

И.В. Нижевский, В.И. Нижевский

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА ИЗОЛЯЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ ПОДСТАНЦИИ ПРИ УДАРЕ МОЛНИИ В ЕЕ МОЛНИЕОТВОД

Розроблено інженерний підхід до розрахунку грозових перенапруг на обладнанні підстанції при ударі блискавки в блискавковідвід. Сформульовані умови безпечного для обладнання проходження струму блискавки по блискавковідводу. Показано, що розрахунок допустимої довжини повітряних ізоляційних проміжків на підстанції базується на основі пробивної напруженості повітря, яка прийнята рівною 500 кВ/м. Це призводить до помилки розрахунку довжини повітряного проміжку i , як наслідок, ймовірності його пробоя, значення якої використовується для розрахунку показника грозоупорності підстанції. Як приклад розглянута методика розрахунку допустимої напруги на корпусі трансформатора при ударі блискавки в блискавкоприймач трансформаторного порталу. На основі нелінійної імпульсної електричної міцності ґрунту отримано уточнену мінімально допустиму відстань в землі між заземлювачем блискавковідводу і найближчою до нього точкою пристрою, що захищається. Наводяться аналітичні вирази для розрахунків. Бібл. 11, табл. 4, рис. 6

Ключові слова: грозові перенапруги, підстанція, блискавковідвід, вольт-секундна характеристика, гірлянда ізоляторів, електричне поле, повітряний проміжок, допустиме напруження, корпус трансформатора, імпульсна електрична міцність.

Разработан инженерный подход к расчету грозовых перенапряжений на оборудовании подстанции при ударе молнии в молниеотвод. Сформулированы условия безопасного для оборудования прохождения тока молнии по молниеотводу. Показано, что расчет допустимой длины воздушных изоляционных промежутков на подстанции базируется на основе пробивной напряженности воздуха, которая принята равной 500 кВ/м. Это приводит к ошибке расчета длины воздушного промежутка u , как следствие, вероятности его пробоя, значение которой используется для расчета показателя грозоупорности подстанции. В качестве примера рассмотрена методика расчета допустимого напряжения на корпусе трансформатора при ударе молнии в молниеприемник трансформаторного портала. На основе нелинейной импульсной электрической прочности ґрунта получено уточненное минимальное допустимое расстояние в земле между заземлителем молниеотвода и ближайшей к нему точкой защищаемого устройства. Приводятся аналитические выражения для расчетов. Библ. 11, табл. 4, рис. 6

Ключевые слова: грозовые перенапряжения, подстанция, молниеотвод, вольт-секундная характеристика, гирлянда изоляторов, электрическое поле, воздушный промежуток, допустимое напряжение, корпус трансформатора, импульсная электрическая прочность.

Введение и постановка задачи. Известно [1], что в атмосфере Земли может одновременно существовать около 2000 грозовых очагов, в которых ежесекундно происходит около 100 разрядов молнии. Высокая интенсивность грозовых процессов приводит к тому, что многие страны, в том числе и Украина, имеют карты грозовой деятельности, которые построены по данным многолетних метеорологических наблюдений и периодически обновляются. Это позволяет совершенствовать методы расчета грозовых перенапряжений, которые возникают в электроустановках. Анализ известных публикаций показывает, что вопросами защиты электрооборудования подстанций (ПС) от грозовых перенапряжений при прямых ударах молнии занимаются многие отечественные и зарубежные ученые. Координата изоляции в условиях ограничения перенапряжений, а также результаты исследований по рассматриваемой проблеме представлены в [2], а особенности работы изоляционных конструкций при грозовых и внутренних перенапряжениях в электрических системах и их ограничение рассмотрены в [1]. Для определения длины изоляционного воздушного промежутка $l_{a.g}$ между телом опоры или портала и гибкой шиной или оборудованием часто используют кривые зависимостей $U_{50\%} = f(l_{a.g})$. Зависимость 50%-ных разрядных напряжений воздушного промежутка от его длины при положительной и отрицательной полярности грозовых импульсов приведена, например, в [3]. Эти зависимости имеют слабую нелинейность. Следовательно, вели-

чина пробивной напряженности воздуха в длинных воздушных промежутках с ростом их длины уменьшается, что должно учитываться в расчетах при определении длины промежутка. Не учёт этого, т.е. принятие величины допустимой напряженности электрического поля в воздушном промежутке постоянной и равной 500 кВ/м, может привести к неточности определения его длины и соответственно к ее уменьшению, что увеличивает вероятность пробоя указанного промежутка. Кроме того, пренебрежение возможными перекрытиями воздушной изоляции подстанции после окончания роста тока приводит к недооценке опасности токов молнии с относительно низкими амплитудами при большой крутизне и длительности их импульсов [4]. Более точные результаты по определению электрической прочности изоляции при так называемых нестандартных напряжениях можно получить с помощью изложенных в [5-7] методов, что также позволяет уточнить длины разрядных промежутков. Однако существующие методики расчета грозовых перенапряжений в электроустановках требуют дальнейшего совершенствования.

Цель статьи – разработка инженерной методики расчета грозовых перенапряжений на оборудовании подстанции при ударе молнии в ее молниеотвод.

Формулирование условий ограничения грозовых перенапряжений и их выполнение. Интенсивность грозовой деятельности в местности расположе-

ния защищаемого объекта характеризуется средним числом грозových часов в году $N_{l,h}$. Другой характеристикой грозовой деятельности является среднее число ударов молнии n_{ls} в 1 км² поверхности земли за 100 грозových часов. При этом на территории Украины $n_{ls} = 6,7$ 1/км² за 100 грозových часов.

Защиту объектов от прямых ударов молний принято выполнять с помощью молниеотводов различной конструкции. Молниеотвод представляет собой возвышающееся над защищаемым объектом устройство, через которое ток молнии, минуя защищаемый объект, отводится в землю. Молниеотвод состоит из молниеприемника, непосредственно воспринимающего на себя удар молнии, токоотвода (мачта, портал, арматура стойки, полоса) и заземляющего устройства (ЗУ). Эти протяженные элементы обладают индуктивностью, которая также определяет распределение напряжения вдоль них. Кроме того, сопротивление заземлителя зависит от его геометрических размеров и удельного сопротивления грунта ρ , в котором он находится, а также от параметров импульса тока молнии: косоугольный фронт, крутизна фронта a , длина фронта τ_f , длина импульса τ_p , амплитуда I_l . При стекании с заземлителя тока молнии плотность проходящего через заземляющие электроды тока велика, поэтому в земле у поверхности электродов создаются высокие напряженности электрического поля, превосходящие пробивные напряженности грунта E_b . Вокруг электродов образуются зоны с высокой проводимостью (прежде всего, за счет процессов ионизации, густой сети стримеров и др.), увеличивающие их эффективные размеры. В результате чего сопротивление заземлителя уменьшается. Быстрое нарастание тока молнии на фронте импульса создает падение напряжения на индуктивности протяженного заземлителя, что ограничивает отвод тока с более удаленных его частей. При этом сопротивление заземлителя, наоборот, увеличивается. В результате влияния того или иного фактора (образование зоны ионизации и стримерных каналов или падения напряжения на индуктивности) сопротивление заземлителя стекающему с него току молнии, т.е. сопротивление R_p (без учета индуктивности) или Z_p (с учетом индуктивности), отличается от сопротивления заземлителя току промышленной частоты R_g , измеренного при переменном напряжении и сравнительно небольшом токе.

Сопротивление горизонтального заземлителя току промышленной частоты R_g определяется по известной формуле [8]:

$$R_g = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \left[\ln \frac{l^2}{2r \cdot h_g} + 0,5 \ln \left(1 + \frac{4h_g^2}{l^2} \right) \right], \quad (1)$$

где l – длина заземлителя, м; r – радиус заземлителя, м; h_g – глубина укладки в грунте заземлителя, м.

Сопротивление горизонтального лучевого заземлителя импульсному току (молнии) в точке ввода тока молнии для момента его максимума рассчитывается по приближенной формуле [9]:

$$Z_p(0, \tau_f) = \frac{R_g + \frac{L_0 \cdot l}{3 \cdot \tau_f}}{n \cdot \eta}, \quad (2)$$

где L_0 – удельная индуктивность (на единицу длины электрода заземлителя, мкГн/м); n – число горизонтальных лучей; η – коэффициент взаимного экранирования.

Максимальное напряжение в точке ввода тока молнии в заземлитель рассчитывается по формуле:

$$U_{\max} = I_l \cdot Z_p(0, \tau_f). \quad (3)$$

Напряжение на конце горизонтального заземлителя при вводе тока молнии в его начало рассчитывается по формуле [9]:

$$U(l, \tau_f) = \frac{I_l}{n} \cdot \left(R_g - \frac{L_0 \cdot l}{6 \cdot \tau_f} \right). \quad (4)$$

Относительное снижение напряжения в конце горизонтального заземлителя в зависимости от его длины рассчитывается по формуле:

$$X\% = \frac{U(l, \tau_f)}{U_{\max}} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Защита ОРУ на 110 кВ и более от прямых ударов молнии обычно выполняется стержневыми молниеотводами, молниеприемники которых устанавливают, как правило, на конструкциях ОРУ. Установка молниеприемников на порталах, расположенных вблизи трансформаторов или шунтирующих реакторов, допускается при выполнении ряда требований. Во-первых, должно быть обеспечено растекание тока молнии от точки присоединения токоспуска к ЗУ ПС не менее, чем по двум-четырем направлениям магистралей заземления. Во-вторых, должны быть установлены два-три вертикальных электрода длиной 3-5 м на расстоянии не менее длины электрода по магистрали заземления от точки присоединения токоспуска. Известно [9], что при воздействии импульсных токов молнии наблюдается уменьшение доли стекающего тока с удаленных участков заземлителя, т.е. имеет место неэквипотенциальность, которая усиливается с ростом длины электрода. Это явление связано с величиной индуктивности стального электрода и зависимостью ее от эквивалентной частоты и амплитуды протекающего тока. Удельная индуктивность электрода заземлителя определяется по известной формуле [1, 9, 10]:

$$L_0 = 0,2 \cdot \left[\ln \left(\frac{2l}{d} - 0,31 \right) \right], \quad (6)$$

а полная индуктивность электрода длиной l в этом случае определяется как

$$L_e = L_0 \cdot l. \quad (7)$$

Прохождение тока молнии по молниеотводу на ПС будет безопасным для оборудования в том случае, если оно основано на следующих расчетах.

Расчет допустимых перенапряжений на гирлянде изоляторов. Импульсное разрядное напряжение гирлянды изоляторов должно быть больше напряжения, возникающего в процессе эксплуатации между точкой крепления гирлянды к portalу и точкой крепления гибкой шины к гирлянде. Это означает, что допустимое напряжение, возникающее на гирлянде изоляторов в период ее эксплуатации, должно лежать

ниже вольт-секундной характеристики гирлянды, определяемой по известной формуле [1]:

$$U(t) = A \cdot \sqrt{1 + \frac{T_0}{t}}, \quad (8)$$

где t – время, мкс; A и T_0 – постоянные.

Значения постоянных определяются подстановкой в (8) испытательных напряжений полным (при $t = 10$ мкс) и срезанным (при $t = 2$ мкс) импульсами. Так, например, для гирлянды 110 кВ из семи изоляторов типа ПС12-А имеем испытательные напряжения $U_{2\mu\text{s}} = 600$ кВ и $U_{10\mu\text{s}} = 480$ кВ. Подставляя эти значения в формулу (8), получаем систему двух уравнений с неизвестными постоянными A и T_0 . На основании решения этой системы уравнений относительно постоянных A и T_0 вольт-секундная характеристика гирлянды описывается выражением:

$$U(t) = 444,994 \cdot \sqrt{1 + \frac{1,636}{t}}. \quad (9)$$

Обратное перекрытие гирлянды изоляторов на портале с молниеприемником происходит при критическом токе I_c , который находится из равенства потенциала портала и 50 %-ного импульсного разрядного напряжения гирлянды изоляторов по формуле [1]:

$$I_c \cdot R_p + a \cdot L_0 \cdot h = U_{50\%}, \quad (10)$$

где R_p – сопротивление заземлителя подстанции импульсному току (молнии); h – высота точки крепления гирлянды на портале.

Критическое значение тока I_c , при котором происходит обратное перекрытие гирлянды изоляторов, получаем из выражения (10) в следующем виде:

$$I_c = \frac{U_{50\%} - a \cdot L_0 \cdot h}{R_p}. \quad (11)$$

Расчет допустимой длины воздушных промежутков. Кратчайшее расстояние по воздуху между молниеотводом и ближайшим к нему оборудованием ПС должно быть не менее допустимого. Расчет этого расстояния основывается на определении максимального потенциала в конкретной точке молниеотвода (мачты, портала или отдельно проложенного токоотводящего спуска), которая находится на расстоянии h_1 от точки подключения токопуска (портала) к ЗУ ПС. Для рассматриваемой формы импульса тока молнии максимальный потенциал в конкретной точке молниеотвода наступает в момент максимума тока молнии и определяется по формуле

$$U_{\text{max}} = I_l \cdot R_p + a \cdot L_T \cdot h_1. \quad (12)$$

где L_T – индуктивность единицы длины токопуска.

В инженерных расчетах удельная величина L_T принимается равной $L_T = 1,7$ мкГн/м как для отдельно проложенного токоотводящего спуска, так и для металлических молниеотводов решетчатой конструкции. К воздушному промежутку длиной l_a приложено напряжение $E_a \cdot l_a$, где E_a – допустимая напряженность электрического поля в воздухе.

В связи с тем, что число ударов молнии в ПС относительно небольшое, то в (12) в качестве расчетных значений параметров I_l и a принимают их следующие численные значения: $I_l = 60$ кА и $a = 30$ кА/мкс. Кроме

того, допустимая напряженность электрического поля в воздухе E_a принимается в расчетах равной 500 кВ/м. Исходя из изложенного, кратчайшее расстояние по воздуху можно записать в следующем виде:

$$l_a \geq \frac{I_l \cdot R_p + a \cdot L_T \cdot h_1}{E_a}. \quad (13)$$

Подставляя приведенные выше значения величин в формулу (13), получаем допустимое расстояние по воздуху

$$l_a \geq \frac{60 \cdot R_p + 30 \cdot 1,7 \cdot h_1}{500} \approx 0,12 \cdot R_p + 0,1 \cdot h_1. \quad (14)$$

Например, при $R_p = 10$ Ом и $h_1 = 10$ м из (14) получаем, что $l_a = 2,2$ м. Общеизвестно, что воздушный промежуток, который имеет однородное электрическое поле, обладает наибольшей электрической прочностью. Если рассматриваемый промежуток имеет однородное электрическое поле при малых расстояниях, то при неизменных электродах увеличение расстояния между ними приводит к росту неоднородности электрического поля, а при дальнейшем увеличении расстояния электрическое поле в промежутке становится резко неоднородным. Следовательно, при больших расстояниях между электродами пробивная напряженность воздуха в промежутке уменьшается [3], т.е. для предотвращения пробоя необходимо увеличение расстояния между электродами. Поэтому, при расстояниях между электродами, измеряемых метрами, используемое на практике численное значение пробивной напряженности воздуха 500 кВ/м должно уточняться. Чем длиннее воздушный промежуток, тем эта величина будет меньше. Предварительная оценка показывает, что увеличение длины данного промежутка приводит к нелинейному снижению пробивной напряженности электрического поля.

Так, например, для пробоя воздушного промежутка длиной 6 м при пробивной напряженности 500 кВ/м необходимо приложить напряжение, равное 3000 кВ. Однако, исходя из кривых $U_{50\%} = f(l_{a.g})$ [3], пробой такого промежутка произойдет при напряжении около 2834 кВ, т.е. при напряжении на 5,5 % меньше. При этом пробивная напряженность воздуха в рассматриваемом промежутке составит 472,3 кВ/м. Исходя из пробивной напряженности воздуха 472,3 кВ/м, определяем допустимое расстояние по воздуху по формуле (13), которое составляет 2,31 м, что на 11 см (или на 5 %) больше, чем при принятой напряженности электрического поля в 500 кВ/м.

Расчет допустимого напряжения на корпусе трансформатора. Кратчайшее расстояние по магистрали заземлителя от точки присоединения к нему токопуска (портала) до точки присоединения к заземлителю корпуса трансформатора должно быть не менее допустимого значения. Выполнение этого условия исследуем путем расчета напряжения на корпусе трансформатора, присоединенного к ЗУ ПС, при различных удельных сопротивлениях грунта и параметрах грозовых импульсов.

В качестве примера рассмотрим силовой трансформатор 110/6 кВ, который установлен у трансформаторного портала.

Для обеспечения заданной надежности работы трансформатора в грозовой сезон необходимо определить расстояние L по магистрали электрода заземлителя от точки присоединения токозпуска молниеотвода до точки заземления корпуса трансформатора, при котором напряжение на корпусе не превышает допустимого значения (электрической прочности внешней изоляции). В данном случае в качестве допустимого напряжения принимаем испытательное напряжение внешней изоляции силового трансформатора грозowymi импульсами. Испытательные напряжения электрооборудования при грозowych импульсах, приведенные к нормальным атмосферным условиям, представлены в табл. 1. При этом в числителе представлено значение полного импульса, а в знаменателе значение срезанного.

Таблица 1

Испытательные напряжения грозowych импульсов [1]

Класс	Действующее значение напряжения, кВ	
	Наибольшее рабочее	Максимальное значение грозowego импульса, кВ
3	3,6	42/50
6	7,2	57/70
10	12	75/90
15	17,5	100/120
20	24	120/150
35	40,5	185/230
110	126	460/570

Рассчитаем напряжение на корпусе трансформатора при ударе молнии в молниеприемник, расположенный на трансформаторном портале. Корпус трансформатора присоединяется к сетке заземляющего устройства, которая выполнена из стального прутка круглого сечения диаметром $d = 2r = 12$ мм, глубина заложения $h_g = 0,7$ м. Пусть удельное сопротивление грунта составляет $\rho = 100$ Ом·м, а амплитуда импульса тока молнии равна $I_l = 20$ кА при длительности его фронта $\tau_f = 2$ мкс. Длина луча l заземлителя изменяется в пределах от 3 до 21 м. Высота молниеотвода составляет $h_{lr} = 19,35$ м.

Ток молнии растекается от точки присоединения токозпуска (портала) к ЗУ ПС по магистралям (лучам) заземлителя. Кратчайшее расстояние по магистрали заземлителя рассчитываем по программе, алгоритм которой приведен на рис. 1.

Выполним расчеты для трех случаев:

- 1) токозпуск молниеотвода присоединяется к двум противоположно направленным лучам сетки;
- 2) токозпуск молниеотвода присоединяется к трем лучам сетки, направленным под углом 90° (при этом коэффициент использования заземлителей в системе (экранирование) $\eta_p = 0,8$);
- 3) токозпуск молниеотвода присоединяется к четырем лучам сетки (при этом $\eta_p = 0,65$).

Результаты расчетов приведены в табл. 2-4.

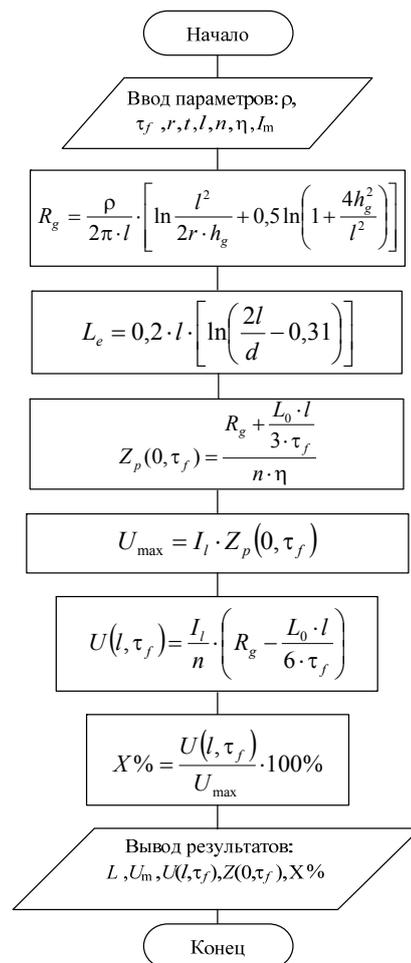


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета зависимости напряжения на корпусе трансформатора от удаления точки заземления токозпуска молниеотвода

Таблица 2

Результаты расчета для случая двухлучевого заземлителя

L , м	U_l , кВ	U_{max} , кВ	Z_p , Ом	X , %
3	351,492	360,408	18,02	97,526
6	187,853	206,909	10,345	90,79
9	129,254	159,676	7,984	80,948
12	95,783	138,082	6,904	69,367
15	73,031	127,59	6,379	57,239
18	55,878	123	6,15	45,429
21	42,027	121,967	6,098	34,458

Таблица 3

Результаты расчета для случая трехлучевого заземлителя

L , м	U_l , кВ	U_{max} , кВ	Z_p , Ом	X , %
3	234,328	300,34	15,017	78,021
6	125,235	172,424	8,621	72,632
9	68,17	133,063	6,653	64,758
12	63,855	115,069	5,753	55,493
15	48,687	106,325	5,316	45,791
18	37,252	102,5	5,125	36,343
21	28,018	101,639	5,082	27,566

Полученные результаты показывают следующее. Для первого случая, когда корпус трансформатора присоединен к сетке на расстоянии 15 м по магистрали заземлителя от точки присоединения токозпуска

(портала) к двум лучам, атмосферное перенапряжение на корпусе составляет 73 кВ, т.е. превышает 70 кВ. В данном случае присоединение корпуса к ЗУ необходимо выполнить на расстоянии 15,5 м или более.

Таблица 4

Результаты расчета для случая четырехлучевого заземлителя

$L, \text{ м}$	$U_i, \text{ кВ}$	$U_{\text{max}}, \text{ кВ}$	$Z_p, \text{ Ом}$	$X, \%$
3	175,746	277,237	13,862	63,392
6	93,926	159,161	7,958	59,013
9	64,627	122,828	6,141	52,616
12	47,892	106,217	5,311	45,088
15	36,515	98,146	4,907	37,205
18	27,939	94,616	4,731	29,529
21	21,014	93,82	4,691	22,398

Для второго случая, когда токопуск молниеотвода присоединен к трем лучам сетки, а на расстоянии 11,03 м по магистрали заземлителя находится точка заземления корпуса трансформатора, атмосферное перенапряжение на корпусе составляет 70,026 кВ, т.е. практически не превышает 70 кВ.

Для третьего случая, когда токопуск молниеотвода присоединен к четырем лучам сетки, а на расстоянии 9 м по магистрали заземлителя находится точка заземления корпуса трансформатора, атмосферное перенапряжение на корпусе составляет около 64,63 кВ, т.е. не превышает 70 кВ.

Как видим, при одинаковой величине тока молнии в точке ввода в ЗУ ПС с ростом числа лучей при $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ сопротивление заземлителя импульсному току уменьшается. Кроме того, с увеличением ρ от 50 Ом·м до 500 Ом·м при числе лучей $n = 4$ и токе молнии $I_l = 20 \text{ кА}$ указанное сопротивление тоже растет. Аналогичные результаты получены и при других токах, например, $I_l = 60 \text{ кА}$.

На рис. 2 представлены зависимости напряжения в рассматриваемой точке ЗУ от расстояния L до точки ввода тока.

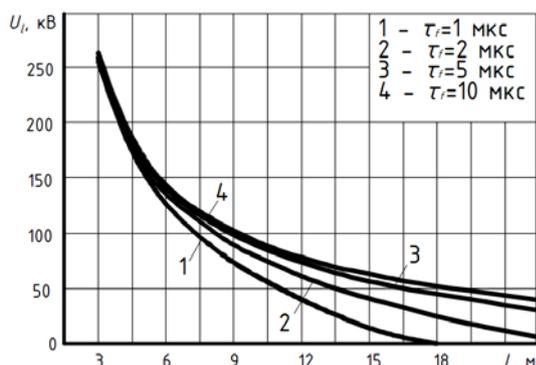


Рис. 2. Зависимость напряжения в рассматриваемой точке ЗУ на расстоянии L от точки ввода тока молнии $I = 20 \text{ кА}$ при разных значениях длины его фронта

На рис. 3 представлены зависимости напряжения в рассматриваемой точке ЗУ от расстояния L до точки ввода тока молнии при разных значениях его амплитуды, но при неизменной длине фронта тока $\tau_f = 2 \text{ мкс}$.

Как следует из рис. 2 и рис. 3, приведенных выше, по мере удаления ($L, \text{ м}$) от точки ввода тока молнии в ЗУ вдоль луча магистрали заземлителя потен-

циал U_i снижается во всех рассмотренных случаях. При этом скорость снижения зависит как от амплитуды тока молнии, так и от крутизны его фронта.

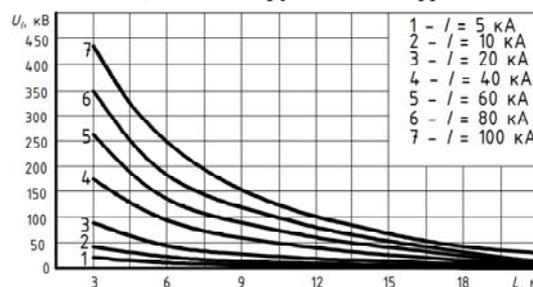


Рис. 3. Зависимости $U_i = f(L)$

На рис. 4 представлены зависимости сопротивления заземлителя ПС импульсному току в точке ввода (4 луча) тока молнии от радиуса зоны его растекания по магистралям (длины лучей L) и длины фронта тока молнии.

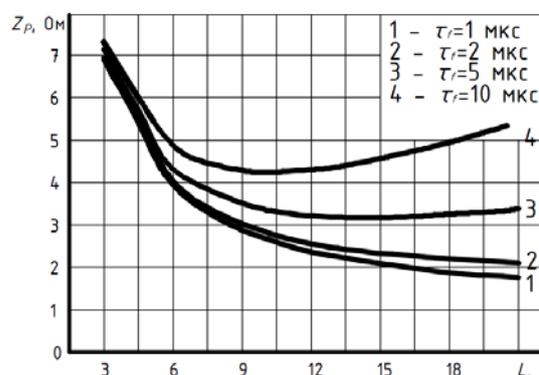


Рис. 4. Зависимости $Z_p = f(L)$

Анализ результатов, приведенных на рис. 4, показывает, что сопротивление Z_p ЗУ молниеотвода ПС импульсному току сложно зависит от размера зоны растекания тока молнии в момент его максимума при разных значениях длины фронта. Например, при $\tau_f > 2 \text{ мкс}$ сопротивление Z_p с ростом размера L зоны снижается. При значении тока молнии 60 кА и удельном сопротивлении грунта $\rho = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ кривые $Z_p = f(L)$ монотонно снижаются, а при уменьшении $\tau_f (\leq 2 \text{ мкс})$ сопротивление Z_p вначале снижается, а затем начинает увеличиваться, при этом минимальное значение Z_p смещается в сторону меньших значений L .

На рис. 5 представлена зависимость $L = f(n)$, которая показывает уменьшение зоны растекания тока молнии с ростом числа лучей сетки ЗУ. При этом напряжение на границе зоны сохраняется на уровне допустимого 70 кВ.

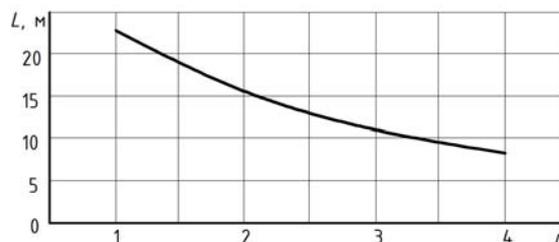


Рис. 5. Зависимость радиуса (L) зоны растекания тока молнии по магистралям заземлителя ПС от числа лучей n в точке ввода тока

Вычислим число лет работы трансформатора без поражений, в течение которых напряжение на его корпусе, вызванное атмосферными перенапряжениями, не превысит допустимого 70 кВ:

$$N = \frac{1}{N_{ls} \cdot P_{I_l}}, \quad (15)$$

где $N_{ls} = \pi(3,5 \cdot h_{lr})^2 \cdot 10^{-6} \cdot \sigma \cdot N_{th}$ – число ударов молнии в молниеотвод ПС; h_{lr} – высота молниеотвода, м; $\sigma = 0,067$ 1/(км)²·гроз. час; $N_{th} = 60$ гроз. час;

$$N_{ls} = 3,14 \cdot (3,5 \cdot 19,35)^2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,067 \cdot 60 = 0,058.$$

Вероятность того, что амплитуда тока молнии превысит значение I_l , рассчитывается по формуле

$$P_{I_l} = 10^{-I_l/60}.$$

Для тока молнии $I_l = 60$ кА получаем

$$P_{I_l} = 10^{-60/60} = 0,1.$$

Таким образом, подставляя полученные выше значения в формулу (15), получаем число лет работы трансформатора без поражений:

$$N = \frac{1}{0,058 \cdot 0,1} = 172,634 \text{ года.}$$

Если амплитуда тока молнии превысит 60 кА, то перенапряжение окажется более 70 кВ. Чтобы избежать этого применяют защитные аппараты (разрядники или ограничители перенапряжений).

Выполненные по этому алгоритму расчеты представлены на рис. 6. Кривая зависимости числа лет, в течение которых может появиться значение тока молнии большее заданного, как следует из рис. 6, нелинейно возрастает.

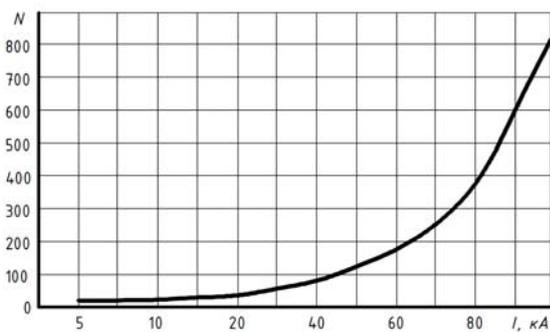


Рис. 6. Зависимость $N = f(I_l)$

Расчет длины допустимого промежутка в земле. Для отдельно стоящего молниеотвода кратчайшее расстояние в земле между заземлителем молниеотвода и ближайшей к нему точкой защищаемого устройства в земле должно быть не менее допустимого значения.

Исходя из того, что в земле к кратчайшему промежутку длиной l_e приложено напряжение $E_e \cdot l_e$, где E_e – допустимая в земле напряженность электрического поля, это условие запишем как

$$l_e \cdot E_e \geq I_l \cdot R_p, \quad (16)$$

где l_e – кратчайшее расстояние в земле между заземлителем молниеотвода и ближайшей к нему точкой защищаемого устройства в земле; E_e ($E_{b.g}$) – импульс-

ная электрическая прочность грунта (пробивная напряженность).

Из условия (16) определяем минимальное допустимое значение величины l_e :

$$l_e \geq \frac{I_l \cdot R_p}{E_{b.g}}. \quad (17)$$

Результаты экспериментального определения импульсной электрической прочности грунта в НТУ «ХПИ» показали [11], что эта величина является нелинейной, т.е. $E_{b.g} = f(S) = A + \frac{B}{S}$.

При больших промежутках, измеряемых десятками сантиметров, а тем более метрами, величина $E_{b.g}$ стремится к численным значениям (100-150) кВ/м в зависимости от характеристик грунта.

Подставляя в выражение (17) значение $E_{b.g} = 150$ кВ/м и $I_l = 60$ кА, получаем условие

$$l_e \geq 0,4 \cdot R_p, \quad (18)$$

которое позволяет определить минимальное допустимое расстояние в земле между заземлителем молниеотвода и ближайшей к нему точкой защищаемого устройства.

Выводы.

Разработана инженерная методика расчета допустимого напряжения на корпусе трансформатора при ударе молнии в молниеприемник трансформаторного портала и допустимого числа лет работы трансформатора, в течение которых напряжение на его корпусе, вызванное атмосферными перенапряжениями, не превысит допустимого значения.

Выполнен инженерный расчет грозовых перенапряжений на оборудовании подстанции при ударе молнии в ее молниеотвод. Сформулированы условия безопасного для оборудования ПС прохождения тока молнии по молниеотводу. Выполненные исследования показали, что используемая величина импульсной пробивной напряженности воздуха 500 кВ/м приводит к неточному определению допустимой длины l_a воздушного разрядного промежутка (с погрешностью до 5%). С увеличением длины l_a данного промежутка нелинейно снижается импульсная пробивная напряженность воздуха и, как следствие, допустимая минимальная длина указанного промежутка увеличивается.

Учет нелинейной импульсной электрической прочности грунта позволил получить уточненное минимальное допустимое расстояние l_e в земле между заземлителем молниеотвода и ближайшей к нему точкой заземляемого устройства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учебник для вузов / Под общ. ред. В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.
2. Гуля В.И., Нижегородский В.И., Хоменко И.В. Координация изоляции и перенапряжения в электрических высоковольтных сетях: Учеб. пособ. / Под ред. проф. Гуля В.И. – Харьков: ЭДЕНА, 2009. – 270 с.
3. Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.

4. Ку克林 Д.В., Ефимов Б.В. Расчет кривых опасных параметров при высоких сопротивлениях заземлений опор линий электропередачи. *Электричество*. – 2016. – №6. – С. 16-21.

5. Pigni A., Rizzi G., Garbagnati E., Porrino A., Baldo G., Pesavento G. Performance of large air gaps under lightning over-voltages: experimental study and analysis of accuracy predetermination methods // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 1989. – vol.4. – no.2. – pp. 1379-1392. doi: 10.1109/61.25625.

6. Caldwell R., Darveniza M. Experimental and Analytical Studies of the Effect of Non-Standard Waveshapes on the Impulse Strength of External Insulation // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. – 1973. – vol. PAS-92. – no.4. – pp. 1420-1428. doi: 10.1109/tpas.1973.293550.

7. Chisholm W. New challenges in lightning impulse flashover modeling of air gaps and insulators // *IEEE Electrical Insulation Magazine*. – 2010. – vol.26. – no.2. – pp. 14-25. doi: 10.1109/mei.2010.5482551.

8. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. Заземляющие устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.

9. Рябкова Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения. – М.: Энергия, 1978. – 224 с.

10. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: справ. кн. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 487 с.

11. Нижевский В.И., Гуль В.И. Электрическая прочность ограниченных объемов грунта // *Вестник Харьковского политехнического института*. – 1984. – № 213: Электроэнергетика и автоматизация энергоустановок. – Вып. 12. – С. 3-6.

REFERENCES

1. Bazutkin V.V., Larionov V.P., Pinal' Y.S. *Tekhnika vysokikh napryazheniy: Izolyatsiya i perenapryazheniya v elektricheskikh sistemakh* [High voltage technique. Insulation and surge in electrical systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 464 p. (Rus).

2. Gul' V.I., Nizhevskiy V.I., Khomenko I.V. *Koordinatsiya izolyatsii i perenapryazheniya v elektricheskikh vysokovol'tnykh setyakh* [Coordination of insulation and overvoltage in high-voltage electrical networks]. Kharkiv, EDENA Publ., 2009. 270 p. (Rus).

3. Kuchinskii G.S., Kizevetter V.E., Pinal' Iu.S. *Izolyatsiya ustanovok vysokogo napryazheniya* [Isolation of installations of high tension]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 368 p. (Rus).

4. Kuklin D.V., Yefimov B.V. Calculation of hazardous parameters curves at high grounding resistance of power line poles. *Electricity*, 2016, no.6, pp. 16-21. (Rus).

5. Pigni A., Rizzi G., Garbagnati E., Porrino A., Baldo G., Pesavento G. Performance of large air gaps under lightning over-voltages: experimental study and analysis of accuracy predetermination methods. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1989, vol.4, no.2, pp. 1379-1392. doi: 10.1109/61.25625.

6. Caldwell R., Darveniza M. Experimental and Analytical Studies of the Effect of Non-Standard Waveshapes on the Impulse Strength of External Insulation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1973, vol. PAS-92, no.4, pp. 1420-1428. doi: 10.1109/tpas.1973.293550.

7. Chisholm W. New challenges in lightning impulse flashover modeling of air gaps and insulators. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2010, vol.26, no.2, pp. 14-25. doi: 10.1109/mei.2010.5482551.

8. Бургсдорф В.В., Якобс А.И. *Zazemlyayushchie ustroystva elektroustanovok* [Grounding device of electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 400 p. (Rus).

9. Ryabkova E.Y. *Zazemleniya v ustanovkakh vysokogo napryazheniya* [Grounding installations high voltage]. Moscow, Energy Publ., 1978. 224 p. (Rus).

10. Kalantarov P.L., Tseytlin L.A. *Raschet induktivnostey* [Inductance calculations]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 488 p. (Rus).

11. Nizhevskiy V.I., Gul' V.I. Dielectric strength of limited soil volumes. *Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute*, 1984, no.213, Series «Electric power industry and automation of power plants», no.12, pp. 3-6. (Rus).

Поступила (received) 27.12.2018

Нижевский Илья Викторович¹, к.т.н.,
Нижевский Виктор Ильич¹, к.т.н., доц.,
¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
тел/phone +380 57 7076977,
e-mail: victornizhevski@gmail.com

I.V. Nizhevskiy¹, V.I. Nizhevskiy¹
¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Calculation estimation of overvoltage on insulation of the equipment of a substation at the lightning strike in its lightning arrester.

Purpose. The complex approach to calculating thunderstorm overvoltage on substation equipment is considered when lightning strikes in a lightning rod. **Methodology.** The conditions of safe passage of lightning current through a lightning arrester are formulated. **Results.** It is shown that the calculation of the permissible length of air insulating gaps in the substation is based on the breakdown of the air tension, which is assumed to be 500 kV/m. This leads to an error in calculating the length of the air gap and, as a consequence, the probability of its breakdown, the value of which is used to calculate the indicator of the lightning resistance of the substation. A technique is proposed for calculating the permissible voltage on the transformer case when a lightning strike strikes the lightning receptacle of the transformer portal. On the basis of the nonlinear pulsed electric strength of the ground, the specified minimum permissible ground distance between the grounding rod of the lightning rod and the nearest point of the protected device is obtained. **Originality.** Refined calculation of the length of the minimum breakdown gap in the air and in the ground. **Practical value.** The proposed approach makes it possible to calculate thunderstorm overvoltage on substation equipment. References 11, tables 4, figures 6.

Key words: lightning overvoltage, substation, lightning arrester, volt-second characteristic, insulator string, electric field, air gap, permissible voltage, transformer case, pulsed electric strength.