

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНЫ ПЛОТНОСТИ ЗАРЯДА В НЕОДНОРОДНЫХ МАГНИТОИЗОЛИРОВАННЫХ ПЕРЕДАЮЩИХ ЛИНИЯХ

А.М. Горбань, Ю.Ф. Лонин

*Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",
Харьков, Украина*

E-mail: gorban@kipt.kharkov.ua; lonin@kipt.kharkov.ua

Представлены результаты исследования пространственных характеристик волны плотности заряда в неоднородных магнитоизолированных передающих линиях, полученные методом численного моделирования. Обсуждается зависимость параметров волны плотности от полного тока в линии и влияние нерегулярности замедляющей структуры.

1. ВВЕДЕНИЕ

Передающие линии с магнитной самоизоляцией (МИПЛ) представляются хорошей основой для создания генератора на скрещенных полях. Такой генератор является перспективным типом прибора для получения сверхвысокочастотных (СВЧ) колебаний гигаваттных уровней мощности. Вместе с тем, представляет интерес изучение возможности генерации в таких приборах широкополосных СВЧ-колебаний. Основанием для этого служит тот факт, что релятивистские СВЧ-генераторы высокой мощности обычно работают в сильно нелинейных режимах. В частности, в работе [1] теоретически исследуется возможность хаотического поведения поля в генераторе на магнитоизолированной линии при высоких значениях вводимого тока. В работе [2] исследованы режимы работы генератора на МИПЛ, в котором фазовая расстройка между электронным потоком и волной является медленной функцией продольной координаты системы. Показано, что параметр расстройки при высоких уровнях вводимого тока может существенно влиять на спектральные характеристики излучения. В обеих работах используется одномерное уравнение для поля волны пространственного заряда в форме, предложенной в [3]. Вместе с тем, хотелось бы иметь информацию о структуре пространственного заряда с учетом двумерной геометрии системы МИПЛ. Для этого мы использовали метод прямого PIC-моделирования размерности 2 в потенциальном приближении.

2. ИСПОЛЬЗУЕМАЯ МОДЕЛЬ

Исследование характеристик электронного потока выполнялось путем численного моделирования методом частиц в потенциальном приближении. Использовалась простейшая двумерная модель, способная описать стационарное состояние волны пространственного заряда. Исследуемая система представляет собой отрезок коаксиальной линии с гладким внутренним проводником. На внутренней стороне наружного проводника может располагаться произвольная регулярная или нерегулярная структура гребеночного типа (в дальнейшем условно называемая замедляющей структурой). При рас-

чете движения частиц учитывались только самосогласованные поперечное электрическое E_r и аксиальное магнитное B_ϕ поля. Таким образом, система уравнений для полей имела следующий вид:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} = -4\pi\rho, \quad (1)$$

$$E_r = -\frac{\partial \Phi}{\partial r}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial B_\phi}{\partial r} + \frac{B_\phi}{r} = \frac{4\pi}{c} j_z, \quad (3)$$

$$\frac{\partial B_\phi}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

с граничными условиями:

$$\Phi \Big|_{r=r_0} = 0, \quad \Phi \Big|_{r=r_1} = \Phi_0, \quad B_\phi \Big|_{r=r_0} = \frac{4\pi}{c} j_c, \quad (5)$$

где $\Phi = \Phi(r, z)$, $E_r = E_r(r, z)$ – потенциал и поперечная составляющая напряженности электрического поля, $\rho = \rho(r, z)$, $j_z = j_z(r, z)$ – плотность заряда и продольного тока, j_c – плотность поверхностного тока по внутреннему проводнику коаксиальной линии, r_0 и r_1 – радиус внутреннего и внешнего проводника соответственно.

Движение электронов описывалось релятивистскими уравнениями для скорости

$$\dot{v}_r = \ddot{r} = g_r, \quad \dot{v}_z = \ddot{z} = g_z, \quad (6)$$

где ускорения:

$$g_r = \eta \gamma^{-1} (E_r - v_z B_\phi - c^{-2} v_r^2 E_r), \quad (7)$$

$$g_z = \eta \gamma^{-1} (v_r B_\phi - c^{-2} v_z v_r E_r). \quad (8)$$

Здесь γ – фактор Лоренца, а η – отношение заряда электрона к массе покоя.

Расчетная область представляет собой односвязную область, вписанную в прямоугольник размерами 50 на 500 ячеек по координате r и z соответственно. Потенциал электрического поля рассчитывается методом последовательной верхней релаксации с чебышевским ускорением. Расчет напряженности электрического поля ведется по 6-точечной разностной схеме [4]. Магнитное поле рассчитывалось по усредненным вдоль системы значениям

электронного тока. Моделируется механизм взрывной эмиссии частиц из поверхности внутреннего проводника. При расчете динамики частиц используется комбинация экстраполяционных формул Адамса третьего порядка точности для скорости и степенных рядов четвертого порядка точности для координат.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Мы исследовали характеристики электронного потока в установившемся режиме. Для достижения такого квазистационарного состояния требовалось около 4 тыс. временных шагов.

Типичные параметры модели, принимаемые при расчетах: радиус внутреннего проводника $r_0=10$ см,

радиус внешнего проводника $r_1 = 15$ см, длина системы $L_z=50$ см, приложенное напряжение $U_0 = 500\dots700$ кВ, полный ток по внутреннему проводнику и в пространстве дрейфа $I_0 = 50\dots200$ кА.

В системе устанавливался прижатый к внутреннему проводнику электронный поток. Исследовалась амплитуда пространственных гармоник плотности заряда электронов вблизи проводника и на поверхности потока. При этом установлена слабая зависимость структуры потока от напряженности магнитного поля в системе. Так, с ростом полного тока I_0 от 50 до 200 кА пики пространственных гармоник несколько уширяются, однако общий характер их распределения не изменяется.

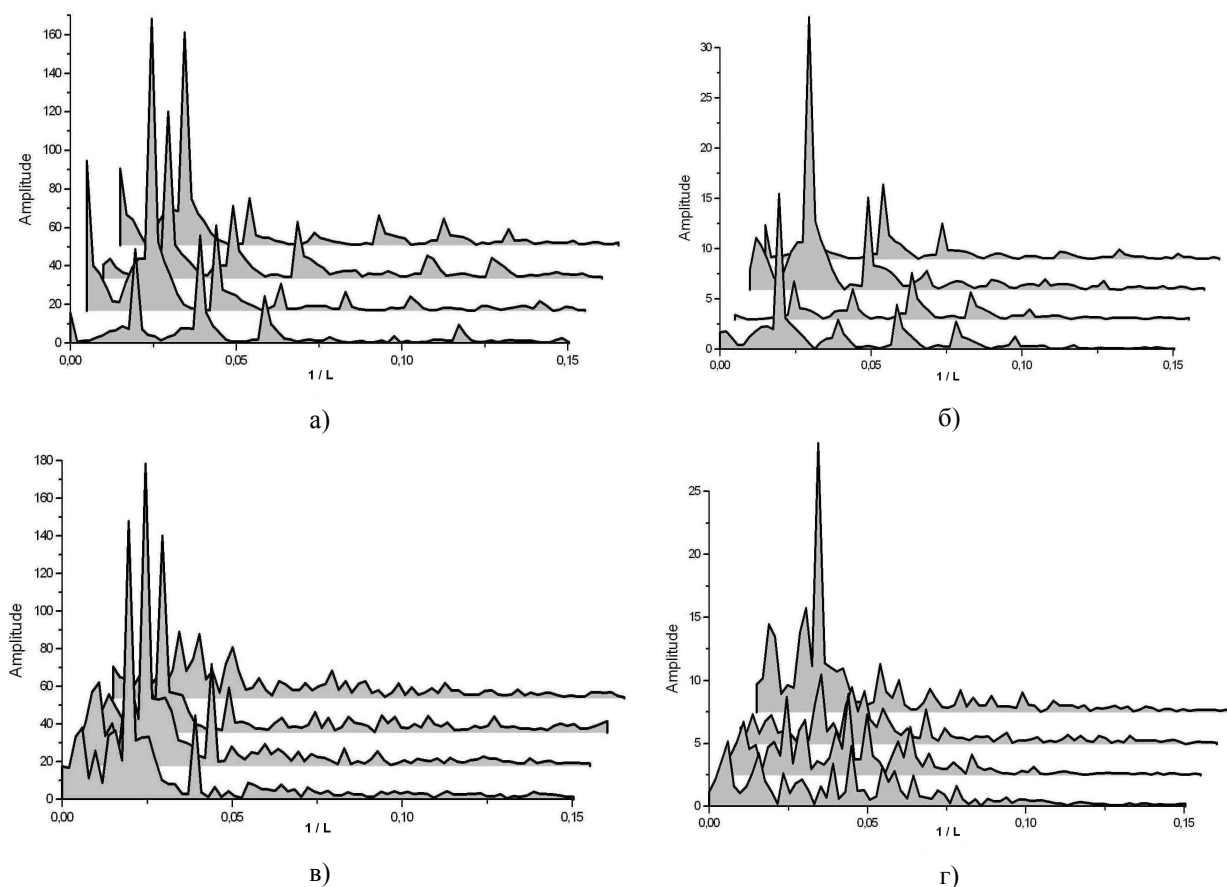


Рис.1. Амплитуда пространственных гармоник волны плотности заряда

Значительно сильнее на характере структуры волны плотности заряда сказываются параметры замедляющей структуры. Для примера, на Рис.1 представлены амплитуды пространственных гармоник плотности заряда в четырех произвольных моментах времени для указанных выше параметров модели при полном токе в системе $I_0 = 200$ кА. Диаграммы 1,а и 1,б соответствуют системе с гребенчатой структурой с периодом 5,3 см и глубиной 4 см. На диаграмме 1,а отобразены амплитуды пространственных гармоник плотности заряда вблизи поверхности внутреннего проводника, а на диаграмме 1,б – на поверхности электронного потока. Диаграммы 1,в и 1,г отличаются от них только применением другой замедляющей структуры – здесь она представляет собой комбинацию двух структур: од-

ной с периодом 5,3 см и глубиной 4 см и другой с периодом 6,9 см и глубиной 3,5 см. Видно, что характер распределения пространственных гармоник плотности заряда как вблизи проводника (Рис.1,в), так и на поверхности потока (Рис.1,г), существенно изменился.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали возможность управления в широких пределах пространственной структурой волны плотности заряда посредством использования иррегулярных замедляющих структур.

Эти результаты могут служить основанием для постановки задачи об исследовании возможности усиления и генерации широкополосного электро-

магнитного излучения в системах на базе магнитоизолированных передающих линий.

ЛИТЕРАТУРА

1. H. Jianhong, D. Wu. Chaotic behavior of the radiation field in the magnetically insulated transmission line oscillator // *Phys. Rev. E* (67). 2003, 026503-1-6.
2. А.М. Горбань, Ю.Ф. Лонин. Нелинейные режимы генератора на магнитоизолированной передающей линии с комбинированной замедляющей структурой // *Тезисы XX Международного семинара по ускорителям заряженных частиц*. Алушта, 09-15 сентября 2007 г., с.45.
3. М.И. Петелин // *Известия вузов. Радиофизика*. 1985, т.28, №3, с.354-360.
4. Ч. Бэдсел, А. Ленгдон. *Физика плазмы и численное моделирование*. М.: «Энергоатомиздат», 1989, с.317-320.

Статья поступила в редакцию 20.05.2008 г.

SPATIAL CHARACTERISTICS OF THE CHARGE DENSITY WAVE IN NON-UNIFORM MAGNETICALLY INSULATED TRANSMITTING LINES

A.M. Gorban', Yu.F. Lonin

Characteristics of charge density of a stationary electronic flow in magnetically insulated transmitting line were studied by a method of numerical simulation. Influence of regular and irregular slowing structures on density of a charge of an electronic flow was considered.

ПРОСТОРОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХВИЛІ ГУСТИНИ ЗАРЯДУ В НЕОДНОРІДНИХ МАГНІТОІЗОЛЬОВАНИХ ПЕРЕДАЮЧИХ ЛІНІЯХ

A.M. Gorban', Yu.F. Lonin

Представлено результати дослідження просторових характеристик хвилі щільності заряду в неоднорідних магнітоізольованих передавальних лініях, отримані методом чисельного моделювання. Обговорюється залежність параметрів хвилі щільності від повного струму в лінії і вплив нерегулярності сповільнюючої структури.