

УСИЛЕНИЕ МНОГОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ В ШИРОКОПОЛОСНОЙ СПИРАЛЬНОЙ ЛБВ

*В.С. Антипов, И.А. Безъязычный, И.В. Бережная,
К.В. Галайдыч, Е.А. Корнилов, Г.В. Сотников*

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

Представлены теоретические и экспериментальные результаты по усилению многочастотных колебаний в «прозрачной» ЛБВ на основе спиральной замедляющей структуры. Продемонстрирована возможность усиления колебаний при токе пучка до 1 А, ускоряющем напряжении до 20 кВ на нескольких частотах в диапазоне 0,5...1,5 ГГц в квазинепрерывном режиме.

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из широкополосных усилителей мощности в СВЧ-технике является ЛБВ со спиральной замедляющей системой (ЗС) [1-3]. Широкополосность ЛБВ определяется электродинамическими характеристиками ЗС, ее линейной дисперсией в значительной области диапазона частот. Для получения максимального уровня выходной мощности необходимо работать с малыми замедлениями (порядка 5) при максимально возможном диаметре пролетного канала. При этом замедляющие структуры являются “прозрачными”, т.е. в них не используются ВЧ-поглотители отраженной волны. Преимуществом таких структур являются: большая широкополосность и небольшие прямые потери, обусловленные отсутствием поглотителя. Такие усилители имеют короткую замедляющую систему и большую выходную мощность.

Целью настоящей работы являются теоретические и экспериментальные исследования возможности одновременного усиления нескольких частот с помощью широкополосной ЛБВ на основе спиральной замедляющей системы.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Рассмотрим усиление многочастотного сигнала в замедляющей структуре в виде спирали радиуса $a=1,5$ см с шагом спирали $L=2,1$ см и углом намотки θ , находящейся в проводящем кожухе радиусом $b=2,725$ см. Структура находится в сильном внешнем магнитном поле H , направленном вдоль оси системы.

Существует большое количество работ по теоретическому описанию усиления многочастотных сигналов. Но эти исследования ограничивались или исследованием малого числа монохроматических волн [4-8], или построением математического аппарата без привязки к конкретным СВЧ-приборам. Актуальность проблемы, недостаточность теоретических и экспериментальных данных усиления в широкополосных приборах стимулирует исследования до настоящего времени [9-12].

Численное моделирование усиления таких сигналов в спиральной замедляющей структуре

опирается на теорию возбуждения волноводов сторонними источниками. Для исследования нелинейной стадии взаимодействия между электронным пучком и собственными волнами спиральной замедляющей линии передачи будем исходить из уравнения для усредненной по поперечному сечению амплитуды продольного электрического поля и уравнений движения для частиц пучка [13]:

$$\frac{dE^{(n)}}{dz} + i(n\beta_e - \beta_0^{(n)})E^{(n)} = (\beta_0^{(n)})^2 I_b R_{ce}^{(n)} I^{(n)}, \quad (1)$$

$$\frac{dv_m(z)}{dz} = -\frac{e}{mv_m} \left(1 - \frac{v_m^2}{c^2}\right)^{3/2} \operatorname{Re} \sum_n (E^{(n)} \cdot e^{-in\theta_m}), \quad (2)$$

$$\frac{d\theta_m(z)}{dz} = \beta_e \cdot \left(\frac{v_0}{v_m(z)} - 1\right), \quad (3)$$

где $E^{(n)}$ – амплитуда n -й гармоники поля;

$I^{(n)} = (1/2\pi) \int_0^{2\pi} e^{in\theta} d\theta_0$; $n\omega_0, \beta_0^{(n)}(n\omega_0)$ – ее частота и волновой вектор при $I_b = 0$ (в отсутствие пучка); $\theta_m = \omega_0 \cdot (t_m(z) - z/v_0)$, $t_m(z)$ и $v_m(z)$ – лагранжево время и скорость электронов; v_0 – начальная скорость электронов; $\beta_e = \omega_0/v_0$; $R_{ce}^{(n)}$ – сопротивление связи (на n -й гармонике поля), определяющее эффективность взаимодействия пучка и волны.

Для численного решения системы уравнений (1-3) удобно ввести безразмерные переменные:

$\varepsilon^{(n)} = e\beta_0^{(1)} E^{(n)} / mv_0^2 (\delta k)^2$ – амплитуда, $\zeta = \delta k \cdot z$ – продольная координата, ($\delta k = \beta_0^{(1)} (eI_b R_{ce}^{(1)} / mv_0^2)^{1/3}$),

$v_m = \frac{v_m - v_0}{v_0} \cdot \frac{\beta_0^{(1)}}{\delta k}$ – скорость, $\Delta^{(n)} = \frac{n\beta_e - \beta_0^{(n)}}{\delta k}$ –

расстройка n -й гармоники от точного черенковского резонанса. Система уравнений (1-3) в безразмерных переменных имеет вид:

$$\frac{d\varepsilon^{(n)}}{d\zeta} + i\Delta^{(n)} \varepsilon^{(n)} = \frac{(\beta_0^{(n)})^2}{(\beta_0^{(1)})^2} \cdot \frac{R_{\tilde{n}\tilde{a}}^{(n)}}{R_{\tilde{n}\tilde{a}}^{(1)}} \cdot I^{(n)}, \quad (4)$$

$$\frac{dv_m}{d\zeta} = - \left(1 - (v_0/c)^2 \cdot \left[1 + \frac{\delta k}{\beta_0^{(1)}} \cdot v_m \right]^2 \right)^{3/2} \times \left(1 + \frac{\delta k}{\beta_0^{(1)}} \cdot v_m \right)^{-1} \cdot \operatorname{Re} \left(\sum_n \varepsilon^{(n)} \cdot e^{-i \cdot n \theta_m} \right), \quad (5)$$

$$\frac{d\theta_m}{d\zeta} = - \left(\frac{\beta_e}{\beta_0^{(n)}(nf_0)} \right) \cdot \frac{v_m}{1 + v_m}. \quad (6)$$

В работе [13] система уравнений выписана для коаксиальной замедляющей структуры. Для применения ее к расчетам спиральной замедляющей структуры мы задавали волновые векторы, полученные из расчета дисперсионного уравнения спирали [14], и сопротивления связи возбуждаемых волн. На этом этапе сопротивление связи $R_{cs}^{(n)}$ рассчитывалось в импедансном приближении, т.е. при учете в полях только нулевой пространственной гармоники:

$$R_{cs}^{(n)} = 120 \frac{a^2 p_0^4}{k^2} \operatorname{tg}^2 \theta \frac{I_0^2(p_0 r_b)}{I_0^2(p_0 b)} F_0^2(p_0 a, p_0 b) \frac{1}{\beta_0^2 S}, \quad (7)$$

$$S = 2 \frac{\beta_0^{(n)}}{k} (p_0 a)^2 \int_0^b \left[\Pi_E'(p_0 r) \right]^2 r dr + 2k \beta_0^{(n)} a^2 \int_0^b \left[\Pi_H'(p_0 r) \right]^2 r dr, \quad (8)$$

$$\Pi_E(p_0 r) = \operatorname{tg} \theta \frac{1}{I_0(p_0 b)} \begin{cases} I_0(p_0 r) F_0(p_0 a, p_0 b), & r \leq a, \\ I_0(p_0 a) F_0(p_0 r, p_0 b), & a < r \leq b, \end{cases} \quad (9)$$

$$\Pi_H(p_0 r) = \frac{1}{I_1(p_0 b)} \begin{cases} I_0(p_0 r) \Phi_0'(p_0 a, p_0 b), & r \leq a, \\ I_1(p_0 a) \Phi_0'(p_0 r, p_0 b), & a < r \leq b, \end{cases} \quad (10)$$

$$F_0(x, y) = I_0(x) K_0(y) - K_0(x) I_0(y), \quad (11)$$

$$\Phi_0(x, y) = -I_0(x) K_1(y) - K_0(x) I_1(y), \quad (12)$$

$$\Phi_0'(x, y) \equiv \frac{d}{dx} \Phi_0(x, y), \quad (13)$$

$$\Pi_E'(x) \equiv \frac{d}{dx} \Pi_E(x), \quad \Pi_H'(x) \equiv \frac{d}{dx} \Pi_H(x), \quad (14)$$

где: $p_0^2 = (\beta_0^{(n)})^2 - k^2$, $k = \omega/c = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 - длина волны в свободном пространстве, $\operatorname{tg} \theta = \frac{L}{2\pi a}$.

При проведении численного моделирования рассматривался частотный интервал от 0,4 до 1,3 ГГц (Рис.1). В расчетах мощность входного сигнала на частоте 1,17 ГГц составляла 5,5 Вт. На Рис.1,а и Рис.1,б вертикальными штрихованными линиями (3, 4 и 2, 3) отмечены частоты усиливаемых волн, прямой линией (2) – пучковая мода, пересекающая ветвь дисперсии (1). Зависимость сопротивления связи от частоты изображена на Рис.1,б, кривая 1.

Численно рассчитывалось распределение вдоль длины системы амплитуды продольного электрического поля при фиксированном токе пучка, но при разных значениях энергии электронов пучка. Целью численных расчетов было нахождение значений энергии электронов пучка, при которых обе волны достигают характерных максимальных значений при одном и том же значении продольной координаты (варианты наилучшего усиления), (при

заданном значении к.п.д. по потерям пучка, т.е. 15...30%). Отметим, что режимы наилучшего усиления многих волн реализуются, когда скорость электронного пучка больше скорости любой из усиливаемых волн.

На Рис.2 приведены результаты численных расчетов наилучшего усиления одновременно двух волн с частотами 0,78 и 1,17 ГГц. Ток электронного пучка был выбран равным 0,8 А, который соответствовал условиям эксперимента. Как следует из рисунка, две волны с существенно отличающимися частотами значительно усиливаются вдоль структуры. При этом существует такая длина структуры, где обе волны имеют большую амплитуду. Т.е. усилитель одновременно должен работать на двух частотах, если выбрать соответствующую энергию электронного пучка.

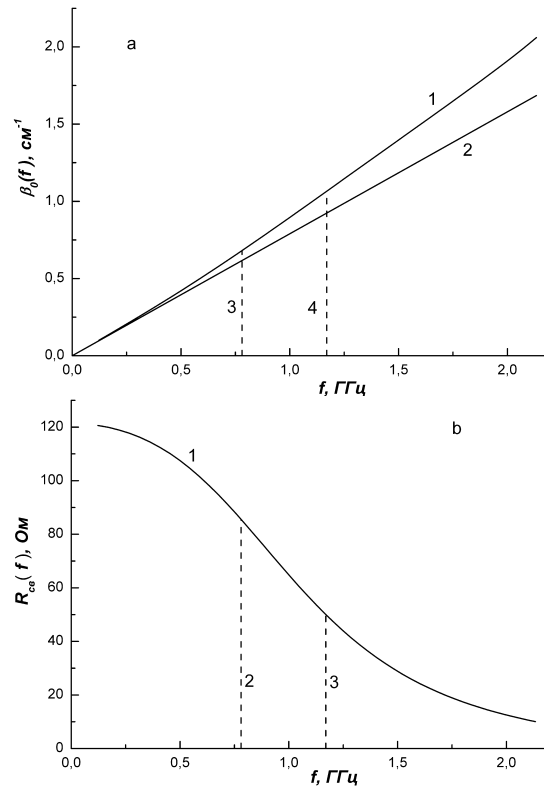


Рис.1. Зависимость дисперсии и сопротивления связи спиральной ЗС от частоты

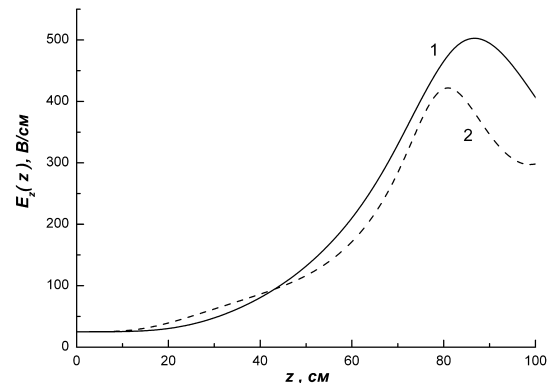


Рис.2. Распределение вдоль длины системы амплитуды продольного электрического поля для варианта наилучшего усиления (энергия электронов пучка – 19 кэВ, ток пучка – 0,8А): 1 – частота равна 0,78 ГГц; 2 – частота равна 1,17 ГГц

Также нами был проведен нелинейный анализ одновременного усиления большого количества волн в спиральной замедляющей структуре.

На Рис.3 представлены результаты расчета (варианты наилучшего усиления) для 9 и 10 волн, поданных на вход усилителя. Расчеты на Рис.3,a выполнены для тока пучка 0,8 А, который соответствует условиям проведенных экспериментов (см. раздел 3), а расчеты на Рис.3,b выполнены для тока пучка 5 А. Как следует из приведенных зависимостей, в условиях, близких к экспериментально реализуемым (Рис.3,a), можно добиться одновременного усиления волн в широкой полосе частот (0,4...1,2 ГГц). Если поднять ток электронного пучка, то в этой же спиральной ЗС можно существенно поднять уровни усиливаемых сигналов, уменьшить длину усилителя, при которой хорошо усиливаются все подаваемые на его вход волны. При этом можно уменьшить неоднородность распределения амплитуд усиленных сигналов по спектру.

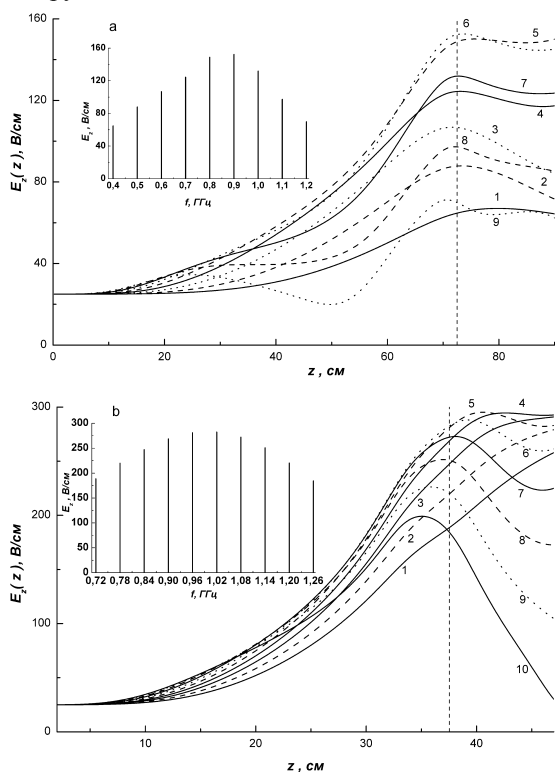


Рис.3. Распределение амплитуды продольного электрического поля вдоль длины системы для варианта наилучшего усиления. Энергия электронов пучка 22,5 кэВ, ток пучка 0,8 (а) и 5 А (b). На вставках приведены спектры сигналов на фиксированной длине (вертикальная штрихованная линия); номера кривых для амплитуд полей приведены в порядке возрастания частоты (см. на графики спектров на вставках)

Таким образом, анализ многочастотного режима усиления спиральной замедляющей структуры показывает перспективность такой линии передачи для создания СВЧ-приборов, способных работать одновременно на нескольких частотах. Таким образом, если изменять энергию электронов пучка,

можно управлять амплитудно-частотным спектром многочастотного сигнала, усиливаемого в спиральной замедляющей линии.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты по исследованию многочастотного возбуждения и усиления электромагнитных волн проводились на установке, функциональная блок-схема которой приведена в [15]. В конструкции многочастотной ЛБВ предложено использовать спиральную ЗС, состоящую из нескольких элементов. На первом этапе используется замедляющая структура, которая состоит из двух спиральных секций, каждая из которых состоит из небольшого количества витков. Обе секции ЗС являются „прозрачными», т.е. в них не используются ВЧ-поглотители отраженной волны. Соответственно, повышенные требования предъявляются к согласованию ЗС с передающими линиями. Предыдущие эксперименты показали, что для работы ЛБВ без паразитного возбуждения необходимо иметь коэффициент стоячей волны (КСВН) не больше 1,5 как со стороны ввода, так и со стороны вывода ВЧ-энергии во всей полосе пропускания. Обеспечить величину коэффициента отражения меньше 0,05 от границ спирально-плазменного волновода в широком (0,4...1,8 ГГц) диапазоне частот достаточно сложно.

Поэтому экспериментальные исследования взаимодействия электронного пучка с замедляющей структурой проводились на частотах, при которых наблюдалось требуемое согласование входного и выходного фидеров со спиральной линией (коэффициент стоячей волны в тракте меньше 2,0).

На первом этапе проведены исследования возбуждения гармоничных сигналов в пределах полосы пропускания при разных энергиях пучка. Были сняты частотные спектры колебаний, возбуждаемых электронным пучком при взаимодействии со спиральной структурой в отсутствие входного сигнала. Интенсивные колебания возбуждались на частотах 0,59 и 1,77 ГГц (т.е. на частотах, при которых было плохое согласование спирали с фидерами). При этом ток, достигаемый коллектора, равнялся 1 А, а энергия пучка - 10 кэВ.

Были также проведены предварительные исследования усиления двух и трех гармонических сигналов в пределах полосы пропускания. На вход усилителя одновременно подавались СВЧ-колебания от задающих генераторов, мощностью до 1 Вт или от пучково-плазменного генератора мощностью до 400 Вт. Исследования проводились в диапазоне частот 0,5...1,5 ГГц. Контроль формы СВЧ-колебаний осуществлялся с помощью высокоскоростных осциллографов. В процессе эксперимента фиксировалась частота, форма и мощность СВЧ-сигналов на входе и выходе системы. На Рис.4 в качестве примера приведены осциллограммы и спектры двухчастотного колебания (0,71 и 1,14 ГГц).

Сравнение экспериментальных данных по усилению двухчастотного сигнала в спиральной ЗС (Рис.4) показывает хорошее качественное совпадение с результатами численных расчетов (см. Рис.2).

Статистическая обработка исследуемых сигналов осуществлялась также с помощью фурье-анализа временных реализаций.

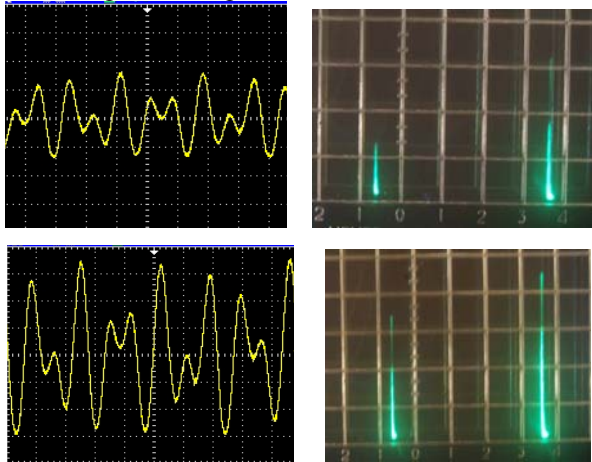


Рис.4. Осциллограммы и СВЧ-спектры входного (вверху) и выходного (внизу) сигналов

Исследование формы выходного сигнала показало, что она практически не искажается. Кроме того, было установлено, что усиление сигналов осуществляется только тогда, когда амплитуда входных сигналов больше некоторого порогового значения, которое зависит от частот усиливаемых сигналов, тока и энергии пучка в замедляющей структуре. При малых значениях мощности входных сигналов коэффициент усиления в вакуумном режиме зависел от величины ускоряющего напряжения и составлял 6...8 дБ при напряжении 12 кВ, на частотах, на которых наблюдалось хорошее согласование в диапазоне частот 0,5...1,5 ГГц. При этом исследования проводились в режимах, когда ток пучка был меньше критического (менее 0,8 А), при котором не происходит возбуждения колебаний в усилителе. При плазменном режиме (давление плазмообразующего газа $7...9 \cdot 10^{-5}$ мм.рт.ст.) коэффициент усиления возрастал на 2...3 дБ и составлял 10...11 дБ.

Аналогичные результаты были получены в экспериментах при подаче на вход трехчастотных сигналов, подобных приведенному на Рис.5.

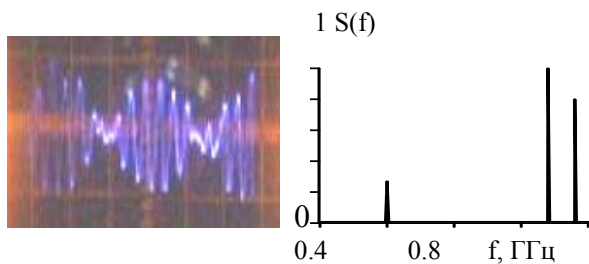


Рис.5. Осциллограмма и СВЧ-спектр трехчастотного сигнала (0,6, 1,35, 1,55 ГГц)

При увеличении входной мощности до 50...100 Вт происходит незначительное увеличение выходной мощности на 2...3 дБ. Очевидно, это

связано с тем, что ток пучка оставался достаточно малым $\approx 0,8$ А.

Эксперименты показали, что при изменении энергии электронов пучка от 7 до 20 кэВ можно управлять коэффициентом усиления двухчастотного сигнала при постоянной длине структуры. При одних значениях энергии возможен режим наилучшего усиления на одной частоте, а при других – наибольшее усиление достигается на другой.

При увеличении тока пучка ЛБВ переходит в режим паразитного возбуждения. Кроме того, было установлено, что осуществить режим усиления на всех частотах в полосе пропускания при увеличении тока пучка в эксперименте достаточно сложно.

Таким образом, в приведенных экспериментах продемонстрирована возможность многочастотного усиления внешнего сигнала в небольшом интервале плотностей плазмы на частотах 0,5...1,5 ГГц. Режим усиления не был достаточно стабильным и иногда сопровождался генерацией на частотах отличных от частот сигналов, подаваемых на вход ЛБВ. Для того, чтобы добиться стабильного режима усиления, необходимо хорошее согласование ЗС с передающими линиями в широком диапазоне частот для подавления паразитной генерации в спирально-плазменном волноводе и, соответственно, увеличения коэффициента усиления.

ВЫВОДЫ

Теоретически показано, что при подаче на вход «прозрачной» ЛБВ на основе спиральной замедляющей структуры нескольких волн, можно реализовать как одночастотный режим усиления, так и режим с одновременным усилением всех волн при максимальном значении к.п.д. при потерях пучка порядка 30%.

В проведенных экспериментах продемонстрирована возможность многочастотного усиления внешнего сигнала на частотах 0,5...1,5 ГГц.

Имеется качественное совпадение данных экспериментов по усилению небольшого количества волн с теоретическими расчетами нелинейного усиления в ЛБВ на основе спиральной ЗС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.А. Калинин, А.М. Кац. Прозрачные усилители мощности на ЛБВ // *Изв. вузов. Радиоэлектроника*. 1980, т.23, №10, с.36-39.
2. А.М. Долов. Прохождение импульсного сигнала через лампу бегущей волны // *Изв. вузов. ПНД*. 2003, т.11, №6, с.130-136.
3. А.Г. Рожнев, Н.М. Рыскин, Д.В. Соколов и др. Новая 2,5-мерная программа моделирования усиления многочастотных сигналов в широкополосной ЛБВ // *13-я Зимняя школа-семинар по СВЧ-электронике и радиофизике*. Саратов, 2006.
4. В.И. Малышев, В.А. Солнцев. Нелинейный анализ двухчастотного режима работы ЛБВ при

- близких частотах // *Электронная техника. Серия «Электроника СВЧ»*. 1969, №10, с.72-80.
5. А.И. Рогашкова. Группировка электронного пучка в плазме при модуляции двумя частотами // *Радиотехника и электроника*. 1970, т.15, №10, с.2338-2346.
 6. Е.М. Ильина, А.М. Кац, Д.Д. Милютин и др. Частный случай двухчастотного режима работы ЛБВ // *Электронная техника. Серия «Электроника СВЧ»*. 1971, №12, с.3-12.
 7. А.Г. Арделян, А.М. Кац. Расчет составляющих выходного сигнала ЛБВ при многосигнальном усилении // *Электронная техника. Серия «Электроника СВЧ»*. 1971, №3, с.45-53.
 8. А.Г. Арделян, А.Н. Каргин, А.М. Кац. Исследование многочастотного режима работы ЛБВ // *Электронная техника. Сер. «Электроника СВЧ»*. 1975, №2, с.26-33.
 9. А.А. Кураев, Д.В. Лукашевич, А.К. Синицын. Многочастотные режимы работы лампы бегущей волны со спиральной замедляющей системой // *10-я Международная Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2000)*: Сб. трудов. Севастополь: Вебер. 2000, с.188-189.
 10. А.Б. Гуринович, А.А. Кураев, А.К. Синицын. Нелинейные процессы взаимодействия двух сигналов в ЛБВ с замедляющей системой в виде гофрированного волновода // *10-я Международная Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2000)*: Сб. трудов. Севастополь: Вебер. 2000, с.183-184.
 11. К.В. Троцок, В.Б. Профе, А.И. Астайкин. Анализ процесса усиления широкополосного сигнала в ЛБВ-О-типа с замедляющей структурой “цепочка связанных резонаторов” // *10-я Международная Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2000)*: Сб. трудов. Севастополь: Вебер. 2000, с.190-191.
 12. К.В. Галайдыч, П.И. Марков, Г.В. Сотников. Нелинейная динамика многочастотного режима возбуждения коаксиальной замедляющей структуры // *15-я Международная Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2005)*: Сб. трудов. Севастополь: Вебер. 2005, с.677-678.
 13. К.В. Галайдыч, П.И. Марков, Г.В. Сотников. Усиление многочастотного сигнала в коаксиальной замедляющей структуре // *Радиофизика и электроника*. 2006, т.11, №3, с.353-359.
 14. Е.В. Анисимов, Н.М. Советов. Распространение электромагнитных волн вдоль ленточной спирали, помещенной внутрь круглого волновода // *ЖТФ*. 1955, т.25, В.11, с.1965-1971.
 15. V.S. Antipov, A.V. Arhipov, I.A. Bezyazychny, et.al. Multifrequency Low-Voltage Plasma-Beam Generator // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Plasma Physics» (13)*. 2007, №1, p.115-118.

Статья поступила в редакцию 15.05.2008 г.

THE MULTIFREQUENCY AMPLIFICATION IN BROADBAND HELIX TWT

V.S. Antipov, I.A. Bez'yazychny, I.V. Berezhnaya, K.V. Galaydych, E.A. Kornilov, G.V. Sotnikov

The theoretical and experimental results on the amplification of multifrequency oscillations in transmission TWT based on helix slow down structure. The possibility of quasicontinuous amplification regime of some waves with different frequencies of range 0.5...1.5 GHz for beam current 1A, accelerating voltage 20 kV is demonstrated clearly.

ПІДСИЛЕННЯ БАГАТОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ У ШИРОКОСМУГОВІЙ СПІРАЛЬНІЙ ЛБХ

В.С. Антіпов, І.А. Без'язичний, І.В. Бережна, К.В. Галайдич, Є.О. Корнілов, Г.В. Сотніков

Представлено теоретичні та експериментальні результати по підсиленню багаточастотних коливань у «прозорій» ЛБХ на основі спіральної уповільнюючої структури. Продемонстрована можливість підсилення коливань при струмі пучка до 1 А, прискорюючій напрузі до 20 кВ на декількох частотах у діапазоні 0,5...1,5 ГГц у квазібезперервному режимі.