

УДК 621.316.99

КОРРОЗИЯ МАТЕРИАЛА ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК В ГРУНТАХ РАЗЛИЧНЫХ РЕГИОНОВ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Драко*М.А.

Аннотация

Рассмотрены причины возникновения грунтовой коррозии.

Проанализированы требования, предъявляемые к проектируемым заземляющим устройствам электроустановок.

Приведены мероприятия, рекомендованные к внедрению в случае возникновения коррозии заземлителей.

На основании результатов измерений оценено влияние удельного электрического сопротивления грунта на скорость коррозии заземлителей в различных регионах Республики Беларусь.

Предложен метод определения средней глубины коррозии на основании ожидаемого срока службы заземлителя.

Ключевые слова: заземляющее устройство, коррозия, удельное электрическое сопротивление грунта, электробезопасность.

Введение

Заземляющие устройства предназначены: для обеспечения режима работы электроустановки; отвода в землю импульсных токов молнии при грозовых разрядах в линию или другие электросетевые объекты и, следовательно, повышения их грозоупорности; отвода в землю токов коротких замыканий и обеспечения в результате надежной работы релейной защиты; обеспечения безопасности людей и животных при ненормальных режимах работы [1].

Совокупность заземлителя и заземляющих проводников называется заземляющим устройством (ЗУ). Связь заземляемых частей электроустановок с землёй осуществляется посредством системы изолированных проводников, находящихся в контакте с землёй и предназначенных для проведения тока в землю – заземлителя.

Заземлители делятся на естественные (проложенные в земле различные металлические конструкции, не предназначенные для цепей заземления, но используемые как заземлители) и искусственные (проложенные в земле проводники и конструкции, используемые только для заземления).

В качестве недостатков естественных заземлителей выделяют их доступность некоторым из них неэлектрическому персоналу и возможность нарушения непрерывности соединения протяженных заземлителей [2]. В

* РУП “Белэнергосетьпроект”, Минск, Республика Беларусь, drako.mikhail@mail.ru

тех случаях, когда естественные заземлители отсутствуют либо имеют слишком высокое сопротивление заземления, используют искусственные заземлители.

Для Республики Беларусь максимальная глубина промерзания грунта для элементов электроустановок составляет порядка 1,8 м. С учетом этого и фактора эффективности работы вертикальных электродов как элементов ЗУ их длина не должна быть менее 5,0 м. При этом, 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 земли удельным сопротивлением [3].

Почвенно-грунтовые условия Республики Беларусь разнообразны, что объясняется результатом проявления целого ряда процессов почвообразования, их сочетаний, различных количественных соотношений и т.д. [4]. Грунт представляет собой дисперсное пористое тело, состоящее из трех частей: твердой, жидкой и газообразной [5].

Значительное влияние на срок службы подземных металлических сооружений оказывает коррозионная агрессивность окружающей среды, а также внешние техногенные воздействия, которые могут привести к существенному снижению надежности и безопасности эксплуатируемых сооружений и в несколько раз сократить срок их службы [6].

1. Причины возникновения, виды грунтовой коррозии и её последствия

По виду разрушения металлов различают два типа коррозии – сплошную и местную (локальную). Сплошная коррозия захватывает одновременно всю поверхность элемента, а местная коррозия – только отдельные участки элемента, в то время как основная часть поверхности может быть совершенно не затронута.

По механизмам коррозии различают грунтовую, контактную, атмосферную, электрическую и бактериальную.

Грунтовая коррозия развивается в торфянистых, болотистых грунтах, черноземы, содержащие органические кислоты, высоко агрессивны к стали, меди, цинку, свинцу. Наиболее агрессивны подзолистые почвы. Скорость коррозии сталей в подзолистых почвах в 5 раз выше, чем в других грунтах [7].

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

Атмосферной коррозии подвержены части заземляющего устройства, находящиеся на воздухе. Тут электролитом является атмосферная влага, оседающая на поверхности металла. Скорость атмосферной коррозии возрастает при растворении в этой влаге химически активных веществ; в силу этого данный вид коррозии сильнее проявляется вблизи промышленных центров.

Биологическая коррозия представляет собой вид электролитической коррозии, происходящей под влиянием продуктов жизнедеятельности бактерий и других микроорганизмов, содержащихся в большинстве грунтов.

Скорость коррозии металла в грунте зависит от ряда свойств: воздухопроницаемости, электропроводности, наличия растворенных солей, температуры среды.

Преобладание ионов хлора (засоленные почвы) и значения водородного показателя pH менее 7 (кислые, гумусовые, болотистые грунты) вызывают повышенную коррозионную активность. Рост температуры повышает коррозионную активность; при замерзании воды в земле эти процессы замедляются, с увеличением влажности почвы коррозия увеличивается, при снижении воздухопроницаемости коррозионный процесс тормозится [8].

Для оценки скорости коррозии наиболее распространен весовой метод, на основании которого определяется потеря веса (в граммах или килограммах) за единицу времени (секунду, час, сутки, год), отнесенную к единице площади (квадратный сантиметр, квадратный метр) испытуемого образца. Если эта величина не превышает $0,1 \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$, металл считается коррозионно-стойким, если же она достигает $3 \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$ и больше – малостойким. Металлы, теряющие с 1 м^2 поверхности более 10 г в час, называются нестойкими [7].

К коррозийным параметрам грунта относят:

– наличие и характеристики поля блуждающих постоянных токов (при расположении ПС вблизи электроустановок постоянного тока (подстанции постоянного тока, железная дорога, алюминиевое производство и т.п.);

– окислительно-восстановительный потенциал стали в грунте;

– влажность грунта и степень насыщения (пор влагой);

– концентрация солей в грунтовом растворе.

Если в результате коррозии площадь уменьшилась до пределов, определяемых термической стойкостью, то дальнейшее разрушение может наступить при протекании токов короткого замыкания или тока молнии.

При этом возможно не только увеличение сопротивления заземлителя, но и такие возникновения таких последствий, как неконтролируемые пути растекания тока, повышение зоны искрообразования в грунте или пробой на поверхности, недопустимо высокий потенциал на заземлителе, увеличение напряжений шага и прикосновения и другим.

В общем случае, дефекты ЗУ значительно снижают электробезопасность обслуживающего персонала и при воздействии коммутационных или внешних перенапряжений могут приводить к значительному народнохозяйственному ущербу, выражающемуся в недоотпуске электроэнергии потребителям вследствие отключения ответственных электроустановок, вызванных их повреждениями или ненормальными режимами работы [9].

2. Методы оценки вероятности грунтовой коррозии, выбор конструктивного исполнения заземляющих устройств

Удельное электрическое сопротивление осадочных пород определяется степенью их водонасыщения (положение уровня грунтовых вод), глинистостью и минерализацией грунтовых вод. Значение удельного электрического сопротивления менее 5 Ом·м характерно только для водонасыщенных пород при минерализации грунтовых вод более 10 г/дм³. Наиболее типичная минерализация грунтовых вод Беларуси составляет 1,0 г/дм³. Значения, превышающие данный уровень, обусловлены, как правило, техногенным загрязнением [9].

Согласно норм [10] в грунтах с удельным сопротивлением верхнего слоя ниже 50 Ом·м и в районах, расположенных южнее 48 параллели, необходимо выполнить определение коррозионных свойств грунта с целью выбора сечения заземлителя, обеспечивающего его долговечность в течение заданного срока службы.

Для оценки коррозионной агрессивности грунта по отношению к стали определяется удельное электрическое сопротивление грунта, измеренное в полевых или лабораторных условиях, и среднюю плотность катодного тока при смещении потенциала на 100 мВ отрицательней стационарного потенциала стали в грунте (таблица 1). Если при определении первого показателя (удельного электрического сопротивления грунта) установлена высокая коррозионная агрессивность грунта, то другой показатель не определяют [6].

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 [6].

В нормах [3, 11] на проектирование и реконструкцию заземляющих устройств (ЗУ) электрических подстанций 35-750 кВ Белорусской энергосистемы критерии коррозионной активности грунта в зависимости от удельного сопротивления несколько изменены (таблица 1) относительно норм [6].

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 применением других форм заземлителей, по условию коррозии не допускается.

В мировой практике для предотвращения коррозии в грунте используют в качестве заземлителей либо нержавеющие материалы, либо черные, покрытые электролитическим путем медью толщиной 0,25 мм, либо методом горячего оцинкования цинком толщиной 0,08 мм, либо методом холодного оцинкования, заключающегося в нанесении на стальной электрод специального электропроводящего антикоррозионного пористого цинкового покрытия, состоящего из цинка (95-96%), смол и летучего растворителя [1].

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 [3]		
Низкая	Свыше 50	До 0,05 включительно
Средняя	Свыше 20 до 50 включительно	Свыше 0,05 до 0,2 включительно
Высокая	До 20 включительно	Свыше 0,2
Согласно СТП 09110.47.203-07 [3], СТП 09110.47.203-07 [11]		
Весьма высокая	до 5	-
Высокая	5-10	-
Повышенная	10-20	-
Средняя	20-100	-
Низкая	более 100	-

Таблица 2. Сечение стальных вертикальных, горизонтальных 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

Вопросы описания материалов по критериям стойкости или склонности к коррозии детально раскрыты в [12].

Опыт применения заземлителей из меди, помимо удорожания, дал в ряде зарубежных стран отрицательные результаты. Медные заземлители образуют гальванические пары с находящимися в земле стальными конструкциями, оболочками кабелей и другими металлическими частями, по отношению к которым медь является катодом, 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. Они не

применимы для заземления оборудования, работающего в схемах катодной защиты (силовые электрические кабели, стальные трубопроводы) ввиду собственного большого положительного потенциала меди, искажающего отрицательный потенциал катодной защиты, создаваемый внешним источником тока [1].

В случае опасности коррозии заземлителей рекомендуется выполнение одного из следующих мероприятий [13, 14]:

– увеличение сечения заземлителей с учетом расчетного срока их службы;

– применение оцинкованных или омеденных заземлителей (кроме кислых почв, а также в почв, 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 покрытие его тем же однородным грунтом слоем той же толщины.

Для определения коррозионного состояния ЗУ осмотр его элементов производится со вскрытием грунта с периодичностью не реже одно раза в 12 лет. Причем элемент ЗУ должен быть заменен, если разрушено более 50 % его сечения [11].

Разъедание электрода ржавчиной пропорционально площади поверхности электрода, соприкасающегося с грунтом. Уменьшение сечения проводника в процессе коррозии за расчетный срок службы заземлителя, мм²:

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

где R и d – внешний радиус и диаметр проводника, мм; r – радиус нескорродированной части проводника, мм; $\delta_{\text{н}\delta}$ – средняя глубина коррозии, мм.

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

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

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

Коррозионная агрессивность грунта	$\delta_{\text{н}\delta}$, мм	$S_{\text{ei}\delta}$, мм ² ; для круглого проводника 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

На основании сопоставления данных таблиц 3 и 2 можно сделать выводы, что:

– при весьма высокой коррозионной активности грунта заземлитель из круглой стали Ø16 мм ожидаемо не прослужит 50 лет, т.к. будет разрушено 78% его сечения;

– при высокой и весьма высокой коррозионной активности грунта заземлитель из круглой стали Ø14 мм ожидаемо не прослужит 50 лет, т.к. будет разрушено 55-65% его сечения.

Таким образом, в нормах [3, 11] должен быть пересмотрен диаметр рекомендуемых заземлителей для электроустановок располагаемых в грунтах с высокой и весьма высокой коррозионной активностью.

Расчетное значение удельного сопротивления грунта, учитывающего сезонные изменения состояния грунта и, следовательно, увеличения его сопротивления, а также состояние земли во время проведения измерения, вычисляется по выражению:

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

где $k_{\text{сез}}$ – сезонный повышающий коэффициент, учитывающий промерзание или высыхание земли [2]; $k_{\text{зем}}$ – коэффициент, учитывающий состояние земли во время проведения измерений ее удельного сопротивления [2].

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

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

Конструктивное исполнение заземлителя	$k_{\text{нв}} k_{\text{св}}$ при сезонных изменениях			Усредненное значение $k_{\text{нв}} k_{\text{св}}$ в годовом разрезе
	Нормальная влажность грунта	Влажный грунт	Сухой грунт	
Вертикальные электроды 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

На основании таблицы 4 можно сделать вывод, что учет сезонных изменений состояния грунта при рассмотрении вопроса выбора заземлителя по условию коррозионной активности приведет к погрешности в 1,53-2,27 раз.

Согласно [10], измерив электрохимический потенциал и электрическое сопротивление грунта можно сделать прогноз коррозионного уменьшения сечения заземлителей и выводы об его состоянии.

Пусть протекание коррозионных процессов приводит к изменению во времени значения начального сопротивления заземляющего устройства $R_{\text{св},0}$. Момент t ремонта или можно считать отказа наступит при достижении параметром $R_{\text{св},0}$ своего предельного допустимого значения $R_{\text{св},0}^{\text{дп}}$.

Тогда вероятность безотказной работы определится по формуле:

$$P(y) = 0,5 + \hat{O} \left(\frac{R_{\zeta\alpha\zeta}^{\hat{a}\hat{i}\hat{i}} + \bar{R}_{\zeta\alpha\zeta} + \gamma(t)t}{\sqrt{\sigma_{R_{\zeta\alpha\zeta}}^2 + \sigma_{\gamma(t)}^2 t^2}} \right), \quad (4)$$

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

Если первоначальное значение $R_{\zeta\alpha\zeta}0$ до момента времени t_0 считается неизменным, а затем линейно (или нелинейно) возрастает до значения $R_{\zeta\alpha\zeta}^{\hat{a}\hat{i}\hat{i}}$, то время t (рис. 1), соответствующее достижению контролируемым параметром допустимого значения и необходимости ремонта или замены заземляющего устройства определится по выражениям:

$$t = t_0 + AB = t_0 + R_{\zeta\alpha\zeta}0 \left(\frac{R_{\zeta\alpha\zeta}^{\hat{a}\hat{i}\hat{i}}}{R_{\zeta\alpha\zeta}0} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\text{tg } \alpha}; \quad (5)$$

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

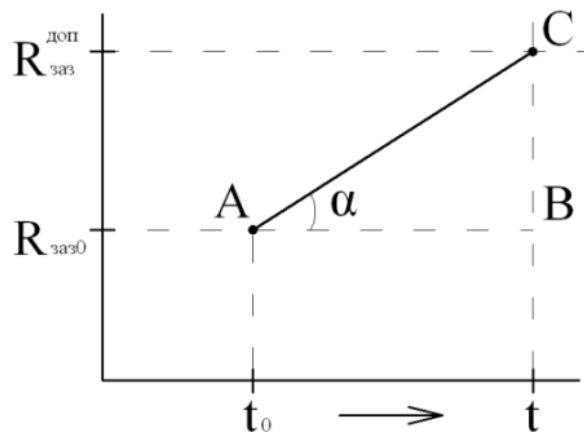


Рис. 1 – Изменение сопротивления заземляющего устройства во времени.

Зная статистические данные о $\gamma(t)$, $\sigma_{R_{\zeta\alpha\zeta}0}$ и $\sigma_{\gamma(t)}$ можно определить время t , по достижении которого его вероятность будет иметь наперед заданное значение.

Выводы

1. Для Республики Беларусь несвойственны грунты с высокой и повышенной коррозионной активностью. Значения удельного сопротивления

идентичных типов грунтов для всех областей отличаются незначительно и могут быть приняты усредненными.

2. За исключением песка в других грунтах ожидаемое удельное электрическое сопротивление не превышает 600 Ом·м.

3. При проектировании электроустановок в торфе с агрессивными водами заземляющие устройства должны рассчитываться по условиям работы в грунтах средней коррозионной активности.

4. 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).

5. В сухих грунтах (влажностью до 5 %) коррозия не ожидается из-за отсутствия электролита.

6. 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 раз.

7. Необходимо пересмотр рекомендуемых диаметров заземлителей для электроустановок, располагаемых в грунтах с высокой и весьма высокой коррозионной активностью.

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

Литература

1. Короткевич М.А. Монтаж электрических сетей. Учебное пособие. Минск: Вышэйшая школа, 2012, 512 с.

2. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергия, 1979, 408 с.

3. СТП 09110.47.203-07. Методические указания по выполнению заземления на электрических станциях и подстанциях напряжением 35-750 кВ. Введ. 2007-04-26. Мн.: ГПО "Белэнерго", 2007, 48 с.

4. Леонович И.И. Водно-тепловой режим земляного полотна // Репозиторий Белорусского национального технического университета [Электронный ресурс]. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/5200> (дата обращения: 15.05.2017).

5. Долин П.А. Справочник по технике безопасности : справочное издание. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984, 823 с.

6. ГОСТ 9.602-2016 Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии.

7. Ланина Т.Д., Селиванова Е.С. Материаловедение (коррозионная защита оборудования): метод. указания для выполнения лабораторных работ. Ухта: УГТУ, 2012, 36 с.

8. Карякин Р.Н. Заземляющие устройства электроустановок. Справочник. Второе издание. М.: ЗАО «Энергосервис», 2006, 520 с.

9. Драко М.А., Короткевич А.М., Иваненко А.П. Выбор геометрических параметров заземляющих устройств подстанций и ВЛ 110кВ и выше с учетом коррозионной активности грунта // Энергетическая стратегия, 2016, № 5, с. 27-29.

10. СТО 56947007-29.130.15.114-2012 Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6-750 кВ. Дата введения: 03.02.2012.

11. СТП 09110.47.103-07. Методические указания по проектированию заземляющих устройств электрических станций и подстанций напряжением 35-750 кВ. Введ. 2007-10-11. Мн.: ГПО «Белэнерго», 2007, 75 с.

12. Сокол И.Я. Ульянин Е. А., Фельдгандлер Э.Г. и др. Структура и коррозия металлов и сплавов: атлас. Справочное издание. М.: Metallurgia, 1989, 400 с.

13. СТП 09110.20.189-12. Методические указания по проектированию и выполнению заземляющих устройств опор ВЛ напряжением 35-750 кВ. Введ. 2013-07-18. Мн.: ГПО «Белэнерго», 2007, 42 с.

14. Правила устройства электроустановок: ПУЭ действие Правил в энергетике Республики Беларусь подтверждено письмом Белэнерго № 31/54 от 02.06.1999г.- 6-е изд., перераб. и доп. Гомель, 2005, 640 с.