

Д.С.Шабанов

Московский институт электроники и математики
Национального исследовательского университета
«Высшая школа экономики» (МИЭМ НИУ ВШЭ)
Москва, Россия, deepgmail@gmail.com

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЩНОЙ ЛБВ С ЗАПРЕДЕЛЬНОЙ
СЕКЦИЕЙ ЗС НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ДИСКРЕТНОГО
ЭЛЕКТРОННО-ВОЛНОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

D.S.Shabanov

Moscow Institute of Electronics and Mathematics

National Research University "Higher School of Economics" (MIEM NRU HSE)

Moscow, Russia, deepgmail@gmail.com

**SIMULATION POWERFUL TWT WITH STOPBAND SECTION OF SWS
WITH A USE OF THEORY OF DISCRETE ELECTRON-WAVE
INTERACTION**

In the study presents an approach to the modeling power TWT with stopband sections on the basis of the theory of discrete electron-wave interaction. Designed TWT without the use of equivalent circuits of SWS and with use of local coupling impedance and the characteristic equation of degree four.

Лампы с бегущей волной (ЛБВ) средней и большой мощности являются важнейшим компонентом различных радиосистем связи, радиолокации, радиоэлектронной борьбы и др. Резонаторные цельнометаллические замедляющие системы (ЗС) типа цепочки связанных резонаторов (ЦСР) или встречных штырей, применяющиеся в данных приборах, являются по существу фильтрами СВЧ, обладающими полосами пропускания и запираания частот. В многосекционных мощных ЛБВ для увеличения полосы частот, коэффициента усиления и других параметров применяют сочетания прозрачных секций ЗС, работающих в полосе пропускания рабочих частот, с запредельными секциями, работающими в полосе запираания рабочих частот.

В работе [1] дан подход к описанию процессов взаимодействия электронного потока и электромагнитной волны, на основе теории дискретного электронно-волнового взаимодействия, который позволяет производить расчет без использования эквивалентных схем.

Исходной является следующая система уравнений:

$$\frac{d^2 J}{dz^2} - 2ih_e \frac{dJ}{dz} + \left(\Gamma h_p^2 - h_e^2 \right) J = -ih_p^2 S \omega \epsilon_0 \bar{E}, \quad (1)$$

известное линейное уравнение [2] для ВЧ тока пучка J,

наведенный ток на q-ом шаге ЗС задается выражением

$$J_q = \frac{1}{d_q} \int_{z_q^-}^{z_q^+} J(z) \bar{e}_q(z) dz. \quad (2)$$

Для периодических систем с периодом L и одинаковыми эквивалентными зазорами взаимодействия ширины d имеем конечно-разностное уравнение возбуждения [3, 4]:

$$\Delta^2 E_q + 2E_q(1 - \cos \varphi_s) = -iR_s^0 \sin \varphi_s J_q d, \quad (3)$$

где $\Delta^2 \hat{A}_q = E_{q+1} - 2\hat{A}_q + \hat{A}_{q-1}$ – конечная разность второго порядка, $\varphi_s = h_s L$.

Это уравнение можно переписать относительно напряжений $U_q = -E_q d$ на эквивалентных зазорах

$$\Delta^2 U_q + 2U_q(1 - \cos \varphi_s) = iZ_s J_q, \quad (4)$$

где $Z_s = R_s^0 d^2 \sin \varphi_s$ – локальный импеданс связи, учитывающий сразу прямую и встречную волны. Важно, что он не обращается в бесконечность на границах полосы прозрачности замедляющей системы и является непрерывной функцией при переходе из одной полосы в другую [4, 5].

Уравнения (1-3) обычно переписывают в безразмерном виде с использованием общепринятых в теории ЛБВ параметров [1]. Решение данной системы уравнений можно искать в виде электронных волн – собственных волн ЗС с электронным пучком, отыскивая комплексный сдвиг фазы ψ_i тока, скорости электронов и поля на шаг в каждой i-ой волне.

При этом получается характеристическое уравнение 4-го порядка, так как уравнение возбуждения связывает F_{q+1} не только с F_q , но и F_{q-1} . Физически это соответствует наличию 4-х электронных волн в периодических ЗС с электронным пучком, которые исследовались в [6, 7] методом эквивалентных схем.

В ходе работы рассматривалась мощная трехсекционная ЛБВ, вторая секция которой является запредельной. В расчете так же рассматривались поглотители, разделяющие секции. Схема переноса токов и скоростей электронов, а так же общая схема трехсекционной ЛБВ показана на рис.1.

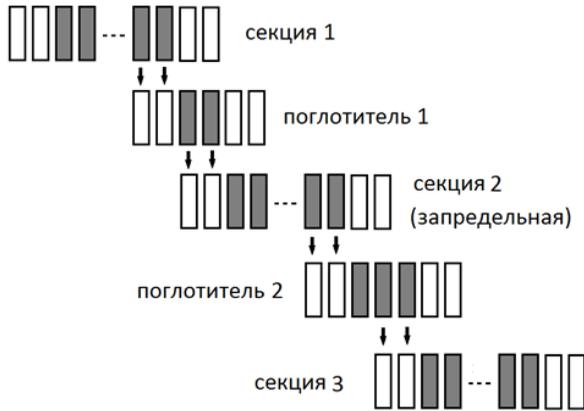


Рис.1. Схема переноса токов и скоростей электронов для многосекционной ЛВВ.

На рис.1. отмечены действительные (серый цвет) и мнимые (белый цвет) зазоры ЗС, введение мнимых зазоров ЗС обусловлено тем, что уравнение возбуждения (3) связывает поле в текущем F_q зазоре, с полями в двух соседних зазорах F_{q-1} и F_{q+1} .

Коэффициент усиления данного прибора, рассчитанный с использованием характеристического уравнения 4ой степени и локального импеданса связи, в рабочей полосе прибора, показан на рис. 2.

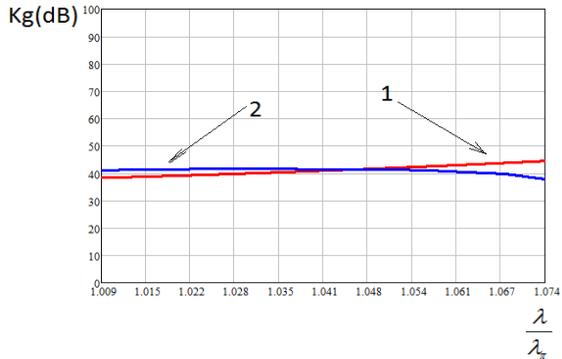


Рис.2. Зависимость коэффициента усиления от длины волны, в рабочей полосе прибора при использовании характеристического уравнения четвертой степени и локального импеданса связи (1), экспериментальные данные (2), где λ_{π} – граничная длина волны для запредельной секции.

В случае если рассматривается характеристическое уравнение 3 степени, введенное в [8]

$$-i(\delta + (d + i \cdot \xi)) \cdot (\delta^2 + \sigma^2) + 1 = 0, \quad (6)$$

где d – параметр затухания, ξ – параметр скорости. Начальной амплитуды нарастающей волны задаются соотношением:

$$A = \left| \frac{\delta_1^2 + \sigma^2}{(\delta_1 - \delta_2)(\delta_1 - \delta_3)} \right|, \quad (7)$$

где $\delta_v, (v = 1, 2, 3)$ - корни характеристического уравнения (6). Имеем следующую зависимость для коэффициента усиления в рабочей полосе пробора (рис.3)

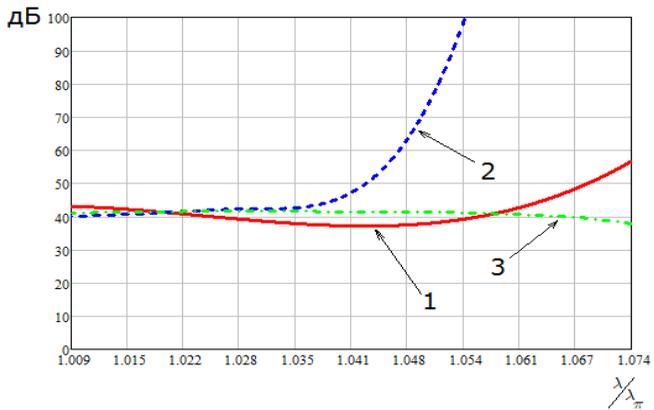


Рис.3. Расчетный (1, при использовании локального импеданса связи),(2, при использовании сопротивления связи Пирса) и экспериментальный (3) коэффициент усиления в рабочей полосе, λ_π – граничная длина волны для запредельной секции.

График экспериментальных данных, по коэффициенту усиления для реальной ЛБВ, получен и предоставлен ЗАО «Фазотрон-ВМЗ».

Расхождения между теорией и экспериментом, вероятно возникают по причине того, что реальный прибор проходит серию «холодных» и «горячих» настроек, которые влияют на структуру пучка, которую в теории точно учесть не представляется возможным. Так же в реальном приборе в выходной секции ЗС имеется некоторое «размытие» по радиусам резонаторов к концу секции, что также не учитывалось в расчете.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №10-02-00859).

Библиографический список

1. Солнцев В.А. Обобщенная линейная теория дискретного электронно-волнового взаимодействия в замедляющих системах / В.А. Солнцев, Р.П. Колтунов, Радиотехника и электроника. 2010г, том 55. №11. С.1362-1375.
2. Вайнштейн Л.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике / Л.А. Вайнштейн, В.А. Солнцев, М.: Сов. радио, 1973.400с.
3. Мухин С.В. Разностная форма теории возбуждения периодических волноводов / С.В. Мухин, В.А. Солнцев, РЭ. 1991. Т.36.№11.С.2161-2166.
4. Солнцев В.А. Анализ уравнений дискретного электронно-волнового взаимодействия и группировки электронных потоков в периодических и псевдопериодических замедляющих системах / В.А. Солнцев, Р.П. Колтунов, 2008г. Радиотехника и электроника. том 53. №6. С.738-751.
5. Мухин С.В. Исследование полосовых свойств и локального импеданса связи замедляющих систем / С.В. Мухин, Д.Ю. Никонов, В.А. Солнцев, Радиотехника и электроника. 2008. Т.53.№10.С.1324-1332.
6. Канавец В.И. Излучение мощных электронных потоков в резонаторных замедляющих системах / В.И. Канавец, Ю.Д. Мозговой, А.И. Слепков, М.: Изд-во МГУ, 1993.208с.
7. Булгакова Л.В. Лекции по электронике СВЧ приборов типа О / Л.В. Булгакова, Д.И. Трубецков, В.Л. Фишер, В.Н. Шевчик, Изд-во Саратов-та. 1974.221с.
8. Клеен В. Введение в электронику сверхвысоких частот. Часть II: Лампы с длительным взаимодействием / В.Клеен, К.Пешль, Пер. с нем. п/р Солнцева В.А., Москва «Советское радио», 1963.272с.