

О возможности диагностики электрического поля по наведенным зарядам

КОЛЕЧИЦКИЙ Е.С.

Рассмотрена методика диагностики объемных зарядов по результатам измерений электрического поля у поверхности земли. Задача связана с анализом процессов развития канала разряда в длинных воздушных промежутках, в том числе канала разряда молнии при поражении наземных объектов. Показано, что напряженность внешнего электрического поля над поверхностью земли может быть определена путем измерения зарядов, наведенных на заземленных проводниках. Проведены расчеты для проводников в виде плоских дисков и шаров. Результаты могут быть использованы для анализа распределения объемного заряда при разрядах, например молнии.

Ключевые слова: разряд молнии, электрическое поле, заземленные проводники, объемный заряд

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. Такая постановка подобна решению задачи магнитодиагностики земли, в которой определяется распределение магнитных масс по результатам измерения магнитного поля на поверхности земли, см., например, [1]. Для ее решения разработан широкий набор вычислительных методов. Часть из них может быть использована и для анализа распределения объемного заряда.

Анализируя электрическое поле в процессе разряда молнии, можно, например, определять напряженность поля в предгрозовом состоянии, оценивать объемный заряд, остающийся после главного разряда, напряженность поля вблизи защищаемого объекта непосредственно перед его поражением молнией и т.п.

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

Задача в общем виде решена в [2]. 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:

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

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:

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

где $\sigma_{\text{ср}}$ — среднее значение поверхностной плотности заряда.

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 $U_{\text{вн}} = \text{const}$ (поверхность проводника совпадает с эквипотенциалью внешнего поля) наведенный заряд будет точно равен

$$Q_{\text{нв}} = C_0 U_{\text{вн}}. \quad (3)$$

Использовать выражение (3) можно, например, для расчета заряда тонкого проводника, расположенного горизонтально над землей, если внешнее поле является равномерным. Проще всего в данном случае применять тонкий диск, так как для него можно достаточно просто и точно рассчитать емкость относительно земли.

В статье рассматривались тонкие диски, диски со скругленными краями и сферы (шары), распо-

ложенные над землей в равномерном поле. Далее приведены расчеты наведенных зарядов для перечисленных случаев.

Тонкие диски. Значения емкости тонкого диска (радиусом 100 см) относительно земли и зарядов, наведенных на этом заземленном диске (равномерное внешнее поле с напряженностью $E_0 = 1$ кВ/м) приведены в табл. 1. Расчеты емкости проводились по программе Аксиал [3].

Таблица 1

Высота над землей H , см	Значение параметра		
	Емкость диска, пФ	Наведенный заряд $Q_{\text{НВ}}$, Кл 10^9	Отношение емкости диска относительно земли к емкости уединенного диска $K_d (H/R)$
10	336,4	3,364	5,175
30	169,8	5,010	2,398
50	129,0	6,450	1,822
70	111,4	7,819	1,573
90	101,7	9,153	1,436
100	99,76	9,976	1,350

Заряд, наведенный на заземленном диске, находящемся на высоте H над плоскостью,

$$Q_{\text{НВ}} = K_d (H/R) 8\epsilon_0 R U_{\text{ВН}}, \quad (4)$$

где $8\epsilon_0 R$ — емкость уединенного диска; $U_{\text{ВН}}$ — потенциал внешнего поля; $K(H/R)$ — коэффициент, отражающий влияние расстояния до земли (заземленной плоскости); значения — см. табл. 1.

Так как напряженность внешнего однородного поля выражается через потенциал как $E_{\text{ВН}} = HU_{\text{ВН}}$, то из (4) следует зависимость напряженности внешнего поля от наведенного заряда:

$$E_{\text{ВН}} = \frac{Q_{\text{НВ}} H}{K_d (H/R) 8\epsilon_0 R}. \quad (5)$$

Кроме расчета наведенного заряда для тонкого диска были также проведены аналогичные расчеты для диска радиусом 100 см со 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)–(5) и данные табл. 1.] сохраняются и при наличии скругления радиусом не более 1 см.

Металлический заземленный шар во внешнем однородном поле (рис. 1). Расчет наведенного на шаре заряда проводится на основании уравнения (2). В

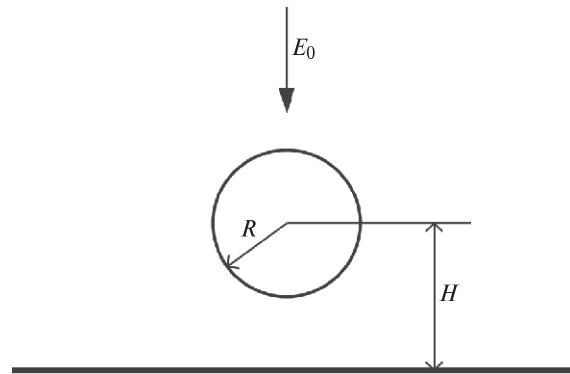


Рис. 1. К расчету заряда, наведенного на заземленном шаре в однородном поле

отличие от задачи с диском, заряд на поверхности шара и внешний потенциал являются функциями высоты рассматриваемой точки над землей. Поэтому решение задачи проводилось численными методами. Для надежности использовались два алгоритма. В первом решалась задача (по программе Аксиал) с «естественными» граничными условиями: т.е. задавалась напряженность внешнего однородного поля и потенциал на шаре, равный нулю. По программе в таком случае получены значения напряженности электрического поля на поверхности шара. Так как на поверхности проводника имеет место соотношение $\sigma = \epsilon_0 E$ (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 проводилось для двух вариантов: в первом на поверхности шара поверхностная плотность заряда считалась в восьми, а во втором в шестидесяти точках. Расхождение не превышало 2%, что говорит об устойчивости решения.

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

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

Значения зарядов, наведенных на заземленной сфере радиусом 1 м, находящейся в равномерном поле с напряженностью 1 кВ/м, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Высота центра сферы радиусом 1 м над плоскостью H , см	Значение параметра		
	Емкость C , пФ	Наведенный заряд $Q_{\text{нв}}$, Кл 10^7	$k_{\text{ш}}(H/R)$
101	360,4	1,84	1,64
110	239,7	2,93	1,58
125	197,8	2,09	1,50
150	170,8	2,35	1,41
200	149,1	2,89	1,30
300	133,6	3,97	1,19

Примечания. 1. Из подобия электрических полей следует, что при изменении радиуса сферы ее емкость относительно земли будет изменяться пропорционально ее радиусу.

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 больше ее радиуса в 1,5 раза:

$$Q_{\text{нв}} \approx \varphi_{\text{ц}} C_{\text{сф}}, \quad (6)$$

где $\varphi_{\text{ц}}$ — потенциал внешнего поля на высоте центра сферы.

Следует подчеркнуть, что неоднократно упоминаемое требование об однородности внешнего поля до высоты H используется только при выводе расчетных формул для вычисления наведенного заряда (на диске или сфере). Невыполнение этого требования влечет за собой некоторую ошибку во всех предложенных формулах [(1)–(6)]. Безусловно, нельзя говорить, что внешнее поле (или поле объемного заряда) должно или может быть однородно.

Используя приведенные результаты, можно получать оценки напряженности внешнего поля у земли. Безусловно, о полностью разработанной методике диагностики внешнего поля по измерениям его напряженности у земли говорить нельзя. Однако возможности такого метода могут быть продемонстрированы на отдельных примерах.

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 [4].

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 формулы.

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

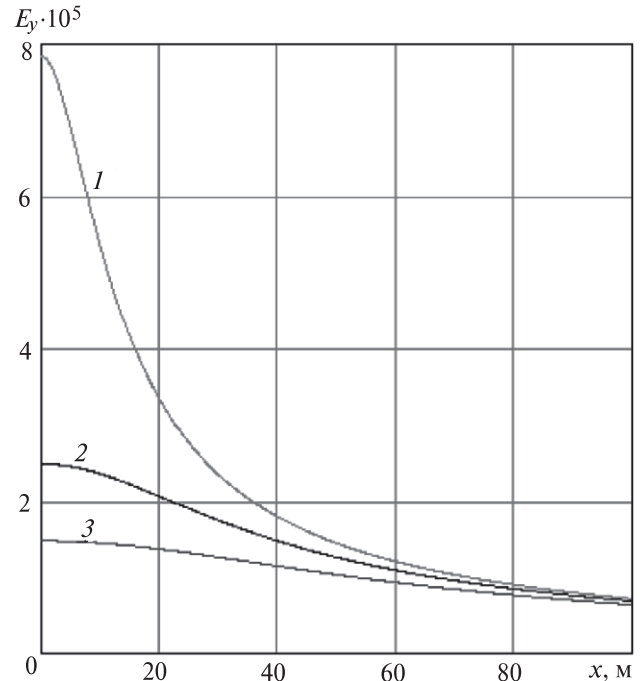


Рис. 2. Зависимости вертикальной составляющей напряженности электрического поля лидера E_y (В/м) от расстояния по горизонтали x : 1 — $Z_1 = 10$ м; 2 — 30 м; 3 — 50 м

Регистрируя соответствующие значения наведенных зарядов и располагая данными о взаимном расположении лидера и датчиков наведенного заряда, можно оценить объемный заряд и, возможно, ток главного разряда, если имеется дополнительная информация о положении нисходящего лидера.

Пример 2. Расчет электрического поля (ЭП) ГИН Истринского филиала ВЭИ при напряжении на верхнем экране 5000 кВ (рис. 3).

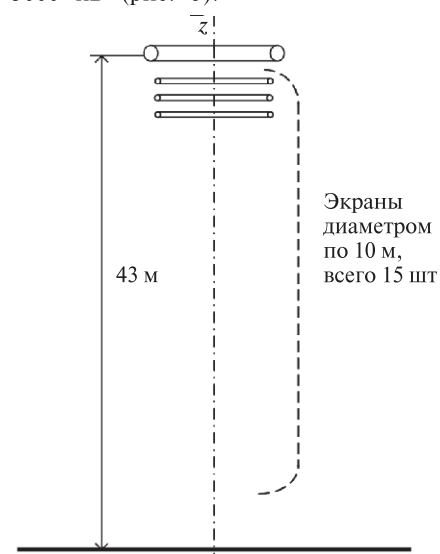


Рис. 3. Эскиз ГИН (напряжение по экранам распределено равномерно от 312 до 5000 кВ)

Расчет ЭП ГИН 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 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 отсутствие разряда и при наличии разрядных процессов без полного пробоя промежутка.

Приведенные расчеты показывают, например, что при использовании в качестве «датчика ЭП» заземленного шара радиусом 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 $2,15 \cdot 10^{-8}$ Кл.

Применение «электрических» способов измерения открывает также возможность сохранения их результатов.

Кроме того, для сравнения был проведен сугубо оценочный расчет электрического поля ГИН с присоединенным к нему коронирующим тросом длиной 50 м. Заряд троса был принят согласно [4] равным 150 мкКл/м, что соответствует токам главного разряда порядка 5 кА. Расчет показал, что напряженность поля у земли на рас-

стоянии 25 м от ГИН (под серединой коронирующего троса) только от зарядов на тросе составит около 11 кВ/м. Напряженность поля, созданная зарядами ГИН, при этом составляет 28 кВ/м. Следовательно, заряд коронирующего троса увеличивает напряженность примерно на 30%, что вполне может быть обнаружено измерениями.

Результаты измерений наведенных зарядов по предложенному методу могут быть использованы для диагностики распределения объемного заряда. Преимущества метода — в возможности использования электрических методов измерения и сохранения результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловейчик Ю.Г., Тригубович Г.М., Чернышев А.В., Рояк М.Э. Об одном подходе к решению трехмерной обратной задачи электромагнитного зондирования Земли становлением поля. — Сиб. журнал индустриальной математики, 2003, № 6, с. 138–153.
2. Гринберг Г.А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. — М.: Изд-во АН СССР, 1948.
3. Белоедова И.П., Елисеев Ю.В., Колечицкий Е.С., Плис А.И., Моисеев В.Н., Филиппов А.А., Шульгин В.Н. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения. — М.: Издат. дом МЭИ, 2008.
4. Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. — Л.: Гидрометеоиздат, 1978.

[25.02.16]

Автор: Колечицкий Егор Сергеевич окончил электроэнергетический факультет Московского энергетического института (МЭИ — ныне Национальный исследовательский университет (НИУ) «МЭИ») в 1957 г. В 1986 г. защитил докторскую диссертацию по расчетам электрических полей в энергетике. Профессор кафедры инженерной экологии и охраны труда НИУ «МЭИ».

Elektrichestvo (Electricity), 2016, No. 7, pp. 57–60.

About the Possibility to Diagnose the External Field Based on Induced Charges

KOLECHITSKII Yegor Sergeyeovich (Moscow Power Engineering Institute National Research University, Moscow, Russia) — Dr. Sci. (Eng.), Professor

An approach to elaborating a procedure for diagnosing bulk charges based on the results from electric field measurements at the earth surface is considered. The problem is connected with analyzing discharge channel development processes in long air gaps, including the lightning discharge channel in hitting on-land facilities. It is shown that the electric field strength above the earth surface can be determined by measuring the charges induced on grounded conductors. Calculations for conductors having the shapes of flat disks and balls are carried out. The obtained results can be used for analyzing the bulk charge distribution during, for example, lightning discharges.

Key words: lightning discharge, electric field, grounded conductors, bulk charge

REFERENCES

1. Soloveichik Yu.G., Trigubovich G.M., Chernyshev A.V., Royak M.E. *Sibirskii zhurnal industrial'noi matematiki — in Russ. (Siberian Journal of Industrial Mathematics)*, 2003, No. 6, pp. 138–153.
2. Grinberg G.A. *Izbrannye voprosy matematicheskoi teorii elektricheskikh i magnitnykh yavlenii* (Selected problems of mathematical theory of electrical and magnetic phenomena). Moscow, Publ. the USSR Academy of Sciences, 1948.

3. Beloyedova I.P., Yeliseyev Yu.V., Kolechitskii Ye.S., Plis A.I., Moiseyev V.N., Filippov A.A., Shul'gin V.N. *Raschet elektricheskikh polei ustroystv vysokogo napryazheniya* (Calculation of the electric fields of high voltage devices). Moscow, Publ. House «Moscow Power Engineering Institute», 2008.
4. Bazelyan E.M., Gorin B.N., Levitov V.I. *Fizicheskiye i inzhenernye osnovy molniezashchity* (Physical and engineering foundations of lightning protection). Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1978.

