

УДК 621.385.633

Экспериментальное исследование режимов генерации колебаний резонансной лампы обратной волны

Экспериментально исследована лампа обратной волны с замедляющей системой типа цепочки связанных спиральных резонаторов. Описаны условия, при которых реализуются различные режимы генерации колебаний с высокой эффективностью и мощностью. Показана возможность получения стабилизированных по частоте монохроматических колебаний с электронным КПД до 30 %.

И. В. Ошкин, В. Б. Профе, К. В. Троцюк

Введение

В радиотехнических и информационных системах лампы обратной волны (ЛОВ) остаются основным типом генератора СВЧ-диапазона. Прежде всего это касается тех областей применения, где требуется сочетание значительной мощности, относительно большой широкополосности и высокой надежности. Создание эффективных ЛОВ повышенной мощности связано с использованием высокоперевансных пучков, что требует значительного увеличения тока пучка при минимально возможном рабочем напряжении [1]. Увеличение тока пучка в ЛОВ, как правило, приводит к усложнению спектра выходных колебаний из-за распределенного характера системы и наличия эффекта перегруппировки электронов в пучке [2]. Во многих случаях возникновение режима автомодуляции при увеличении тока пучка препятствует реализации генерации монохроматических колебаний с относительно высокими уровнями мощности и КПД. Одним из вариантов уменьшения границ режима автомодуляции является применение в области транспортировки электронного пучка замедляющей системы (ЗС) с заданной неравномерностью передаточной характеристики [3].

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния передаточной характеристики ЗС на режимы генерации колебаний резонансной ЛОВ, определение условий повышения выходной мощности и электронного КПД.

Характеристики замедляющей системы

Для создания эффективных ЛОВ метрового и дециметрового диапазонов длин волн широко применяются спиральные ЗС и их модификации, обеспечивающие приемлемые габариты СВЧ-прибора и необходимое замедление фазовой скорости колебаний, распространяющихся вдоль ЗС.

Однако полоса пропускания однородной спиральной ЗС простирается от постоянного тока до колебаний с длиной волны, сравнимой с шагом намотки спирали. Ограничение полосы достигается путем разбиения однородной спиральной ЗС на отрезки, каждый из которых преобразуется в звено полосопропускающего фильтра. Образованная таким образом ЗС представляет собой цепочку связанных спиральных резонаторов (ЦССР), которая характеризуется отрицательной дисперсией минус первой пространственной гармоники электромагнитного поля, относительно широкой полосой пропускания и высоким сопротивлением связи пучка с волной [4].

Для исследуемой конструкции ЗС типа ЦССР при решении приближенной задачи используется дисперсионное уравнение [5], в результате решения которого определяются базовые геометрические параметры ЗС, соответствующие требуемой частотной зависимости коэффициента замедления фазовой скорости волны:

$$k^2 \operatorname{ctg}^2 \psi \sum_{=-\infty}^{\infty} \frac{2\pi d E_0}{D} \frac{\cos \beta_p \frac{d}{2}}{\pi^2 - \beta_p^2 d^2} \left[\frac{R_1(\tau_p a) T_1(\tau_p a) - \left(\frac{\tau_p}{k \operatorname{ctg} \psi} \right)^2 R_0(\tau_p a) T_0(\tau_p a)}{R_1(\tau_p a) T_0(\tau_p a) T_1(\tau_p a) \tau_p^2 a} \right] = 0,$$

где k – волновое число, $\tau_p = \sqrt{|\beta_p^2 - k^2|}$ – поперечная постоянная, $\beta_p = \frac{\phi + 2\pi p}{D}$ – фазовая постоянная, ψ – угол намотки витков резонатора, a – средний радиус резонатора, d – расстояние между соседними резонаторами, D – период ЗС, $R_{0,1}$ и $T_{0,1}$ – функции Бесселя нулевого или первого порядка.

Для определения электродинамических параметров при трехмерной постановке задачи применяется программа численного расчета электромагнитных полей с ярко выраженным резонансным поведением. В результате дискретизации системы уравнений Максвелла с учетом периодических граничных условий методом конечных интегралов решается характеристическое уравнение:

$$\tilde{M}_{\mu-1} C E = \omega^2 M_{\epsilon} E,$$

где C – дискретный аналог оператора ротора, E – матрица напряженностей электрического поля, M_{ϵ} и M_{μ} – матрицы диэлектрической проницаемости и удельного магнитного сопротивления [6].

Экспериментальные значения коэффициента замедления фазовой скорости волны определяются методом резонансов для периодических структур [7] в результате измерения резонансных частот коэффициента передачи (КП) макета ЗС:

$$n_m = F(2N - m)(f_m N D)^{-1},$$

где F – коэффициент, зависящий от частотного диапазона, N – число резонаторов на периоде ЗС, m – номер максимума КП, f_m – частота максимума КП.

На рис. 1 представлены результаты расчета и экспериментального измерения дисперсионной характеристики.

Отвод СВЧ-энергии из пространства ЗС (рис. 2) в окончательную нагрузку осуществляется отрезком спирали устройства вывода энергии (УВЭ), расположенным в сечении максимума амплитуды напряженности электрического поля ЗС со стороны электронной пушки. Для выполнения условий согласования электромагнитных полей ЗС и отрезка спирали УВЭ, а также для исключения разрывов

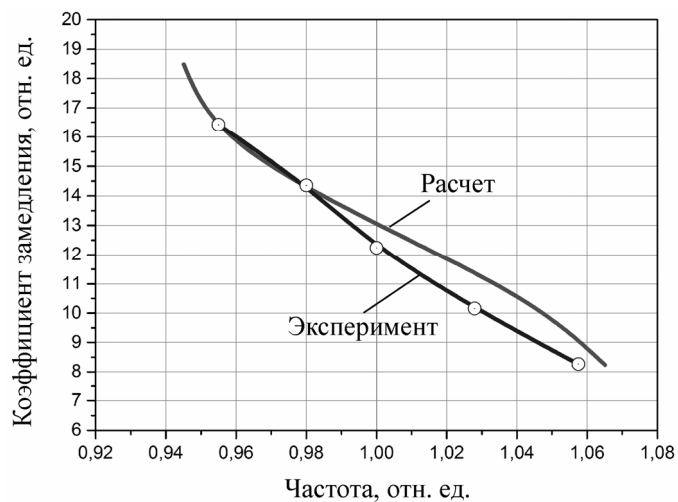


Рис. 1. Дисперсионная характеристика ЗС типа ЦССР

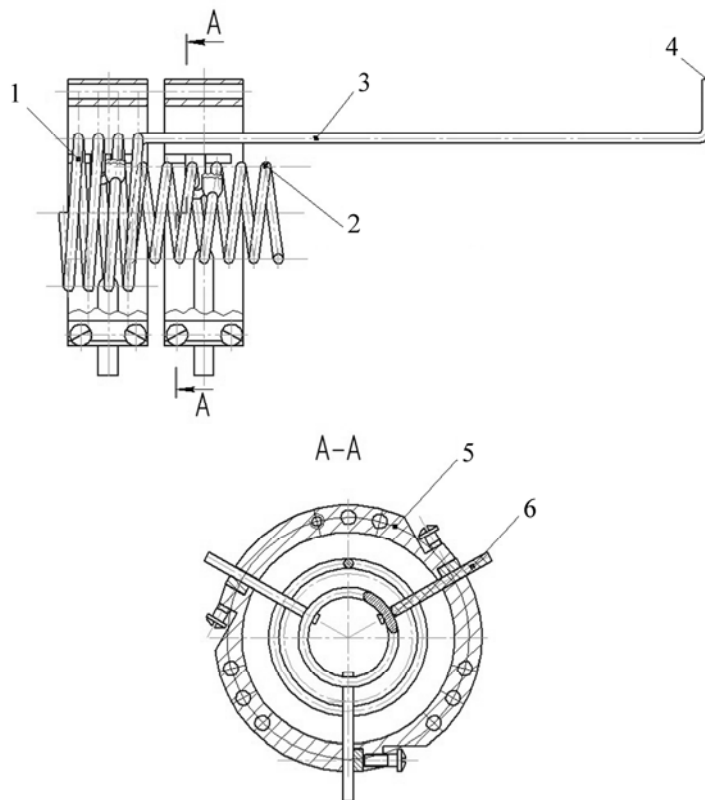


Рис. 2. Эскиз ЗС типа ЦССР без внешнего корпуса: 1 – отрезок спирали УВЭ; 2 – спиральный резонатор (со стороны электронной пушки); 3 – вывод УВЭ; 4 – сечение подключения коаксиального кабеля; 5 – кольцо корпуса ЗС; 6 – фторопластовая опора

дисперсионной характеристики (устранения фазовых скачков волнового сопротивления) намотка витков спиральных резонаторов ЗС и УВЭ выполнена в одинаковом направлении.

Результаты экспериментов

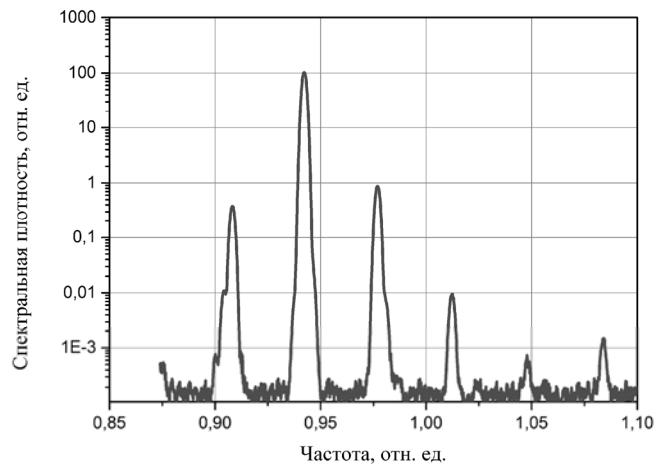
Экспериментальные исследования проводились на макете ЛОВ-генератора, электронно-оптическая система которого включает электронную пушку магнетронного типа с катодом из гексаборида лантана, пролетный канал с ЗС типа ЦССР, коллектор с принудительным водяным охлаждением и магнитно-фокусирующую систему соленоидального типа. Все исследования проводились в импульсном режиме электропитания катода пушки при скважности импульсов $q = 100$. Амплитудный спектр выходного сигнала анализировался в рамках метода измерения спектра высокочастотного заполнения радиоимпульсов.

В качестве исследуемых параметров передаточной характеристики выбраны КП и коэффициент стоячей волны (КСВ). Для количественной оценки неравномерности передаточной характеристики введен фактор связи $A_{св} = K_{св} \cdot Q_{нагр}$, где $K_{св}$ – коэффициент связи отрезка спирали УВЭ со спиральными резонаторами ЗС, $Q_{нагр}$ – добротность ЗС, нагруженной оконечной нагрузкой. Изменение сечения отрезка спирали УВЭ позволяет изменять значения коэффициента связи от 0,131 до 0,178, а добротности – от 40 до 160.

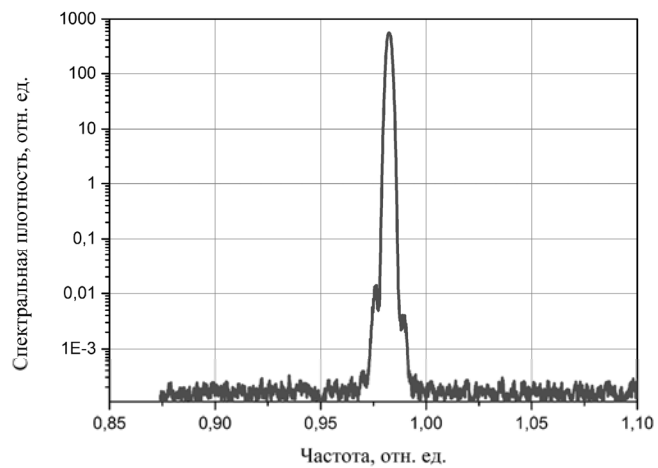
При неравномерности передаточной характеристики в диапазоне $1 \leq \text{КСВ} < 4$ ($A_{св} > 18,7$) наблюдаются следующие режимы генерации колебаний: начиная со стартового значения тока пучка в системе появляется генерация монохроматических колебаний; далее, с увеличением тока пучка, возникает периодическая автомодуляция (многочастотные колебания), которая в дальнейшем сменяется колебаниями со сплошным спектром. При этом область генерации монохроматических колебаний имеет относительно узкий диапазон изменения по току пучка, что ограничивает дальнейшее повышение мощности выходных колебаний и стабилизацию амплитуды колебаний в режиме насыщения [8].

При неравномерности $4 < \text{КСВ} \leq 10$ ($A_{св} = 5,24$) обнаружено, что с увеличением тока пучка и рабочего напряжения зона генерации монохроматических колебаний значительно увеличивается, что позволяет повысить уровень мощности выходных колебаний. При заданной неравномерности КСВ с увеличением тока пучка для ЛОВ характерны следующие режимы: при превышении тока пучка стартового значения в системе возникает режим периодической автомодуляции (рис. 3,а), который при увеличении тока пучка сменяется режимом генерации монохроматических колебаний (рис. 3,б). При этом для режима периодической автомодуляции характерно резкое затухание колебаний с ростом рабочего напряжения и тока пучка. Характерной особенностью режима монохроматических колебаний является широкий диапазон изменения рабочего напряжения и тока пучка. Дальнейшее увеличение тока пучка приводит вновь к режиму периодической автомодуляции (рис. 3,в).

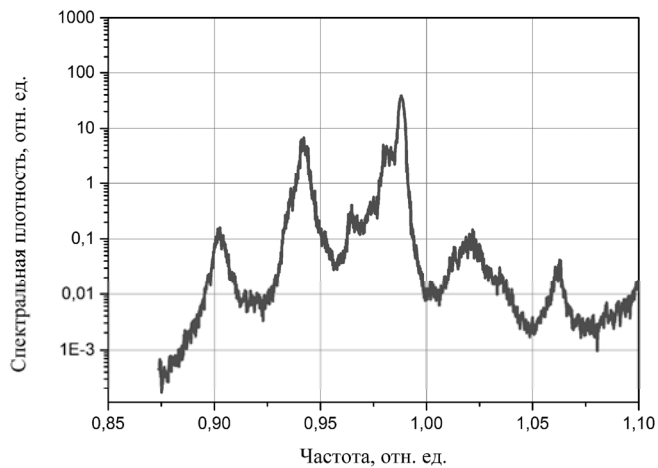
При факторах связи $A_{св} > 5,24$ (неравномерность $4 < \text{КСВ} \leq 10$) существует оптимальное значение, при котором неравномерность КСВ в диапазоне частот минимальна (рис. 4). Так, например, при $5,24 < A_{св} < 9,72$ неравномерность КСВ уменьшается, однако начиная с $A_{св} > 9,72$ неравномерность возрастает. Очевидно, наименьшая неравномерность КСВ соответствует условию, когда максимум напряженности электрического поля отрезка спирали УВЭ совпадает с максимумом напряженности электрического поля ЗС, а в пространстве выполняется условие равенства фазовых скоростей.



а



б



в

Рис. 3. Динамика спектра выходных колебаний при изменении рабочего напряжения:
 а – $U_0 < 3400$ В, б – $3400 < U_0 < 4300$ В, в – $U_0 > 4300$ В

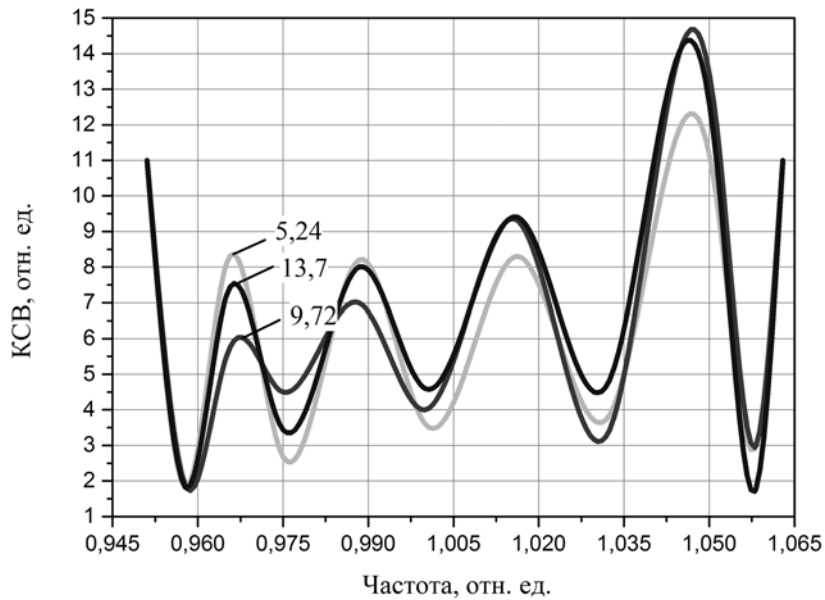


Рис. 4. Характер изменения КСВ при различных значениях $A_{св}$

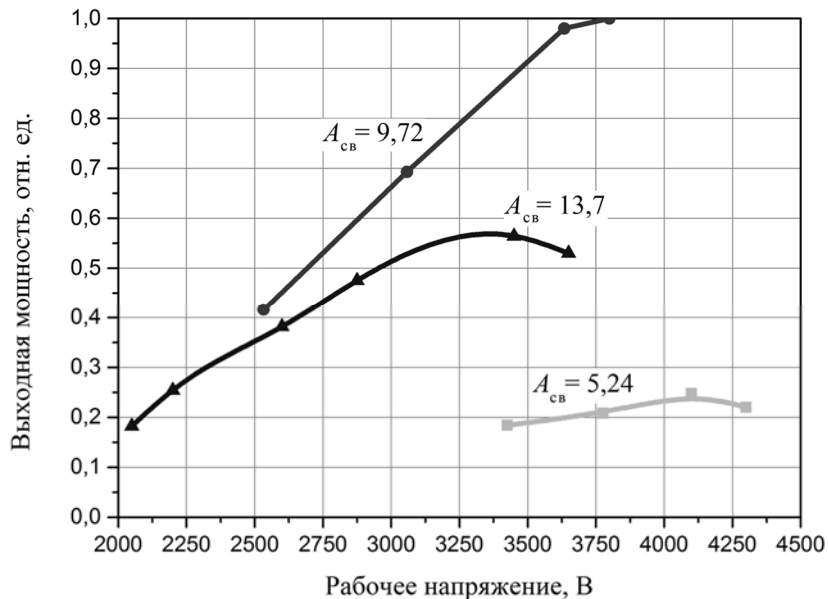


Рис. 5. Зависимость выходной мощности от рабочего напряжения в режиме генерации монохроматических колебаний

На рис. 5 показаны зависимости относительной выходной мощности от рабочего напряжения в режиме генерации монохроматических колебаний. Зависимости получены при условии, что с электронной пушки инжектируется максимальный ток пучка. При постоянном значении рабочего напряжения наблюдается насыщение выходной мощности с изменением тока пучка; смена режи-

мов генерации колебаний отсутствует. Ограничение мощности по току связано с ростом поля пространственного заряда в электронном пучке, которое препятствует образованию интенсивного сгустка электронов. Дальнейшее увеличение рабочего напряжения влечет за собой уменьшение выходной мощности ЛОВ, т. е. возникает явление перегруппировки, характерное для приборов с длительным взаимодействием. Ширина областей генерации колебаний по напряжению в значительной степени определяется неравномерностью КСВ. Так, например, при $A_{св} = 5,24$ ширина области генерации по напряжению составляет $\Delta U_0 \approx 900$ В и увеличивается до ≈ 1600 В при $A_{св} = 13,7$.

Следует отметить, что режим генерации монохроматических колебаний в данных условиях характеризуется широким диапазоном значений рабочего напряжения (до ≈ 1200 В) и тока пучка с отклонением частоты от рабочей не более 1,3 % (рис. 6). То есть существует возможность создания источников стабилизированных СВЧ-колебаний без использования дополнительных схем стабилизации, что позволяет снизить требования к пульсации источников питания.

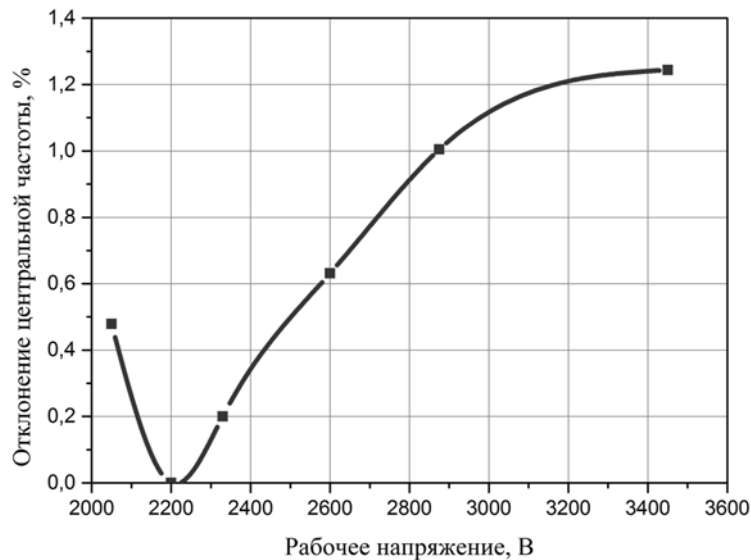


Рис. 6. Отклонение центральной частоты при изменении рабочего напряжения

Рабочее напряжение и ток пучка определяют микропервеанс p_μ , зная который можно определить электронный КПД генератора (рис. 7). Для случая $A_{св} = 9,72$ при $p_\mu = 4,4$ мкА/В^{3/2} электронный КПД достигает ≈ 30 %, т. е. происходит эффективный энергообмен электромагнитной волны ЗС с электронным пучком. Из рис. 7 следует, что в резонансной ЛОВ максимальный КПД достигается на границе смены режимов генерации колебаний (в низковольтной области). При больших значениях микропервеанса происходит ограничение переменной составляющей первой гармоники сгруппированного тока, поэтому существует оптимальное значение микропервеанса, при котором КПД генератора максимален. Однако следует отметить, что для случаев $A_{св} \geq 9,72$ при $p_\mu = 5,5-6,0$ мкА/В^{3/2} возникает второй максимум электронного КПД. Его появление связано с тем, что с увеличением микропервеанса в некоторой точке пространства фаза первой гармоники тока изменяется на 180° ; затем вновь начинается процесс группировки, и электроны собираются в сгустки.

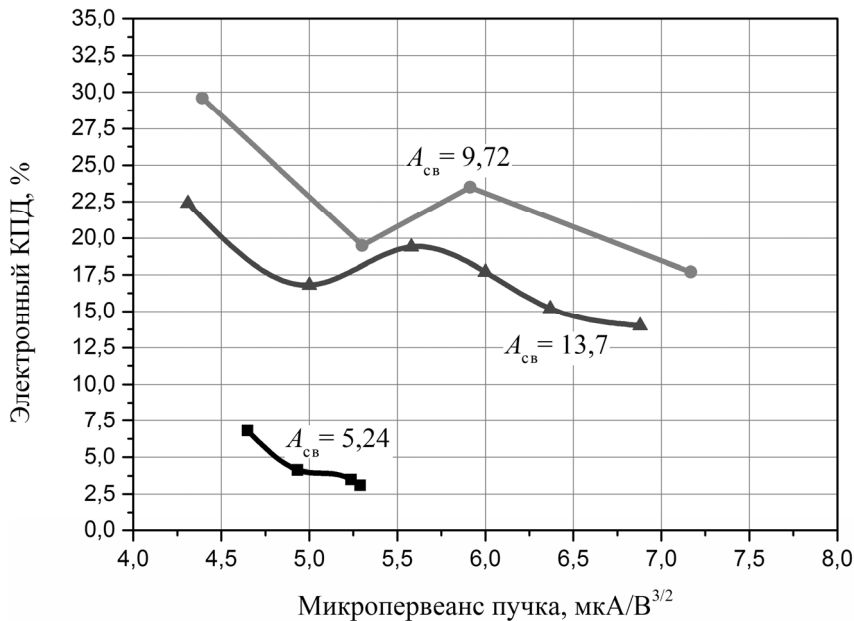


Рис. 7. Зависимость электронного КПД от микропервеанса электронного пучка в режиме генерации монохроматических колебаний

При дальнейшем увеличении неравномерности КСВ > 10 , когда связь между отрезком спирали УВЭ и резонаторами ЗС слабая ($K_{св} < 0,1$) и ярко выражены резонансные свойства в системе ($Q_{нагр} > 350$), во всем диапазоне изменения тока пучка и рабочего напряжения устанавливаются колебания со сплошным спектром, низким уровнем выходной мощности и КПД.

Выводы

Экспериментальные исследования показали, что благодаря изменению характера частотной зависимости передаточной характеристики в пределах полосы пропускания ЗС появляется возможность увеличить уровень выходной мощности и КПД резонансной ЛОВ. Частотная зависимость КСВ ЗС значительно влияет на режимы генерации колебаний резонансной ЛОВ. При $1 \leq K_{св} < 4$ с ростом тока пучка в ЛОВ монохроматические колебания сменяются периодической автомодуляцией, а далее – колебаниями со сплошным спектром; при $4 < K_{св} \leq 10$ наблюдается широкий диапазон генерации монохроматических колебаний по значениям тока пучка и рабочего напряжения, при неравномерности КСВ > 10 генерируются колебания со сплошным спектром и низким уровнем мощности. Кроме того, построение резонансной ЛОВ на основе ЗС типа ЦССР с заданной передаточной характеристикой позволяет создавать стабилизированные по частоте источники монохроматических колебаний с высоким уровнем выходной мощности и КПД до 30 %.

Список литературы

1. Ошкин И. В., Троцюк К. В. Общая схема разработки электронно-оптических систем в приборах СВЧ. Сб. докл. Восьмой науч.-техн. конф. «Молодежь в науке». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2009. С. 492–497.
2. Долов А. М., Кузнецов С. П. Применение методики контроля хаоса для устранения автоколебаний в лампе обратной волны // Журнал технической физики. 2003. Т. 73. Вып. 8. С. 139–142.
3. Ошкин И. В., Профе В. Б., Троцюк К. В. Режимы генерации колебаний резонансного ЛОВ-генератора // Сб. докл. Четырнадцатой науч.-техн. конф. «Молодежь в науке». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. С. 242–247.
4. Oshkin I. V., Profe V. B., Trotsyuk K. V. Study of the external loading influence on BWT-generator operation modes // 24th Int. Crimean Conf. «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo-2014). Sevastopol, Russia. P. 165–166.
5. Ошкин И. В., Профе В. Б., Троцюк К. В. Определение дисперсионной характеристики замедляющей системы типа цепочка связанных спиральных резонаторов // Вестник Саровского физтеха. 2007. № 13–14. С. 64–69.
6. Clemens M., Weiland T. Discrete electromagnetism with the finite integration technique // Progress In Electromagnetic Research. 2001. P. 65–87.
7. Троцюк К. В., Профе В. Б., Астайкин А. И., Мартынов А. П. Метод резонансов для измерения дисперсионной характеристики цепочки связанных резонаторов // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2001. Вып. 1. С. 468–473.
8. Кузнецов С. П. Нелинейная динамика лампы обратной волны: автомодуляция, мультистабильность, контроль // Изв. вузов. Сер. ПНД. 2006. Т. 14, № 4. С. 3–28.

Experimental Investigation of Generation Modes of Oscillations of a Resonant Backward-Wave Tube

I. V. Oshkin, V. B. Profe, K. V. Trotsyuk

The experimental investigation results of the backward-wave tube with slow-wave structure of the coupled helical resonator chain are given. Conditions at which demanded oscillating modes of oscillations with high efficiency and capacity are realised are resulted. Possibility of reception of the monochromatic oscillations stabilised on frequency with electronic efficiency to 30 % is shown.