

КОРРОЗИЯ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Аннотация

В статье рассмотрены причины возникновения грунтовой коррозии, проанализированы требования к проектируемым заземляющим устройствам электроустановок и рекомендованы мероприятия по предупреждению коррозии заземлителей. На основании измерений дана оценка влиянию удельного электрического сопротивления грунта на скорость коррозии заземлителей и предложен метод определения средней глубины коррозии с учетом ожидаемого срока службы заземлителя.

Annotation

The article examines the causes of soil corrosion. The author analyzes the requirements for the designed grounding devices of the electrical installations and describes the measures recommended for implementation in case of corrosion of grounding devices. Based on the measurement results, the author evaluates the effect of the electrical resistivity of the soil on the corrosion rate of grounding devices. In conclusion, a method to calculate the average depth of corrosion based on the expected service-life of the grounding device is proposed.

Статья поступила в редакцию 19 ноября 2019 года



М.А. ДРАКО,
м.т.н., заведующий электротехнической лабораторией отдела учета и качества электроэнергии РУП «Белэнергопроект»

Заземляющие устройства (ЗУ) предназначены для повышения грозоупорности электроустановок и электросетевых объектов, отвода в землю токов коротких замыканий (КЗ) и перенапряжений, возникающих при попадании молнии. Они позволяют обеспечить надежную работу релейной защиты, а также безопасность людей и животных при ненормальных режимах работы энергооборудования [1].

ЗУ представляет собой совокупность заземлителя и заземляющих неизолированных проводников, обеспечивающих связь с землей. Заземлители делятся на естественные (проложенные в земле металлические конструкции, не предназначенные для цепей заземления, но используемые как заземлители) и искусственные (проложенные в земле проводники и конструкции, используемые только для заземления).

Среди недостатков естественных заземлителей выделяют доступность некоторых из них неэлектротехническому персоналу и возможность нарушения непрерывности соединения протяженных заземлителей [2]. В тех случаях, когда естественные заземлители отсутствуют либо имеют слишком высокое сопротивление, используют искусственные заземлители.

Конструкции заземлителей могут быть самыми разнообразными и включать как объемные элементы (фундаменты зданий, баки и др.), так и тонкие проводники [3].

Горизонтально расположенные электроды из полос или круглой стали применяются для связи вертикальных электродов и как самостоятельные заземлители. С учетом максимальной глубины промерзания грунта в Беларуси – порядка 1,8 м – вертикальные заземлители обеспечивают эффективность заземления при длине не менее 5 м. В качестве вертикальных электродов при соответствующем обосновании могут быть использованы глубинные заземлители, длина которых должна быть достаточной для достижения слоев земли с низким по отношению к верхним слоям удельным электрическим сопротивлением [4].

Виды и причины коррозии

Значительное влияние на срок службы подземных металлических сооружений оказывает коррозионная агрессивность окружающей среды, а также внешние тех-

ногенные воздействия, существенно снижающие надежность и безопасность эксплуатируемых сооружений и срок их службы [7].

По виду разрушения металлов различают два типа коррозии – сплошную и местную (локальную). Сплошная коррозия поражает одновременно всю поверхность элемента, местная – его отдельные участки, при этом основная часть поверхности может быть не затронута.

По механизмам возникновения коррозия бывает грунтовой, контактной, атмосферной, электрической и биологической.

Грунтовая коррозия чаще развивается в торфянистых, болотистых грунтах. Черноземы, содержащие органические кислоты, обладают высокой степенью агрессивности по отношению к стали, меди, цинку, свинцу. Наиболее агрессивны подзолистые почвы: в них скорость коррозии сталей в 5 раз выше, чем в других грунтах [8].

Контактная коррозия может возникать вследствие образования гальванических пар в месте контакта разнородных металлов, например на стыке стальных и медных электродов.

Атмосферной коррозии подвержены части ЗУ, находящиеся на поверхности. В этом случае электролитом является атмосферная влага, оседающая на металле. При растворении в ней химически активных веществ скорость процесса возрастает, поэтому коррозия данного вида чаще возникает вблизи индустриальных центров.

Биологическая коррозия происходит под влиянием жизнедеятельности бактерий и других микроорганизмов, находящихся в большинстве грунтов.

Особенности грунтовой коррозии и метод оценки ее скорости

Почвенно-грунтовые условия Республики Беларусь неоднородны, что объясняется разными процессами почвообразования. Грунт представляет собой пористую среду, состоящую из минеральных и коллоидных частиц, окружающей их воды с растворенными в ней солями и газообразной фазы (воздух, пар) [5, 6]. В зависимости от состава он по-разному влияет на активность коррозионного процесса.

К коррозионным параметрам грунта относятся:

- наличие и характеристики поля блуждающих постоянных токов, возникающих при расположении ПС вблизи электроустановок постоянного тока: подстанций постоянного тока, железных дорог, алюминиевых производств и т.п.;
- окислительно-восстановительный потенциал стали в грунте;
- влажность грунта;
- концентрация солей.

Повышенную коррозионную активность вызывают засоленные почвы, в которых преобладают ионы хлора, кислые, гумусовые, болотистые грунты с водородным показателем (pH) менее 7. Процесс коррозии ускоряется при повышении температуры и увеличении влажности грунта и замедляется при замерзании в нем воды и снижении воздухопроницаемости почвы [9].

Наиболее распространенным методом оценки скорости коррозии является весовой. Метод предполагает определение потери веса (г, кг) за единицу времени (с, ч, сут, год), отнесенную к единице площади (см², м²) испытуемого образца. Если эта величина не превышает 0,1 г/м²·ч, металл считается

коррозионно-стойким, если достигает 3 г/м²·ч и больше – малостойким, если превышает 10 г/м²·ч – нестойкими [8].

Если в результате коррозии сечение элементов ЗУ уменьшилось до пределов, определяемых термической стойкостью, то разрушение устройства может наступить при протекании токов КЗ или тока молнии. Это может не только спровоцировать увеличение сопротивления заземлителя, но и вызвать неконтролируемое растекание тока, расширение зоны искрообразования в грунте или пробой на поверхность, образование недопустимо высокого потенциала на заземлителе, увеличение напряжений шага и прикосновения и др.

В общем случае дефекты ЗУ, обусловленные коррозией, значительно снижают электробезопасность обслуживающего персонала и при воздействии коммутационных или внешних перенапряжений могут приводить к отключению ответственных электроустановок и значительному экономическому ущербу, обусловленному недоотпуском электроэнергии потребителям [10].

Оценка коррозионной агрессивности грунта с учетом его удельного электрического сопротивления

Одним из важнейших факторов, влияющих на скорость грунтовой коррозии, является удельное электрическое сопротивление осадочных пород, которое зависит от степени их водонасыщения, глинистости и минерализации грунтовых вод. Наиболее типичная минерализация грунтовых вод в Беларуси составляет 1 г/дм³. Значения, превышающие данный уровень, обусловлены, как правило, техногенным загрязнением [10].

Согласно [11] в грунтах с удельным сопротивлением верхнего слоя ниже 50 Ом·м и в районах, расположенных южнее 48-й параллели, при проектировании ЗУ необходимо определять коррозионные свойства грунта с целью выбора такого сечения заземлителя, которое обеспечит его долговечность.

Для оценки коррозионной агрессивности грунта по отношению к стали определяются:

- удельное электрическое сопротивление грунта (измеряется в полевых или лабораторных условиях);
- средняя плотность катодного тока при смещении потенциала стали в грунте в отрицательную область на 100 мВ по отношению к стационарному (таблица 1).

Если удельное электрическое сопротивление грунта, измеренное в полевых или лабораторных условиях, равно или более 130 Ом·м, то коррозионная агрессивность грунта считается низкой и по средней плотности катодного тока не оценивается [7].

В нормах [4, 12] на проектирование и реконструкцию ЗУ электрических подстанций 35–750 кВ Белорусской энергосистемы критерии коррозионной активности грунта в зависимости от удельного сопротивления несколько изменены (таблица 1) относительно норм [7]. Так, если минимально допустимое сечение элементов ЗУ определяется не термической стойкостью, а только механической прочностью, то их сечение в зависимости от агрессивности грунта принимается по таблице 2. При этом применение других форм заземлителей по условию коррозии не допускается.

Защита заземлителей от коррозии

В мировой практике для предотвращения коррозии в грунте при изготовлении заземлителей используют нержавеющие стали либо черные металлы, покрытые:

- медью толщиной 0,25 мм (путем электролиза);
- цинком толщиной 0,08 мм (методом горячего цинкования);
- электропроводящим антикоррозионным пористым покрытием из цинка (95–96 %), смол и летучего растворителя (методом холодного цинкования) [7].

Детальное описание материалов заземлителей по критериям стойкости либо склонности к коррозии приведено в [13].

Опыт применения в ряде зарубежных стран заземлителей из меди, помимо удорожания, дал и другие отрицательные результаты. Медные заземлители образуют гальванические пары с находящимися в земле стальными конструкциями, оболочками кабелей и другими металлическими частями, выступая в качестве катода, в результате чего происходит коррозия подземных стальных частей – анодов по отношению к меди.

Стальные электроды, покрытые медью, не могут применяться в кислых почвах, а также в почвах, содержащих нитраты и сульфаты. Их нельзя использовать для заземления оборудования, работающего в схемах катодной защиты (силовые электрические кабели, стальные трубопроводы), поскольку большой положительный потенциал меди искажает отрицательный потенциал катодной защиты, создаваемый внешним источником тока [1].

В случае если существует опасность коррозии заземлителей, рекомендуется выполнение одного из мероприятий, перечисленных ниже [14, 15]:

- увеличение сечения заземлителей с учетом расчетного срока их службы;
- применение оцинкованных или омедненных заземлителей (в любых почвах, кроме кислых и содержащих нитраты и сульфаты);
- применение электрической защиты;
- выполнение гидроизоляции заземлителя на 0,2 м в обе стороны от границы грунта посредством обмотки заземлителя хлопчатобумажной лентой, пропитанной горячим битумом;
- засыпка дна траншеи однородным грунтом слоем толщиной 10–15 см с последующей укладкой на него заземлителя и покрытием его таким же грунтом слоем той же толщины.

Таблица 1. Коррозионная агрессивность грунта (почвенно-грунтовых вод) по отношению к углеродистой и низколегированной стали

Коррозионная агрессивность грунта	Удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м	Средняя плотность катодного тока, А/м ²
Согласно ГОСТ 9.602-2016 [4]		
Низкая	Более 50	До 0,05 включительно
Средняя	20–50	Свыше 0,05 до 0,2 включительно
Высокая	До 20 включительно	Свыше 0,2
Согласно СТП 091.10.47.203-07 [4], СТП 091.10.47.203-07 [12]		
Весьма высокая	до 5	–
Высокая	5–10	–
Повышенная	10–20	–
Средняя	20–100	–
Низкая	Более 100	–

Таблица 2. Рекомендуемые сечения и конструкции стальных заземлителей и заземляющих проводников в зависимости от агрессивности грунтов

Коррозионная активность грунта по отношению к стали	Рекомендуемый диаметр заземлителей	Допустимые к применению заземлители
Стальные вертикальные заземлители		
Весьма высокая	Сталь круглая Ø16 мм	–
Высокая	То же	–
Повышенная, средняя	Для мягких грунтов – сталь круглая Ø12 мм	Сталь угловая 63×63×6 мм
Низкая	Для грунтов средней твердости – сталь круглая Ø16 мм	Для мягких грунтов – сталь угловая 50×50×5 мм, для грунтов средней твердости – сталь угловая 63×63×6 мм
Стальные горизонтальные заземлители и заземляющие проводники		
	Сталь круглая	Стальная полоса
Весьма высокая	Ø16 мм	20×10, 30×10, 40×10 мм
Высокая	Ø14 мм	20×8, 30×8, 40×8 мм
Повышенная, средняя	Ø12 мм	20×6, 30×6, 40×6 мм
Низкая	Ø10–12 мм	20×4, 30×4, 40×4 мм

Прогноз коррозионного состояния заземлителя

Для определения коррозионного состояния ЗУ производится осмотр его элементов со вскрытием грунта не реже одного раза в 12 лет. Если разрушено более 50 % сечения элемента, он должен быть заменен [12].

Уменьшение сечения проводника в процессе коррозии за расчетный срок службы заземлителя составляет, мм²:

$$S_{\text{кор}} = \pi R^2 - \pi r^2 = \pi(R^2 - r^2) = \pi(R-r)(R+r) = \pi \delta_{\text{кр}}(R+r) = \pi \delta_{\text{кр}}(R + (R - \delta_{\text{кр}})) = \pi \delta_{\text{кр}}(d - \delta_{\text{кр}}), \quad (1)$$

где R и d – внешний радиус и диаметр проводника, мм; r – радиус не пораженной коррозией части провод-

Таблица 3. Зависимость средней глубины и площади коррозии от коррозионной агрессивности грунта

Коррозионная агрессивность грунта	δ_{cp} , мм	$S_{кор}$ круглого проводника, мм ² , диаметром, мм / площадью сечения, мм ²			
		10/78,54	12/113,09	14/153,93	16/201,06
Весьма высокая	4,278	76,9	103,78	130,66	157,54
Высокая	2,338	56,28	70,97	85,66	100,35
Повышенная	1,621	42,67	52,85	63,04	73,22
Средняя	1,011	28,55	34,9	41,25	47,61
Низкая	0,464	13,9	16,82	19,73	22,65

ника, мм; δ_{cp} – средняя глубина коррозии, мм, рассчитываемая по формуле

$$\delta_{cp} = a_3(\ln T)^3 + a_2(\ln T)^2 + a_1 \ln T + a_0, \quad (2)$$

где T – расчетный срок службы заземлителя (600 мес.); a_0 – a_3 – коэффициенты, зависящие от агрессивности грунтовых условий по отношению к стали [1].

На основании сопоставления данных таблиц 3 и 2 можно сделать вывод, что ожидаемо не прослужат 50 лет:

- заземлитель из круглой стали $\varnothing 16$ мм при весьма высокой коррозионной активности грунта, так как будет разрушено 78 % его сечения;
- заземлитель из круглой стали $\varnothing 14$ мм при высокой и весьма высокой коррозионной активности грунта, так как будет разрушено 55–65 % его сечения.

Таким образом, в нормах [4, 12] должен быть пересмотрен рекомендуемый для электроустановок диаметр заземлителей, располагаемых в грунтах с высокой и весьма высокой коррозионной активностью.

Расчетное значение удельного сопротивления грунта с учетом сезонных изменений его состояния, а также состояния во время проведения измерения, вычисляется по формуле

$$\rho_{расч} = \rho k_{сез} k_{зем}, \quad (3)$$

где $k_{сез}$ – сезонный повышающий коэффициент, учитывающий промерзание или высыхание грунта; $k_{зем}$ – коэффициент, учитывающий состояние грунта во время проведения измерения его удельного сопротивления [2].

Результаты расчета ожидаемого увеличения значения $\rho_{расч}$ с учетом вариаций $k_{сез}$ и $k_{зем}$ для заземлителей различного конструктивного исполнения сведены в таблицу 4.

На основании таблицы 4 можно сделать вывод, что учет сезонных изменений состояния грунта при выборе заземлителя по условию коррозионной активности грунта приведет к увеличению погрешности проектирования в 1,53–2,27 раза.

Согласно [11] измерение электрохимического потенциала и электрического сопротивления грунта позволяет сделать выводы о его состоянии и прогноз о коррозионном уменьшении сечения заземлителей.

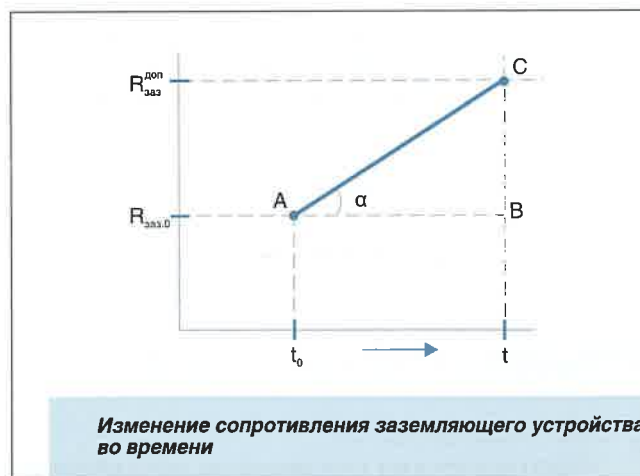
Пусть протекание процессов коррозии приводит к изменению во времени значения начального сопротивления ЗУ $R_{заз,0}$. Момент t ремонта (отказа) наступит при достижении параметром $R_{заз,0}$ предельно допустимого значения $R_{заз,0}^{доп}$. Тогда вероятность безотказной работы можно определить по формуле

Таблица 4. Ожидаемое увеличение $\rho_{расч}$ (с учетом $k_{сез}$ и $k_{зем}$) относительно ρ

Конструктивное исполнение заземлителя	$k_{сез} k_{зем}$ при сезонных изменениях			Усредненное значение $k_{сез} k_{зем}$ в годовом разрезе
	Нормальная влажность грунта	Влажный грунт	Сухой грунт	
Вертикальные электроды длиной 5 м	1,5	1,65	1,43	1,53
Горизонтальные электроды длиной 10 м	2,5	4,25	1,88	2,88
Горизонтальные электроды длиной 50 м	2	3,2	1,6	2,27

$$P(y) = 0,5 + \Phi \left(\frac{R_{заз,0}^{доп} + \bar{R}_{заз,0} + \gamma(t)t}{\sqrt{\sigma_{R_{заз,0}}^2 + \sigma_{\gamma(t)}^2 t^2}} \right), \quad (4)$$

где Φ – нормированная функция Лапласа; $\gamma(t) = \frac{dR_{заз}}{dt}$ – скорость изменения параметра $R_{заз}$ во времени t; $\sigma_{R_{заз,0}}^2$, $\sigma_{\gamma(t)}^2$ – дисперсии нормального распределения значений $R_{заз,0}$ и $\gamma(t)$.



Если первоначальное значение $R_{заз,0}$ до момента времени t_0 считается неизменным, а затем линейно (или нелинейно) возрастает до значения $R_{заз,0}^{доп}$, то время t (см. рисунок), соответствующее моменту достижения контролируемым параметром допустимого значения и, соответственно, возникно-

вения необходимости ремонта или замены ЗУ, определяется по выражениям:

$$t = t_0 + AB = t_0 + R_{\text{заз},0} \left(\frac{R_{\text{заз}}^{\text{доп}}}{R_{\text{заз},0}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\text{tg}\alpha}; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{AB}{CB} = \text{ctg}\alpha \rightarrow AB = CB \text{ctg}\alpha &= (R_{\text{заз}}^{\text{доп}} - R_{\text{заз},0}) \text{ctg}\alpha = \\ &= \frac{(R_{\text{заз}}^{\text{доп}} - R_{\text{заз},0})}{\text{tg}\alpha} = \frac{R_{\text{заз},0} \left(\frac{R_{\text{заз}}^{\text{доп}}}{R_{\text{заз},0}} - 1 \right)}{\text{tg}\alpha} = \frac{CB}{AB} = \text{tg}\alpha = \gamma(t). \end{aligned} \quad (6)$$

Зная статистические данные по $\gamma(t)$, $\sigma_{R_{\text{заз},0}}$ и $\sigma_{\gamma(t)}$, можно определить время t , по достижении которого степень коррозии будет иметь наперед заданное значение.

Выводы

1. Для Беларуси нехарактерны грунты с высокой и повышенной коррозионной активностью. Значения удельного электрического сопротивления грунтов идентичных типов во всех областях республики отличаются незначительно и могут быть приняты усредненными. В других грунтах, за исключением песка, ожидаемое удельное электрическое сопротивление не превышает 600 Ом·м.

2. При проектировании электроустановок, размещаемых на торфяных грунтах с агрессивными водами, параметры ЗУ должны рассчитываться по условиям работы в грунтах средней коррозионной активности.

3. При размещении заземлителей в суглинках, суглинках с агрессивными водами, супесях, супесях мокрых, песке всех видов ожидается низкая коррозионная активность (характерно для всех областей Республики Беларусь). В сухих грунтах (влажностью до 5 %) коррозия не прогнозируется из-за отсутствия электролита.

4. Учет сезонных изменений состояния грунта при рассмотрении вопроса выбора заземлителя по условию коррозионной активности приводит к увеличению удельного электрического сопротивления грунта в 1,53–2,27 раза.

5. Предложена корреляционная зависимость изменения сопротивления ЗУ во времени.

6. Необходим пересмотр рекомендуемых диаметров заземлителей для электроустановок, размещаемых на грунтах с высокой и весьма высокой коррозионной активностью.

Отметим, что согласно [1] применительно к территории Беларуси считается, что вертикальные и лучевые заземлители, выполненные из круглой стали диаметром 12 мм, прослужат не менее 50 лет, что подтверждают результаты расчетов.

Список литературы

1. Короткевич, М.А. Монтаж электрических сетей: учеб. пособие / М.А. Короткевич. – Минск: Выш. школа, 2012. – 512 с.
2. Долин, П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: учеб. пособие для вузов / П.А. Долин. – М.: Энергия, 1979. – 408 с.
3. Колечицкий, Е.С. Основы расчета заземляющих устройств: учеб. пособие / Е.С. Колечицкий. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 48 с.
4. Методические указания по выполнению заземления на электрических станциях и подстанциях напряжением 35–750 кВ: СТП 09110.47.203-07. – Введ. 26.04.07. – Минск: ГПО «Белэнерго», 2007. – 48 с.
5. Леонович, И.И. Водно-тепловой режим земляного полотна [Электронный ресурс]: пособие для студентов специальности 1-70 03 01 «Автомобильные дороги» / И.И. Леонович, Н.П. Вырко; Белорусский национальный технический университет, кафедра «Строительство и эксплуатация дорог». – Минск: БНТУ, 2013.
6. Долин, П.А. Справочник по технике безопасности: справ. издание / П.А. Долин. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 823 с.
7. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии: ГОСТ 9.602-2016. – Введ. 01.06.17. – Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии России, 2016.
8. Ланина, Т.Д. Материаловедение (коррозионная защита оборудования): метод. указания для выполнения лабораторных работ / Т.Д. Ланина, Е.С. Селиванова. – Ухта: УГТУ, 2012. – 36 с.
9. Карякин, Р.Н. Заземляющие устройства электроустановок: справочник / Р.Н. Карякин. – 2-е изд. – М.: ЗАО «Энергосервис», 2006. – 520 с.
10. Драко, М.А. Выбор геометрических параметров заземляющих устройств подстанций и ВЛ 110 кВ и выше с учетом коррозионной активности грунта / М.А. Драко, А.М. Короткевич, А.П. Иваненко // Энергетическая стратегия. – 2016. – № 5. – С. 27–29.
11. Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6–750 кВ: СТО 56947007-29.130.15.114-2012. – Введ. 03.02.2012.
12. Методические указания по проектированию заземляющих устройств электрических станций и подстанций напряжением 35–750 кВ: СТП 09110.47.103-07. – Введ. 01.12.2007. – Минск: ГПО «Белэнерго», 2007. – 75 с.
13. Сокол, И.Я. Структура и коррозия металлов и сплавов. Атлас: справ. издание / И.Я. Сокол [и др.]. – М.: Металлургия, 1989. – 400 с.
14. Методические указания по проектированию и выполнению заземляющих устройств опор ВЛ напряжением 35–750 кВ: СТП 09110.20.189-12. – Введ. 01.08.2013. – Минск: ГПО «Белэнерго», 2007. – 42 с.
15. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – Минск, 2015. – 340 с.