

НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕЖИМЫ ГЕНЕРАТОРА НА МАГНИТОИЗОЛИРОВАННОЙ ПЕРЕДАЮЩЕЙ ЛИНИИ С КОМБИНИРОВАННОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СТРУКТУРОЙ

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

Теоретически исследованы режимы работы генератора на магнитоизолированной передающей линии, 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. Задавая закон изменения расстройки, можно оптимизировать спектральные характеристики генератора.

1. ВВЕДЕНИЕ

Генератор на магнитоизолированной передающей линии является перспективным типом прибора на скрещенных полях для получения сверхвысоко-частотных колебаний гигаваттных уровней мощности. Теоретические и экспериментальные исследования таких генераторов ведутся достаточно давно и были направлены, в основном, на разработку приборов для генерации узкополосного излучения.

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 рассматриваются эффекты, связанные с возникновением предельных циклов и хаотического поведения поля в генераторе на магнитоизолированной линии при высоких значениях вводимого тока.

Отдельный интерес представляет задача формирования в таких генераторах широкополосного СВЧ-излучения с заданными спектральными характеристиками. В настоящей работе предпринята попытка исследования такой возможности за счет использования комбинированных замедляющих структур.

2. БАЗОВАЯ ТЕОРИЯ

При выводе системы уравнений, описывающей взаимодействие электронного потока и электромагнитной волны, будем полагать, что генератор представляет собой цилиндрически симметричную систему, движение электронов в которой представляет собой дрейф вдоль продольной оси z в скрещенных полях. Скорость дрейфа $v_z = c(E_{r0}/B_{\theta 0} + E_r/B_{\theta 0})$, где $B_{\theta 0}$ – угловая составляющая магнитного поля самоизоляции, E_{r0} и E_r – радиальные составляющие постоянного электрического поля и электромагнитного поля соответственно. Электромагнитное поле представим в виде:

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \left[\vec{E}_p(r) a(z, t) + \vec{E}^{(s)}(r, z, t) \right] e^{i(kz - \omega t)}, \\ \vec{B} &= \left[\vec{B}_p(r) a(z, t) + \vec{B}^{(s)}(r, z, t) \right] e^{i(kz - \omega t)}. \end{aligned} \quad (1)$$

Первый член в правой части уравнений описывает поле излучения, а второй – поле волны пространственного заряда и, согласно [2], может быть представлен как

$$E^{(s)}(r, z, t) = -\frac{4\pi\mu}{\epsilon} E_p(r) a(z, t), \quad (2)$$

где μ и ϵ – магнитная и диэлектрическая проницаемости, а $a(z, t)$ – медленно изменяющаяся комплексная амплитуда поля волны. Уравнение, описывающее ее эволюцию, согласно [3], имеет вид:

$$\frac{\partial a}{\partial t} + v_g \frac{\partial a}{\partial z} = -\frac{I d}{u} E_{pr}^*(r_b) \langle \exp(-i\phi_j) \rangle, \quad (3)$$

где u – энергия поля в одном периоде структуры d деленная на $|a|^2$, v_g – групповая скорость вакуумной волны, r_b – радиус электронного пучка, I – ток пучка. Фаза электронов определяется уравнением

$$\frac{d\phi_j}{dt} = \frac{\partial \phi_j}{\partial t} + v_g \frac{\partial \phi_j}{\partial z} = k(v_{z0} + \Delta v_{jz}) - \omega, \quad (4)$$

где $v_{z0} = c(E_{r0}/B_{\theta 0})$ а Δv_{jz} – приращение скорости частицы, вызванное полем волны E_r . Используя (1) и (2) Δv_{jz} можно представить в виде:

$$\Delta v_{jz} = \frac{\Delta v_{jz}}{c} = \frac{E_{pr}}{B_{\theta 0}} \left(1 - \frac{4\pi\mu}{\epsilon} \right) a \exp(i\phi_j). \quad (5)$$

Переходом к переменным Лагранжа в приближении стационарности поля и релятивистского потока ($v_{jz} \approx c$) уравнения (3)-(5) приводятся к виду [1]:

$$\left(1 - \frac{v_g}{v_{z0}} \right) \frac{\partial A}{\partial \tau} + \frac{\partial A}{\partial \xi} = -\tilde{I} \langle \exp(-i\phi_j) \rangle, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial \xi} = L \Delta k + L \frac{\omega}{c} \frac{\Delta \beta_{jz}}{\beta_{z0}^2}, \quad (7)$$

$$\Delta \beta_{jz} = A \exp(i\phi_j). \quad (8)$$

Здесь $\tau = v_g t_0 / L$ и $\xi = z' / L$ – Лагранжевы координаты, $A = \frac{E_{pr}}{B_{\theta 0}} \left(1 - \frac{4\pi\mu}{\varepsilon}\right) a$ – нормализованная амплитуда поля,

$$\tilde{I} = I \frac{dLE_{pz}^* E_{pr}}{uv_g B_{\theta 0}} \left(1 - \frac{4\pi\mu}{\varepsilon}\right) \quad (9)$$

– безразмерный ток и L – длина области взаимодействия. Параметр $\Delta k = k - \omega / v_{z0}$ представляет собой расстройку и при фиксированном значении v_{z0} определяется фазовой скоростью волны v_ϕ .

3. МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Нашей целью являлось изучение влияния свойств замедляющей системы на спектральные характеристики излучения в широкополосном режиме генерации. С этой целью фазовую скорость волны положим зависящей по некоторому закону от продольной координаты $v_\phi(\xi)$. Соответственно параметр расстройки Δk в (7) также оказывается функцией ξ . Для применимости такого допущения к модели, описываемой системой (6)-(8), потребуем, чтобы $v_\phi(\xi)$ изменялась с ξ много медленнее поля волны ω . Кроме того, потребуем, чтобы вариация фазовой скорости была много меньше ее среднего значения. При этом следует учесть, что групповая скорость v_g и, в силу (9), ток \tilde{I} в уравнении (6) также становятся функциями ξ . В первом приближении примем, что v_g зависит от координаты по тому же закону, что и v_ϕ .

Практически такой генератор можно реализовать, например, выполнив замедляющую структуру в виде двух совмещенных структур (основной и вспомогательной) с разными периодами и глубиной или профилируя глубину гребенки по заданному закону.

Численные расчеты производились для системы со следующими параметрами: на полной длине области взаимодействия L укладывалось 160 периодов волны с частотой ω , на которой система, работающая в режиме усиления, возбуждалась на левой границе при $\xi = 0$. Начальная фаза $\phi|_{\xi=0} = 0$. На правой границе при $\xi = 1$ для (6) задавалось условие отражения либо свободной границы. Параметр расстройки Δk задавался в виде $\Delta k = \Delta k_0 + P \sin(2\pi\xi/\delta)$, где Δk_0 – постоянная составляющая, P и δ – амплитуда и пространственный период переменной составляющей расстройки. Значение δ в разных расчетах варьировалось в диапазоне (0.03...0.08)L.

Предполагается, что длительность импульса тока настолько большая, что влиянием переходных процессов можно пренебречь и поведение модели определяет два параметра: расстройка Δk и ток \tilde{I} .

В сильно нелинейных режимах система уравнений (6)-(8) оказывается достаточно жесткой. Так для

однократного решения методом Рунге-Кутты-Вернера 6 порядка уравнения (7) с оценкой относительной локальной погрешности не хуже 0.005 требуется $\approx 10^5$ шагов.

На Рис.1 представлены полученные спектры мощности излучения в широкополосном режиме генерации при умеренной нелинейности для различных значений параметра расстройки. Все спектры построены по временной реализации поля A в точке $\xi = 0.7L$. Для всех четырех вариантов $v_{z0}/c = 0.7$, начальное значение $v_g/c = 0.55$. Единственное различие в начальных условиях всех четырех вариантов – значение расстройки Δk . График 1 соответствует заданию постоянной расстройки с относительным значением $\Delta kv_{z0}/\omega = +0.012$, график 2 представляет результат задания переменной расстройки с периодом $\delta = 0.032L$ и амплитудой $Pv_{z0}/\omega = 0.012$, вариант 3 отличается только большей амплитудой (0.047), а вариант 4 соответствует заданию постоянной расстройки в +0.047 и переменной с амплитудой 0.047.

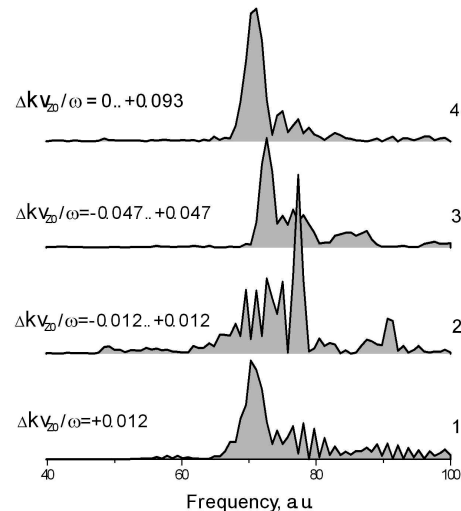


Рис.1. Спектральная плотность мощности излучения в зависимости от параметра расстройки

Из Рис. 1 видно, что параметр расстройки может существенно влиять на спектральные характеристики генератора. Расчеты показали, что это влияние возрастает с увеличением тока \tilde{I} . Это справедливо, по крайней мере, для умеренно нелинейных режимов.

Следует отметить, что расстройка может приводить как к уширению спектра излучения, так и к его сужению и «сглаживанию».

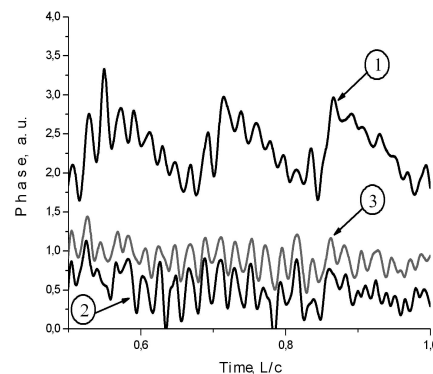


Рис.2. Фаза как функция времени в зависимости от параметра расстройки

На Рис.2 приведен фрагмент временной реализации фазы ϕ , наблюдаемой в точке $\xi = 0.7L$. Графики 1-3 Рис.2 соответствуют спектрам мощности 1-3 из Рис.1. Видно, что с ростом амплитуды расстройки P среднее значение фазы возрастает даже в отсутствие постоянной расстройки δ . Этим можно попытаться объяснить различия в форме спектров 2 и 3.

На Рис.3 представлены амплитудные спектры пространственного распределения поля вдоль оси ξ в различные моменты времени. Графики Рис.3 соответствуют графикам 2 на Рис.1 и Рис.2. Видно, что общий характер спектров сохраняется, однако, предположение стационарности поля, использованное при получении системы уравнений (6)-(8), строго говоря, не выполняется.

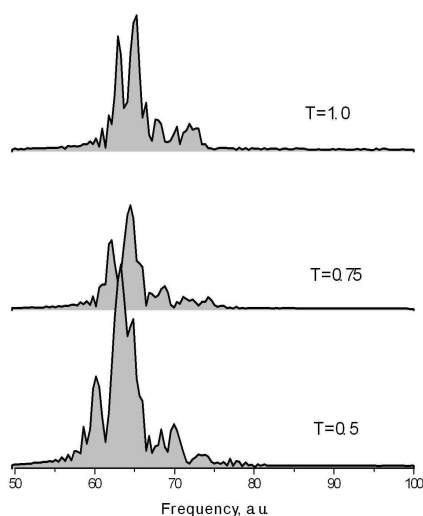


Рис.3. Амплитудные спектры поля вдоль системы в фиксированные моменты времени

Необходимо отметить ограниченную применимость использованной модели для исследования генераторов с комбинированными замедляющими системами. Ограничения связаны в основном с тем, что изменение фазовой скорости волны, задаваемое замедляющей структурой, на длине волны основной частоты ω должно быть пренебрежимо малым. В

связи с этим представляет большой интерес разработка более совершенных аналитических моделей, либо использование методов прямого моделирования для исследования сильно нелинейных режимов работы генераторов на скрещенных полях.

Вместе с тем, полученные данные о высокой чувствительности спектральных характеристик излучения генераторов при высоких уровнях вводимого тока к фазовой расстройке могут быть основанием для исследования влияния на спектр неустойчивости напряжения на передающей линии.

ВЫВОДЫ

Параметр расстройки при высоких уровнях вводимого тока может существенно влиять на спектральные характеристики излучения генератора на магнитоизолированной передающей линии. Расстройка может приводить как к уширению спектра излучения, так и к его сужению и «сглаживанию».

Задавая закон изменения расстройки в направлении распространения электронного потока, можно оптимизировать спектральные характеристики генератора. Это, в частности, дает возможность снижения значений вводимого тока необходимых для перевода генератора в сильно нелинейный режим.

Практически такой генератор можно реализовать, например, выполнив замедляющую структуру в виде двух совмещенных структур (основной и вспомогательной) с разными периодами и глубиной или профилируя глубину гребенки по заданному закону.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. 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. М.И. Петелин // *Известия ВУЗов, Радиофизика*. 1985, 28. № 3. с.354-360.
3. В. Levush, T. Antonsen, A. Bromborsky, et al. Theory of Relativistic Backward-Wave Oscillators with End Reflections // *IEEE Trans. On Plasma Science* (20). 1992, №3, p.263-280.

NONLINEAR REGIMES OF THE MAGNETICALLY INSULATED TRANSMISSION LINE OSCILLATOR WITH THE COMBINED SLOWING STRUCTURE

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

In work theoretically investigated operating regimes of the generator on magnetically insulated transmitting line in which phase detuning between an electronic stream and a wave is slow function of longitudinal coordinate of system. Calculations have shown, that the parameter of detuning at high levels of an entered current can influence spectral characteristics of radiation essentially. Setting the law of change of detuning is possible to optimize spectral characteristics of the generator.

НЕЛІНІЙНІ РЕЖИМИ ГЕНЕРАТОРА НА МАГНІТОІЗОЛОВАНІЙ ПЕРЕДАВАЛЬНІЙ ЛІНІЇ З КОМБІНОВАНОЮ СПОВІЛЬНЮЮЧОЮ СТРУКТУРОЮ

A.M. Горбань, Ю.Ф. Лонін

Теоретично досліджено режими роботи генератора на магнітоізолюваній передавальній лінії, в якому фазове розлагодження між електронним потоком та хвилею є повільною функцією поздовжньої координати системи. Розрахунки показали, що параметр розлагодження при високих рівнях введеного струму може суттєво впливати на спектральні характеристики випромінювання. Задаючи закон зміни розлагодження можна оптимізувати спектральні характеристики генератора.