

УДК 621.317.3

**В.В. КНЯЗЕВ, С.И. МЕЛЬНИК, С.П. ШАЛАМОВ****МЕТОДИКА РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИМПУЛЬСА В ПОЛЕОБРАЗУЮЩЕЙ СИСТЕМЕ ПОЛОСКОВОГО ТИПА**

У статті представлена методика моделювання у середовищі COMSOL процесів поширення ЕМІ в полозковій системі відкритого типу, яка може бути застосована для будь-якого варіанту полозкової системи. Результати моделювання показали, що вимоги стандарту MIL STD 461G за ступенем однорідності поля 6 дБ, легко задовольняються будь-якою системою полеутворення за використання полозкової лінії. Розглянута полеутворююча система традиційного типу з перехідними секціями та горизонтальною центральною частиною.

**Ключові слова:** числове моделювання, електромагнітний імпульс, полеобразующая система, полозкова лінія, зона однорідності.

В статье представлена методика моделирования в среде COMSOL процессов распространения ЭМИ в полосковой системе открытого типа, которая может быть применена для любого варианта полосковой системы. Результаты моделирования показали, что требования стандарта MIL STD 461G по степени однородности поля 6 дБ, легко удовлетворяются любой системой полеобразования использующей полосковые линии. Рассмотрена полеобразующая система традиционного типа с переходными секциями и горизонтальной центральной частью.

**Ключевые слова:** численное моделирование, электромагнитный импульс, полеобразующая система, полосковая линия, зона однородности.

Method of simulation in COMSOL environment of the processes of propagation of EMP in stripline system of open type that can be used for any variant of stripline system is presented in the paper. The results of simulation showed that the requirements of the standard MIL-STD-461G on the degree of field uniformity of 6 dB are easily satisfied by any field-forming system with strip lines. It was shown that, to surely obtain a pulse front of 2 10<sup>-9</sup> s and required amplitude, it is advantageous to raise the lower plate of the strip line field-forming system through a height 1 m above the surface of the ground. The field-forming system of the traditional type with transitional sections and horizontal central part is considered. The dimensions of the horizontal part are: the distance between the planes – 3 m, the length – 5 m. In the area of working volume of the field-forming system, vectors of electric and magnetic field strength deflect from the plane of cross section through no more than 0.3 rad at the edges and no more than 0.05 rad in its centre. The waveform deviates from the wave of TEM-type through no more than 5% in the central area about 3 m in length and at the distance from the current-conducting elements no less than 0.3 m. When pulse front goes through the horizontal part of the field-forming system, the uniformity of distribution of electric field (Ez component) and magnetic field (Hy component) is no more than ±30% of the average value which equals ±1 dB.

For the central part 2x2m<sup>2</sup> (which is more than half of the horizontal part by width and height of FS), field nonuniformity is no more than ±15% which is ±0.6 dB. In the central cross section of the horizontal area, the nonuniformity is still lower and does not exceed ±0.3 dB in the square 2x2m<sup>2</sup>.

**Key words:** numerical simulation, electromagnetic pulse, field-forming system, strip line, zone of uniformity.

**Введение.** Актуальность рассмотрения вопросов, связанных с методологией проведения испытаний уровня устойчивости технических средств, которые содержат в своей основе электронные, радиоэлектронные и электрические компоненты, обуславливается рядом объективных обстоятельств. С одной стороны, активное расширение сферы применения указанных компонент; снижение уровня устойчивости электронных компонент в результате использования слаботочной элементной базы, все более ответственные функции, которые возлагаются на эти компоненты (управления, принятия решений и т.п.). С другой стороны, уровень электромагнитного «загрязнения» окружающего пространства неуклонно возрастает. Причем, к естественным источникам мощных электромагнитных помех, например, вызываемых молниевыми разрядами, с определенной вероятностью, могут добавиться источники искусственного происхождения. К числу таких источников относится электромагнитный импульс ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ) [1–10].

В связи с большой зоной распространения ЭМИ

высотного ЯВ (до 10<sup>6</sup> км<sup>2</sup>), его воздействию могут подвергнуться практически все объекты инфраструктуры находящиеся в зоне облучения. Поэтому, негативные последствия возможны и в тех странах, которые непосредственно не участвуют в конфликте. Учитывая это обстоятельство, Международная электротехническая комиссия (МЭК) разработала серию стандартов, описывающих процессы формирования ЭМИ ЯВ, значения вероятных параметров, требования по устойчивости к действию ЭМИ высотного ЯВ объектов гражданской инфраструктуры и методы испытаний.

Для создания испытательных импульсов в качестве полеобразующих систем, как правило, используются полосковые линии. Что обуславливает актуальность анализа структуры импульсных электромагнитных полей и процесса их распространения в полосковых линиях методами математического моделирования. В рамках данной статьи описана реализация расчетной оценки с использованием Comsol Multiphysics 5.3.

### 1 Постановка задачи

Провести численное моделирование прохождения импульсной электромагнитной волны по полеобразующей системе (ПС). В качестве ПС использовать полосковую несимметричную линию с переходными секциями и горизонтальной частью. Провести исследования следующих аспектов:

- расчет входного импеданса ПС;
- расчет волнового сопротивления ПС в различных сечениях;
- оптимизация параметров согласующей нагрузки ПС;
- расчет пространственного распределения напряженности поля в ПС;
- расчет зоны однородности, удовлетворяющей условию +6 дБ.

Дополнительно исследовать влияние расстояния до «грунта» на распределение поля и динамику прохождения электромагнитного импульса в ПС. Также, оценить размер зоны распространения волны во внешнее пространство (для напряженностей от 10 В/м до 320 В/м).

**Описание математической модели. Описание выбора расчетного метода и принятых приближений**

#### Система уравнений

Для моделирования распространения импульса используется интерфейс *Electromagnetic Waves, Transient (temw)*. Такой выбор является типичным для решения задач распространения электромагнитных импульсов, так как учитывает временные зависимости полей, не являющихся гармоническими. В исследуемой пространственно-временной области находятся значения магнитного векторного потенциала  $\vec{A}$  путем решения уравнения Максвелла:

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times A) + \mu_0 \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left( \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial A}{\partial t} \right) = 0,$$

где  $A$  – магнитный векторный потенциал;

$\sigma$  – электрическая проводимость;

$\epsilon_0$  – электрическая постоянная;

$\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость;

$\mu_0$  – магнитная постоянная;

$\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость.

**Настраиваемые параметры модуля *WaveEquation, Electric*:**

Температура окружающей среды 293.15К.

Давление 1 атм.

Поле электрического смещения вычисляется с учетом свойств материала: относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$ .

Магнитная индукция вычисляется с учетом свойств материала: относительной магнитной проницаемости  $\mu_r$ ;  $B = \mu_0 \mu_r H$ .

**Начальные условия** для вектора магнитного потенциала – нулевое значение и нулевая первая производная по времени:  $A = 0$ ,  $\frac{\partial A}{\partial t} = 0$ .

### Граничные условия

В элементах, заданных как идеальный проводник, граничные условия устанавливают нулевую тангенциальную составляющую электрического поля:  $n \times E = 0$  ( $n$  – вектор нормали к поверхности элемента).

Для улучшения точности учета рассеяния остаточной части импульса в пространство в модели задана виртуальная сфера радиуса 17 м (т.е. на расстоянии, на порядок большем характерных пространственных размеров импульса и ПС), на поверхности которой введены условия поглощения поля:

$$\begin{aligned} \mu_0 n \times H + \frac{\mu_0}{Z_c} n \times (E \times n) - \frac{r}{\mu_r} n \times (A \times n) = \\ = \frac{\mu_0}{Z_c} n \times (E_0 \times (n - k_{dir})) - \frac{\gamma}{\mu_r} n \times (A_0 \times (n - k_{dir})) - \\ - \frac{r}{\mu_r} n \times (A_0 \times n). \end{aligned}$$

$$E_0 = -\frac{\partial A_0}{\partial t} Z_c = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \gamma = \frac{\sigma Z_c}{2}.$$

### Моделирование источника поля и нагрузки

В том случае, когда источником поля является генератор напряжения, а также в случае ТЕМ-волны, в пакете моделирования COMSOL (RF) предусмотрен инструмент «Lumpedport» (сосредоточенный порт). Он позволяет описывать его, как элемент линии передачи и подключать к нему любые электротехнические схемы. Сосредоточенный порт должен быть задан между двумя металлическими поверхностями, расстояние между которыми значительно меньше значения длины волны, что позволяет использовать локально квазистатическое приближение.

В рассматриваемой задаче с импульсным источником напряжения можно говорить лишь о характерном значении длины волны, ориентируясь на время достижения максимума в импульсе. Оно оказывается одного порядка с размером порта. Но анализ пространственно-временного распределения напряженности электрического поля в различных сечениях ПС (см. далее) показал, что локально квазистатическое приближение допустимо и в этом случае.

Сосредоточенный входной порт характеризуется импедансом  $Z_{port}$  и S-параметром  $S_{11}$ , которые вычисляются по формулам:

$$Z_{port} = \frac{V_{port}}{I_{port}}, \quad S_{11} = \frac{V_{port} - V_{in}}{V_{in}},$$

где входное напряжение  $V_{in}$  порта задано аналитически, в соответствии с формой импульса, заданного в ТЗ:

$$V_{in}(t) = V_0 \operatorname{Im} p(t),$$

где  $\operatorname{Im} p(t) = k_1 (e^{-a_1 t} - e^{-b_1 t})$ .

Значения параметров импульса заданы в разделе *GlobalDefinitions*:

$$V_0 = 0.1 \text{ MB}; k_1 = 1.3; a_1 = 4 \times 10^7 \text{ c}^{-1}; b_1 = 6 \times 10^8 \text{ c}^{-1}.$$

**Характеристический импеданс** порта задан постоянным и равным  $Z_{ref} = 50 \Omega$ .  $V_{port}$  – напряжение на порту, задаваемое линейным интегралом от напряженности электрического поля между его контактами, Для двумерной модели получаем соотношение.

$$V = \int_h E \cdot dl = \int_h (E \cdot a_h) dl. \quad (1)$$

Ток  $I_{port}$  задается, как суммарный ток, равный усредненному значению суммарного тока по всем сечениям, параллельным контактным площадкам порта.

$$I = \int_{\omega} (n \times J_s) dl = - \int_{\omega} (J_s \cdot a_h) dl. \quad (2)$$

Для моделирования **нагрузки**, подавляющей отражение импульса от противоположной источнику грани ПС, установлен **LumpedElement**, состояние которого определяется постоянным импедансом:

$$Z = \frac{V_I}{I_I}. \text{ Тип элемента: однородный.}$$

**Характеристический импеданс нагрузки** был подобран из условия минимизации мощности отраженного импульса, о установлен равным  $Z_{element} = 125 \Omega$ .

**Временной интервал счета задачи** варьируется от  $[0,5 \times 10^{-10} \dots 1.5 \times 10^{-7}]$ с до  $[0,5 \times 10^{-10} \dots 2 \times 10^{-6}]$ с.

#### Выбор режимов моделирования в программе

Выбор решателя для данной задачи не играет решающей роли, так как все они: PARDISO, MUMPS и SPOOLES, принадлежат к классу прямых решателей (DirectSolvers), и должны приводить к одному и тому же решению.

С расчетной точки зрения эти варианты различаются только скоростью выполнения, которая, как правило, выше у PARDISO. Из этих соображений и был выбран именно этот решатель.

Ниже приводятся значения параметров, входящих в настройки метода решения задачи. Большинство из них не оказывают принципиального влияния на качество полученных результатов, и выбирались из соображений максимальной точности решения при приемлемом (при имеющихся в наличии вычислительных ресурсах) времени счета. Некоторые из значений параметров установлены «по умолчанию», или определены системой автоматически. Другие регулировались в соответствии с вышеописанными критериями. В списке параметры сгруппированы по разделам.

#### Time-Dependent Solver: раздел Absolute Tolerance

Эти параметры задают уровень допустимой ошибки на каждом шаге решения. Решатель уменьшает временной шаг до тех пор, пока не будет соблюдаться требуемое условие ошибки счета. Упрощенно это условие можно представить следующей схематичной формулой:

$$\sqrt{\frac{1}{N} \sum \left( \frac{|E|}{A + R|Y|} \right)^2} < 1,$$

где суммирование производится по всем степеням

свободы,  $E$  – оценка ошибки,  $Y$  – зависимая переменная,  $R$  – относительная погрешность,  $A$  – нормируемая абсолютная погрешность. Такой выбор формы оценки допустимой погрешности обеспечивает как хорошую оценку точности решения в основной пространственно-временной области решения, так и критерий допустимой точности для областей, где поле приближается к нулевому. Выбор такой схемы задается следующими параметрами:

Global Method: *Scaled*

Tolerance method: *Factor*

Tolerance Factor: *0.1*

Method: *Use Global*

Update Scaled Absolute Tolerance: *Yes*

#### Time-Dependent Solver: Раздел Time Stepping

В этом разделе задается метод счета по дискретным временным шагам. Метод BDF известен как довольно устойчивый для такого типа задач, но может вызывать ошибки, связанные с отбрасыванием высоких частот в решении, даже в тех случаях, когда их наличие явно следует из начальных условий. Поскольку в моделируемой задаче как раз высокие частоты играют основную роль, мы используем здесь более адаптивный алгоритм Generalizedalpha, который обладает характеристиками, схожими с BDF, но позволяет регулировать уровень учета высоких частот. Для выбранного метода заданы следующие параметры:

Method: *Generalized alpha*

Steps Taken by Solver: *Free*

Amplification for high frequency: *0.75*

Predictor: *Linear*

#### Time-Dependent Solver: Раздел Algebraic variable settings

Singularmassmatrix: *Maybe* – решатель допускает возможность и проверяет нулевые столбцы и строки в матрицах.

Consistent initialization: *Backward Euler*

Fraction of initial step for Backward Euler: *0.001*

Errorestimation: *IncludeAlgebraic*

Включена последовательная инициализация дифференциально-алгебраических систем методом BackwardEuler. Для этого решатель выполняет небольшой искусственный шаг в обратном направлении. Размер шага задан достаточно малым – 0,001 от базового. Параметр IncludeAlgebraic включает алгебраические степени свободы в формулу оценки ошибки временной дискретизации.

Остальные, менее критичные параметры настроек приведены списком ниже:

#### Suggested Direct Solver (temw): General

Solver: *PARDISO*

Preordering Algorithm: *Nested dissection multithreaded*

Scheduling method: *Auto*

Row Preordering: *Yes*

Bunch-Kaufman pivoting: *No*

Multithread forward and backward solve: *Yes*

Pivotingperturbation:  $10^{-8}$  (Этот параметр входит в один из алгоритмов вариационного поиска опорных элементов несимметричных матриц решателем

PARDISO).

Parallel direct sparse for clusters: *Yes*  
 Out-of-core: *Automatic*  
 Memory fraction for Out-of-core: *0.99*  
 In-core memory method: *Automatic*  
 Minimum in-core memory: *512 Mb*  
 Used fraction of total memory: *0.8*  
 Internalmemoryusagefactor: *3*

Эта и предыдущие опции влияют на распределение оперативной и виртуальной памяти решателя. Их выбор зависит от имеющихся в наличии вычислительных ресурсов и требований к скорости счета.

**Suggested Direct Solver (temw): Error**

Check error estimate: *Automatic* (Автоматическая проверка уровня ошибок в процессе решения).

Factor in error estimate: *400*  
 Iterative refinement: *Yes*  
 Maximum number of refinement: *15*  
 Use in nonlinear solver: *No*

**Suggested Direct Solver (temw): Advanced: General**

Matrix symmetry: *Automatic*  
 Matrix Format: *Automatic*  
 Row equilibration: *Yes*  
 Null-space function: *Automatic*  
 Orthonormal block limit: *10<sup>7</sup>*  
 Store last residual: *Off*

**Suggested Direct Solver (temw): Fully Coupled 1: Method and termination**

Nonlinear method: *Constant(Newton)*  
 Damping factor: *1*  
 Jacobian update: *Minimal*  
 Termination technique: *Tolerance*  
 Maximum number of iterations: *4*  
 Tolerance factor: *1*  
 Stabilization and acceleration: *None*

**Solver Configuration: Solution1: Dependent variables 1**

Magnetic vector potential Scaling method: *From Parent*

Incident Magnetic vector potential Scaling method: *From Parent/*

## 2 Иллюстрация наложения расчетной пространственной сетки

Выбор параметров конечно-элементного разбиения определяется как физическими параметрами задачи, так и требованиями к точности и скорости счета. В пакете моделирования COMSOL предусмотрен режим автоматического выбора размеров ячеек разбиения в различных областях системы, в зависимости от их геометрических размеров и параметров электромагнитного импульса.

Метод конечных элементов аппроксимирует решение внутри каждого элемента, используя некоторую элементарную функцию формы, которая может быть постоянной, линейной или более высокого порядка. В зависимости от порядка функции элементов в модели для решения задачи требуется более тонкая или грубая сетка.

В общем, можно выделить три проблемных фак-

тора, которые определяют необходимое разрешение сетки:

– первый – это неоправданно большое количество элементов из-за геометрических особенностей модели. Генератор сетки автоматически создает более мелкую сетку, где есть много мелких геометрических деталей. Для борьбы с этим фактором требуется вручную удалить (или упростить форму) мелких геометрических деталей системы, если только это не оказывает существенного влияния на распределение поля.

– второй – это влияние скин-эффекта на распределение поля в силу возникающих потерь мощности. Глубина скин-слоя может быть легко оценена в зависимости от проводимости, проницаемости материала и частоты. Для учета захвата изменения полей необходимо создать, по крайней мере, два линейных элемента на глубину скин-слоя. Если глубина скин-слоя неизвестна, или в задаче не требуется точного расчета профиля диссипации энергии, необходимо заменить области с небольшой глубиной скин-слоя соответствующим граничным условием. Тем самым удается избежать не нужного увеличения количества расчетных элементов сетки.

– третий и последний фактор – длина волны. Чтобы правильно решить задачу, необходимо использовать около 10 линейных элементов (или пяти элементов 2-го порядка) на длину волны. При этом необходимо учитывать, что длина волны зависит от свойств материала.

С учетом этих требований при решении задачи использовались как грубые, так и более точные разбиения ПС на конечные элементы. В первом случае проводилась грубая оптимизация и получение начальных приближений, так как эти процедуры требуют многократного пересчета модели при различных параметрах. Окончательный расчет для получения максимально точных решений производился на сетке с мелкими элементами. Их размер подбирался вручную (с учетом приведенных выше требований) таким образом, чтобы дальнейшее умельчение сетки уже не оказывало существенного влияния на результаты счета.

### 2.1 Выбор «минимальной» расчетной сетки для предварительного анализа и оптимизации модели

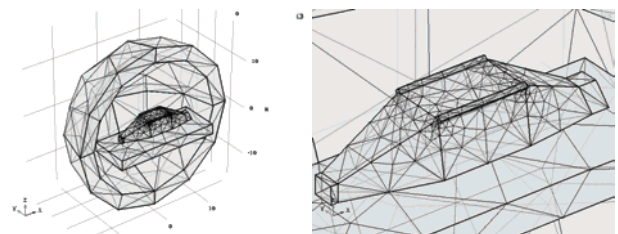


Рисунок 1 – Грубая сетка для проведения предварительных исследований ПС и ее оптимизации. Время одного расчета на компьютере с ОП 16 Гб около 10 минут

### 2.2 Выбор оптимальной расчетной сетки и ее оптимизации для получения требуемой точности

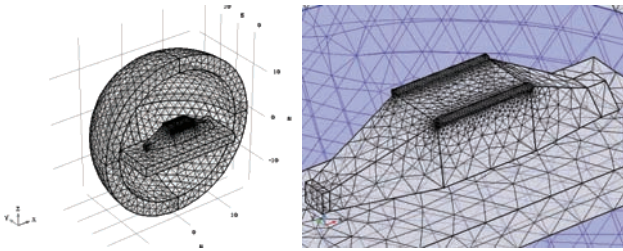


Рисунок 2 – Детализированная сетка для окончательных расчетов распределения поля в ПС. Время одного расчета на компьютере с ОП 16 Гб около 2 часов

### 2.3 Выбор сетки для анализа распределения поля во внешней по отношению к ПС области пространства

Для анализа распределения поля во внешней по отношению к ПС области пространства была использована модель с существенно большей областью, окружающей ПС. Для этого была построена другая сетка, в которой особенности ПС заданы более грубо, а окружающего ее пространства – более точно.

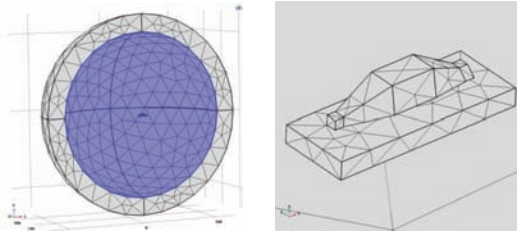


Рис. 3 – Расчетная сетка для анализа распределения поля во внешней по отношению к ПС области пространства

### 2.4 Выбор сетки для анализа влияния конструкции ввода на распределение поля в ПС

Дополнительно было проанализировано влияние особенностей системы подачи импульса в ПС. Оказалось, что при замене точной конструкции входа моделью сосредоточенного порта распределение поля в расчетной области ПС не претерпевает существенных изменений. В дальнейших расчетах поля была использована упрощенная модель с входом в виде сосредоточенного порта.

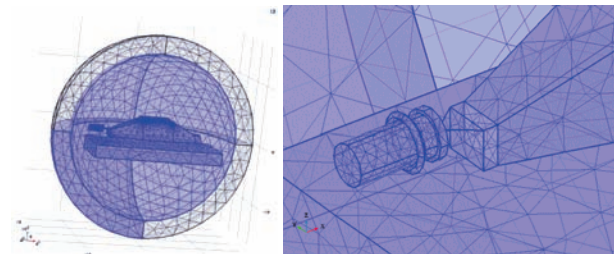


Рисунок 4 – Расчетная сетка для анализа влияния конструкции ввода на распределение поля в ПС

## 3 Анализ волнового сопротивления и входного импеданса ПС во временной области

**Волновое сопротивление** – это сопротивление, которое встречает электромагнитная волна при распространении вдоль однородной линии без отражения, т. е. при условии, что на процесс передачи не

влияют несогласованности на концах линии. Оно свойственно данному типу линии и зависит лишь от ее первичных параметров и частоты передаваемого тока. Электромагнитную волну можно представить в виде двух волн: волны напряжения, соответствующей электрической энергии, и волны тока, соответствующей магнитной энергии. Количественное соотношение, имеющее место между волной напряжения и волной тока в линии, и есть волновое сопротивление цепи. При этом, как следует из данного выше определения волнового сопротивления, необходимо рассматривать лишь падающую (движущуюся вперед) электромагнитную волну. Если в линии выделить отдельно отраженную волну, то она, двигаясь к началу линии, также будет встречать сопротивление, равное волновому сопротивлению. В общем виде волновое сопротивление является комплексной величиной.

Рассматриваемая нами ПС является неоднородной линией передачи. В неоднородной линии отраженные волны искажают частотную характеристику собственного волнового сопротивления. Подключенный к ее входу измерительный прибор покажет уже не волновое, а входное сопротивление, характеризующее новое электрическое состояние линии. Затухание неоднородной линии представляет собой суммарную величину, включающую, кроме собственного затухания кабеля также затухание за счет неоднородности электрических характеристик цепи.

Реальную линию можно рассматривать как неоднородную линию, составленную из отдельных однородных участков. Электромагнитная волна, распространяясь по такому кабелю и встречая на своем пути неоднородность, частично отражается от нее и возвращается к началу линии. При наличии нескольких неоднородных участков волна претерпевает серию частичных отражений и, циркулируя по линии, вызывает дополнительное затухание и искажение характеристик цепи.

Неоднородности в линии приводят к появлению в цепи двух дополнительных потоков энергии:

- Обратного потока, состоящего из суммы элементарных отраженных волн в местах неоднородностей и движущегося к началу цепи,
- Попутного потока, возникающего по закону двойных отражений вследствие того, что первоначально отраженные волны, движущиеся к началу цепи, встречая места неоднородностей, частично отражаются и направляются к концу линии.

Обратный поток приводит к колебаниям входного сопротивления линии.

### 3.1 Методика расчета волнового сопротивления и входного импеданса ПС

Электродинамическое определение волнового сопротивления подразумевает расчет соотношения электрической и магнитной амплитуд ЭМ волны, распространяющейся вдоль линии передачи. Таким образом, в стандартном случае ВС относится к однородным свойствам линии (проводимость, емкость, индуктивность), отнесенным к единице длины.

К разрабатываемой полеобразующей системе та-

кое определение не может быть применено без изменений, по следующим причинам:

- подаваемый на вход сигнал не является гармонической волной, и не характеризуется какой-то определенной частотой.

- входной сигнал не имеет бесконечного по времени периодического характера, а наоборот – хорошо локализован во времени и пространстве.

- характерные размеры импульса сравнимы с размерами полеобразующей системы (метры и доли метра).

Из приведенных выше определений следует, что в реальной волноводной линии при подаче периодического сигнала мы всегда меряем входной импеданс, а не волновое сопротивление. Это связано с тем, что неоднородности или не согласованные по нагрузке края линии создают отраженную волну, которая интерферирует с прямой волной и искажает ее. Поэтому для экспериментального измерения или теоретического расчета волнового сопротивления необходимо, строго говоря, обеспечить или имитировать однородность рассматриваемого участка линии. Это можно сделать различными способами:

- аналитический расчет погонной емкости и индуктивности соответствующей однородной линии, с последующим вычислением импеданса однородной линии с такими параметрами;

- измерение параметров участка линии, рассматриваемого как четырехполюсник, и последующее вычисление импеданса для прямой волны;

- измерение в импульсном режиме, во временном промежутке, в котором отраженная волна не успевает исказить фронт прохождения прямой.

В рассматриваемой задаче подаваемый на вход импульс хорошо локализован по времени. Его полуширина соответствует расстоянию порядка 0.5м, что значительно меньше характерных размеров геометрических параметров однородного участка ПС (5м). Это делает предпочтительным анализ волнового сопротивления и входного импеданса во временной области. При этом полученное значение входного импеданса оказывается зависящим от времени. Выделяя в этой зависимости интервал, в котором присутствует только прямая волна, мы можем получить и эквивалентное значение волнового сопротивления в соответствующем сечении ПС.

### 3.2 Алгоритм расчета временной зависимости входного импеданса в различных сечениях ПС

При расчете входного импеданса в заданном сечении мы учитываем как прямую волну, так и все отраженные от неоднородностей ПС волны. Этим входной импеданс отличается от волнового сопротивления, рассчитанного в том же сечении, но только для прямой волны. В обоих случаях мы сводим расчет этих параметров ПС к эквивалентным параметрам линии передачи и рассчитываем их по формуле:

$$Z = \frac{V}{I}.$$

Для этого мы вводим дополнительно вместо рассматриваемого сечения проводящую поверхность, соединяющую проводящие полеобразующие поверхно-

сти ПС и считаем, что по ней проходит некоторый поверхностный ток. Этот ток мы задаем таким образом, чтобы обеспечить те же самые граничные условия, что и в рассматриваемом сечении исходной ПС. В силу теоремы единственности, поле, как справа, так и слева от рассматриваемого сечения будет таким же, как и в ПС без эквивалентной проводящей поверхности (рис. 5).

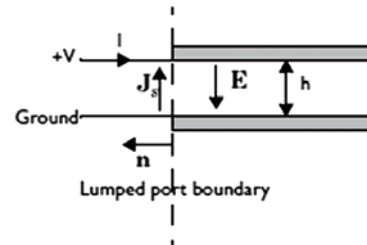


Рисунок 5 – Схема сосредоточенного порта и введения эквивалентных параметров тока и напряжения для расчета входного импеданса

Для обеспечения такого соответствия используем формулу граничного условия при заданной плотности поверхностного тока в бесконечно тонкой проводящей поверхности

$$-\vec{n} \times (H_1 - H_2) = J_s.$$

Заметим, что при моделировании поля в правой или левой от сечения области, эквивалентный магнитному полю ток должен идти в разных направлениях (на рисунке для правой области – снизу вверх, а для левой – сверху вниз). Таким образом, при объединении этих областей мы получаем два встречных и одинаковых по величине тока, которые компенсируют друг друга и возвращают нас к исходной задаче. Но если мы рассматриваем только правую или только левую часть (тем самым сводя задачу к задаче расчета входного импеданса передающей линии), то один из этих токов заменяет собой отброшенную часть ПС. Таким образом, зная распределение напряженности магнитного поля, мы можем рассчитать распределение эквивалентного поверхностного тока. По факту оно оказывается равным тангенциальной составляющей вектора магнитной напряженности. Далее, для получения полного тока, мы должны проинтегрировать эту плотность тока по ширине контактных линий (по координате Y в нашей модели), используя формулу (2).

Для расчета напряжения пользуемся формулой (1).

### 3.3 Анализ входного волнового сопротивления и импеданса ПС во временной области.

Ниже (рис. 6) приведены графики временных зависимостей напряжения, тока и входного импеданса **LumpedPort**, рассчитанные по приведенным выше формулам.

Предварительно было исследовано распределение характеристического (поверхностного) импеданса в центральном сечении ПС в различные моменты времени (через 5 нс), представленные на рис. 7.

На основании анализа результатов можно сделать вывод о том, что однородность распределения наблюдается на двух промежутках времени, соответствующих времени прохождения фронта волны через это сечение и по рупорной части ПС.

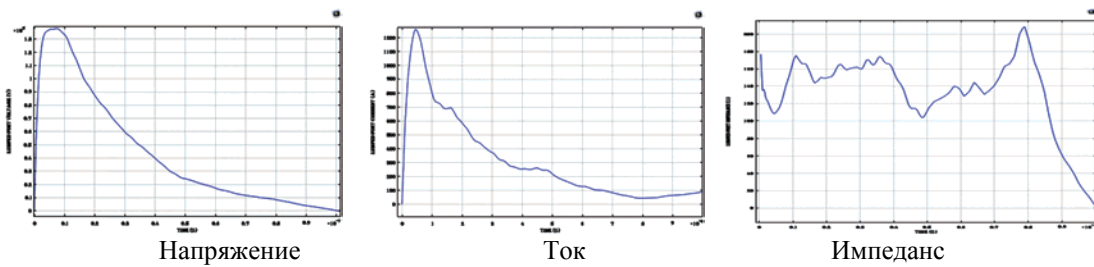


Рисунок 6 – Временные зависимости напряжения, тока и входного импеданса LumpedPort

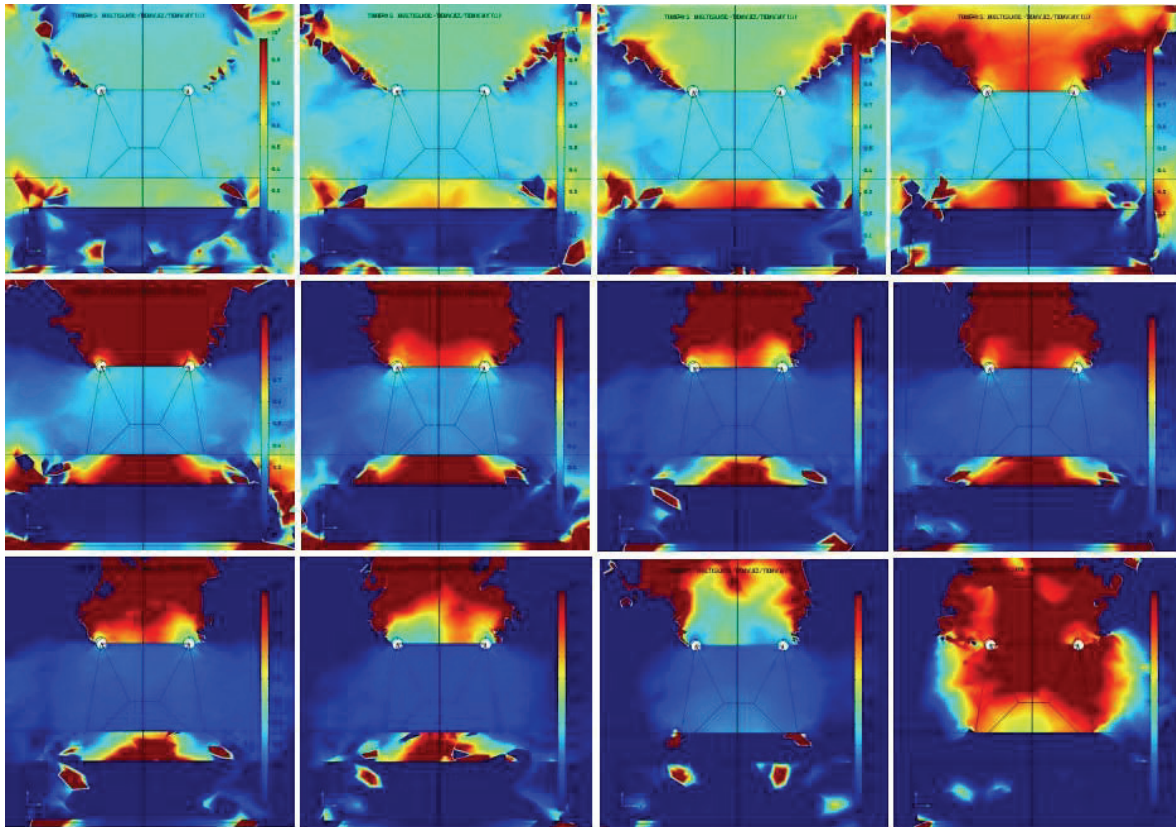


Рисунок 7 – Распределение характеристического (поверхностного) импеданса в центральном сечении ПС в различные моменты времени

#### **Временные зависимости входного импеданса в центральном сечении ПС**

На рис. 8 показана временная зависимость входного импеданса в центральном сечении ПС. Их анализ позволяет сделать следующие выводы:

- в сечении на расстоянии 5 м от входа фронт волны приходит в 18 нс. После этого значение импеданса составляет около 300 Ом, что полностью соответствует теоретическому значению волнового сопротивления, рассчитанному для прямоугольного волновода с отношением сторон  $\frac{3}{4}$ .

- начиная с момента 54 нс, к рассматриваемому сечению начинает приходить волна, отраженная от рупорной части ПС. При этом входное сопротивление все более отличается от волнового сопротивления в связи с тем, что все большая часть рупорной секции ПС задействована в формировании отраженной волны.

- начиная с момента 90 нс, к рассматриваемому сечению приходит волна, отраженная от нагрузки. В связи с возникающими переотражениями волны в выходной части ПС наблюдается большое количество плохо идентифицируемых резонансов.

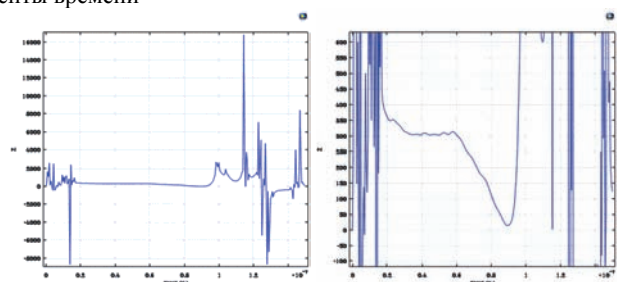


Рисунок 8 – Временная зависимость входного импеданса в центральном сечении ПС

На рис. 9 показана временная зависимость входного импеданса в сечении на расстоянии 10 м в центральном сечении ПС (переход прямой секции ПС в рупорную часть). Их анализ позволяет сделать следующие выводы:

- в сечении на расстоянии 10 м от входа фронт волны приходит в 36 нс;

- после этого значение импеданса линейно меняется от 360 Ом до 160 Ом. Этот участок соответствует постепенному включению рупорной части ПС в формирование отраженной волны.

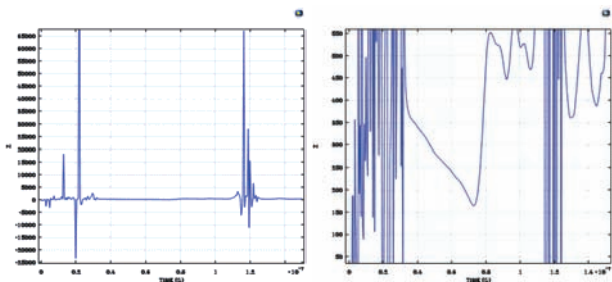


Рисунок 9 – Временная зависимость входного импеданса в сечении ПС на расстоянии 10 м от входа (переход в рупорную часть ПС)

Начиная с момента 72 нс, к рассматриваемому сечению начинает приходить волна, отраженная от нагрузки ПС. В промежутке времени 72–83 нс на графике входного импеданса отчетливо проявляются колебания волны, многократно переотраженные промежутком между плоскостями выхода.

#### 4 Двумерные и трехмерные графики распределения напряженности электрического и магнитного полей в ПС

##### 4.1 Методика представления результатов моделирования распределения напряженности электрического и магнитного полей в ПС

Целью создания и оптимизации полеобразующей системы является возможность генерации электромагнитного импульса, по своим пространственно-временным параметрам, максимально близкого заданному импульсу.

Поэтому, прежде всего, определим эти параметры и требования для «эталонного» импульса, при этом учтем, что он формируется в точке, достаточно удаленной от области измерений:

- соответствие ТЕМ – типу волны;
- однородность распределения в плоскости, перпендикулярной направлению излучения;
- отсутствие искажений в форме временного представления импульса в каждой точке исследуемого объема.

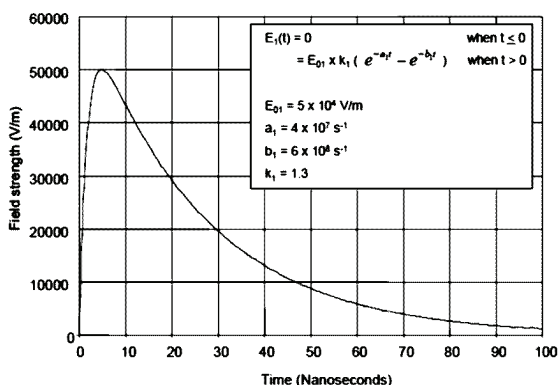


Рисунок 10 – Форма электромагнитного импульса

Временные параметры импульса представлены на рис. 10:

- длительность фронта (время нарастания от 0,1 до 0,9 в диапазоне 1,8 - 2,8 нс;
- длительность импульса на полуспаде

(23 ± 5) нс.

Методика представления результатов исследований представляет собой проверку и оценку степени соответствия модели каждому из этих приближений.

#### 4.2 Общая картина распространения электромагнитного импульса в ПС

Прежде всего, проиллюстрируем общую картину распространения импульса в ПС. Для этого на рис. 11 представлены отдельные кадры динамического изменения распределения вертикальной составляющей ( $Z$ -составляющей) электрического поля в условиях согласованной нагрузки и заданной амплитуды импульса напряжения на входе.

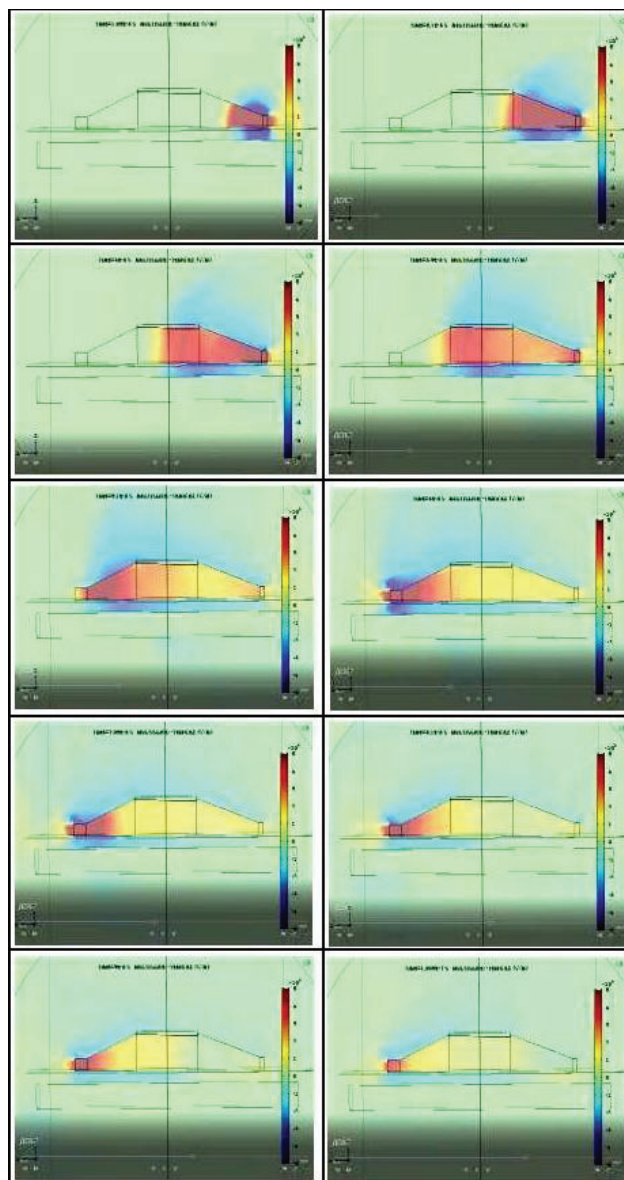


Рисунок 11 – Кадры динамического изменения распространения  $E_z$  импульса в ПС при согласованной нагрузке 125 Ом и максимальном входном напряжении 150 кВ

На отдельных кадрах рис. 12 показано распределение  $E_z(x, z)$  в среднем продольном сечении ПС ( $y = 0$ ) с интервалом 10 нс.

Предварительный анализ на основе представлен-



ных кадров показывает, что в горизонтальной области ПС поле распространяется без геометрических и временных искажений, достигая максимального значения напряженности 50 кВ/м. При этом в верхней части области фронт волны несколько отстает от фронта волны в нижней части, что связано с особенностями геометрии ПС.

#### 4.3 Анализ соответствия волны типу TEM

В волне типа TEM отсутствуют составляющие электрического и магнитного полей в направлении распространения волны. Поэтому для проверки этого приближения были рассчитаны синусы углов наклона векторов поля к плоскости  $YZ$ , перпендикулярной направлению движения волны (вдоль оси  $X$ ).

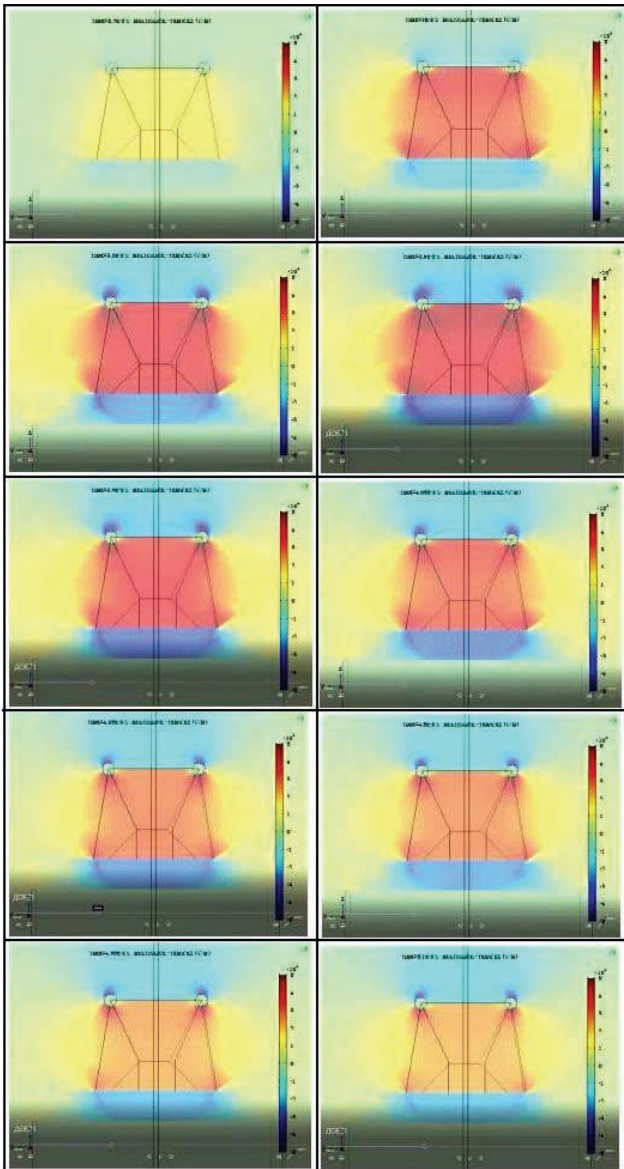


Рисунок 12 – Кадры динамического изменения распространения  $E_z$  импульса в ПС при согласованной нагрузке 125 Ом и максимальном входном напряжении 150 кВ. На отдельных кадрах показано распределение  $E_z$  в среднем поперечном сечении ПС ( $x = 0$ ) с интервалом 2,5 нс (начиная с 25 нс после момента включения)

#### 4.3.1 Полосковая несимметричная линия

Рассчитаны распределения, соответствующие трем сечениям  $YZ$ : на входе горизонтальной части ПС ( $x = -L/2$ ), в ее центре ( $x = 0$ ), и на выходе из нее ( $x = L/2$ ). Схема расположения сечений представлена на рис. 13.

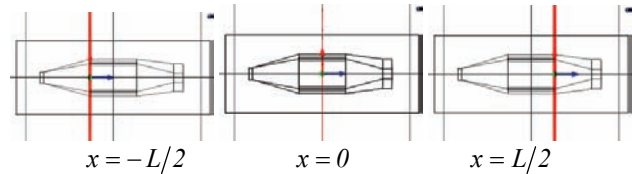


Рисунок 13 – Расположение сечений  $YZ$  для анализа соответствия волны TEM-типу (вид ПС сверху)

Для анализа выбран момент времени прохождения максимума импульса через соответствующее сечение. Результаты анализа показаны на рис. 14.

Из результатов расчета видно, что в прямой области ПС (исключая края токопроводящих элементов) вектор напряженности электрического поля отклоняется от сечения  $YZ$  не более, чем на 0,3 рад на краях горизонтальной области и не более, чем на 0,05 рад в ее центре.

Эффект отклонения на границах области можно объяснить тем, что на форму волны оказывают влияние конические части ПС, средняя линия которых и формирует направление движения волны под углом к горизонту.

Анализ структуры волны в остальных сечениях  $YZ$  горизонтального участка ПС, позволяет сделать вывод, что она отклоняется от волны TEM-типа не более, чем на 5% в центральной области длиной около 3 м и на расстоянии от токопроводящих элементов не менее 0,3 м.

#### 4.3 Анализ однородности распределения поля в плоскости, перпендикулярной направлению излучения

##### 4.3.1 Полосковая несимметричная линия с переходными секциями и горизонтальной частью

Анализ проводился в центральном поперечном сечении горизонтальной части ПС и на ее краях (рис. 13). На рис. 15 и 16 приведено распределение напряженности электрического ( $Z$ -компонента) и магнитного ( $Y$ -компонента) полей в указанных сечениях и, более подробно, в их центральной части размером 2 м на 2 м (отступ от верхней и нижней токопроводящих плоскостей одинаков и составляет 0,5 м). Для анализа был выбран момент времени прохождения максимума импульса через соответствующее сечение. Максимальное напряжения входного импульса 150 кВ.

На основании анализа полученных результатов сделаны следующие выводы:

При прохождении фронта импульса в горизонтальной части ПС неоднородность распределения электрического поля (компонента  $E_z$ ) и магнитного (компонента  $H_y$ ) не превышает  $\pm 30\%$  от среднего значения, что составляет  $\pm 1$  дБ.

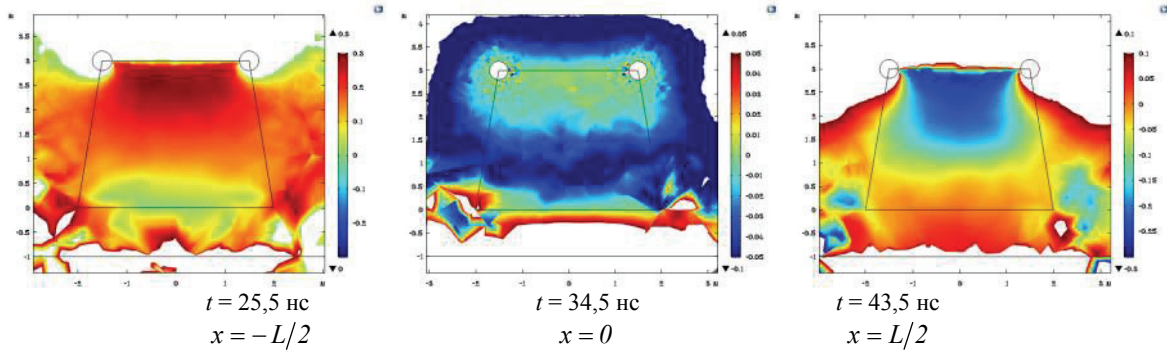


Рисунок 14 – Распределение  $\sin(\alpha_H)$  в момент прохождения максимума импульса в трех различных сечениях YZ горизонтальной части ПС

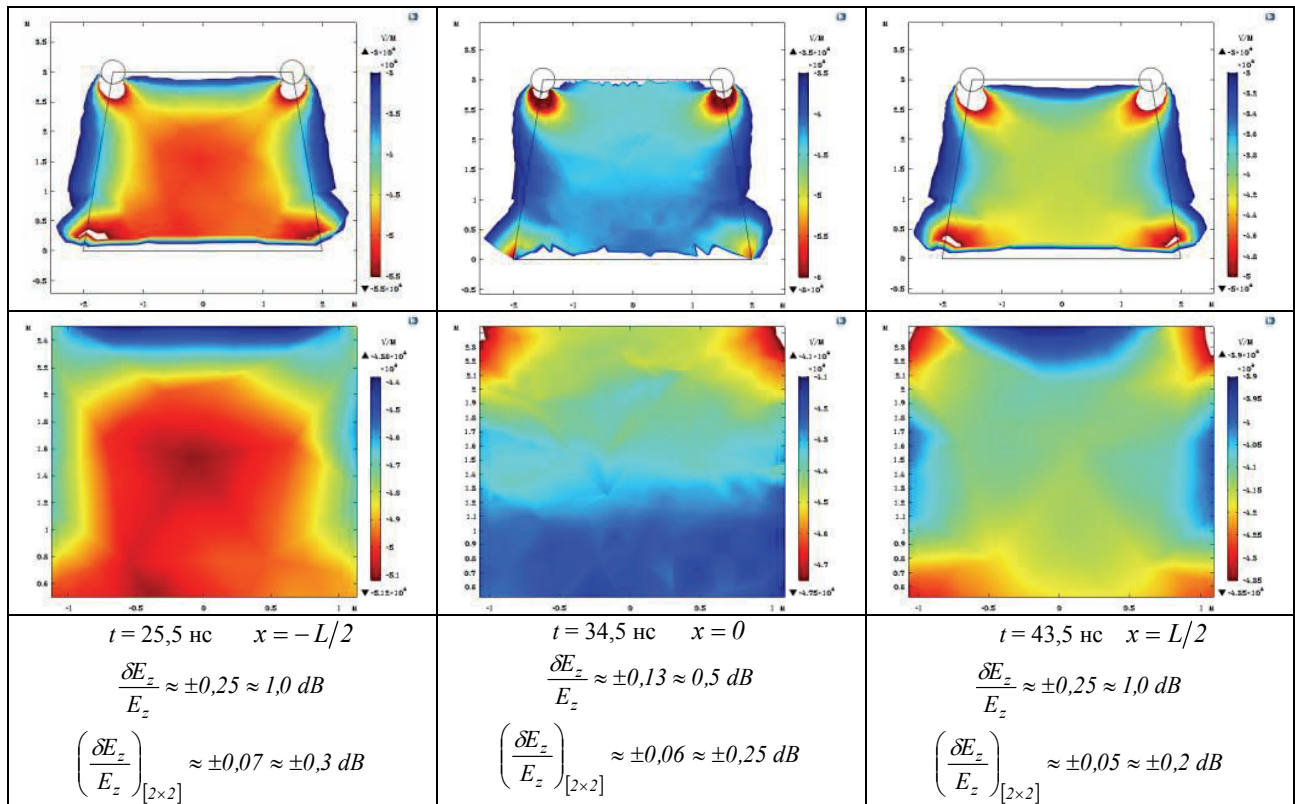


Рисунок 15 – Распределение  $E_z$  в момент прохождения максимума импульса в трех различных сечениях YZ горизонтальной части ПС

Для центральной части  $2 \times 2 \text{ м}^2$  (что составляет более половины по ширине и высоте горизонтальной части ПС) неоднородность поля не превышает  $\pm 15 \%$ , что составляет  $\pm 0,6 \text{ dB}$ . При этом в центральном сечении горизонтальной области неоднородность еще ниже и не превышает (в квадрате  $2 \times 2 \text{ м}^2$ )  $\pm 0,3 \text{ dB}$ .

Другие компоненты поля составляют не более 5% от основных в центральной части горизонтальной секции ПС длиной около 3 м и на расстоянии от токопроводящих элементов не менее 0,3 м. Это было показано в предыдущем подразделе при анализе соответствия формы волны ТЕМ типу.

Продольное распределение напряженностей электрической и магнитной компонент ТЕМ-волны (вдоль оси X) формируется в основном его временными параметрами и незначительно искажается особенностями формы ПС. Более подробно эти зависимости рассмотрены в следующем подразделе.

#### 4.4 Анализ искажений в форме временного представления импульса в каждой точке исследуемого объема

##### 4.4.1 Методика анализа временного характера импульса в различных областях ПС

В отличие от распределения поля в поперечном сечении ПС, в продольном требуется обеспечить не его однородность, а соответствие исходному профилю (рис. 10). Для анализа этого соответствия рассчитывается:

- распределение компонент поля вдоль оси X на разных расстояниях от краев и от центра ПС;
- временную зависимость компонент поля в заданных точках;
- границы области, в которой форма временной зависимости компонент поля отличается от заданной в ТЗ не более, чем на допустимое значение.

Распределения напряженности электрического

поля (компонента  $E_z$ ) вдоль горизонтальных линий на высоте 1 м и 2 м над проводящей плоскостью в пределах горизонтальной части полосковой линии длиной

5 м (показано красными отрезками на рис. 17) представлено на рис. 18.

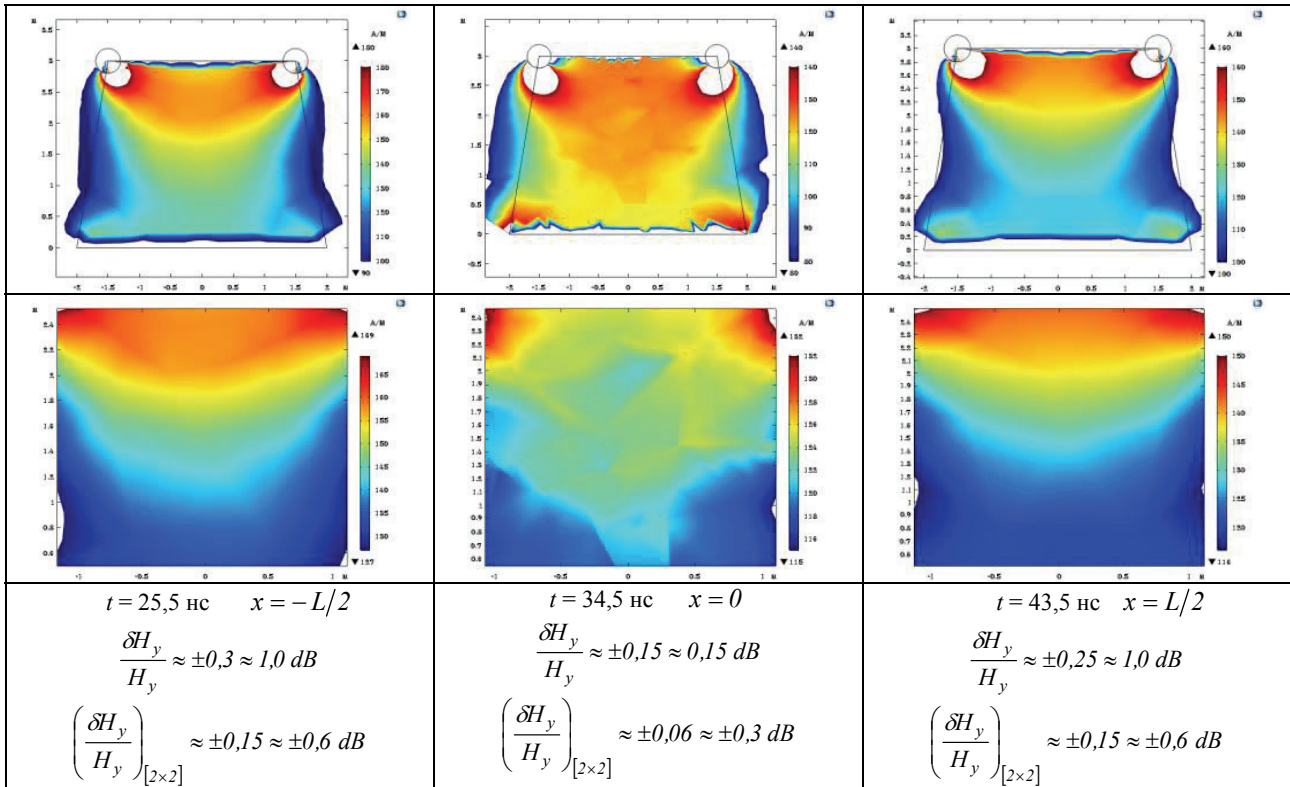


Рисунок 16 – Распределение  $H_y$  в момент прохождения максимума импульса в трех различных сечениях  $YZ$  горизонтальной части ПС

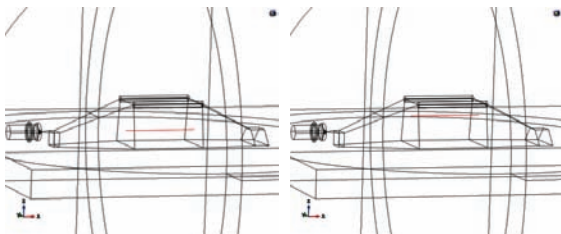


Рисунок 17 – Горизонтальные линии на высоте 1 м и 2 м над проводящей плоскостью в пределах горизонтальной части полосковой линии длиной 5 м, вдоль которых выводятся значения компонента поля  $E_z$

Каждая линия на рис. 18 соответствует определенному моменту времени. Интервал между линиями – 2,5 нс. Они оказываются смещены друг относительно друга на 75 см, что соответствует перемещению фронта волны в ПС со скоростью света.

Для сравнения в том же масштабе ниже приведен заданный в ТЗ временной профиль сигнала. Из сравнения рисунков видно, что в течение прохода фронта волны по центральной области горизонтальной части системы (2 м за 6,7 нс) форма сигнала практически не искажается. Видимые отклонения не превышают погрешностей, вызванных неоднородностью сеточного разбиения объема системы. Можно отметить незначительное (до 20 %) уширение переднего профиля волны. С увеличением высоты проведения профиля искажения уменьшаются.

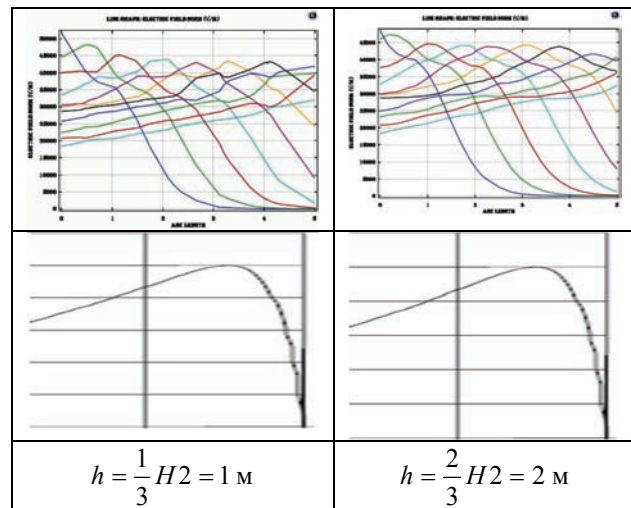


Рисунок 18 – Распределения напряженности электрического поля (компонента  $E_z$ ) вдоль горизонтальной линии на высоте 1 м и 2 м над проводящей плоскостью в пределах горизонтальной части полосковой линии длиной 5 м

Временная зависимость напряженности электрического поля выводилась в фиксированных точках центрального продольного сечения ПС, как показано на рис. 19.

**Результаты анализа** динамики поля в различных точках показывают:

– временная динамика компонента  $E_z$  электрического поля может быть представлена как наложение

прямого импульса и отраженного импульса меньшей амплитуды. Это наглядно видно на рис. 20 с (логарифмическая шкала);

- в горизонтальной части ПС на длине 4 м (из 5 м) форма импульса практически не меняется, постепенно снижая амплитуду на 10 %;

- искажения формы импульса практически не зависят от точки контроля в пределах горизонтальной области ПС. Они связаны с наложением отраженного от границ области сигнала и не превышают 0.6 дБ. Для их уменьшения можно использовать плавные переходы между областями ПС и распределенную (по X) нагрузку на ее выходе;

- в центральном сечении горизонтальной части ПС форма и амплитуда импульса практически не зависят от высоты расположения датчика. Амплитуды в центральной точке ( $z = 1,5\text{ м}$ ) и на высоте 5 см от нижней поверхности ( $z = 0,05\text{ м}$ ) отличаются не более, чем на 5 %.

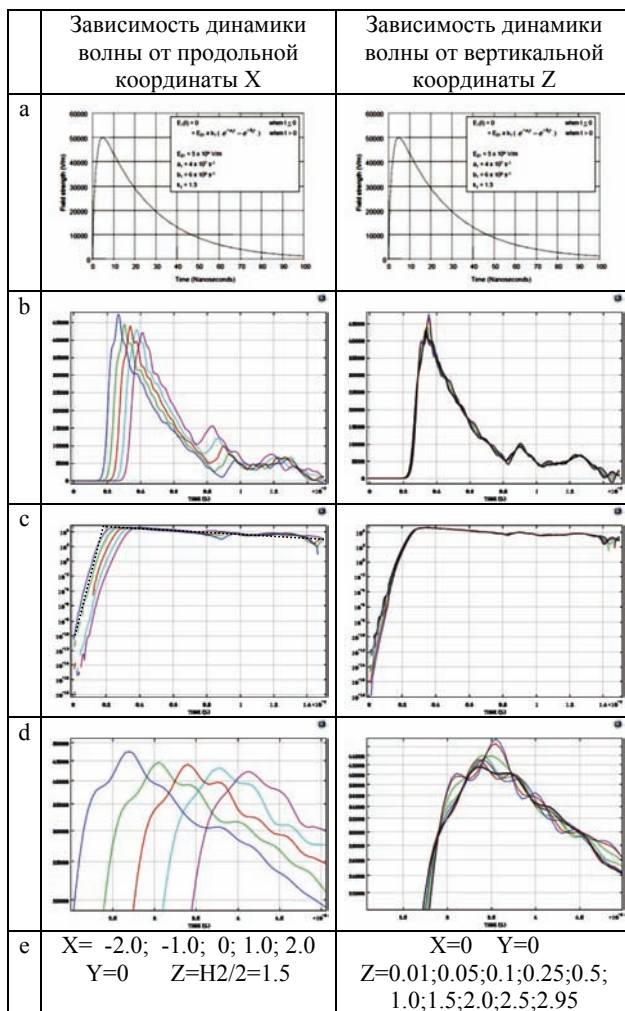


Рисунок 19 – Временная зависимость напряженности электрического поля в фиксированных точках центрального продольного сечения ПС

### 5 Оптимизация нагрузки

Оптимизация нагрузки необходима для подавления отраженной волны, которая искажает динамику прохождения фронта прямой волны. В качестве критерия качества оптимизации было выбрано отношение

амплитуды обратного и прямого импульса, проходящего через выбранное поперечное сечение ПС.

Отношение рассчитывалось для средней по сечению плотности потока энергии, а также для вертикальной компоненты  $E_z$  электрического поля. Для оптимизации были выбраны два сечения – в центре горизонтальной части ПС ( $x = 0$ ) и на выходе из нее ( $x = 2,5\text{ м}$ ).

На рис. 20 слева изображено семейство зависимостей плотности потока энергии, усредненной по площади поперечного сечения ПС ( $x = 2,5\text{ м}$ ), при различных значениях нагрузки: 200 Ом, 175 Ом, 150 Ом, 125 Ом, 100 Ом. Наиболее близкой к требуемой форме импульса оказалась кривая при значении нагрузки 125 Ом. При этом амплитуда отраженной волны (оцененная как амплитуда «всплеска» на кривой экспоненциального затухания в момент времени 78 нс) составляет не более 2% от амплитуды первичного импульса в этом сечении.

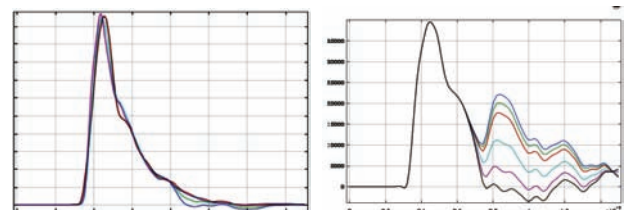
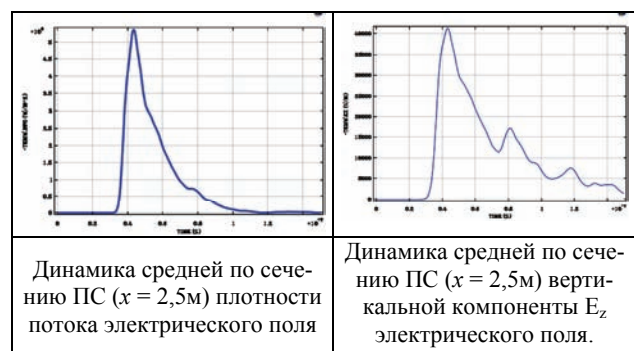


Рисунок 20 – Примеры расчетов по оптимизации нагрузки: плотности потока мощности волны, и компоненты поля  $E_z$ , усредненной по сечению ПС

На рис. 20 справа показана динамика среднего по сечению ( $x = 2,5\text{ м}$ ) значения  $E_z$  при нагрузке 200, 175, 150, 100, 67,50 Ом (сверху вниз). При этом оказывается, что всплески, соответствующие отраженной волне, присутствуют при любой нагрузке. Но ее оптимизация позволяет сместить среднее значение  $E_z$  ближе к форме не искаженного импульса. Этот результат достигается при нагрузке в 67 Ом.



Динамика средней по сечению ПС ( $x = 2,5\text{ м}$ ) плотности потока электрического поля

Динамика средней по сечению ПС ( $x = 2,5\text{ м}$ ) вертикальной компоненты  $E_z$  электрического поля.

Рисунок 21 – Оптимизация нагрузки по плотности потока энергии дает значение 125 Ом (слева). На графике динамики  $E_z(t)$  (справа) наблюдаются два пика, соответствующие приходу однократно и двукратно отраженной волны

Следует отметить, что результаты оптимизации по компоненте  $E_z$  поля и по плотности потока энергии дают различные результаты. Так, на рис. 21 показаны результаты расчетов для нагрузки 125 Ом, при которой динамика плотности потока энергии практически не отличается от динамики требуемого импульса. На

графике  $E_z(t)$  при этой нагрузке видны два «всплеска», по времени соответствующие приходу однократно и двукратно отраженной (от границ конусной части ПС) волны.

Аналогичные результаты оптимизации наблюдаются при анализе динамики параметров поля в центральном сечении и в центральной точке ПС.

Эффект невозможности полной компенсации отраженной волны связан с широким спектром входного импульса и дисперсией волнового сопротивления ПС. Для более качественной компенсации отраженного импульса требуется использовать распределенную (по оси  $x$ ) в конусной части ПС нагрузку. Тем не менее, из анализа полученных результатов можно сделать вывод, что нагрузка 125 Ом обеспечивает достаточное поглощение прямого импульса и удовлетворяет требованиям стандарта [1].

**6 Влияние близости грунта к нижней плоскости ПС**

Для анализа влияния близости грунта на формирование распределения поля в ПС были просчитаны 2 модели: с расстоянием до бетонного основания 1 м и с ПС, расположенной непосредственно на бетонном основании.

Сравнение проводилось на основе анализа поперечного и продольного сечений ПС, проходящих через ее центр. Результаты моделирования представлены на рис. 22 - 24.

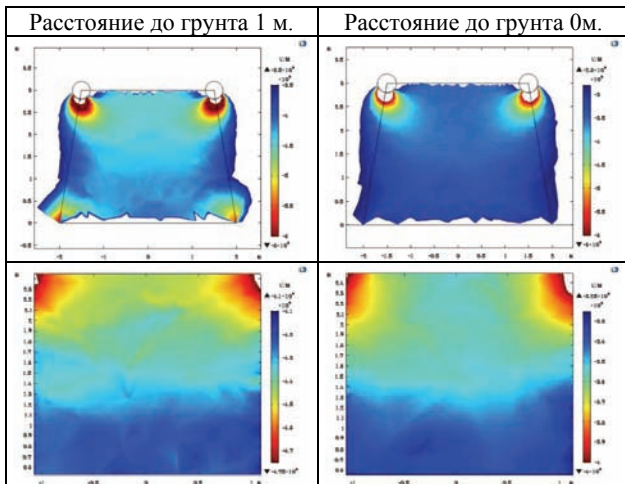


Рисунок 22 – Распределение напряженности  $E$  поля в поперечном сечении ПС

Анализ результатов моделирования показывает, что:

- уменьшение расстояния до грунта (с 1 м до 0 м) увеличивает неоднородность распределения поля по высоте с  $\pm 6\%$  до  $\pm 13\%$ ;
- в области  $2 \times 2 \text{ м}^2$  соответственно с  $\pm 3\%$  до  $\pm 7\%$ ;
- уменьшение расстояния до грунта (с 1 м до 0 м) незначительно искажает форму импульса;
- уменьшение расстояния до грунта (с 1 м до 0 м) уменьшает амплитуду волны на 15%.

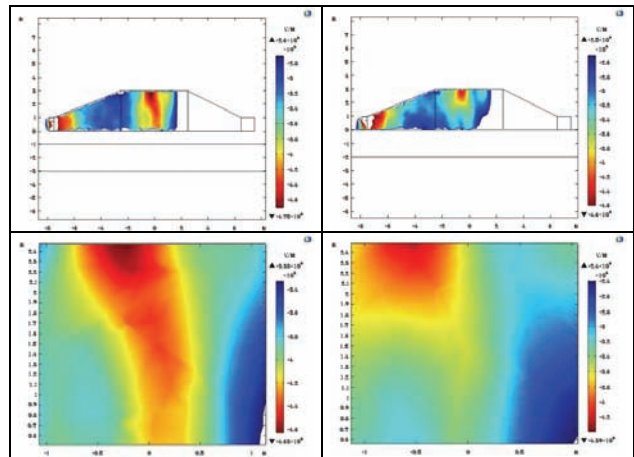


Рисунок 23 – Распределение напряженности  $E$  поля в продольном сечении ПС

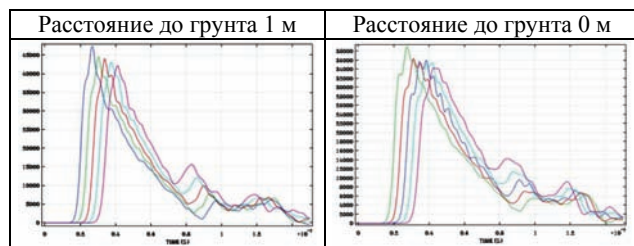


Рисунок 24 – Анализ влияния близости грунта на формирование распределения поля в ПС. Приведены временные зависимости компоненты  $E_z$  напряженности электрического поля в различных точках прямого сектора ПС, расположенной на расстоянии до бетонного основания 1 м (слева) и с ПС, расположенной непосредственно на бетонном основании (справа)

**7 Анализ распространения волны во внешней относительно ПС области**

Для оценки распространения волны за пределами ПС использована модель с расширенной областью внешнего пространства, ограниченного сферой радиусом 250 м. Исследовалось распределение компоненты вектора напряженности электрического поля  $E_z$  в различные моменты времени. Далее приведены отдельные кадры из него. Различными цветами обозначены границы областей, соответствующие значениям  $E_z$ , равным 10, 20, 40, 80, 160 и 320 В/м.

Анализ полученных распределений показывает, что граница каждой из областей сначала расширяется, а затем сужается. Максимальный размер области с границей 320 [В/м] составляет около 50 м, а 10 [В/м] – 200 м, что подтверждает предварительные аналитические оценки.

**Выводы.** Проведенное численное моделирование и анализ его результатов для ПС типа – полосковая несимметричная линия с переходными секциями и горизонтальной частью позволяет сделать следующие выводы:

*Результаты общего анализа*

В горизонтальной области ПС поле распространяется без геометрических и временных искажений, достигая максимального значения напряженности 50 кВ/м. При этом в верхней части области фронт волны незначительно отстает от фронта волны в нижней части, что связано с особенностями геометрии ПС.

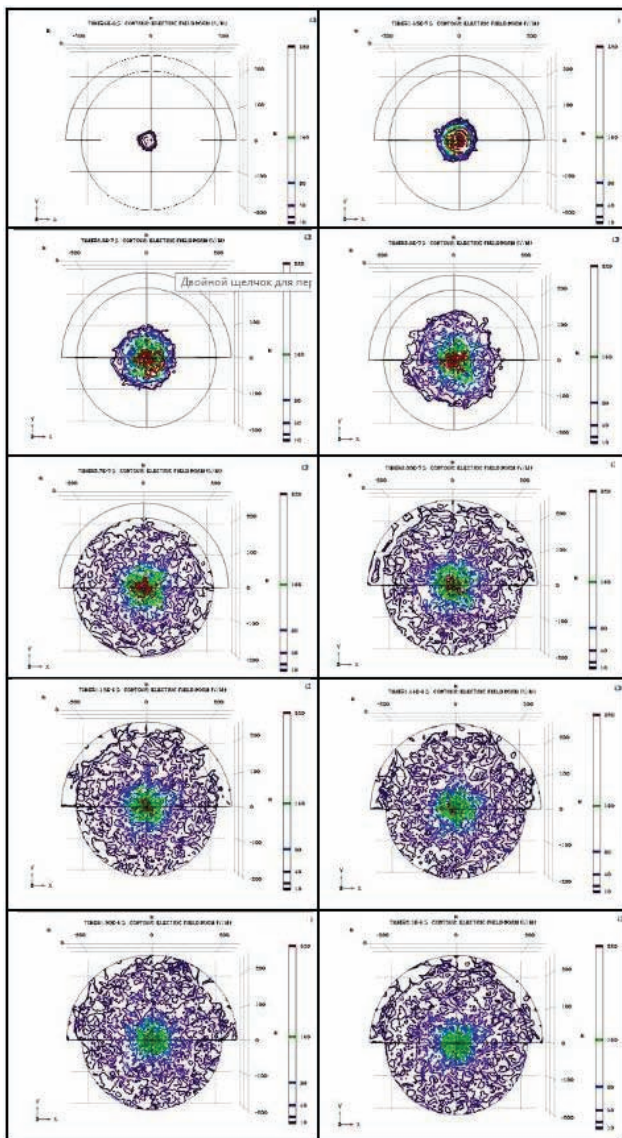


Рисунок 25 – Границы областей, соответствующие значениям  $E_z$ , равным 10, 20, 40, 80, 160 и 320 В/м в различные моменты времени в течение 2 мкс от начала подачи импульса

#### Результаты анализа распределений поля

В прямой области ПС (исключая края токопроводящих элементов) вектора напряженности электрического и магнитного полей отклоняются от сечения  $YZ$  не более, чем  $0,3$  рад на краях горизонтальной области и не более, чем на  $0,05$  рад в ее центре.

Форма волны отклоняется от волны ТЕМ-типа не более, чем на  $5\%$  в центральной области длиной около  $3$  м и на расстоянии от токопроводящих элементов не менее  $0,3$  м.

При прохождении фронта импульса в горизонтальной части ПС неоднородность распределения электрического поля (компонента  $E_z$ ) и магнитного (компонента  $H_y$ ) не превышает  $\pm 3\%$  от среднего значения, что составляет  $\pm 1$  дБ.

Для центральной части  $2 \times 2 \text{ м}^2$  (что составляет более половины по ширине и высоте горизонтальной части ПС) неоднородность поля не превышает  $\pm 15\%$ , что составляет  $\pm 0,6$  дБ. При этом в центральном сечении горизонтальной области неоднородность еще ни-

же и не превышает в квадрате  $2 \times 2 \text{ м}^2 \pm 0,3$  дБ.

#### Результаты анализа динамики поля

Продольное распределение напряженностей электрической и магнитной компонент ТЕМ-волны (вдоль оси  $X$ ) формируется в основном его временными параметрами и незначительно искажается особенностями формы ПС.

Временная динамика компоненты  $E_z$  электрического поля может быть представлена как наложение прямого импульса и отраженного импульса меньшей амплитуды.

В горизонтальной части ПС на длине  $4$  м (из  $5$  м) форма импульса практически не меняется, постепенно снижая амплитуду на  $10\%$ .

Искажения формы импульса практически не зависят от точки контроля в пределах горизонтальной области ПС. Они связаны с наложением отраженного от границ области сигнала и не превышают  $0,6$  дБ. Для их уменьшения можно использовать плавные переходы между областями ПС и распределенную (по  $X$ ) нагрузку на ее выходе.

В центральном сечении горизонтальной части ПС форма и амплитуда импульса практически не зависят от высоты расположения датчика. Амплитуды в центральной точке ( $z = 1,5$  м) и на высоте  $5$  см от нижней поверхности ( $z = 0,05$  м) отличаются не более, чем на  $5\%$ .

#### Результаты анализа волнового и входного импеданса ПС

Однородность распределения характеристического (поверхностного) импеданса в центральном поперечном сечении ПС наблюдается на двух промежутках времени, соответствующих времени прохождения фронта волны через это сечение и по рупорной части ПС.

Эффект невозможности полной компенсации отраженной волны связан с широким спектром входного импульса и дисперсией волнового сопротивления ПС. Для более качественной компенсации отраженного импульса требуется использовать распределенную (по оси  $X$ ) в конусной части ПС нагрузку.

Нагрузка ПС  $125$  Ом обеспечивает достаточное поглощение прямого импульса и удовлетворяет требованиям стандарта [1].

#### Результаты анализа влияния близости «грунта»

Уменьшение расстояния до грунта с характеристиками бетона (с  $1$  м до  $0$  м) увеличивает неоднородность распределения поля по высоте с  $\pm 6\%$  до  $\pm 13\%$ . В области  $2 \times 2 \text{ м}^2$  на  $\pm 3\%$  и  $\pm 7\%$ , соответственно. Увеличение проводимости грунта, очевидно, степень влияния будет возрастать.

Уменьшение расстояния до грунта (с  $1$  м до  $0$  м) незначительно искажает форму импульса.

Уменьшение расстояния до грунта (с  $1$  м до  $0$  м) уменьшает амплитуду волны на  $15\%$ .

#### Результаты анализа распространения поля во внешнее пространство

Граница областей, ограниченных пороговым значением напряженности, сначала расширяется, а затем сужается. Максимальный размер области с границей  $320$  В/м составляет около  $50$  м, а  $10$  В/м –  $200$  м.

**Список літератури:**

1. MIL-STD-461G Department of defence interface standard. Requirements for the control of electromagnetic interference. Characteristics of subsystems and equipment.
2. IEC/TR 61000-1-3:2002 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 1-3: General – The effects of high-altitude EMP (HEMP) on civil equipment and systems.
3. IEC/TR 61000-1-5:2004 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 1-5: General – High power electromagnetic (HPEM) effects on civil systems.
4. IEC 61000-2-9:1996 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2: Environment – Section 9: Description of HEMP environment - Radiated disturbance. Basic EMC publication
5. IEC 61000-2-10:1998 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-10: Environment – Description of HEMP environment – Conducted disturbance.
6. IEC 61000-2-11:1999 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-11: Environment – Classification of HEMP environments.
7. IEC 61000-2-13:2005 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-13: Environment – High-power electromagnetic (HPEM) environments – Radiated and conducted.
8. IEC 61000-4-18:2006 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-18: Testing and measurement techniques – Damped oscillatory wave immunity test.
9. IEC 61000-4-23:2016 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-23: Testing and measurement techniques – Test methods for protective devices for HEMP and other radiated disturbances.
10. IEC 61000-4-24:2015 Electromagnetic compatibility (EMC) –Part 4: Testing and measurement techniques – Section 24: Test methods for protective devices for HEMP conducted disturbance – Basic EMC Publication.

**Bibliography (transliterated):**

1. MIL-STD-461G Department of defence interface standard. Requirements for the control of electromagnetic interference. Characteristics of subsystems and equipment.
2. IEC/TR 61000-1-3:2002 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 1-3: General – The effects of high-altitude EMP (HEMP) on civil equipment and systems.
3. IEC/TR 61000-1-5:2004 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 1-5: General – High power electromagnetic (HPEM) effects on civil systems.
4. IEC 61000-2-9:1996 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 2: Environment – Section 9: Description of HEMP environment – Radiated disturbance. Basic EMC publication
5. IEC 61000-2-10:1998 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 2-10: Environment – Description of HEMP environment – Conducted disturbance.
6. IEC 61000-2-11:1999 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-11: Environment – Classification of HEMP environments.
7. IEC 61000-2-13:2005 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 2-13: Environment – High-power electromagnetic (HPEM) environments – Radiated and conducted.
8. IEC 61000-4-18:2006 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-18: Testing and measurement techniques – Damped oscillatory wave immunity test.
9. IEC 61000-4-23:2016 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-23: Testing and measurement techniques – Test methods for protective devices for HEMP and other radiated disturbances.
10. IEC 61000-4-24:2015 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4: Testing and measurement techniques – Section 24: Test methods for protective devices for HEMP conducted disturbance – Basic EMC Publication.

Поступила (received) 20.09.2017

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Методика розрахункової оцінки просторового розподілу амплітудно-часових параметрів електромагнітного імпульсу в полеутворюючій системі полозкового типу / В. В. Князев, С. І. Мельник, С. П. Шаламов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 18-32. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).**

**Методика расчётной оценки пространственного распределения амплитудно-временных параметров электромагнитного импульса в полеобразующей системе полоскового типа / В. В. Князев, С. И. Мельник, С. П. Шаламов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 18-32. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).**

**Numerical simulation of spatial distribution of amplitude-time parameters of electromagnetic pulse in field-forming systems of stripline type / V.V. Kniaziev, S.I. Mel'nik, S.P. Shalamov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 38 (1260). – С. 18-32. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Князев Володимир Володимирович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел./факс: (057) 707-68-68, e-mail: knyaz2@i.ua

**Князев Владимир Владимирович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник НИПКІ «Молния» НТУ «ХПІ», тел./факс: (057) 707-68-68, e-mail: knyaz2@i.ua

**Kniaziev Volodymyr Volodymyrovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior staff scientist, Principal scientist of NDKPI "Molniya" NTU "KhPI", Phone/Fax: (057) 707-68-68, e-mail: knyaz2@i.ua

**Мельник Сергій Іванович** – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник Інституту радіоелектроніки НАНУ, e-mail: smelnyk@yandex.ua

**Мельник Сергей Иванович** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института радиоэлектроники НАНУ, e-mail: smelnyk@yandex.ua

**Mel'nik Sergiy Ivanovych** - Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior staff scientist of Institute of Radioelectronics NASU, e-mail: smelnyk@yandex.ua

**Шаламов Станіслав Павлович** – аспірант НТУ «ХПІ», тел.: 066-62-60-187, e-mail: shalamov.stas@mail.ru.

**Шаламов Станислав Павлович** – аспірант НТУ «ХПІ», тел.: 066-62-60-187, e-mail: shalamov.stas@mail.ru

**Shalamov Stas Pavlovich** – Post-graduate of NTU "KhPI", tel.: 066-62-60-187, e-mail: shalamov.stas@mail.ru