

Об измерениях напряженности поля у поверхности земли

Целью работы является определение напряженности электрического поля у поверхности земли путем измерения зарядов, наведенных на заземленных проводниках. Задача связана с анализом процессов развития канала разряда в длинных воздушных промежутках, в том числе канала разряда молнии при поражении наземных объектов.

Одним из физических параметров процесса ориентации канала молнии на заземленный объект, без всякого сомнения, является напряженность электрического поля. Измерение этого параметра в промежутке сопряжено с большими техническими трудностями и до настоящего времени соответствующая аппаратура не разработана. Однако определенную информацию можно получить, измеряя напряженность электрического поля у поверхности земли. Настоящая работа позволяет в какой-то мере решить эту задачу.

В работе предлагается оценивать напряженность внешнего поля по значению заряда, наведенного на заземленном проводнике в виде шара или диска.

Задача в общем виде решена Г.А. Гринбергом [1]. Согласно соответствующей теореме потенциал, наводимый на изолированном проводнике, находящемся во внешнем электрическом поле, определяется свободным распределением заряда по поверхности проводника и распределением потенциала внешнего поля при помощи выражения

$$U = \frac{1}{C_0} (Q_0 + \frac{1}{U_0} \int_S \sigma_0 U_{\text{вн}} dS) , \quad (1)$$

где $C_0 = Q_0 / U_0$ - собственная емкость проводника, σ_0 - распределение поверхностной плотности заряда без учета внешнего поля при потенциале U_0 , $U_{\text{вн}}$ - потенциал внешнего поля.

Следствием из (1) для заземленного проводника является выражение для наведенного заряда

$$Q_{\text{вн}} = -\frac{C_0}{Q_0} \int_S \sigma_0 U_{\text{вн}} dS = -\frac{C_0 \int \sigma_0 U_{\text{вн}} dS}{\sigma_{\text{ср}} S}. \quad (2)$$

Заметим, что σ_0 и $U_{\text{вн}}$ являются некими функциями, зависящими от положения точки на поверхности проводника.

В некоторых (достаточно редких) случаях $\sigma_0 = \text{const}$. В этом случае наведенный заряд будет равен произведению емкости проводника на среднее значение потенциала внешнего поля по поверхности проводника.

Из (2) также очевидно, что при $U_{\text{вн}} = \text{const}$ (когда поверхность проводника совпадает с эквипотенциалью внешнего поля) наведенный заряд будет точно равен

$$Q_{\text{вн}} = C_0 U_{\text{вн}} = C_0 E_0 H, \quad (3)$$

где E_0 – напряженности внешнего однородного поля, H – расстояние от эквипотенциали до земли (в общем случае $H = \text{var}$).

В качестве примера использования выражения (3) можно назвать тонкий проводник, расположенный горизонтально над землей, если внешнее поле является равномерным. Проще всего в данном случае применять тонкий диск, т.к. для него можно достаточно просто точно рассчитать емкость относительно земли.

В данной работе рассматриваются тонкие диски, диски со скруглениями краев и сферы (шары), расположенные над землей в равномерном поле. Ниже приводятся расчеты наведенных зарядов для перечисленных случаев.

Тонкие диски.

Значения емкости тонкого диска относительно земли и зарядов, наведенных на заземленном диске, приводятся в табл.1. Расчеты емкости проводились по программе Аксиал [2].

Таблица 1.

Зависимость емкости плоского диска радиусом 100 см от его высоты H над заземленной плоскостью и заряда, наведенного в равномерном внешнем поле с напряженностью $E_0 = 1$ кВ/м

Параметр	Значения параметра при разных значениях Н, см					
	10	30	50	70	90	110
Емкость диска, пФ	336,4	169,8	129,0	111,4	101,7	95,61
$Q_{\text{нав}} \cdot 10^8$, Кл	3,364	5,091	6,45	7,819	9,153	10,517
$K_d(H/R)$	5,175	2,398	1,822	1,573	1,436	1,350

Примечание. 1. В табл. 1 $K_d(H/R)$ – отношение емкости диска относительно земли к емкости уединенного диска. 2. Наведенный заряд вычислен при радиусе диска $R_d = 100$ см и напряженности внешнего поля 1 кВ/м.

При условии, что поле у поверхности земли можно рассматривать как равномерное ($E = U_{\text{вн}} \cdot H$) его напряженность можно выражать через потенциал $U_{\text{вн}}$, а наведенный заряд измеряется как интеграл от тока в заземляющей цепи.

Заряд, наведенный на заземленном диске, находящемся на высоте H над плоскостью, может быть также выражен формулой

$$Q_{\text{нав}} = k_d (H / R) \cdot 8\varepsilon_0 R \cdot U_{\text{вн}}, \quad (4)$$

где $8\varepsilon_0 R$ – емкость уединенного диска, $U_{\text{вн}}$ – потенциал внешнего поля, $k_d(H/R)$ – коэффициент, отражающий влияние расстояния до земли (заземленной плоскости), значения которого приведены в табл.1.

Так как напряженность внешнего однородного диска выражается через потенциал как $E_{\text{вн}} = H \cdot U_{\text{вн}}$, то из (4) вытекает зависимость напряженности внешнего поля от наведенного заряда:

$$E_{\text{вн}} = \frac{Q_{\text{нав}} H}{k_d (H / r) 8\varepsilon_0 R}. \quad (5)$$

Кроме расчета наведенного заряда для тонкого диска были также проведены аналогичные расчеты для диска радиуса 100 см с скругленными краями (радиус скругления 1 см). Емкость такого диска отличается от емкости тонкого диска не более чем на 2% при его высоте над землей 50 см и с ростом высоты ее отличие от емкости плоского тонкого диска уменьшается.

На этом основании полученные выше выводы (формулы 3, 4 и 5, а также данные табл. 1) сохраняются и при наличии скругления радиусом не более 1 см.

Металлический заземленный шар во внешнем однородном поле.

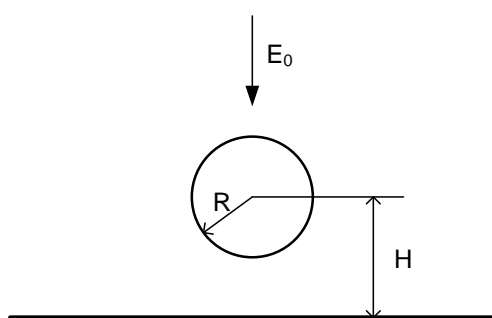


Рис.1 К расчету заряда, наведенного на заземленном шаре в однородном поле.

Расчет наведенного на шаре заряда проводится на основании уравнения (2). В отличие от задачи с диском, заряд на поверхности шара и внешний потенциал являются функциями высоты рассматриваемой точки над землей. Поэтому решение задачи производилось численными методами. Для надежности использовались два алгоритма. В первом решалась задача (по программе Axial [2]) с «естественными» граничными условиями: т.е. задавалась напряженность внешнего однородного поля и потенциал на шаре, равный нулю.

Программа выдает в таком случае значения напряженности электрического поля на поверхности шара. Так как на поверхности проводника имеет место соотношение $\sigma = \epsilon_0 \cdot E$ (σ - поверхностная плотность заряда Кл/м²), то значения напряженности пересчитывались в поверхностную плотность заряда и проводилось численное интегрирование по поверхности шара. В результате рассчитывался полный наведенный заряд шара. Численное интегрирование производилось для двух вариантов: в первом на поверхности

шара поверхностная плотность заряда считалась в 8-ми, а во втором в 16-ти точках. Расхождение не превышало 2%, что говорит об устойчивости решения.

Второй метод состоял в том, что граничное условие на шаре задавалось в виде значения его заряда. При этом рассчитывался потенциал нара во внешнем поле. Значение заряда на шаре, дающее его потенциал наиболее близким к нулевому, принималось в качестве решения задачи.

Процесс подгонки заряда прекращался, если потенциал отличался от нуля на величину Δ , не превышающую 1% от потенциала внешнего поля в центре шара. Расхождение в результатах двух алгоритмов не превышали, как правило, 0,1 %. На этом основании погрешность численных решения при оценке наведенного заряда можно считать не превышающей 1 %.

Таблица 2.

Значения зарядов, наведенных на заземленной сфере радиусом 1 м, находящейся в равномерном поле с напряженностью 1 кВ/м

№ п/п	Параметр	Значения параметра при разных высотах центра над плоскостью для сферы радиусом 1 м.					
		101 см	110 см	125 см	150 см	200	300 см
1	C, пФ	360,4	239,7	197,8	170,8	149,1	133,6
2	$Q_{\text{нав}} \cdot 10^7$, Кл	1,84	1,933	2,089	2,353	2,886	3,97
3	$k_{\text{ш}}(H/R)$,	1,64	1,58	1,50	1,41	1,30	1,192

Примечания. 1. Из подобия электрических полей следует, что при изменении радиуса сферы ее емкость относительно земли будет изменяться пропорционально H/R. 2. Из данных табл. 2, в частности, следует, что с погрешностью не более 10% наведенный на шаре заряд можно вычислить по приближенной формуле при условии, что высота центра сферы более полутора ее радиуса:

$$Q_{\text{нав}} \approx \varphi_{\text{ц}} \cdot C_{\text{сф}} \quad (6)$$

где $\varphi_{\text{ц}}$ – потенциал внешнего поля на высоте центра сферы. 3. Если распределение электрического поля по высоте H является неравномерным, то значения наведенных зарядов будут отличаться от приведенных в табл. 2.

Пример 1

Рассмотрим самую примитивную модель нисходящего лидера в виде вертикального равномерно заряженного отрезка. Высота верхней точки равна 2000 м, высота нижней точки обозначена как Z_1 . Плотность линейного заряда на единицу длины принимаем равной 420 мкКл/м, что примерно соответствует амплитуде тока главного разряда 50 кА согласно оценке [3].

Напряженность электрического поля такой модели вычисляется путем интегрирования по длине заряженного отрезка с учетом зеркального отражения. Расчет показывает, что при минимальной высоте модели лидера 10 м и на расстоянии от него более 20 м электрическое поле у поверхности земли на высоте 2 м и ниже – является практически однородным. Это позволяет использовать предложенные в данном сообщении формулы для расчета наведенного заряда.

На рис. 2 приведены результаты вертикальной составляющей напряженности электрического поля модели лидера на высоте 2 м от земли в зависимости от расстояния от лидера по горизонтали.

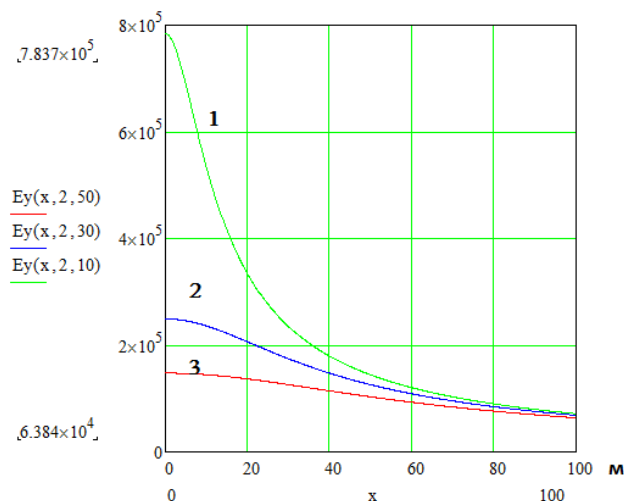


Рис. 2 Зависимости вертикальной составляющей напряженности электрического поля лидера E_y (В/м) от расстояния по горизонтали x , м для значений Z_1 равных 10 м (кривая 1), 30 и 50 м (кривые 2 и 3).

Регистрируя соответствующие значения наведенных зарядов и располагая данными о взаимном расположении лидера и датчиков наведенного заряда, можно строить оценки об объемном заряде и, возможно, токе главного разряда.

Подчеркнем, что требование равномерности поля до высоты H возникает при выводе всех выражений для расчета наведенного потенциала, но не более того. Другими словами реальное поле объемных зарядов может иметь любую неравномерность.

Пример 2

Расчет ЭП «ГИН Истра» при напряжении на верхнем экране 5000 кВ

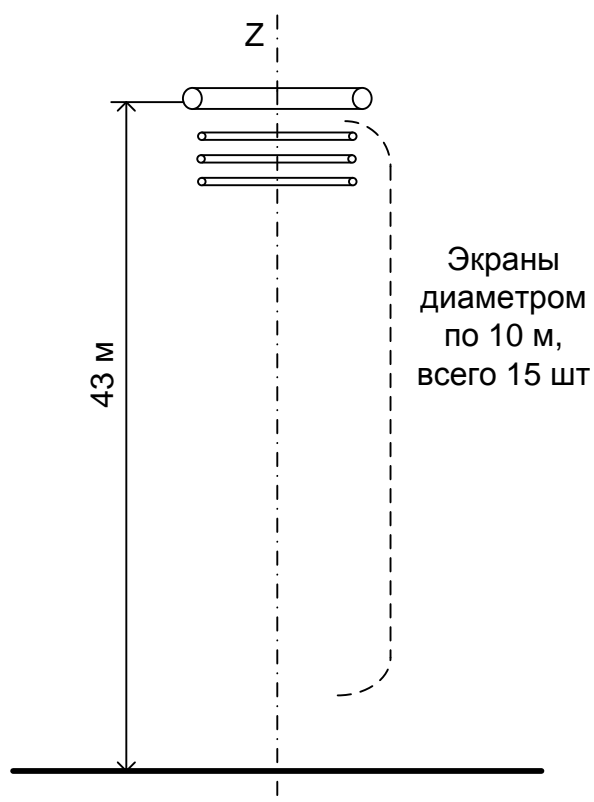


Рис. 3. Эскиз ГИИ. Напряжение по экранам распределено равномерно от 312 до 5000 кВ.

Расчет ЭП ГИИ Истринского отделения ВЭИ (см. ниже), показал, что у поверхности земли в радиусе до 100 м и по высоте до 2 м электрическое поле – равномерное с высокой точностью. Из этого следует, что напряженность поля у земли можно определять по изложенной выше методике.

Использование методики диагностики ЭП объемного заряда дает возможность определять некоторые общие параметры электрического поля. А именно: наличие/отсутствие объемного заряда в промежутке (путем сравнения ЭП до и после разряда); ЭП вблизи защищаемого объекта в разные моменты времени или, например, в финальной стадии разряда; количество объемного заряда, оставшегося в промежутке после завершения разряда.

Одним из возможных способов диагностики может являться сравнение ЭП одной и той же установки при разных уровнях напряжения т.е. в отсутствии разряда и при наличии разрядных процессов без полного пробоя промежутка.

Приведенные выше расчеты показывают, например, что при использовании в качестве «датчика ЭП» заземленного шара радиуса 1 м, расположенного на расстоянии 20 м от ГИН, на нем будет наводиться заряд, равный $Q = 0,78 \cdot 10^{-5}$ Кл, если его центр будет находиться на высоте 1,5 м над уровнем земли.

Если же использовать в качестве датчика заземленный диск радиусом 1 м, расположенный на высоте 0,5 м, то наведенный заряд будет равен $2,13 \cdot 10^{-8}$ Кл.

Результаты расчета ЭП в окрестности ГИН.

Контрольные точки в промежутке (геометрические размеры в см, напряженность в кВ/см, потенциал в кВ),

E_z – осевая составляющая напряженности; E_r – радиальная составляющая; E_s – модуль напряженности; U – потенциал относительно земли.

Z	R	E_z	E_r	E_s	U
50	2000	-0.3301	0.004755	0.3301	16.5
100	2000	-0.3304	0.009524	0.3305	33.01
200	2000	-0.3315	0.01916	0.332	66.1
50	5000	-0.1087	0.002037	0.1088	5.438

100	5000	-0.1087	0.004074	0.1088	10.87
200	5000	-0.1086	0.008146	0.1089	21.74
50	1e+004	-0.02242	0.0002916	0.02242	1.121
100	1e+004	-0.02241	0.000583	0.02242	2.241
200	1e+004	-0.02239	0.001166	0.02242	4.482
500	5000	-0.1076	0.02033	0.1095	54.18
1000	5000	-0.104	0.04036	0.1116	107.2
2000	5000	-0.08914	0.07767	0.1182	204.7
4000	5000	-0.03169	0.1198	0.1239	329.9
5000	5000	-0.001067	0.1155	0.1155	345.8
6000	5000	0.02061	0.09855	0.1007	335.1

Список литературы

1. Гринберг Г.А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений/ М.: Изд-во АН СССР, 1948
2. Расчет электрического поля устройств высокого напряжения/ И.П. Белоедова, Ю.В. Елисеев, Е.С. Колечицкий и др. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.
3. Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты/ Л.: Гидрометеиздат, 1978.