

Взаимодействие полей ЭМИ ядерного взрыва с объектами

Попов И.С.

Кафедра теоретической физики

Омский государственный университет имени Ф.М.Достоевского



Цель работы:

1. Произвести обзор современных методов моделирования действия электромагнитного импульса ядерного взрыва на различные элементы радиоэлектронного оборудования.
2. Разработан и программно реализован метод численного решения системы дифференциальных уравнений Максвелла, описывающую взаимодействия электромагнитного поля с объектом сложной формы.
3. Изложить современные результаты в данной области, полученные другими авторами.
4. Произвести моделирование действия электромагнитного поля электромагнитного импульса ядерного взрыва на различные объекты сложной формы.

Математическая постановка задачи

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t};$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t};$$

(1)

Численный метод: FDTD (Finite Difference Time Domain) [1]

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right);$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right);$$

$$E_z^{n+1}(i,j,k+1/2) = \frac{1-\psi}{1+\psi} E_z^n(i,j,k+1/2) + \frac{\Delta t}{\varepsilon(i,j,k+1/2)} \times$$
$$\times \frac{1}{1+\psi} \left[\frac{H_y^{n+1/2}(i+1/2,j,k+1/2) - H_y^{n+1/2}(i-1/2,j,k+1/2)}{\Delta x} + \right.$$
$$\left. + \frac{H_x^{n+1/2}(i,j-1/2,k+1/2) - H_x^{n+1/2}(i,j+1/2,k+1/2)}{\Delta y} \right]; \quad (2)$$

[1] Давыдов А.А., Кондратьева А.И., Плыгач В.А. Трёхмерная методика расчёта параметров взаимодействия электромагнитных полей с объектами. – ЦФТИ МО РФ. М.: 1999. 91 с.

$$\begin{aligned}
H_z^{n+1}(i,j,k+1/2) &= H_z^n(i+1/2,j+1/2,k) + \frac{\Delta t}{\mu(i+1/2,j+1/2,k)} \times \\
&\times \frac{1}{1+\psi} \left[\frac{E_x^n(i+1/2,j+1,k) - E_x^n(i+1/2,j,k)}{\Delta x} + \right. \\
&\left. + \frac{E_y^n(i+1/2,j+1,k) - E_y^n(i+1/2,j,k)}{\Delta y} \right]; \tag{2'}
\end{aligned}$$

$$\Delta t \leq \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{(1/\Delta x)^2 + (1/\Delta y)^2 + (1/\Delta z)^2}};$$

$$I_y(t) = \Delta x \Delta y \sum_{i,k} \sigma(i,j,k) E_y(i,j,k,t) + \sigma(i,j,k) \frac{\partial E_y(i,j,k,t)}{\partial t};$$

$$J_y(t) = \sigma(i,j,k) E_y(i,j,k,t) + \sigma(i,j,k) \frac{\partial E_y(i,j,k,t)}{\partial t};$$

Внешние граничные условия

1. Условия [1,2].
2. Условия Мура [3].
3. Поглощающие граничные условия в запаздывающем времени [4].

-
- [1] Bayliss A., Turkel E. Radiation boundary conditions for wave-like equation // Commun. Pure Appl. Math. 1980. V.33. P.707-725.
- [2] Holland R. THREDE: A free EMP coupling and scattering code // IEEE Transaction on Nuclear Science. 1977. V.NS-24. № 6. P. 2416-2421.
- [3] Mur G. Absorbing boundary conditions for finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic field equations // IEEE Transaction Electromagnetic Computation. 1981. V.EMC-23. № 4. P. 1073-1077.
- [4] Berntsen S., Hornselt S.N. Retarded time absorbing boundary conditions // IEEE Transaction Antennas Propagat. 1994. V. 42. № 8. P. 1059-1064.

Учёт наличия скачков электрофизических параметров среды

$$\begin{aligned}\varepsilon(i+1/2,j,k) &= \frac{1}{4} \left[\varepsilon(i+1/2,j+1/2,k+1/2) + \varepsilon(i+1/2,j-1/2,k+1/2) + \right. \\ &+ \varepsilon(i+1/2,j+1/2,k-1/2) + \left. \varepsilon(i+1/2,j-1/2,k-1/2) \right]; \\ \sigma(i+1/2,j,k) &= \frac{1}{4} \left[\sigma(i+1/2,j+1/2,k+1/2) + \sigma(i+1/2,j-1/2,k+1/2) + \right. \\ &+ \sigma(i+1/2,j+1/2,k-1/2) + \left. \sigma(i+1/2,j-1/2,k-1/2) \right]; \\ \mu(i,j+1/2,k+1/2) &= \frac{2\mu(i-1/2,j+1/2,k+1/2)\mu(i+1/2,j+1/2,k+1/2)}{\mu(i-1/2,j+1/2,k+1/2) + \mu(i+1/2,j+1/2,k+1/2)};\end{aligned}\tag{3}$$

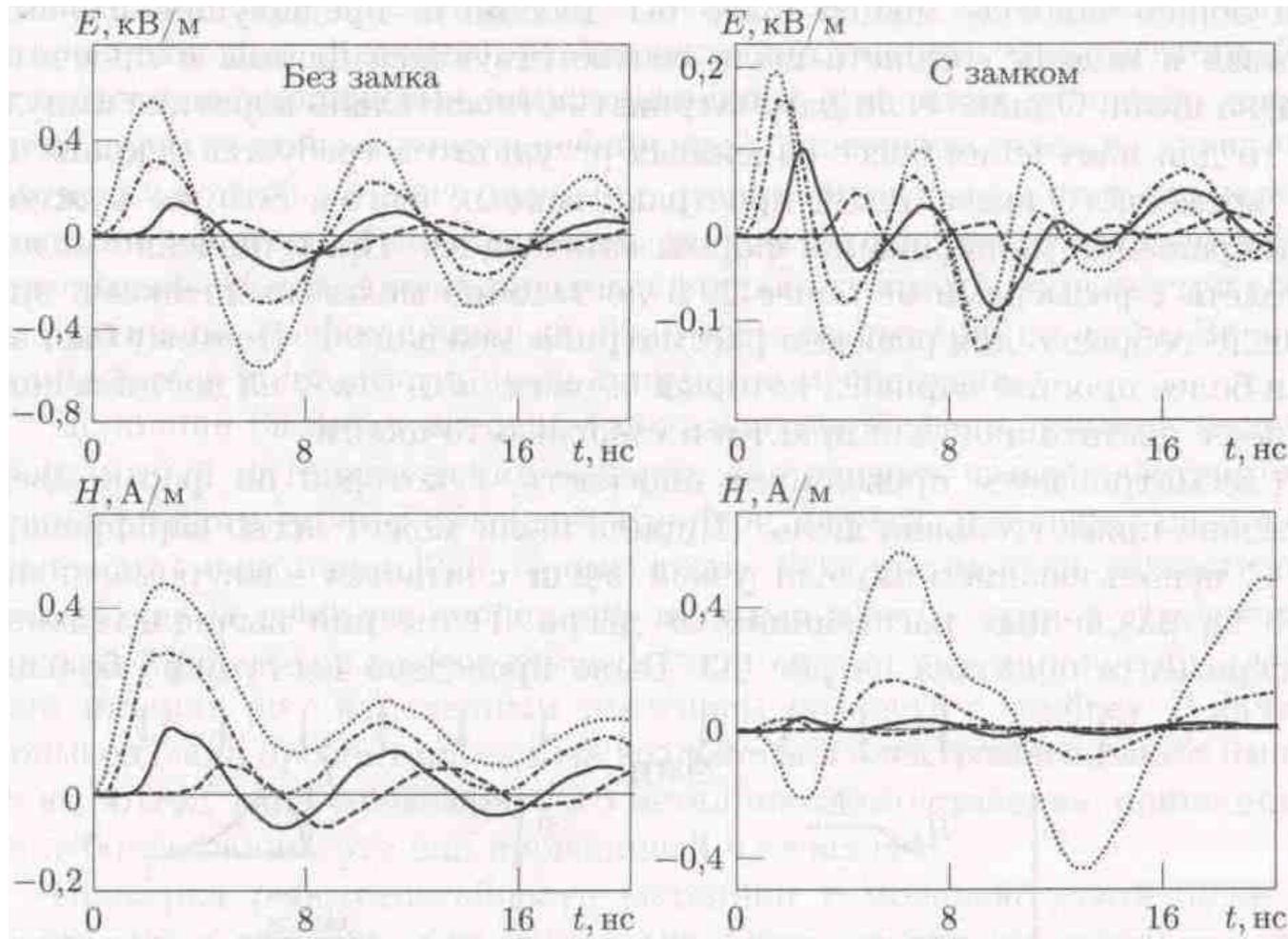
$$\begin{aligned}\varepsilon(x,y,z) &= \frac{1}{2} \left[\varepsilon(x,y+\frac{1}{2}\Delta y,z) + \varepsilon(x,y-\frac{1}{2}\Delta y,z) \right]; \\ \sigma(x,y,z) &= \frac{1}{2} \left[\sigma(x,y+\frac{1}{2}\Delta y,z) + \sigma(x,y-\frac{1}{2}\Delta y,z) \right]; \\ \mu(x,y,z) &= \frac{2\mu(x,y+\frac{1}{2}\Delta y,z)\mu(x,y-\frac{1}{2}\Delta y,z)}{\mu(x,y+\frac{1}{2}\Delta y,z) + \mu(x,y-\frac{1}{2}\Delta y,z)};\end{aligned}\tag{4}$$

Способы автоматизации описания объекта

- 1) Трёхмерное моделирование объекта в графической системе, в последующем разбиение построенной модели прямоугольной сеткой. Основные этапы:
- 2) Создание специального редактора на DELPHI.

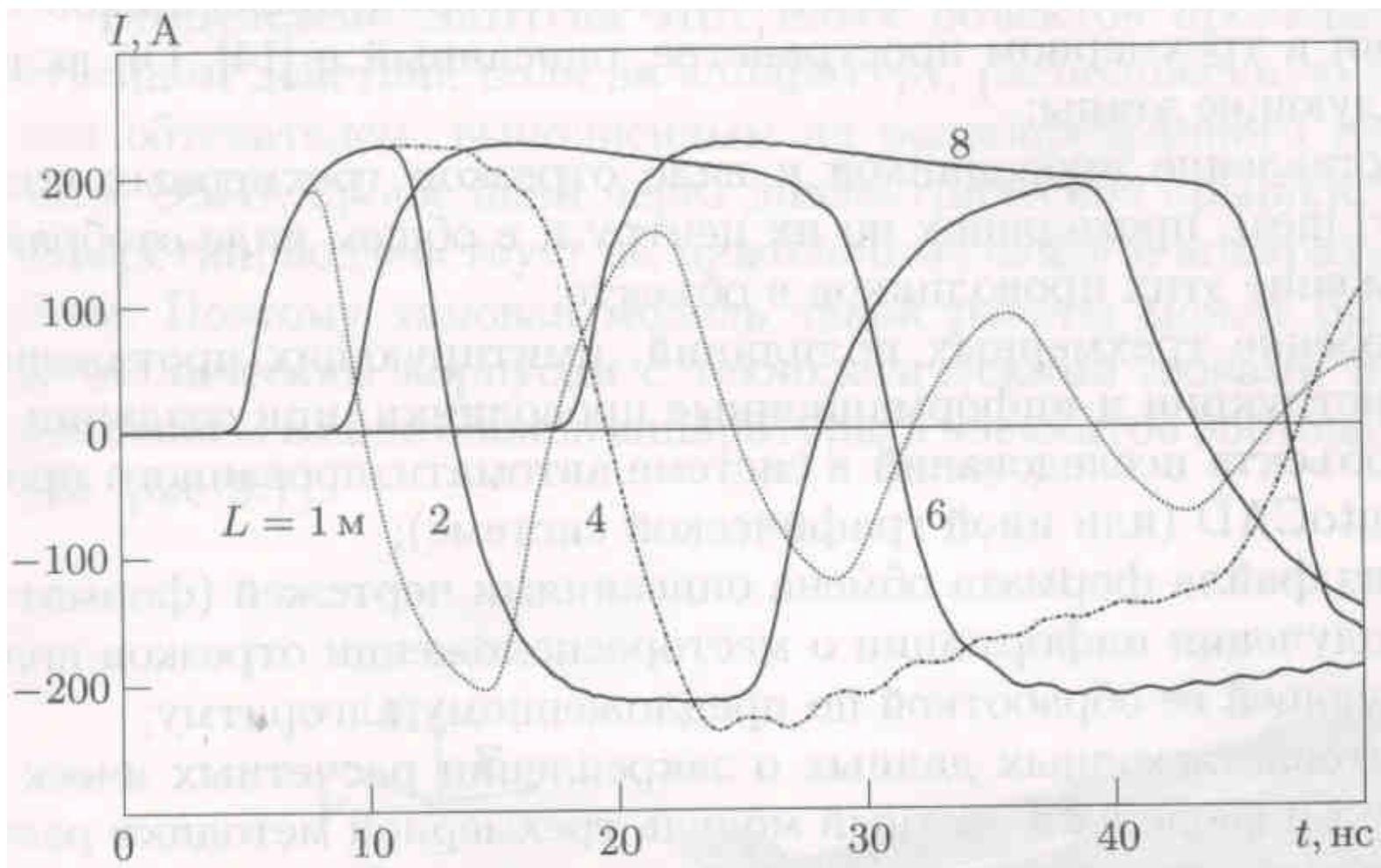
Специальное место в модели отведено описанию модели узкой щели и описание тонких металлических проводников

Некоторые современные результаты



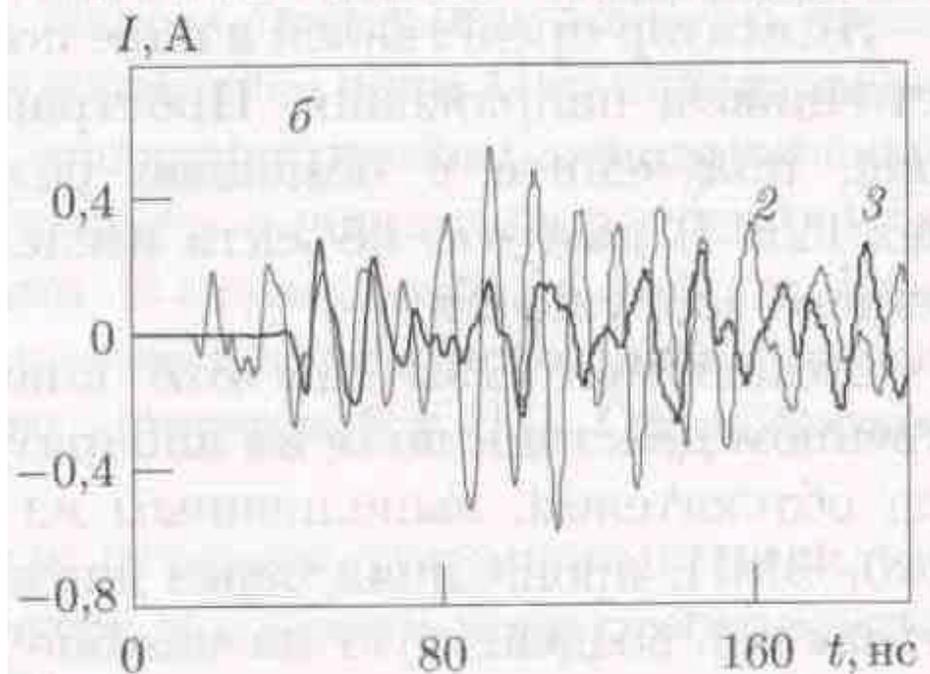
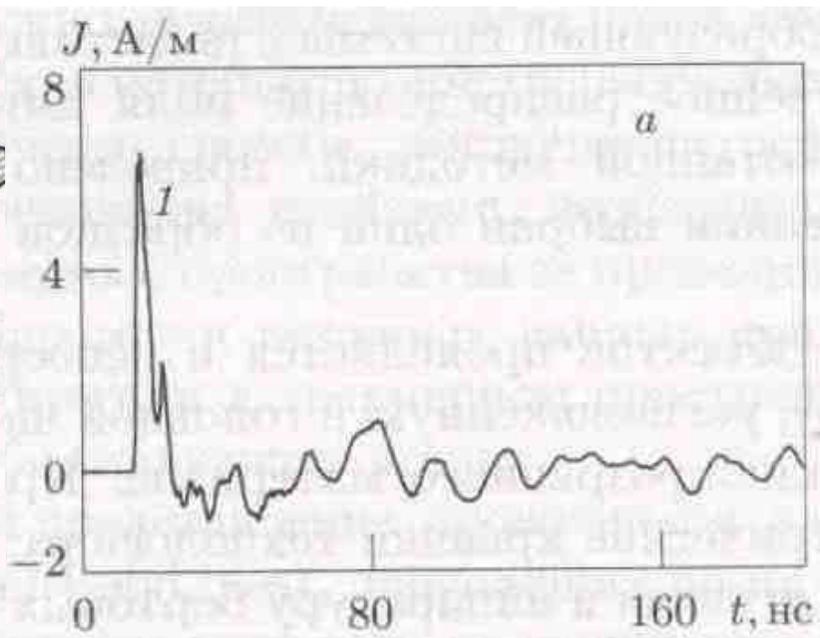
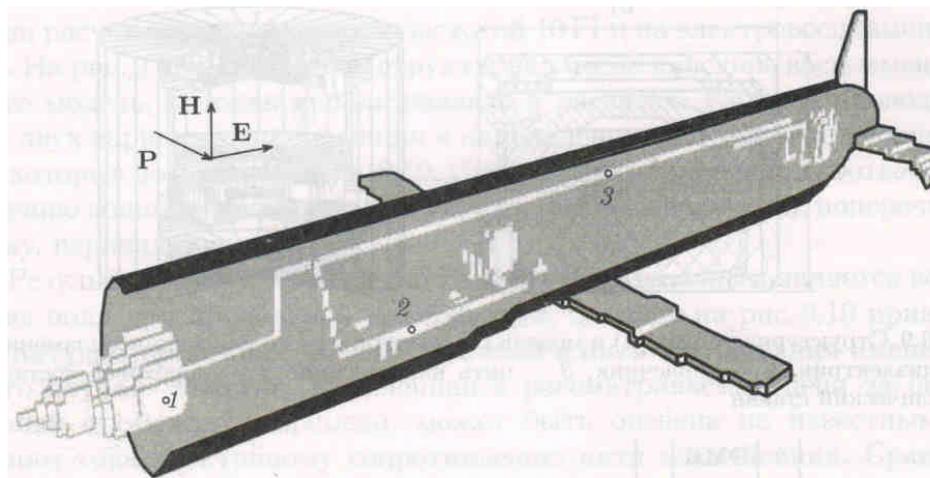
Амплитудно-временные зависимости прошедших через прямоугольную щель компонентов поля на различных расстояниях от неё.

Источник: Физика ядерного взрыва. Том 2. Действие взрыва. 12 ЦНИИ МО РФ. 2010.



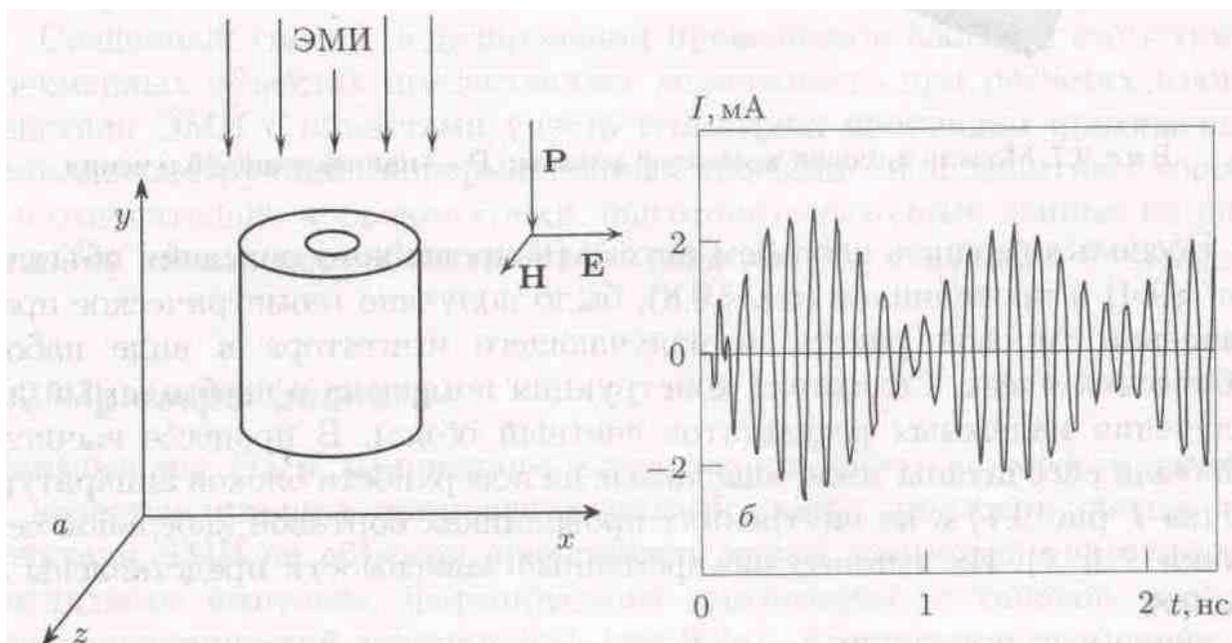
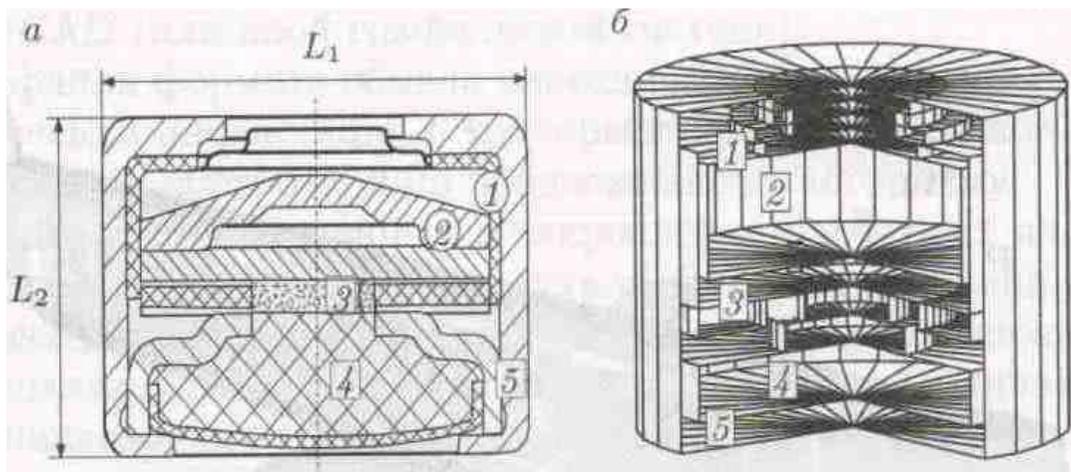
Амплитудно-временные зависимости тока в тонком заземлённом проводнике длины L .

Источник: Физика ядерного взрыва. Том 2. Действие взрыва. 12 ЦНИИ МО РФ. 2010.



Типовая модель крылатой ракеты и амплитудно-временные зависимости плотности тока, наведённого на поверхности моноблока (а – точка 1 на примитивном чертеже ракеты), и тока, формируемого в защитных коробах (б – точки 2 и 3 на примитивном чертеже ракеты).

Источник: Физика ядерного взрыва. Том 2. Действие взрыва. 12 ЦНИИ МО РФ. 2010.

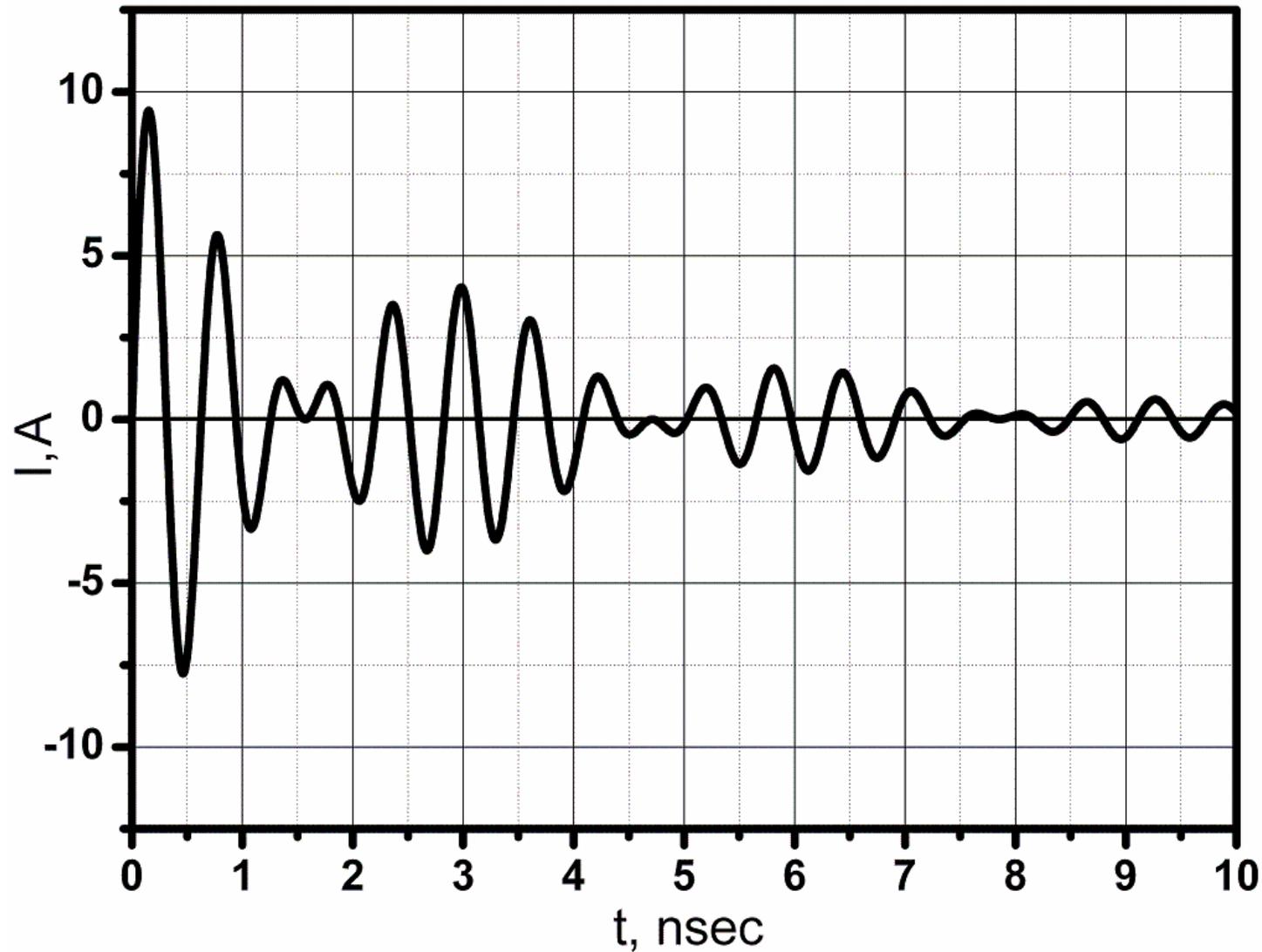


Сверху: структурная схема (а) и модель (б) электрического капсюля-воспламенителя.

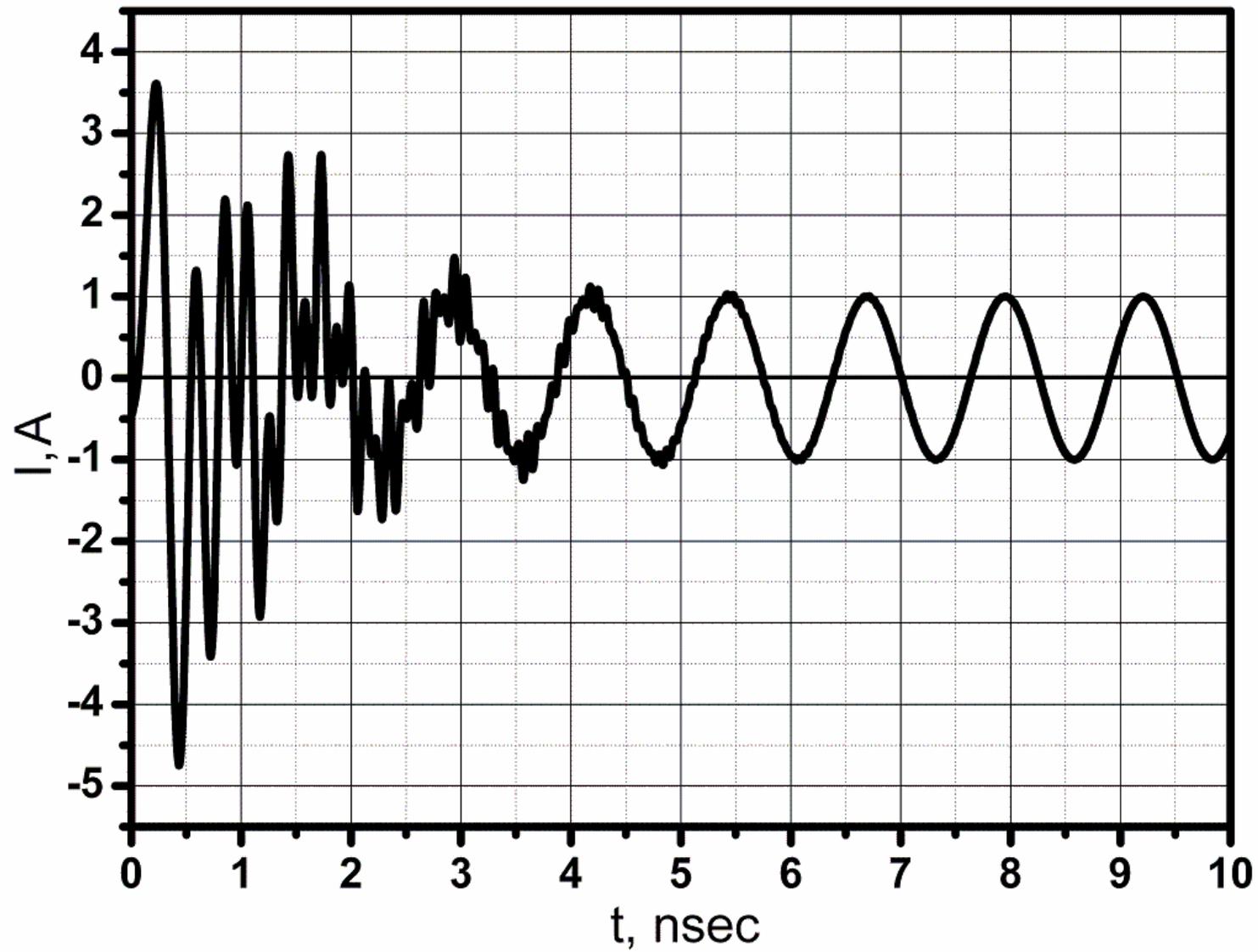
Снизу: схема вычислительного эксперимента и амплитудно-временная зависимость тока в нити накаливания.

Источник: Гриций В.Н., Давыдов А.А., Кондратьева А.И. Расчётная оценка воздействия электромагнитных полей на электрический капсюль-воспламенитель / Сб. докладов девятой российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности. ЭМС 2006. – Санкт-Петербург: ВИТУ, 2006. С. 368-372.

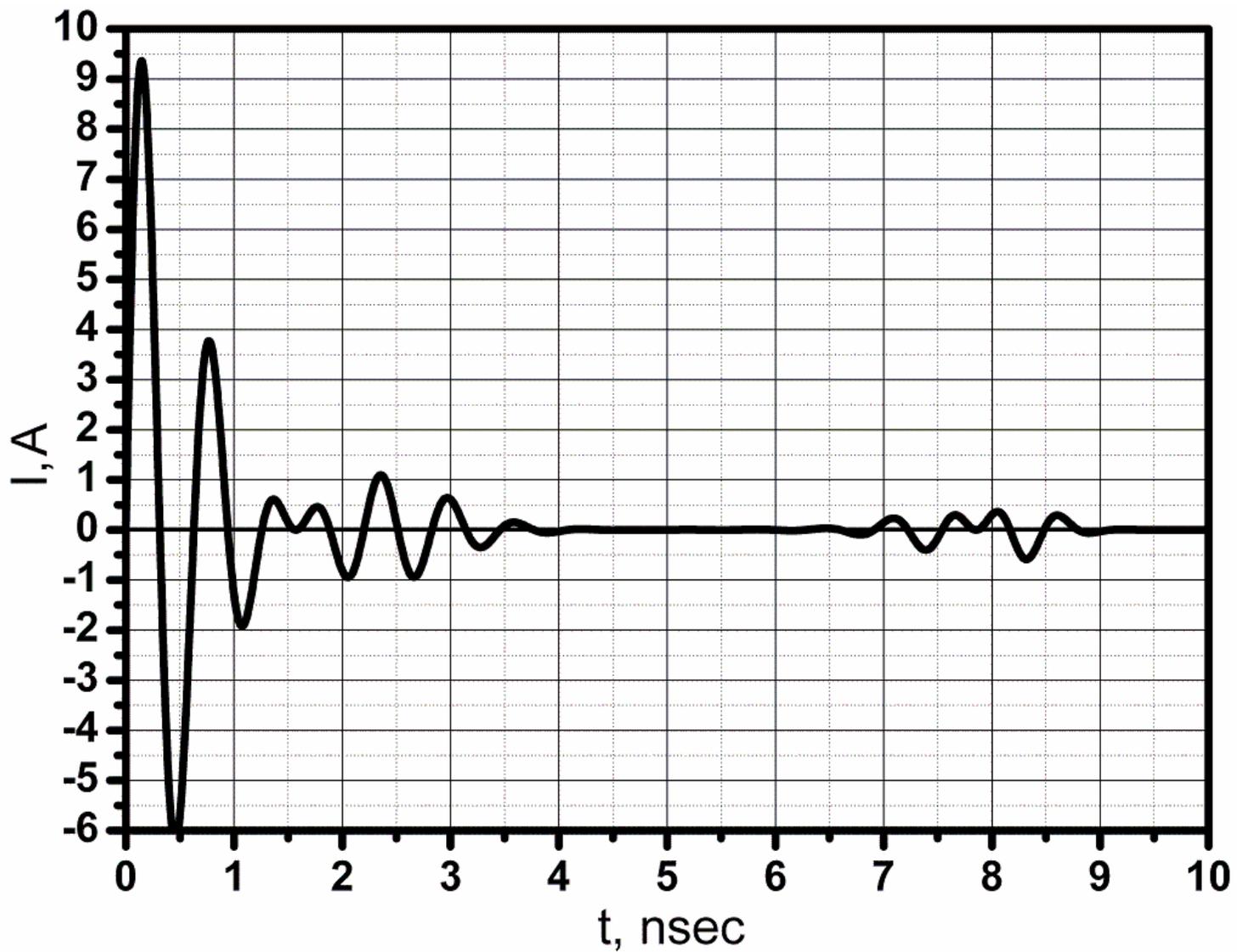
Результаты моделирования



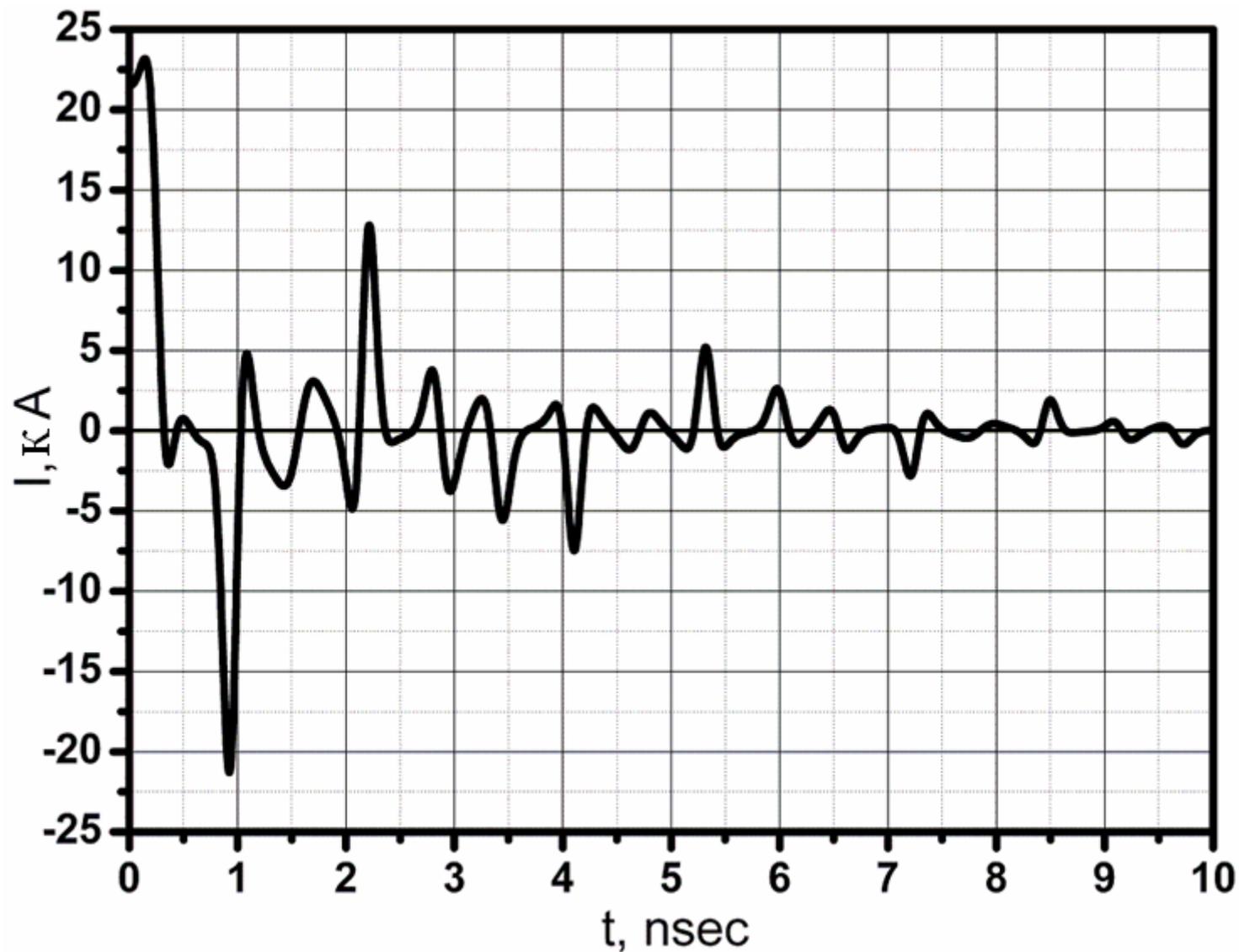
Взаимодействие падающей электромагнитной волны с колебательным контуром. Ток в



Действие ЭМИ ядерного взрыва на СВЧ-генератор синусоидальных колебаний.



Наведённый ЭМИ ядерного взрыва ток в антенне на металлическом корпусе.



Ток в проводнике радиоэлектронного устройства, вызванный ЭМИ ядерного взрыва, при пробое защиты.

Выводы:

1. Произведён обзор современных методов моделирования действия электромагнитного импульса ядерного взрыва на различные элементы радиоэлектронного оборудования.
2. Разработан и программно реализован метод численного решения системы дифференциальных уравнений Максвелла, описывающую взаимодействия электромагнитного поля с объектом сложной формы.
3. Изложены некоторые современные результаты в данной области, полученные другими авторами.
4. Произведено моделирование действия электромагнитного поля электромагнитного импульса ядерного взрыва на различные объекты сложной формы. Приведены результаты и дано их обсуждение.