

## Проникновение электромагнитного импульса в экранированные подземные сооружения

ЛЮБОМУДРОВ А.А.

*Исследуется электрическое поле в заглубленных экранированных сооружениях в квазистационарном приближении. Такие методы расчёта экранов разработаны достаточно полно. Однако в них не рассматривались экраны в грунте, имеющие с грунтом различную электрическую связь. Предложены эквивалентные расчетные схемы экранов сооружений. Исследованы случаи электрического контакта экрана с грунтом по всей поверхности и заземлённого экрана. Выведены выражения для расчёта импульсного электрического поля внутри экранов в форме интегралов свёртки. Получены импульсные характеристики эквивалентных схем экранов.*

*Ключевые слова: электромагнитное экранирование, подземные высокозащищённые сооружения, импульсное электромагнитное поле, электромагнитные экраны в проводящей среде, импульсные характеристики экранов*

Воздействие мощных импульсных электромагнитных полей на радиоэлектронную аппаратуру, размещённую в заглубленных сооружениях с высокой степенью механической защиты, может привести к выходу из строя или временной потере работоспособности системы связи и управления. Источниками таких электромагнитных импульсов могут быть молнии, электростатические разряды, преднамеренные воздействия, в том числе электромагнитные импульсы (ЭМИ) ядерных взрывов [1]. Одним из способов защиты радиоэлектронного оборудования подземных сооружений от мощных электромагнитных помех является экранирование конструкции в целом.

В статье исследуется электрическое поле в заглублённых экранированных сооружениях в квазистационарном приближении. Методы расчёта таких экранов разработаны достаточно полно. Для экранов, находящихся в воздухе, задача рассмотрена в [2] и более широко в [3], учёт экранирования поглощением был проведён в [4]. Однако в этих работах не рассматривались экраны в грунте, имеющие с ним различную электрическую связь.

**Трансформация спектра импульса при проникновении в грунт.** Экранирующие свойства экранов, окружённых проводящей средой, отличаются от свойств таких же экранов, находящихся в диэлектрике. Это проявляется, в первую очередь, при взаимодействии электрического поля с экраном. Вследствие того что электропроводность грунта гораздо меньше электропроводности оболочки экрана, изменение экранирующих свойств при изменении электропроводности среды будет иметь место лишь по отношению к электрическому полю, поскольку экранирующий эффект магнитного поля определяется токами в замкнутой оболочке экрана. Поэтому при расчёте проникновения импульсного магнитного поля в экранированное сооружение

можно воспользоваться уже известными результатами, полученными в [3].

В отличие от магнитного поля механизм экранирования импульсного электрического поля связан со свойствами слабо проводящей окружающей среды. Длины волн в основной части спектра, действующих на экранированное подземное сооружение электромагнитных импульсов, гораздо больше размеров экранов, поскольку высокочастотная часть спектра существенно ослабляется грунтом. Поэтому при оценке полей внутри экранов правомерно решать задачу в квазистационарном приближении, используя теорию электрических цепей и представляя экран в виде электрической цепи с сосредоточенными постоянными. Применительно к протяжённым сооружениям (например метро, туннель) при решении задачи экранирования может быть использовано представление сооружения в виде длинной линии.

**Связь электрического поля в экране с током экранирующей оболочки.** В данной работе заглубленное экранированное сооружение представляется в виде полого проводника, находящегося в проводящей среде. В проводнике импульсным электромагнитным полем наводится ЭДС, протекающий по проводнику ток возбуждает электромагнитное поле во внутренней полости сооружения.

Для определённости примем сооружение в форме полого цилиндра. Различие в эффективности применения экранов разной формы незначительно. Эффективность экранирования плоского, цилиндрического и сферического экранов выражается примерно соотношением 3:2:1, т. е. по степени экранирования конструктивные разновидности экранов можно расположить в следующем порядке: плоский экран, цилиндр, сфера (для одинакового материала стенок, их толщины и характерных размеров). Таким образом, расчёты, проведённые для

цилиндрических экранов, могут быть перенесены на экраны других простых геометрических форм.

Экран, поперечные размеры которого гораздо меньше продольных, находящийся в помехонесущем электрическом поле, является по существу линейной электрической приёмной антенной. Ток экрана может быть определён из хорошо известной общей эквивалентной схемы короткой приёмной антенны. По найденному току в оболочке экрана можно найти поле внутри него.

Экран может иметь различную электрическую связь с грунтом, которая влияет на ток экрана, наводимый помехонесущим полем. Рассмотрим два типичных вида электрической связи:

неизолированный экран, который имеет электрический контакт с окружающим его грунтом по всей своей внешней поверхности;

экран, поверхность которого изолирована от грунта, а одно из оснований имеет электрический контакт с грунтом (заземление на одном из оснований цилиндра); условно назовём такой экран изолированным.

Неизолированный цилиндрический экран в проводящей среде представляет собой отрезок однопроводной линии с потерями, постоянная распространения которой  $g$  практически равна постоянной распространения окружающей среды (грунта)  $g_{гр} = \sqrt{j\omega\mu_0\epsilon_{гр}S_{гр}}$ , где  $\omega$  – угловая частота поля;  $\mu_{гр}$ ,  $S_{гр}$  – магнитная проницаемость и проводимость грунта;  $\mu_0$  – магнитная постоянная.

Напряжённость электрического поля на внешней поверхности экранирующей оболочки  $E_s(r_2)$  с внутренним и внешним радиусами  $r_1$  и  $r_2$  связана с плотностью тока на внешней поверхности соотношением

$$E_s(r_2) = \frac{1}{S_{об}} i_s(r_2), \tag{1}$$

где  $S_{об}$  – проводимость металлической оболочки.

Напряжённость на внутренней поверхности экрана определяется решением волнового уравнения. Отношение комплексного спектра напряжённости импульсного электрического поля на внутренней поверхности оболочки к его спектру на внешней поверхности выражается через цилиндрические функции 1- и 2-го рода:

$$\frac{S_{E_i}(j\omega, r_1)}{S_{E_s}(j\omega, r_2)} = \frac{J_0(k_{об}r_1)N_1(k_{об}r_1) - J_1(k_{об}r_1)N_0(k_{об}r_1)}{J_0(k_{об}r_2)N_1(k_{об}r_1) - J_1(k_{об}r_1)N_0(k_{об}r_2)}, \tag{2}$$

где  $k_{об} = \sqrt{-j\omega\mu_0\epsilon_{об}S_{об}}$ . Учитывая, что  $|k_{об}r| \gg 1$ , используем асимптотические формулы для цилинд-

рических функций и получим связь спектра на внутренней поверхности экрана со спектром на его внешней поверхности [5]:

$$S_{E_i}(j\omega) = \sqrt{\frac{r_2}{r_1}} \frac{1}{\cos k_{об}d} S_{E_s}(j\omega), \tag{3}$$

где  $d = (r_2 - r_1)$  – толщина оболочки экрана.

Применяя к (3) обратное преобразование Фурье, учитывая, что  $\sqrt{r_2/r_1} \gg 1$ , и обозначая  $g_{об} = \sqrt{j\omega\mu_0\epsilon_{об}S_{об}}$ , запишем:

$$E_i(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{j\omega t}}{\text{ch} g_{об}d} S_{E_s}(j\omega) d\omega. \tag{4}$$

Используя связь между преобразованиями Фурье и Лапласа, получаем интеграл обратного преобразования

$$E_i(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{pt}}{\text{ch}(\sqrt{p\mu_0\epsilon_{об}S_{об}}d)} S_{E_s}(p) dp;$$

в условной записи, показывающей, что  $E_i(t)$  есть

$$\text{оригинал изображения } \frac{S_{E_s}(p)}{\text{ch}(\sqrt{p\mu_0\epsilon_{об}S_{об}}d)};$$

$$E_i(t), \frac{S_{E_s}(p)}{\text{ch}(a\sqrt{p})},$$

где  $S_{E_s}(p)$  – изображение напряжённости электрического поля  $E_s(t)$  на внешней поверхности экрана;  $a = \sqrt{\mu_0\epsilon_{об}S_{об}}d$  – приведённая толщина оболочки.

С помощью таблиц интегральных преобразований [6] получаем выражение для напряжённости электрического поля на внутренней поверхности экранирующей оболочки:

$$E_i(t) = \frac{a}{\sqrt{p}} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-1)^n \int_0^t E_s(t-t) \frac{\exp\left[-\frac{a^2}{t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \frac{1}{t} \frac{d}{dt}\right]}{t^{3/2}} dt. \tag{5}$$

Поскольку поперечные размеры экрана гораздо меньше содержащихся в импульсном спектре длин волн, то поле по сечению экрана будет практически постоянно и равно  $E_i(t)$ .

Формула (5) имеет вид интеграла наложения и связывает импульсное электрическое поле внутри цилиндрического экрана с продольной напряжённостью электрического поля на его наружной поверхности. Из (5) следует, что прохождение поля через проводящую оболочку эквивалентно прохождению импульса напряжения через че-

тырёхполосник, имеющий импульсную характеристику вида

$$g(t) = \frac{a}{\sqrt{\rho}} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-1)^n \frac{\exp\left\{-\frac{a^2}{4t} - \frac{1}{2\sigma} \frac{a^2}{t}\right\}}{t^{3/2}} \quad (6)$$

Для расчёта поля внутри экрана необходимо найти связь поля на его внешней поверхности  $E_s(t)$  с током экрана  $I(t)$ . Используя (1), вместо (4) получим

$$E_i(t) = \frac{1}{2\rho} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{j\omega t}}{s_{об} \operatorname{ch}gd} S_{i_s}(j\omega) d\omega \quad (7)$$

Связь между комплексной спектральной плотностью тока экрана  $S_I(j\omega)$  и плотностью тока на его внешней поверхности  $S_{i_s}(j\omega)$  при  $|k_{об}r| \gg 1$  имеет вид

$$S_I(j\omega) = \frac{2pr_2}{(\sqrt{j\omega w_0 m_{об} s_{об}} \operatorname{cth}(a\sqrt{j\omega}))} S_{i_s}(j\omega) \quad (8)$$

Подставив (7) в (8) и выполнив преобразования по Лапласу, получим с применением таблиц интегральных преобразований:

$$E_i(t) = \frac{1}{2pr_2} \sqrt{\frac{m_{об}}{\rho s_{об}}} \int_0^t I(t-\tau) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^2}{4t} \exp\left\{-\frac{a^2}{4t} - \frac{1}{2\sigma} \frac{a^2}{t}\right\} (2n-1)^2 \frac{1}{4t} d\tau \quad (9)$$

Если спектр импульса тока лежит в области достаточно высоких частот, где выполняются неравенства  $\frac{a^2}{4t} \gg 1$  и  $w^2 \gg \frac{1}{a^2}$  (при сохранении условия квазистационарности), в (9) можно удержать только первый член ряда, т.е.

$$E_i(t) = \frac{1}{2pr_2} \sqrt{\frac{m_{об}}{\rho s_{об}}} \int_0^t I(t-\tau) \frac{a^2}{4t} \exp\left\{-\frac{a^2}{4t} - \frac{1}{2\sigma} \frac{a^2}{t}\right\} \frac{1}{4t} d\tau \quad (10)$$

В случае низкочастотного спектра, когда  $w < \frac{1}{a^2}$ ,

$$E_i(t) = \frac{I(t)}{2pr_2 ds_{об}} \quad (11)$$

Формула (11), как и следовало ожидать, выражает закон Ома для постоянного тока. Соотношение (10) показывает, что если известен ток в экранирующей оболочке, то электрическое поле внутри экрана определено.

**Импульсная характеристика и электрическое поле в неизолированном экране.** В случае если экран в форме цилиндра с длиной, в несколько раз большей диаметра, имеет электрический контакт с грунтом по всей поверхности, он может рассматриваться по отношению к электрическому полю как короткий отрезок неизолированного линейного проводника в грунте, являющегося симметричной приёмной антенной с нулевой нагрузкой. При диаметре сооружения, значительно меньшем длины волны, постоянная распространения волны тока по экрану практически совпадает с постоянной распространения волны в грунте.

Для определения тока экрана необходимо знать его входное сопротивление. Входное сопротивление экрана, имеющего контакт с грунтом по всей поверхности, зависит от полного внутреннего сопротивления экрана, его внешнего сопротивления (внешней индуктивности) и полного сопротивления окружающего экран грунта, рассчитанных на единицу длины. Поскольку проводимость оболочки экрана гораздо больше проводимости окружающей среды, а диаметр экрана гораздо меньше длин волн в спектре электромагнитного импульса, то входное сопротивление экрана как отрезка однопроводной линии совпадает с характеристическим сопротивлением этой линии:

$$Z_0 = \frac{Z_0}{g_{л}}$$

где  $Z_0$  — полное сопротивление линии на единицу длины;  $g_{л}$  — постоянная распространения линии; в случае неизолированной линии значение  $g_{л}$  равно постоянной распространения грунта  $g_{гр}$ .

Если известно  $Z_0$ , то спектральная плотность тока оболочки может быть найдена из соотношения

$$S_I(j\omega) = \frac{S_{E_0}(j\omega)}{Z_0} l,$$

где  $S_{E_0}(j\omega)$  — спектральная плотность напряженности помехонесущего электрического поля;  $l$  — длина цилиндрического экрана.

Сопротивление  $Z_0$  включает рассчитанные на единицу длины внутреннее сопротивление оболочки экрана  $Z_{об}$ , её внешнее индуктивное сопротивление и полное сопротивление грунта.

Оценки показывают, что в рассматриваемой нами квазистационарной области, когда  $(r\sqrt{wm_0 m_{об} s_{об}}) < 1$ , внутреннее индуктивное со-

противление оболочки гораздо меньше внешнего, а её активное сопротивление практически равно сопротивлению постоянному току  $R_{об}^0$ .

Внешняя индуктивность единицы длины оболочки

$$L_{об}^0 = \frac{\mu_0 \epsilon_0}{2\pi \epsilon} \ln \frac{2l}{r_1} - \frac{\ddot{\varphi}}{\dot{\varphi}}$$

а полное погонное сопротивление грунта для токов, вытекающих из цилиндрического экрана [7],

$$Z_{гр}^0 = - \frac{k_{гр}}{2\pi m_{гр} r_1} \frac{H_0^{(2)}(k_{гр} r_2)}{H_1^{(2)}(k_{гр} r_2)},$$

где  $H_0^{(2)}(k_{гр} r_2)$ ,  $H_1^{(2)}(k_{гр} r_2)$  — функции Ганкеля первого и второго порядков.

При малых аргументах функций Ганкеля

$$Z_{гр}^0 = \frac{w m_{гр} \mu_0}{8} + \frac{j w m_{гр} \mu_0}{2\pi} \ln \frac{2}{1,781 r_2 \sqrt{w m_{гр} \mu_0 s_{гр}}}$$

Для упрощения расчётов учтём, что частота, стоящая в степени  $-1/2$  под знаком логарифма, слабо влияет на значение  $Z_{гр}^0$ . Действительно, при

$s_{гр} = 10^{-3}$  1/Ом·м и  $r_2 = 5$  м значение  $w = 10$  1/с и  $\ln \frac{2}{1,781 r_2 \sqrt{w m_{гр} \mu_0 s_{гр}}} \gg 9$ , а на частоте  $10^6$  1/с логарифм равен двум. Поэтому целесообразно под знаком логарифма переменную  $w$  заменить на некоторое среднее для спектра электромагнитного импульса значение  $\bar{w}$ .

Тогда получим выражение для характеристического сопротивления отрезка однородной линии, эквивалентной экрану:

$$Z_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon}{\epsilon_0 \epsilon} L_{об}^0 + \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_{гр} \mu_0}{s_{гр}}} \ln \frac{2}{1,781 r_2 \sqrt{w m_{гр} \mu_0 s_{гр}}} - \frac{j}{8} \sqrt{\frac{\mu_0 m_{гр}}{s_{гр}}} \frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}} \sqrt{jw} + \frac{R_{об}^0}{\sqrt{w m_{об} \mu_0 m_{гр} s_{гр}}} = z \sqrt{jw} + \frac{R_{об}^0}{\sqrt{w m_{об} \mu_0 m_{гр} s_{гр}}} \quad (12)$$

Используя полученные соотношения, применив преобразования Лапласа, получим связь напряжённости электрического поля внутри экрана с напряжённостью действующего на экран помехоносущего электрического поля  $E_0(t)$ :

$$E_i(t) = \frac{al}{2\pi r_2 z} \sqrt{\frac{\mu_0 m_{об}}{\mu_0 s_{об}}} \int_0^t E_0(t-t) \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) t^{-3/2} \cdot$$

$$\exp\left\{-\frac{a}{4t}\right\} \frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}} \quad (13)$$

Следовательно, неизолированный от грунта экран с точки зрения проникновения в него электрического поля может быть заменён эквивалентным четырёхполюсником с импульсной характеристикой вида

$$g(t) = \frac{al}{2\pi r_2 z} \sqrt{\frac{\mu_0 m_{об}}{\mu_0 s_{об}}} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) t^{-3/2} \exp\left\{-\frac{a}{4t}\right\} \frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}} \quad (14)$$

При коротких импульсах, когда  $\frac{a^2}{4t} \gg 1$ ,  $w > \frac{1}{a^2}$ , в сумме можно удержать только первый член, тогда

$$g(t) \approx \frac{al}{2\pi r_2 z} \sqrt{\frac{\mu_0 m_{об}}{\mu_0 s_{об}}} t^{-3/2} \exp\left\{-\frac{a}{4t}\right\} \frac{\dot{\varphi}}{\dot{\varphi}} \quad (15)$$

Для низкочастотного спектра, когда  $w < \frac{1}{a^2}$ ,  $shz \gg z$  и

$$g(t) \approx \frac{l}{2\pi^{3/2} s_{об} r_2 z d} t^{-1/2}, \quad (17)$$

а электрическое поле в экране равно

$$E_i(t) = \frac{l}{2\pi^{3/2} s_{об} r_2 z d} \int_0^t \frac{E_0(t-t)}{\sqrt{t}} dt. \quad (18)$$

На рис. 1 представлена импульсная характеристика электрического поля неизолированного экрана, имеющего контакт с грунтом по всей поверх-

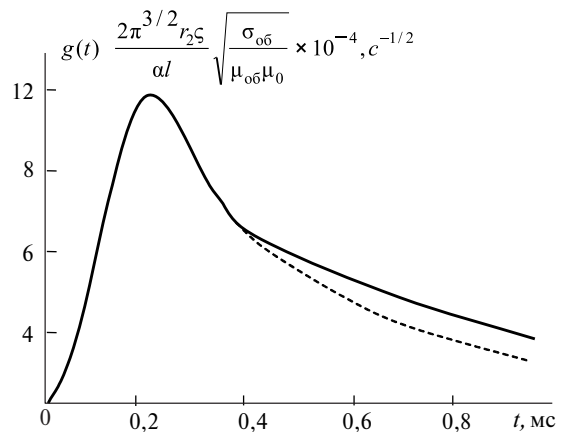


Рис. 1

ности, для  $a = 3 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{1/2}$ , сплошной линией показана импульсная характеристика, рассчитанная по точной формуле (14), штриховой — характеристика, рассчитанная по приближённой высокочастотной формуле (15).

Расчёт по приближённой высокочастотной формуле приводит к уменьшению длительности заднего фронта импульса, в то время как передний

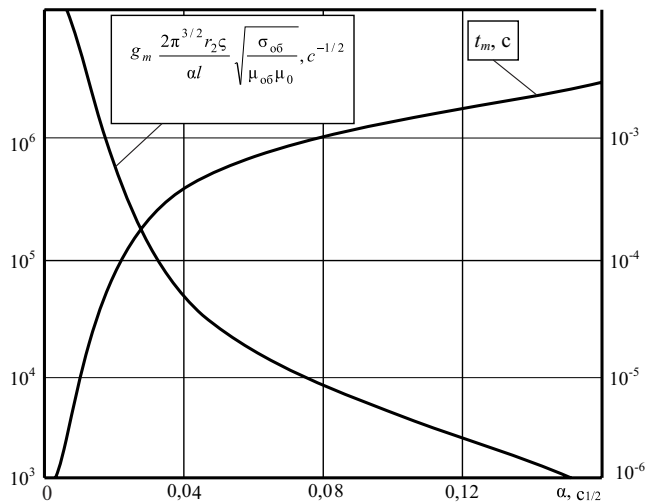


Рис. 2

фронт как по точной (в пределах принятых допущений), так и по приближённым формулам воспроизводится практически одинаково.

На рис. 2 показаны зависимости максимального значения  $g_m(t)$  (в единицах  $\text{с}^{-1/2}$ ) и времени достижения этого максимального значения  $t_m$  от приведённой толщины оболочки экрана.

**Импульсная характеристика и электрическое поле в изолированном заземлённом экране.** Рассмотрим теперь заземлённый цилиндрический экран, электрически изолированный от грунта слоем диэлектрика и имеющий электрический контакт только на одном основании. Примером такого экрана может служить вертикально расположенное заглублённое в грунт сооружение, покрытое по внешней поверхности битумной обмазкой, имеющее металлическую гидроизоляцию и заземлённое в нижней части.

Если экран имеет контакт с грунтом на одном из концов и сопротивление контакта равно нулю, то такой экран можно рассматривать как отрезок коаксиальной линии, возбуждаемый на неизолированном торце экрана генератором ЭДС с нулевым внутренним сопротивлением и нагруженный на сопротивление  $Z_H$ , равное ёмкостному сопротивлению ёмкости изолированного торца экрана относительно грунта  $C_T$ . Однако значение  $C_T$  мало. Действительно, если принять, например, диэлектриче-

скую проницаемость изолирующего покрытия  $\epsilon_{\text{из}} = 2,5$ , радиус экрана  $r_2 = 4$  м и толщину покрытия  $d_{\text{из}} = 10$  см, то ёмкость составит примерно  $10^{-8}$  Ф и сопротивление току экрана в полосе частот спектра импульса будет значительно больше характеристического сопротивления экрана, которое составляет единицы ом. Следовательно, можно считать  $Z_H(x=l) = \infty$ ,  $Z_H(x=0) = 0$ .

В этом случае экран представляет собой ёмкостное сопротивление, значение ёмкости  $C_3 = C^0 l$ , где  $C^0$  — погонное значение ёмкости экрана:

$$C^0 = \frac{2\pi\epsilon_{\text{из}}\epsilon_0}{\ln \frac{r_2 + d_{\text{из}}}{r_2}}$$

где  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная.

В квазистационарном случае спектральная плотность тока экрана

$$S_I(j\omega, x) = \frac{S_{E_0}(j\omega)l}{Z_3} e^{-\frac{x}{l}} \quad (19)$$

Полное входное сопротивление экрана  $Z_3 = \frac{1}{j\omega C_0}$ . Из (19) следует, что электрический ток

максимален у основания экрана, имеющего контакт с грунтом. У изолированного конца ток практически равен нулю.

Применяя преобразования, аналогичные тем, которые использовались в случае неизолированного экрана, и учитывая, что в диапазоне частот, соответствующих принятому условию квазистационарности, ёмкостное сопротивление гораздо больше поверхностного сопротивления оболочки, получаем электрическое поле внутри экрана и, соответственно, импульсную характеристику экрана в электрическом поле:

$$E_i(t) = \frac{C_3 l}{16\rho^{3/2} r_2} \sqrt{\frac{m_0 m_{b6}}{s_{o6}}} \int_0^t E_0(t-t) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\frac{2n-1}{4} \frac{a}{t}}}{t^{5/2}} - 12(2n-1) \frac{e^{-\frac{(2n-1)^2 a^2}{4t}}}{t^{5/2}} dt; \quad (20)$$

$$g(t) = \frac{C_3 l}{16\rho^{3/2} r_2} \sqrt{\frac{m_0 m_{b6}}{s_{o6}}} \frac{1}{t^{5/2}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\frac{2n-1}{4} \frac{a}{t}}}{t^{5/2}} - 12(2n-1) \frac{e^{-\frac{(2n-1)^2 a^2}{4t}}}{t^{5/2}}. \quad (21)$$



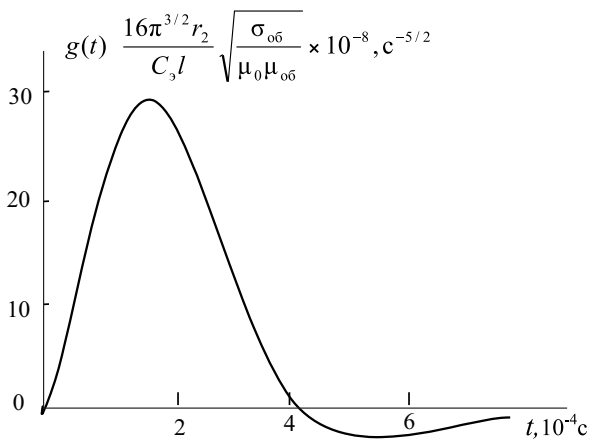


Рис. 3

На рис. 3. показан вид импульсной характеристики изолированного экрана в электрическом поле с заземлением на одном из концов для приведённой толщины экрана  $a = 0,06 \text{ c}^{1/2}$ .

Импульсная характеристика имеет вид затухающего колебания. Наибольшие значения имеют амплитуды первой и второй полуволн (квазиполупериодов). Амплитуда третьей полуволны более чем на два порядка ниже, чем второй. На рис. 4 представлена зависимость амплитуды первой полуволны от приведённой толщины оболочки, а также показаны моменты времени достижения этих амплитудных значений.

Выражение (20) может быть упрощено в тех случаях, когда преобладающие в спектре электромагнитного поля частоты либо значительно больше (при сохранении условия квазистационарности), либо значительно меньше  $1/a^2$ .

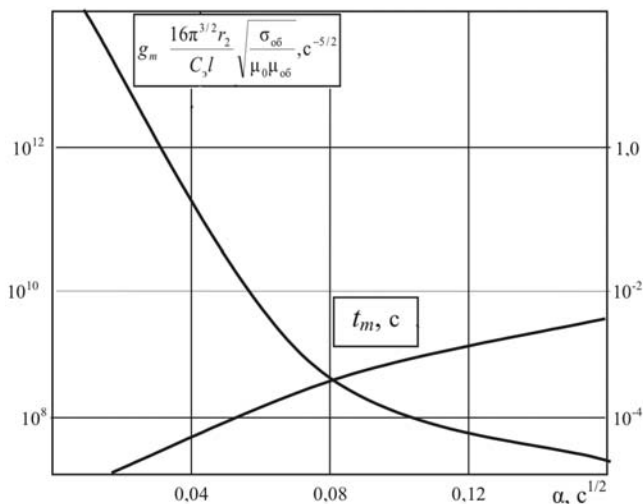


Рис. 4

Для высокочастотного поля, когда  $w \gg \frac{1}{a^2}$ ,  $\frac{a^2}{4t} \gg 1$ , удерживая в (20) только первый член ряда, приближённо получаем:

$$E_i(t) = \frac{C_3 l}{16\rho_{об}^{3/2} r_2} \sqrt{\frac{m_0 m_{об}}{s_{об}}} \dot{E}_0(t-t_0) \frac{1}{t^{5/2}} \frac{e^{-\frac{a^2}{4t}}}{e^{-\frac{a^2}{4t}}} - 12 \frac{a^2}{c t} \ddot{E}_0(t-t_0) + 12 \frac{a^2}{c t} \dot{E}_0(t-t_0) \frac{d}{dt} \quad (22)$$

В низкочастотном поле ( $w \ll \frac{1}{a^2}$ ,  $\frac{a^2}{4t} \ll 1$ ), пренебрегая поверхностным эффектом в оболочке и учитывая, что  $\text{sh} a \sqrt{jw} \approx a \sqrt{jw}$ , получаем:

$$E_i(t) = \frac{C_3 l}{16\rho_{об} s_{об} r_2 d} \frac{dE_0}{dt} = R_3 C_3 \frac{dE_0}{dt}, \quad (23)$$

где  $R_3 = \frac{l}{2\rho_{об} r_2 d}$  – сопротивление оболочки постоянному току.

Следовательно, для низкочастотной области спектра помехонесущего импульсного электрического поля изолированный по поверхности заземлённый на одном из концов экран представляет собой дифференцирующую цепь с постоянной времени  $t_3 = R_3 C_3$ .

**Сравнение экранирующих свойств неизолированного и заземлённого изолированного экранов.** Сравнение показывает, что проникновение импульсного электрического поля в экраны существенно зависит от электрической связи экранов с грунтом.

На рис. 5 показана зависимость отношения максимальных значений импульсных характеристик неизолированного и изолированного экранов

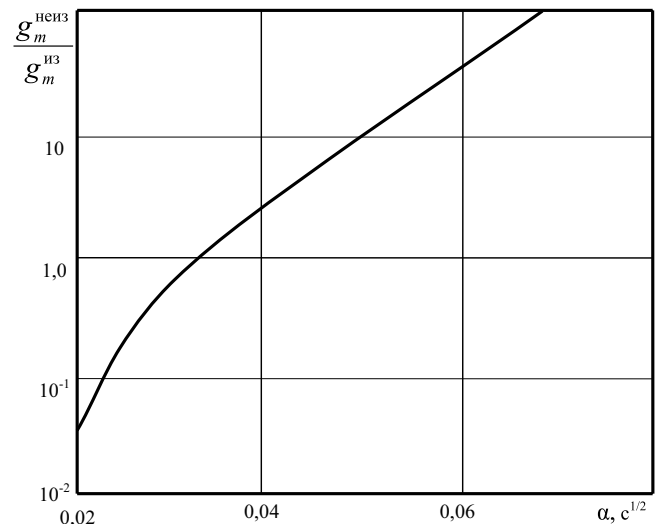


Рис. 5

$g_m^{\text{неиз}} / g_m^{\text{из}}$  от приведённой толщины оболочки экрана  $a = \sqrt{\epsilon_0 \epsilon_{\text{об}} \epsilon_{\text{об}}} d$ . С увеличением приведённой толщины экранирующие свойства неизолированного экрана существенно улучшаются. Это связано с тем, что при малых толщинах существенную роль играет механизм экранирования отражением, в то время как при больших — экранирование поглощением, поскольку ёмкостная связь экрана с грунтом приводит к дифференцированию импульса помехоносущего поля. Действительно, при проникновении электрического поля в изолированный экран, заземлённый на одном из концов, происходит дифференцирование формы импульса и смещение спектра импульса в область высоких частот. При этом поглощение поля в оболочке (скин-эффект)

*Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 5, pp. 47–53.*

оказывается более существенным, чем в случае неизолированного экрана.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балуев Н.В., Кечиев Л.Н., Степанов П.В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты. — М.: ООО «Группа ИДТ», 2007, 478 с.
2. Любомудров А.А. Импульсные характеристики электромагнитных экранов. — *Электричество*, 1977, № 11, с. 90–93.
3. Любомудров А.А., Синогейкин К.Н. Электромагнитные экраны конструкций космических аппаратов. В кн.: Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных исследований. — М.: Изд-во Московского авиационного института — ПРИНТ, 2014, т. 3, с. 1438–1481.
4. Кузнецов В.В., Любомудров А.А. Синтез эквивалентных схем электромагнитных экранов. — *Радиотехника*, 1980, т. 35, № 7, с. 45–48.

## Penetration of Electromagnetic Impulse into Shielded Underground Structures

A.A. LYUBOMUDROV

*The electric field in buried shielded structures is considered in quasi steady-state approximation. Such shield calculation methods have been developed to a sufficiently full extent. However, these methods did not consider shields in soil having different electric coupling with the soil. Equivalent theoretical circuits for analyzing the shields of structures are proposed. Cases involving a shield electrically contacting with the soil over the entire surface and a grounded shield are investigated. Expressions for calculating the impulse electric field inside the shields in the form of convolution integrals are derived. The impulse characteristics of equivalent shield circuits are obtained.*

**Key words:** *electromagnetic shielding, highly secured underground structures, impulse electromagnetic field, electromagnetic shields in conducting medium, shield impulse characteristics*

#### REFERENCES

1. Balyuk N.V., Kechiyev L.N., Stepanov P.V. *Moshchnyi elektromagnitnyi impul's: vozdeistviye na elektronnye sredstva i metody zashchity* (Powerful electromagnetic pulse: effects on electronic means and methods of protection). Moscow, Publ. LLC «Gruppa IDT», 2007, 478 p.
2. Lyubomudrov A.A. *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1977, No. 11, pp. 90–93.
3. Lyubomudrov A.A., Sinogeikin K.N. *Kniga: Proektirovaniye avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov dlya fundamental'nykh issledovaniy* (Book: Projecting of automatic space apparatuses for fundamental researches). Moscow, Publ. of Moscow Aviation Institute — PRINT, 2014, vol. 3, pp. 1438–1481.
4. Kuznetsov V.V., Lyubomudrov A.A. *Radiotekhnika – in Russ. (Radio Engineering)*, 1980, vol. 35, No. 7, pp. 25–48.
5. Dzhefris G., Svirls B. *Metody matematicheskoi fiziki. Vyp. 3* (Methods of mathematical physics. Iss. 3). Moscow, Publ. Mir, 1970, 343 p.
6. Beitmen G., Erdei A. *Toblitsy integral'nykh preobrazovaniy* (Tables of integral transforms). Moscow, Publ. Nauka, 1969, vol. 1, 344 p.
7. King R., Smit G. *Antenny v material'nykh sredakh* (Antennas in material medias). Moscow, Publ. Mir, 1984, 824 p.

*Author: Lyubomudrov Aleksandr Aleksandrovich (Moscow, Russia) — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Petr Great Military Academy.*

5. Джефрис Г., Свирлс Б. Методы математической физики. Вып. 3. — М.: Мир, 1970, 343 с.
6. Бейтмен Г., Эрдейи А. Таблицы интегральных преобразований. — М.: Наука, 1969, т. 1, 344 с.
7. Кинг Р., Смит Г. Антенны в материальных средах. — М.: Мир, 1984, 824 с.

[01.10.14]

*Автор: Любомудров Александр Александрович окончил реактивный факультет Военной инженерной артиллерийской академии в 1954 г. Защитил диссертацию на соискание учёной степени доктора технических наук в 1972 г. Профессор Военной академии ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого.*