

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОПЕРЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ ИМИТАТОРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ ВЫСОТНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ ДИПОЛЬНОГО ТИПА

METHOD FOR CALCULATING THE CROSS-SECTIONAL DIMENSIONS OF DIPOLE-TYPE HIGH-ALTITUDE NUCLEAR EXPLOSIVE PULSE SIMULATORS

Д. Б. КРАСНОПЕРОВ, Е. В. АГАПОВ, П. А. ШИРЯЕВ

ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России, Сергиев Посад, Россия

D. B. Krasnoperov, E. V. Agarov, P. A. Shiryev

*Federal state government institution «12 Central Research Institute»
of Ministry of Defense of Russian Federation, Sergiev Posad, Russia*

Аннотация. Описана основанная на законах электростатики методика расчета поперечных размеров области пространства, где с помощью имитатора дипольного типа формируется в испытательных целях однородное электрическое поле. Учтен эффект близости, то есть неравномерное распределение поверхностной плотности тока по имеющим конечные поперечные размеры излучателям имитатора. Методика позволяет задавать обоснованные требования к геометрическим размерам имитатора в зависимости от габаритных размеров объектов испытаний на действие импульсных электромагнитных полей.

Ключевые слова: электромагнитный импульс, испытания, имитатор импульсных электромагнитных полей.

Для цитирования: Методика расчета поперечных размеров имитаторов электромагнитных импульсов высотных ядерных взрывов дипольного типа / Д. Б. Красноперов [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2026. Т. 211. № 2. С. 29–34.

Annotation. A method based on the laws of electrostatics for calculating the transverse dimensions of the space where a homogeneous electric field is generated using a dipole-type emulator for testing purposes has been described. The near-field effect, i.e., the non-uniform distribution of surface current density on the finite transverse dimensions of the emulator's radiators, has been taken into account. This method allows setting reasonable requirements for the geometric dimensions of the emulator depending on the dimensions of the test objects exposed to impulse electromagnetic fields.

Key words: electromagnetic pulse, tests, impulse electromagnetic field simulator.

For citation: Method for calculating the cross-sectional dimensions of dipole-type high-altitude nuclear explosive pulse simulators / D. B. Krasnoperov [et. al] // Electromechanical matters. VNIEM studies. 2026. Vol. 211. № 2. Pp. 29–34.

Электромагнитный импульс ядерного взрыва – поражающий фактор, представляющий потенциальную опасность для радиоэлектронной аппаратуры технических систем различного назначения, в том числе и расположенных на удалении в сотни километров от эпицентра [1]. В мировой практике способность технических систем сохранять работоспособность в условиях воздействия электромагнитных импульсов проверяется в ходе испытаний [2 – 4]. Суть испытаний заключается в воспроизведении на приведенный в работоспособное состояние объект импульсных электромагнитных полей с заданными и соответствующими реальному взрыву амплитудно-временными параметрами и пространственным распределением. Для воспроизведения в качестве испытательных воздействий импульсных электромагнитных полей используются испытательные установки – имитаторы.

Важной особенностью электромагнитного импульса ядерного взрыва является его распространение на десятки и сотни километров и, как следствие, высокая однородность параметров его элек-

трической и магнитной составляющих в областях пространства, занимаемых реальными техническими системами (автомобилями, трансформаторными подстанциями и т.п.). В то же время электромагнитные поля, воспроизводимые имитаторами, обладают существенной неоднородностью уже на расстояниях около 10 м. Понятно, что различие параметров электромагнитных полей, действующих на различные составные части объекта испытаний – существенно влияющий на достоверность результатов испытаний показатель. Кроме того, на результаты испытаний влияет направление воспроизводимого воздействия электромагнитных полей.

В отечественной испытательной практике получили распространение два типа имитаторов электромагнитного импульса: связанных волн и излучающего типа (названия не совсем верно отражают принципы их работы, но закрепились исторически). Наиболее представительной в России на сегодняшний день является экспериментально-испытательная база ФГКУ «12 ЦНИИ» Минобороны России [5]. Некоторые из имитаторов показаны на рис. 1.



а



б

Рис. 1. Имитатор электромагнитных импульсов связанных волн ЭРУ-2М (а) и излучающего типа ЭРУ-2МС (б)

При этом испытательные воздействия импульсных электромагнитных полей воспроизводятся на объекты испытаний сбоку и распространяются параллельно земле. Это явно не соответствует условиям потенциально наиболее опасного для радиоэлектронной аппаратуры наземных систем реального воздействия электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва.

Очевидно, что поля, создаваемые взрывом, произведенным на высоте в несколько десятков километров, будут действовать на наземные объекты со стороны верхней полусферы. Имитаторов, моделирующих соответствующее воздействие, в России на сегодняшний день нет.

За рубежом функционируют так называемые имитаторы электромагнитного импульса дипольного типа. Они представляют собой крупногабаритный диполь, излучатели которого размещаются горизонтально на высоте в несколько десятков метров и имеют длину

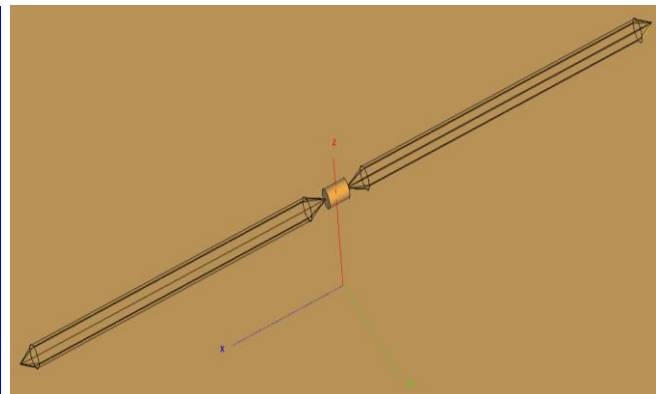
до сотни метров. Между излучателями подключают источник импульсного питания – генератор импульсных напряжений. Один из таких имитаторов показан на рис. 2. Там же показан его типовой общий вид.

Сочетая в себе основные положительные характеристики имитаторов связанных волн и излучающего типа, дипольные имитаторы обеспечивают воспроизведение испытательного воздействия со стороны верхней полусферы и представляются поэтому в качестве перспективы развития экспериментально-испытательной базы.

В общем случае требования на разработку имитатора дипольного типа включают высоту размещения излучателей, их длину и амплитудно-временные параметры выходного напряжения импульсного источника питания. Ниже рассмотрен порядок определения необходимой высоты размещения излучателей, очевидно определяющей поперечную структуру воспроизводимого имитатором электромагнитного поля.



а



б

Рис. 2. Имитатор электромагнитного импульса дипольного типа: а – внешний вид; б – расчетная модель

Очевидно также, что для расчета поперечной структуры электромагнитного поля (распределения амплитуд в пространстве) имитатора, можно воспользоваться методами электростатики с учетом принципа зеркального отображения. Расчет проведем в следующей последовательности: расчет поля вокруг тонкого проводника, размещенного над идеально проводящей поверхностью, внесение поправок, связанных с конечным радиусом излучателей и проводимостью земли.

Расчет поля вокруг тонкого проводника

Геометрия задачи расчета с введенной системой координат показана на рис. 3.

Электрическое поле E в произвольной точке наблюдения A с координатами x_0 и y_0 есть сумма полей, обусловленных тонким проводником B (E_1), размещенным на высоте b , и его зеркальным отображением C (E_2) [6]. Линейный заряд проводника τ положительный, а его зеркального отображения – отрицательный, равный $-\tau$, диэлектрическая проницаемость среды ϵ , расстояние от проводника (его зеркального отображения) до точки наблюдения $r_1(r_2)$.

Поскольку в рамках решаемой задачи важны относительные величины напряженностей полей, определим, что $\frac{\tau}{2\pi\epsilon} = 1$. Абсолютные значения напряженностей полей в точке A , обусловленных проводником и его зеркальным отображением, равны:

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{1}{\sqrt{x_0^2 + (b - y_0)^2}}; \\ E_2 &= \frac{1}{\sqrt{x_0^2 + (b + y_0)^2}}. \end{aligned} \quad (1)$$

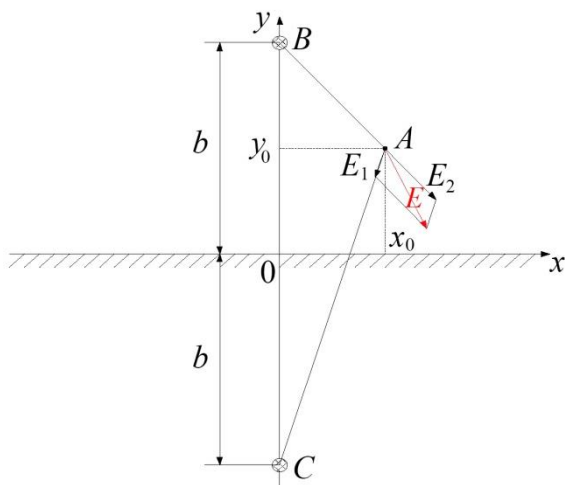


Рис. 3. Геометрия задачи расчета поля вокруг тонкого проводника

Проекции указанных напряженностей на оси соответственно равны:

$$\begin{aligned} E_{1x} &= E_1 \sin \alpha = \frac{x_0}{x_0^2 + (b - y_0)^2}; \\ E_{1y} &= E_1 \cos \alpha = \frac{b - y_0}{x_0^2 + (b - y_0)^2}; \\ E_{2x} &= E_2 \sin \beta = \frac{x_0}{x_0^2 + (b + y_0)^2}; \\ E_{2y} &= E_2 \cos \beta = \frac{b + y_0}{x_0^2 + (b + y_0)^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Это позволяет определить проекции на оси результирующего суммарного поля (интерес представляют абсолютные значения, поэтому знаки « \rightarrow » при вертикальных составляющих опустим):

$$\begin{aligned} E_x &= E_{1x} - E_{2x} = \frac{x_0}{x_0^2 + (b - y_0)^2} - \frac{x_0}{x_0^2 + (b + y_0)^2}; \\ E_y &= E_{1y} + E_{2y} = \frac{b - y_0}{x_0^2 + (b - y_0)^2} + \frac{b + y_0}{x_0^2 + (b + y_0)^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, абсолютное значение результирующего поля равно (опуская ряд промежуточных выкладок):

$$\begin{aligned} E &= \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \\ &= \frac{2b}{\sqrt{[x_0^2 + (b + y_0)^2][x_0^2 + (b - y_0)^2]}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Очевидно, что максимального значения электрическое поле достигает под проводником при $x_0 = 0$. Оно равно:

$$E(0) = \frac{2b}{b^2 - y_0^2}. \quad (5)$$

Если ввести норму неоднородности по амплитуде поля, например, не более 20%, можно составить уравнение для расчета поперечных границ области пространства, внутри которой указанное условие соблюдается:

$$E(x, y) = 0,8E(0); \quad (6)$$

$$\frac{2b}{\sqrt{[x_0^2 + (b + y_0)^2][x_0^2 + (b - y_0)^2]}} = \frac{1,6b}{b^2 - y_0^2}.$$

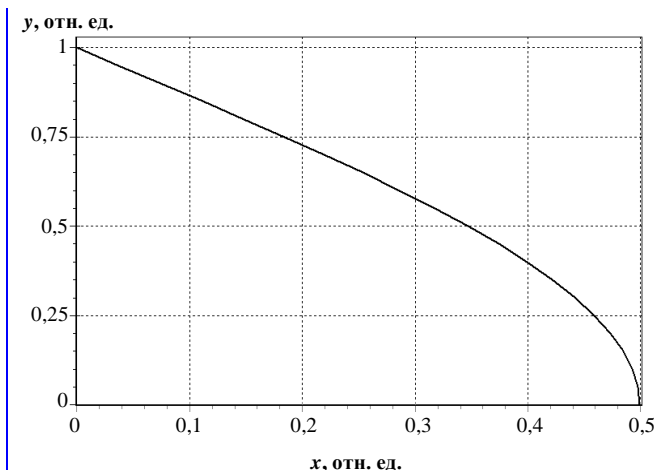


Рис. 4. Распределение кривой x_0 при норме неоднородности поля 20%

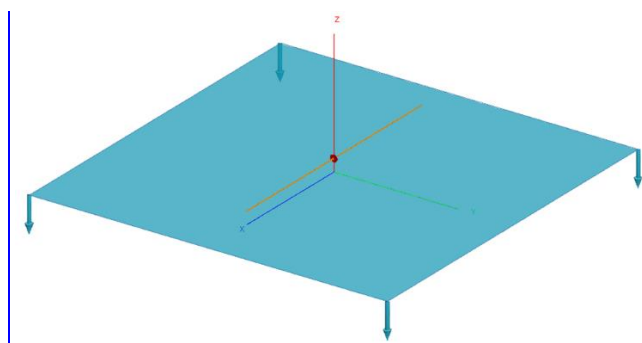


Рис. 5. Модель задачи расчета электрического поля

Решение данного уравнения относительно x_0 (опуская промежуточные выкладки) имеет вид:

$$x_0 = \sqrt{\sqrt{1,56b^4 + 0,88b^2y_0^2 + 1,56y_0^4 - b^2 - y_0^2}}. \quad (7)$$

Если ввести соотношение $y_0 = kb$, уравнение примет вид:

$$x_0 = b\sqrt{\sqrt{1,56 + 0,88k^2 + 1,56k^4 - 1 - k^2}}. \quad (8)$$

Пространственное расположение кривой x_0 для нормированной высоты подвеса проводника $b = 1$ показано на рис. 4.

Зона нормированной однородности находится под кривой.

Таким образом, при формировании требований на разработку имитатора электромагнитного импульса дипольного типа высоту подвеса проводника можно определить по условию размещения габаритов потенциальных объектов испытаний внутри зоны нормированной однородности формируемых электромагнитных полей.

Внесение поправки, связанной с конечным радиусом излучателей

Поскольку излучатель имитатора, как показано на рис. 2, имеет конечный радиус, на распределение электрического поля вокруг него влияет эффект близости. Он заключается в смещении истинной оси симметрии поля. То есть распределение поля вне проводника конечного радиуса соответствует распределению поля вокруг бесконечно тонкого проводника (его называют эквивалентным), ось которого смещена относительно оси исходного проводника на величину Δy [7]:

$$\Delta y = b - \sqrt{b^2 - r^2}, \quad (9)$$

где r – радиус проводника.

Ось эквивалентного проводника смещена в сторону поверхности земли, то есть координата оси излучателя дипольного имитатора по оси y для заданных условий равна $y_0 + \Delta y$.

Внесение поправки, связанной с конечной проводимостью земли

Электрофизические свойства грунтов, определяющие характеристики отражаемого от их поверхности электромагнитного поля, существенным образом зависят от частоты [8], а их расчет является сложной инженерной задачей. В то же время в настоящее время имеются стандартные пакеты программ для решения электродинамических задач, которые позволяют оценить влияние поверхности земли на распределение электромагнитного поля. На рис. 5 показана модель задачи расчета электрического поля, создаваемого проводником с током, размещенным горизонтально над проводящей поверхностью. Расчет реализован в программном комплексе *Feko* [9].

Ток в проводнике возбуждается источником напряжения на частотах меньших, сопоставимых и больших высоты размещения проводника (в геометрическом представлении).

Путем последовательного уменьшения удельной проводимости грунта от 10^7 до 10^{-3} См/м определялись условия распределения поля, существенным образом отличающиеся от рассчитанных по формуле (4).

Ряд результатов расчетов показан на рис. 6.

Анализ приведенных данных показывает, что значительное изменение распределения электрического поля наблюдается при проводимостях грунта от $3 \cdot 10^{-3}$ См/м и ниже для всех частот. Такие значения совершенно не соответствуют реальным грунтам в местах использования испытательного оборудования, что позволяет использовать полученные расчетные соотношения без поправок.

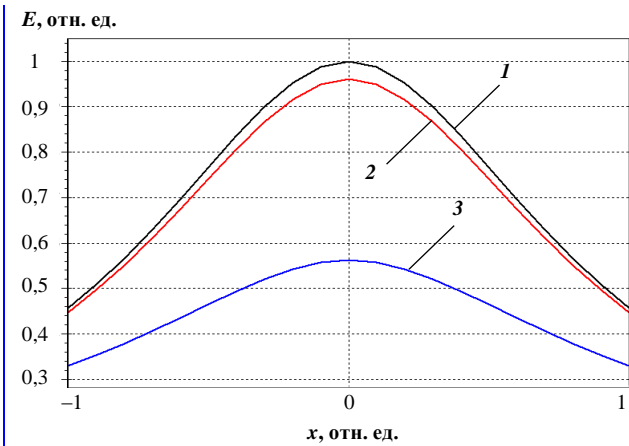


Рис. 6. Распределение электрических полей, создаваемых проводником с током: черный (1) – идеально проводящий грунт; красный (2) – проводимость грунта $3 \cdot 10^{-3}$ См/м; синий (3) – проводимость грунта – 10^{-5} См/м

Таким образом, разработана методика расчета поперечных размеров имитаторов электромагнитного импульса ядерного взрыва, позволяющая

определить минимально необходимую высоту размещения излучателей по заданным габаритам объектов испытаний.

Методика основана на применении методов и приемов расчета пространственного распределения электростатического поля, в том числе принципов зеркального отображения и суперпозиции. Методика учитывает эффект близости, обусловленный конечным радиусом излучателей.

Показано, что для характерных частот влиянием конечной проводимости грунта на применимость методики можно пренебречь.

В качестве направления дальнейших исследований представляется целесообразным разработать аналогичные методики расчета продольных размеров имитатора дипольного типа и параметров его импульсного источника питания. Это позволит разработать требования и изготовить такой имитатор, что существенным образом повысит достоверность испытаний и исследований результатов воздействия электромагнитных импульсов ядерных взрывов на технические системы.

Список источников

1. Рикетс Л. У., Бриджес Дж. Э., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты : Пер. с англ. / Под ред. Н. А. Ухина. М. : Атомиздат, 1979. 327 с.
2. Кечиев Л. Н., Балюк Н. В. Требования зарубежных стандартов по стойкости и безопасности объектов к мощным электромагнитным воздействиям // Технологии электромагнитной совместимости. 2014. № 4 (51). С. 5–16.
3. Кечиев Л. Н., Балюк Н. В. Зарубежные военные стандарты в области ЭМС / Под ред. Л. Н. Кечиева. М. : Грифон, 2014. 448 с. (Серия «Библиотека ЭМС»).
4. Бурутин А. Г., Перцев С. Ф., Балюк Н. В. Экспериментально-испытательная база Минобороны России // Технологии электромагнитной совместимости. 2010. № 1 (32). С. 33–37.
5. Физика ядерного взрыва : в 5 т. Том 3. Воспроизведение факторов взрыва / В. М. Лоборев [и др.] ; Министерство обороны Российской Федерации. Российская академия ракетных и артиллерийских наук. 12 Центральный научно-исследовательский институт. М. : Физматлит, 2013. 472 с.
6. Марков Г. Т., Чаплин А. Ф. Возбуждение электромагнитных волн. М. – Л. : Энергия, 1967. 376 с. : ил.
7. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. Учебник. 10-е изд., стереотипное. М. : Гардарики, 2003. 317 с. : ил.
8. Рекомендация МСЭ-R P.2040 (09/2013). Влияние строительных материалов и структур на распределение радиоволн на частотах выше приблизительно 100 МГц. Серия Р. Распространение радиоволн [Электронный ресурс]. Международный союз электросвязи. Женева, 2014. URL : <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2040/en> (дата обращения: 22.01.2026).
9. Банков С. Е., Курушин А. А. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO. М. : ЗАО «НПП «РОДНИК», 2008. 246 с.

References

1. Rickerts L. U., Bridges J. E., Maylett J. Electromagnetic pulse and protection methods: Translated from English / Ed. by N. A. Ukhin. M. : Atomizdat, 1979. 327 p.
2. Kechiev L. N., Baluk N. V. Requirements of foreign standards for the stability and safety of objects to powerful electromagnetic impacts // Technologies of electromagnetic compatibility. 2014. No. 4 (51). P. 5–16.
3. Kechiev L. N., Baluk N. V. Foreign military standards in the field of EMS / Ed. by L. N. Kechiev. M. : Griffin, 2014. 448 p. (EMS Library).
4. Burotyn A. G., Percev S. F., Baluk N. V. Experimental-testing base of the Russian Ministry of Defence. Technologies of electromagnetic compatibility. 2010. No. 1 (32). P. 33–37.
5. Physics of nuclear explosion : in 5 vol. Vol. 3. Reproduction of explosion factors / Loborev V. M. [et al.] ; Ministry of Defence of the Russian Federation. Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences. 12 Central Research Institute. 2013. 472 p.

6. Markov G. T., Chaplin A. F. Excitation of electromagnetic waves. М. – Л. : Energy publishing house, 1967. 376 p. : with ill.
7. Bessonov L. A. Theoretical foundations of electrical engineering. Electromagnetic field. Textbook. 10th ed., stereotype. М. : Gardariki, 2003. 317 p. : ill.
8. Recommendation MSE-R P.2040 (09/2013). Influence of building materials and structures on the distribution of radio waves at frequencies above approximately 100 MHz. Series R. Radio propagation [Electronic resource]. International Telecommunication Union. Geneva, 2014. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2040/en> (дата обращения: 22.01.2026).
9. Bankov S. E., Kurushin A. A. Calculation of Radiated Structures Using FEKO. М. : ЗАО "NPP 'RODNICK'". 2008. 246 p.

Поступила в редакцию 26.02.2026

The article was submitted 26.02.2026

Информация об авторах

Дмитрий Борисович Красноперов – доктор технических наук, начальник отдела, т. 8 (496) 545-62-00, e-mail: fgu12tsnii@mil.ru;

Евгений Васильевич Агапов – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела, т. 8 (496) 545-62-00, e-mail: fgu12tsnii@mil.ru;

Петр Анатольевич Ширяев – научный сотрудник, т. 8 (496) 545-62-00, e-mail: fgu12tsnii@mil.ru.

Information about the authors

Dmitriy Borisovich Krasnoperov – Doctor of Technical Sciences, Division head, t. 8 (496) 545-62-00, e-mail: fgu12tsnii@mil.ru;

Evgeniy Vasilevich Agapov – Candidate of Technical Sciences, Assistant division head, t. 8 (496) 545-62-00, e-mail: fgu12tsnii@mil.ru;

Petr Anatolyevich Shirayev – Scientific Employee, t. 8 (496) 545-62-00, e-mail: fgu12tsnii@mil.ru.