

РАДИОЧАСТОТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ ПРОВОДНИКОВ

М. А. Горлач

ВВЕДЕНИЕ

Электрический взрыв проводника представляет собой явление резкого изменения физического состояния металла при пропускании по нему импульсного тока большой плотности. Одним из важных применений электрического взрыва в физике высоких плотностей энергии является получение электромагнитного излучения. В спектре излучения взрывающегося проводника выделяют такие компоненты как радиочастотное излучение, видимое и ультрафиолетовое излучение, а также мягкий рентген. Так, в работе [1] теоретически показано, что при быстром убывании кольцевого тока может происходить направленное эффективное излучение электромагнитной энергии. С точки зрения приложений интересным является получение мощного радиочастотного излучения при электрическом взрыве с частотой от сотен мегагерц до нескольких гигагерц. Целями данной работы являются:

- приближённый расчёт спектра излучения взрывающегося проводника и временной зависимости мощности излучения;
- исследование эффектов, связанных с электродинамическим взаимодействием взрывающихся проводников.

СПЕКТР И МОЩНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ ВЗРЫВАЮЩЕГОСЯ ПРОВОДНИКА

Очевидно, что наиболее интенсивное излучение от проводника имеет место в момент быстрого обрыва тока в цепи. Во многих случаях приемлемой аппроксимацией «спадающего» участка кривой тока является

$$I(t) = I_0 \left\{ 1 + \exp\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right) \right\}^{-1},$$

где параметры t_0 , τ , I_0 имеют смысл момента начала этапа собственно взрыва, характерного времени убывания тока и максимального значения силы тока в проводнике соответственно. Тогда, используя известные соотношения для магнито-дипольного излучения, для случая кольцевого тока радиуса ρ_0 получаем следующие результаты: временная зависимость мощности излучения имеет вид

$$P(t) = \frac{27P_{\max}}{4} \frac{sh^2\eta(t)}{ch^6\eta(t)}, \text{ где } \eta = \frac{t-t_0}{2\tau}, \quad P_{\max} = \frac{\pi\mu_0}{648c^3} \cdot \frac{\rho_0^4 I_0^2}{\tau^4}$$
 – максимальная мощность излучения; спектр излучения в магнито-дипольном случае не зависит от направления и описывается выражением $F(\omega) = K \frac{\xi^4(\omega)}{sh^2\xi(\omega)}$, где $\xi(\omega) = \pi\omega\tau$; максимум излучения приходится на частоту $\nu_0 = \frac{0.097}{\tau}$, отвечающую $\xi_0 = 1.92$. При характерных временах убывания тока порядка нескольких десятков наносекунд получаем частоты в десятки мегагерц – радиочастотное излучение. Соответствующие графики представлены на рис. 1, 2.

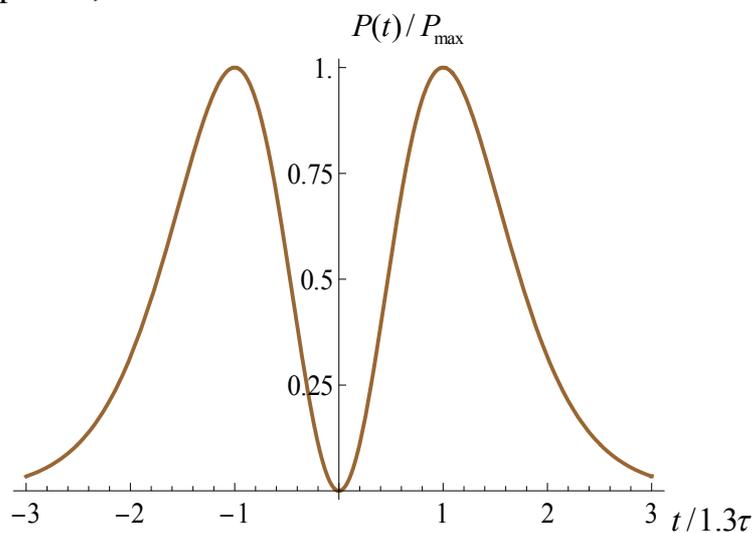


Рис. 1. Временная зависимость мощности излучения взрывающегося проводника

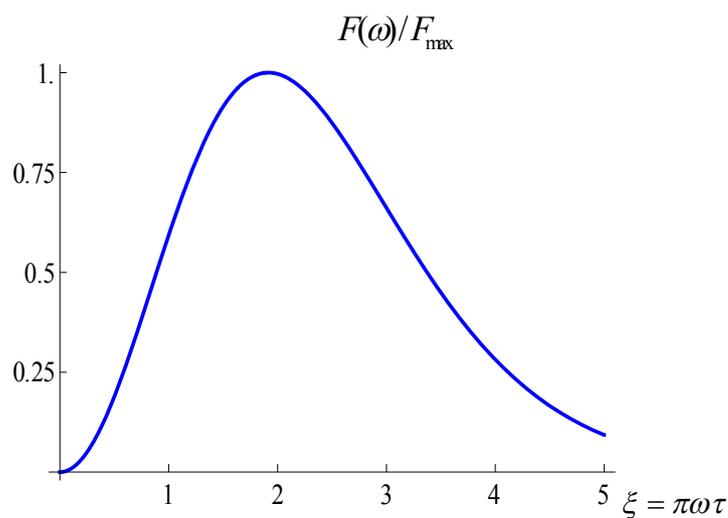


Рис. 2. Спектр излучения взрывающегося проводника (радиочастотная область)

Полученные результаты позволяют по осциллограмме тока во взрывающемся проводнике оценивать характеристики излучения. Отметим, что приведенные соотношения относятся к практически важному случаю $\tau \geq \rho_0/c$, поскольку использовалось магнито-дипольное приближение; рассмотрение общего случая не представляет затруднений. Однако помимо мощности и спектра излучения важным является вопрос об эффективности преобразования энергии, первоначально запасённой в контуре, в электромагнитное излучение. Оценки показывают, что эффективность излучения может быть повышена путём увеличения размеров контура либо путём уменьшения диаметра проводника; кроме того, для получения мощного излучения непременно должен происходить взрыв проводника. Для проведения расчётов излучения при электрическом взрыве использовалась модель [2, 3].

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЗРЫВАЮЩИХСЯ ПРОВОДНИКОВ

Выше был рассмотрен случай одного взрывающегося проводника. Оказывается, что электродинамическое взаимодействие взрывающихся проводников может привести к существенному изменению формы импульса тока.

Пусть две проволоочки, питаемые от разных емкостных накопителей, расположены на небольшом расстоянии друг от друга, причём цепи первой и второй проволоочек замыкаются не одновременно, а с некоторой задержкой по времени. Расчёты по упрощённой модели [4] показывают: в зависимости от начальных условий возможны два варианта развития импульса тока в такой системе. Типичные графики, полученные в результате расчётов, изображены на рис.3, 4.

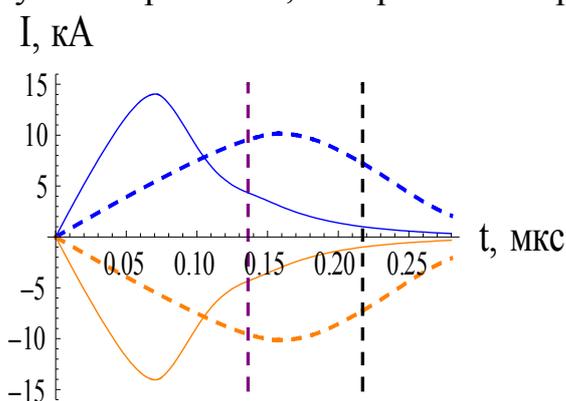


Рис. 3. Случай, когда токи в проволоочках текут в разных направлениях. Наблюдается эффект обострения импульса тока

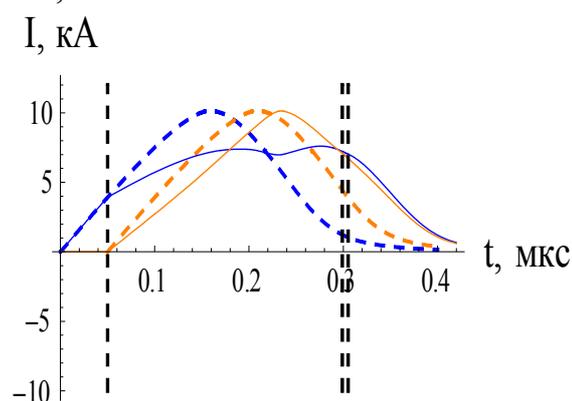


Рис.4. Случай, когда токи в проволоочках текут в одном направлении. Наблюдается эффект синхронизации взрывов проводников

Пунктирными кривыми показаны импульсы тока в отсутствие электродинамического взаимодействия проводочек. Вертикальные пунктирные линии отмечают моменты замыкания цепи либо взрыва проводочки.

Если токи в проводочках текут в разных направлениях, то электродинамическое взаимодействие проводников приводит к тому, что взрыв этих проводников наступает существенно раньше, нежели в отсутствие взаимодействия; импульсы тока в обоих проводниках возрастают по амплитуде и сокращаются по длительности. Таким образом, наблюдается эффект обострения импульса тока. На рис. 3 изображена ситуация, когда цепи обеих проводочек были замкнуты одновременно; разные знаки для сил тока в первой и второй проводочке учитывают разные направления токов в проводниках. Физической причиной эффекта обострения импульса тока является уменьшение эффективной индуктивности системы из двух проводочек вследствие встречного включения токов в них.

Если же токи в проводочках текут в одном направлении, то электродинамическое взаимодействие проводников, напротив, приводит к сглаживанию импульса тока в каждой из проводочек. Однако наблюдается эффект синхронизации взрывов: так, в примере на рис. 4 контуры первой и второй проводочек были замкнуты с задержкой по времени 50 нс; различие же во временах взрыва этих проводников составило всего 6 нс.

Отметим, что с использованием многопроводочных сборок можно добиться более существенного обострения импульса тока, что важно в импульсной энергетике и электронике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрен процесс генерации радиочастотного излучения при электрическом взрыве проводников; получен приближённый вид спектра радиочастотного излучения взрывающегося проводника, установлена временная зависимость мощности излучения. Полученные инженерные формулы позволяют оценивать характеристики излучения взрывающегося проводника по осциллограмме тока в нём. Также в работе рассмотрены эффекты, связанные с электродинамическим взаимодействием взрывающихся проводников: эффект обострения импульса тока и эффект синхронизации взрывов.

Автор выражает благодарность научному руководителю В.Г. Барышевскому за постановку задачи, а также А.А. Гуринович и С.Л. Черкасу за многочисленные обсуждения и ценные замечания.

Литература

1. Афанасьев Ю. В., Климов В. В., Феоктистов А. Л., Феоктистов Л. П. Излучение быстросубявающего кольцевого тока // ЖЭТФ. 1992. Т101. Вып. 4. С. 1118–1131.

2. *Barysevich A. E., Cherkas S. L.* Testing the equation of state and electrical conductivity of copper by the electrical wire explosion in air: experiment and magnetohydrodynamic simulation // *Physics of Plasmas*. 18. 052703 (2011).
3. *Борисевич А. Е., Черкас С. Л.* Влияние радиуса проводника на динамику электрического взрыва: магнитогиродинамическое моделирование // *ЖТФ*. 2012. Т82. Вып. 10. С. 58–64.
4. *Горлач М. А.* Моделирование электрического взрыва медных проводников в воздухе // *Сб. работ 69-й научной конференции студентов и аспирантов БГУ*. Минск. 2012. С. 122–125.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТОВЫХ ИМПУЛЬСОВ В СЛОИСТЫХ СРЕДАХ: ОПТИЧЕСКИЕ АНАЛОГИИ КВАНТОВЫХ ЯВЛЕНИЙ

Н. Дадашзадех, Д. Д. Орловская

Фотонные структуры как объект изучения за последние два десятилетия прошли путь от абстрактной концепции до систем, широко используемых в различных оптических приложениях. Так, нелинейные фотонные структуры различных геометрий (одномерный фотонный кристалл, микрорезонаторы, волноводы и т.д.) служат в качестве логических элементов, переключателей, мультиплексоров в волоконно-оптических линиях связи и системах обработки лазерных сигналов [1]. Поэтому изучение их оптических свойств является одним из перспективных направлений современной нелинейной и квантовой оптики.

Явления распространения электромагнитных волн в средах с модуляцией показателя преломления имеют много общего с квантово-механическими задачами о распространении волнового пакета в пространственно-неоднородном потенциальном поле. На основе изоморфизма стационарного уравнения Шредингера и уравнения Гельмгольца выявлены оптические аналоги квантово-механических явлений резонансного прохождения, туннелирования волновых пакетов через оптические неоднородности и др. [2].

В данной работе представлены результаты теоретического, численного и компьютерного моделирования процессов распространения электромагнитных волн через многослойные диэлектрические структуры; исследованы закономерностей распространения сверхкоротких световых импульсов в слоистых средах; рассчитаны энергетические коэффициенты отражения и прохождения в зависимости от параметров сред и излучения. Для расчета пространственных распределений напряженности электрического и магнитных полей в работе использовался метод конечно-разностной аппроксимации уравнений Максвелла в пространственной и временной области (*FDTD*-метод) для одномерной геометрии неоднородностей показателя преломления.