

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.  
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра электроники, колебаний и волн

Тема магистерской диссертации:

**Определение оптимальной конструкции, обеспечивающей  
необходимые выходные характеристики для ЛБВ в V-диапазоне с СЗС**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 2 курса 2231 группы  
направления 03.04.03 «Радиофизика», профиль «Физика микроволн»  
института физики  
Евлушиной Олеси Алексеевны

Научный руководитель  
доцент кафедры основ  
проектирования приборов СВЧ,  
к. ф. – м. н.



подпись, дата

В. И. Роговин

Зав. кафедрой  
электроники, колебаний и волн,  
доцент, к. ф. – м. н.



подпись, дата  
09.06.2025 г.

С. В. Гришин

Саратов, 2025 г.

## **ОГЛАВЛЕНИЕ**

|   |    |
|---|----|
| Введение.....   | 3  |
| Глава 1. Обзор литературы.....  | 4  |
| Глава 2. Используемое программное обеспечение.....  | 4  |
| Глава 3. Определение первоначальной конфигурации ВЧ-пакета .....  | 5  |
| Глава 4. Расчет электродинамических характеристик спиральной<br>замедляющей системы.....                            | 6  |
| Глава 5. Учет влияния шероховатости поверхности плющенной микроленты<br>на электродинамические характеристики ..... | 8  |
| Глава 6. Расчет выходных характеристик ЛБВ.....   | 10 |
| Заключение .....  | 12 |
| Список литературы .....   | 14 |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность** данной работы обусловлена освоением коротковолнового диапазона и стремительным развитием различных отраслей промышленности, что, в свою очередь, привело к росту исследований и разработок усилителей СВЧ V-диапазона. Одним из основных элементов усилителей СВЧ, является лампа бегущей волны (ЛБВ) [1].

**Цель** данной работы заключается в определении оптимальной конфигурации ВЧ-пакета и пространства взаимодействия спутниковой ЛБВ с СЗС в V-диапазоне с использованием отечественных серийных технологий и элементной базы. Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

1. обзор литературы, посвящённой исследованиям в области проектирования ЛБВ V-диапазона частот;
2. выбор первоначальной конфигурации с использованием авторского программного обеспечения (ПО);
3. изучение методологии проектирования СЗС в ANSYS HFSS и адаптация решателя, для более точного расчета;
4. определение оптимальной конфигурации ВЧ-пакета и его параметрическая оптимизация, а также расчет характеристик;
5. проектирование пространства взаимодействия с применением авторского ПО, основанного на одномерной нелинейной модели взаимодействия пучка с волной.

## **ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ**

В 1995 году впервые была установлена перекрестная связь между спутниками с использованием V-диапазона частот (40-75 ГГц) [2]. Основное преимущество диапазона – широкая полоса пропускания. Диапазон имеет низкую помехоустойчивость [3] и подвержен атмосферной абсорбции [4]. Такой процесс может обеспечить стабильную и более надежную связь между спутниками. Поэтому V-диапазон является идеальным для использования в связи между спутниками.

Наибольшее распространение для использования в спутниковых системах связи получили ЛБВ с СЗС. Анализ литературы [5 – 15], показал, что подобные ЛБВ должны обладать выходной мощностью не менее 40 Вт, коэффициентом усиления приблизительно 40 дБ и достаточно высоким КПД на уровне 6-10%. Также представленные работы показали, что использование СЗС является перспективным направлением при разработке ЛБВ V-диапазона.

## **ГЛАВА 2. ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ**

Программное обеспечения «Optica» [16, 17] использовалось для определения основных характеристик электронно-оптической системы и магнитной периодической фокусирующей систем (МПФС), необходимых для получения параметров и конфигурации электронного пучка для достижения заданных СВЧ-характеристик ЛБВ. В основу программы заложена группа параметров, связанная между собой уравнениями для плотности тока, выходной мощности, безразмерного параметра спирали и формулой для расчета амплитуды магнитного поля.

Для расчет электродинамических характеристик (ЭДХ) использовался программный комплекс ANSYS Electronics Suite HFSS [18]. В его основе лежит численный алгоритм решения уравнений Максвелла с применением метода конечных элементов (МКЭ) и граничных условий типа Флоке.

Расчет пространства взаимодействия (ПВ) осуществлялся с использованием авторской программы [19], [20]. Процессы взаимодействия бегущей электромагнитной волны с пучком описываются системой интегро-

дифференциальных уравнений в частных производных, состоящей из уравнения возбуждения, уравнения движения заряженных частиц и уравнения для расчета гармоник тока.

### ГЛАВА 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРВОНАЧАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ВЧ-ПАКЕТА

На первом этапе проектирования конструкции были определены оптимальные размеры: диаметр экрана, диаметр катода и уровень магнитной индукции. Значение ускоряющего напряжения выбиралось из интервала 10-14 кВ. Диаметр канала для прохождения пучка – от 0.45 до 0.55 мм, заполнения пучком пролетного канала – 0.5-0.6. Радиус катода выбран в пределах технологических возможностей: 0.75-1 мм, а максимальный ток катода не превышал 100 мА. Расчеты проведены на центральной частоте V-диапазона, равной 60 ГГц. Все полученные данные должны соответствовать требованиям, указанным в табл. 1.

*Таблица 1. Оптимальные значения для конструкции ЛБВ V-диапазоне*

|                      |               |                   |                     |
|----------------------|---------------|-------------------|---------------------|
| $J_c$                | $\gamma_{ea}$ | $P_{\text{вых}}$  | $B_0$               |
| $< 5 \text{ A/cm}^2$ | $< 1.5$       | $> 50 \text{ Вт}$ | $< 3900 \text{ Гс}$ |

Здесь  $J_c$  – плотность тока,  $\gamma_{ea}$  – безразмерный параметр,  $P_{\text{вых}}$  – выходная мощность,  $B_0$  – амплитуда магнитного поля. Значения выбраны из инженерно-технических соображений. Результат расчетов, представлен в табл. 2.

*Таблица 2. Результат расчета с помощью программы «Optica»*

| Параметр                  | Значение                     | Параметр                              | Значение               |
|---------------------------|------------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| Частота                   | 60 ГГц                       | $D_{\text{экрана}}/D_{\text{канала}}$ | $\approx 3.0$          |
| Электронный КПД           | $\approx 5 - 8 \%$           | $D_{\text{экрана}}$                   | 1.4 – 1.7 мм           |
| Плотность тока            | не более 5 А/см <sup>2</sup> | $D_{\text{катода}}$                   | 1.5 мм                 |
| Диаметр пролетного канала | $\approx 0.55 \text{ мм}$    | Выходная мощность                     | 52 Вт                  |
| Ток пучка                 | не более 85 мА               | Плотность тока                        | 4.53 А/см <sup>2</sup> |
| Напряжение ЗС             | 13 000 – 13 500 В            | $B_0$                                 | 2900 Гс                |

Приближенное значение шага определялось исходя из геометрического замедления по формуле:  $h = \frac{2\pi r}{\sqrt{n^2-1}}$ , где  $r$  – радиус спирали,  $n$  – замедление.

Замедление рассчитывалось из напряжения ЗС:  $n = \frac{505}{\sqrt{U}}$ , где  $U$  – напряжение ЗС.

#### ГЛАВА 4. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПИРАЛЬНОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Для определения оптимального варианта конструкции СЗС для ЛБВ V-диапазона частот, был выполнен расчет, анализ и сравнение ЭДХ для различных конфигураций элементов СЗС.

Исследование ЭДХ спиральной замедляющей системы с разной геометрией диэлектрических опорных стержней проводилось путем сравнения ЭДХ для прямоугольных, Т-образных и трапецеидальных стержней.

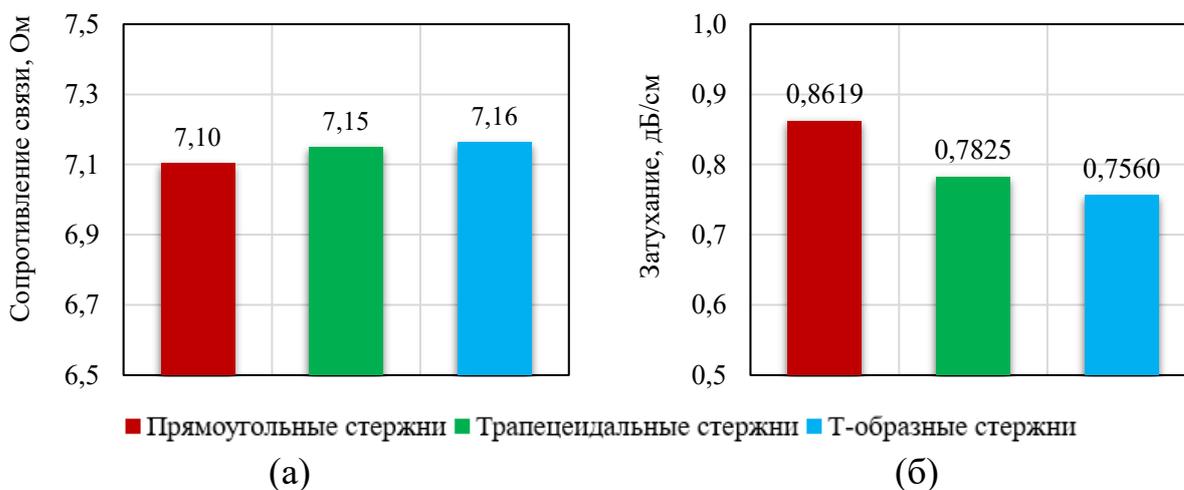


Рис. 1. Гистограмма распределения сопротивления связи (а) и затухания (б) для различной геометрии диэлектрических опорных стержней

Использование Т-образных стержней позволило увеличить сопротивление связи на 1.5% и минимизировать потери на 13.5%.

Диаметр пролетного канала равен 0.55 мм (из программы «Optica»). Отношение диаметра экрана к диаметру канала должно быть в интервале от 2 до 3. Были определены шесть возможных в реализации вариантов значения диаметра экрана, удовлетворяющих этому условию (от 1.2 до 1.7 мм).

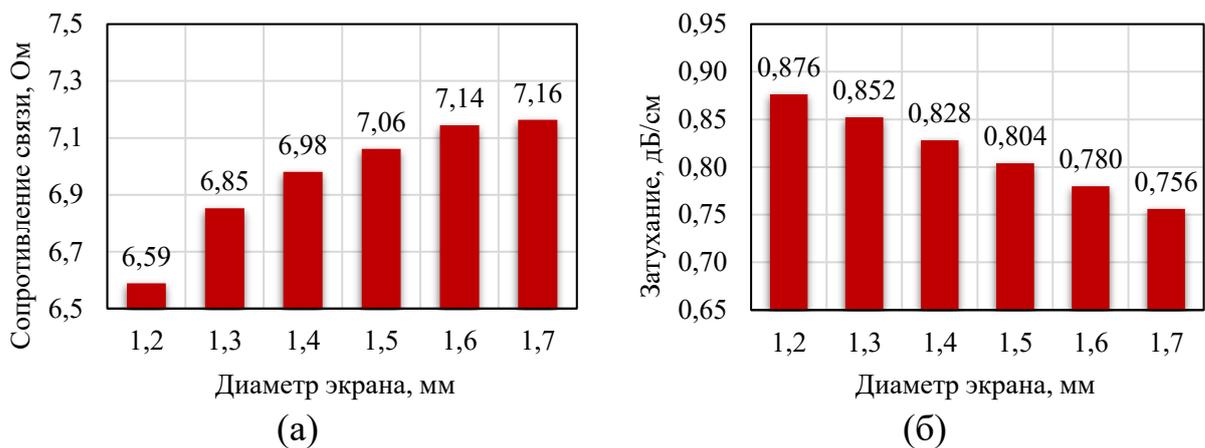


Рис. 2. Зависимость сопротивления связи (а) и затухания (б) от диаметра экрана

Диаметр экрана СЗС, равный 1.7 мм, обеспечил оптимальное сочетание высокого сопротивления связи (выше на 8%) и низких потерь (ниже на 15%).

Сечение для спиральной микроленты выбирались исходя из технологических возможностей. Для анализа были выбраны сечения равные  $0.25 \times 0.10$ ,  $0.2 \times 0.1$  и  $0.150 \times 0.075$  мм.

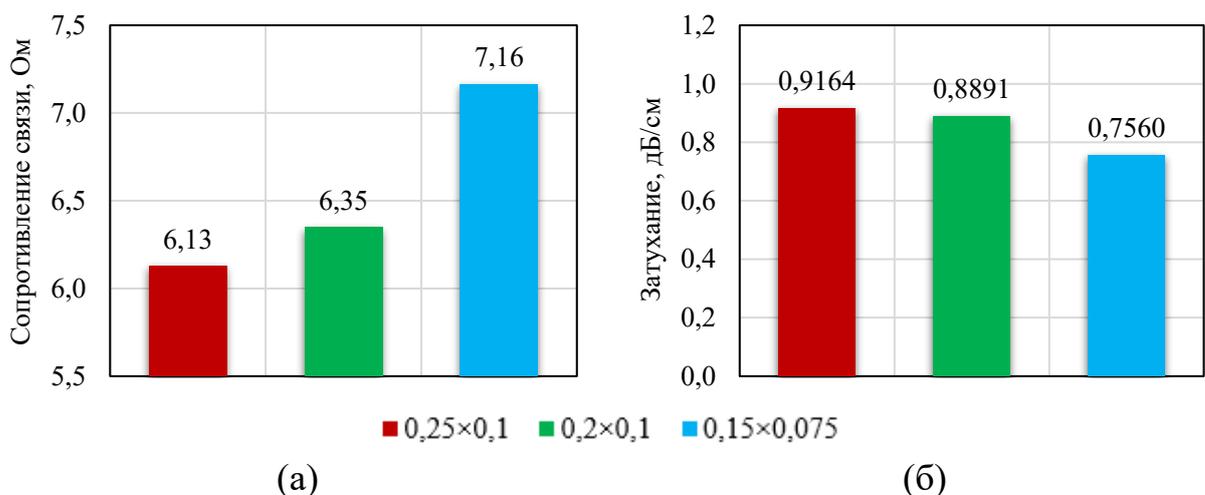


Рис. 3. Зависимость сопротивления связи (а) и затухания (б) от сечения микроленты

Наилучшие ЭДХ достигались при размерах прямоугольного сечения спиральной микроленты, равным  $0.15 \times 0.075$ . Именно при этом сечении СЗС демонстрировала максимальное сопротивление связи (выше на 11%) и минимальные потери (ниже на 21%).

Итоговый вариант геометрических размеров и модель одного периода СЗС для ЛБВ V-диапазона представлены в табл. 3 и на рис. 4.

Таблица 3. Параметры СЗС для ЛБВ V-диапазона частот

| Параметры                             | Значения    |
|---------------------------------------|-------------|
| Внутренний диаметр экрана, мм         | 1.7         |
| Ширина нижней части стержня, мм       | 0.2         |
| Ширина верхней части стержня, мм      | 0.4         |
| Высота нижней части стержня, мм       | 0.2         |
| Высота стержня, мм                    | 0.5         |
| Диаметр пролетного канала спирали, мм | 0.55        |
| Сечение спиральной микроленты, мм     | 0.150×0.075 |

В качестве материалов для элементов СЗС были выбраны: медь с проводимостью  $3.8 \times 10^7$  См/м – для комбинированного экрана; оксид бериллия с диэлектрической проницаемостью 6.4 и тангенсом угла диэлектрических потерь, равным  $5 \times 10^{-4}$  – для T-образных диэлектрические опорные стержни; сплав МАГТ-0.2 (медь – 99.98%, алюминий, гафний и титан – 0.2%) – для спирали, выполненной из микроленты прямоугольного сечения.

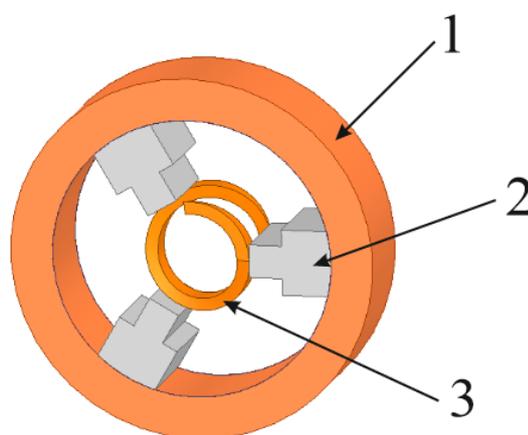


Рис. 4. Итоговая конструкция СЗС с T-образными стержнями (модель, созданная в HFSS): 1 – медный комбинированный экран, 2 – T-образные опорных диэлектрические стержни, 3 – микролента прямоугольного сечения.

## ГЛАВА 5. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЮЩЕННОЙ МИКРОЛЕНТЫ НА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

С переходом в коротковолновую часть СВЧ-диапазона наличие неоднородностей в СЗС оказывает влияние на ЭДХ и выходные характеристики. Поэтому была проведена оценка влияния шероховатости

микрорентны на ВЧ-характеристики. Исходя из способов обработки детали, известна лишь средняя высота шероховатости, поэтому в HFSS для расчетов использовалась модель Гройсса [21] поправочный коэффициент которой равен:  $K = 1 + \exp\left(-\left(\frac{\delta}{2R_q}\right)^{1.6}\right)$ , где  $R_q$  – среднеквадратичное значение высоты шероховатости,  $\delta$  – толщина скин-слоя.

Для определения  $R_q$  оценка шероховатости проводилась двумя методами: с помощью анализа шероховатости прокатных валов; с помощью стилусной профилометрии (данные предоставлены коллективом Саратовского филиала ИРЭ РАН им. В. А. Котельникова, в частности инженером Ножкиным Д.А.). Полученные результат с помощью стилусной профилометрии подтверждают результаты полученные с помощью оценки шероховатости прокатных валов и  $R_q = 0,57$  мкм.

В статье [22], [23] указывалось и подтверждалось, что модели, представленные ANSYS HFSS неэффективны на частотах более 30 ГГц. Поэтому было проведено сравнение расчетов ЭДХ для X-, Ku-, K-диапазонов без учета шероховатости, с учетом шероховатости по модели Гройсса и с учетом шероховатости с помощью использования поправочного коэффициента, равного  $\sqrt{2}$ . Этот поправочный коэффициент получен при лучшем совпадении расчетных и экспериментальны характеристик ЛБВ.

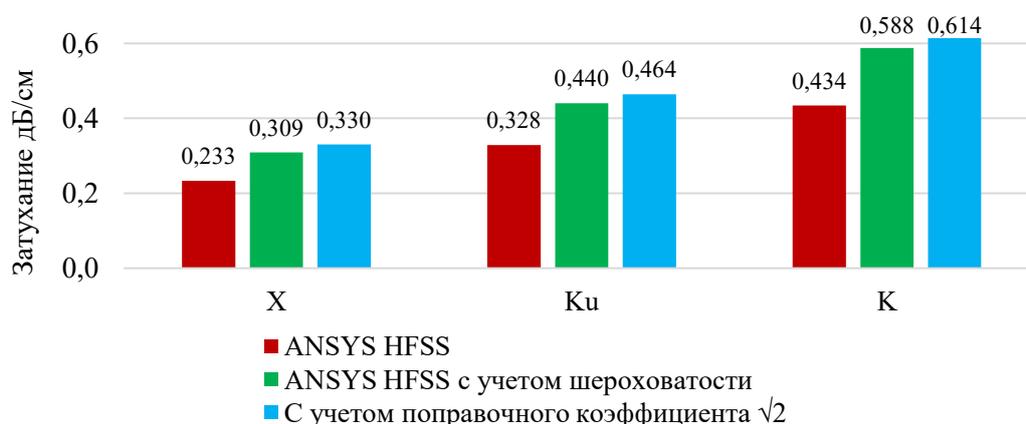


Рис. 5. Гистограмма распределения затухания для «оптимальных» конфигураций СЗС в X-, Ku, K-диапазонах частот без учета шероховатости с учетом шероховатости двумя способами

Разница между затуханием из ANSYS HFSS без и с учетом шероховатости составила  $\approx 3\%$ . При этом разница между ANSYS HFSS с учетом шероховатости и поправочным коэффициентом составила менее 1%. В связи с этим в V-диапазоне частот можно использовать поправочный коэффициент  $\sqrt{2}$ .

## ГЛАВА 6. РАСЧЕТ ВЫХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛБВ

Результаты ЭДХ СЗС для ЛБВ в V-диапазоне частот позволили провести расчёт ПВ ЛБВ и, как следствие, оценить основные выходные характеристики. Выбранная конфигурация ПВ представлена на рис. 2.

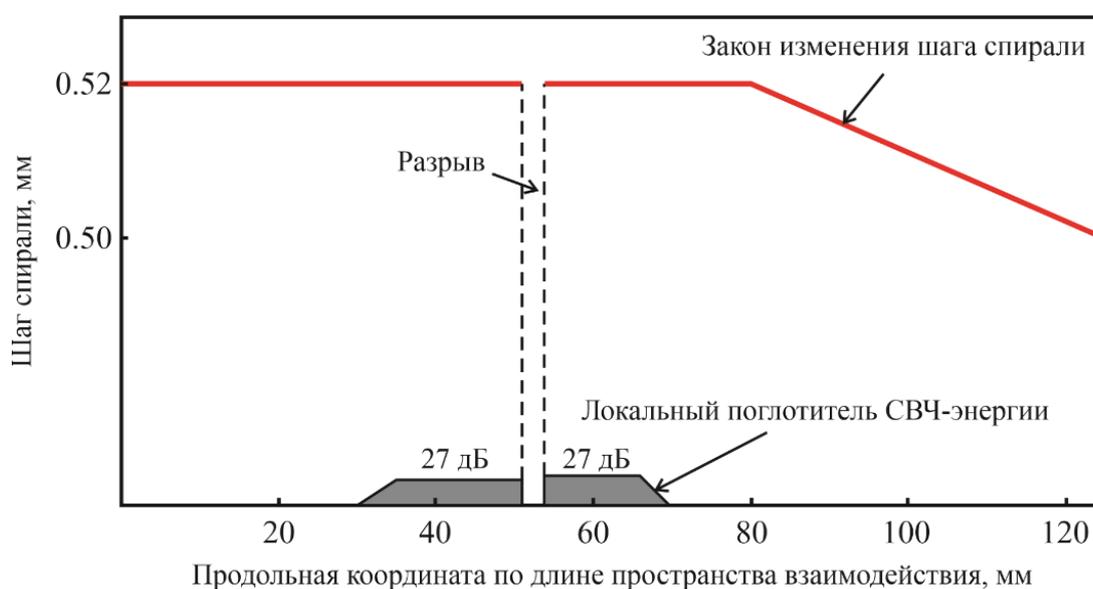


Рис. 6. Конфигурация ПВ

Были рассчитаны выходные характеристики в линейном и нелинейном режимах. В главе 5 было установлено, что с переходом в коротковолновую часть СВЧ-диапазона наличие шероховатостей в СЗС оказывает влияние на ЭДХ и выходные характеристики. В связи с этим было оценено влияния шероховатости поверхности спиральной микроленты на выходные характеристики СЗС. Расчетное затухание с учетом шероховатости составило 1,0696 дБ/см при шаге шероховатости  $1,04h_0$  и 1,2209 дБ/см на при шаге  $h_0$  (затухание увеличилось на 30%).

На рис.6 представлены графики, показывающие, как изменялись выходные характеристики в линейном и нелинейном режимах при наличии или отсутствии шероховатостей на спирали.

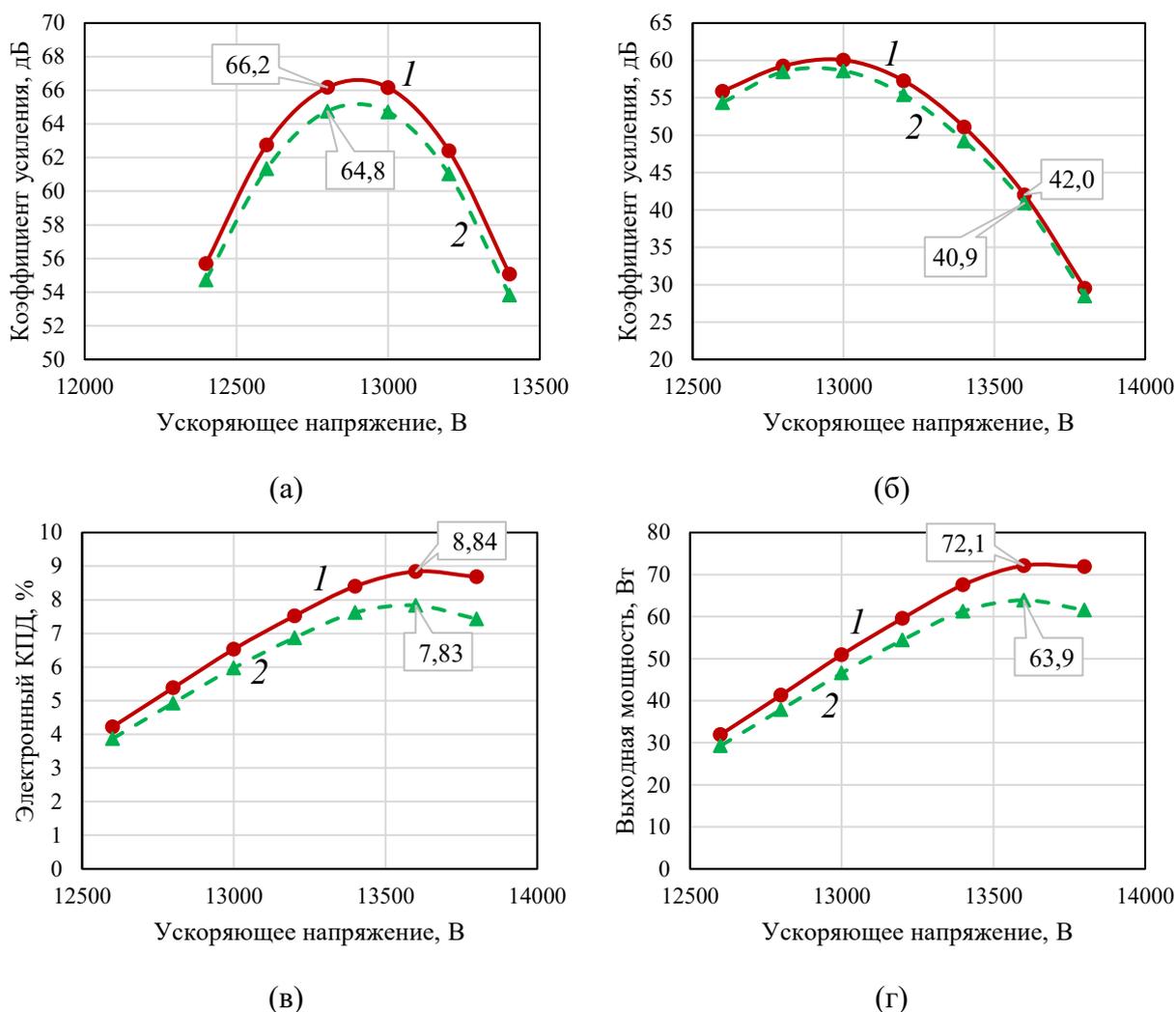


Рис. 7. (а) – линейный режим, (б), (в), (г) – нелинейный режим (1 – без учета шероховатости, 2 – с учетом шероховатости)

Максимальное усиление в линейном режиме достигалось при напряжении 12.8 кВ. Однако при наличии шероховатости коэффициент усиления снижался на 1.4 дБ (на 2.2%). В нелинейном режиме выходная мощность достигала насыщения при напряжении, равном 13.6 кВ, и в условиях наличия шероховатости выходная мощность уменьшалась на 11.3%, КПД – на 1%, а коэффициент усиление – на 1.1 дБ (на 2.6%).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы была определена оптимальная конфигурация ВЧ-пакета и пространства взаимодействия спутниковой ЛБВ с СЗС в V-диапазоне с использованием отечественных серийных технологий и элементной базы. Было определено, что при выходной мощности более 45 Вт и токе пучка не более 85 мА с плотностью тока  $4.53 \text{ А/см}^2$  и с напряжением 13000 – 13500 В, а также электронным КПД 5 – 8 % на частоте 60 ГГц магнитное поле будет составлять 2900 Гс. При этом диаметр катода будет равен 1.5 мм, а диаметр пролетного канала 0.55 мм.

Для определения оптимального варианта конструкции СЗС для ЛБВ V-диапазона частот с помощью программы ANSYS HFSS, был выполнен расчет, анализ и сравнение ЭДХ для различных конфигураций элементов СЗС. В итоге была получена конструкция с экраном диаметром 1.7 мм выполненным из меди с проводимостью  $3.8 \times 10^7 \text{ См/м}$ , Т-образными диэлектрическими опорными стержнями, выполненными из оксида бериллия с диэлектрической проницаемостью 6.4 и тангенсом угла диэлектрических потерь равным  $5 \times 10^{-4}$ , а также спиральной микроленты прямоугольного сечения  $0.15 \times 0.075$  из материала МАГТ-0.2 с проводимостью  $1.5 \times 10^7 \text{ См/м}$  и диаметром пролетного канала 0.55 мм.

Поскольку с переходом в коротковолновую часть СВЧ-диапазона наличие неоднородностей в СЗС оказывает влияние на ЭДХ и выходные характеристики, было оценено влияние шероховатости микроленты на ВЧ-характеристики СЗС. Так как статьи [22], [23] показали, что модели, предоставляемые ANSYS HFSS, неэффективны на частотах более 30 ГГц был использован поправочный коэффициент, равный  $\sqrt{2}$ . Разница между затуханием составила 30%.

Результаты ЭДХ СЗС для ЛБВ в V-диапазоне частот позволили провести расчёт ПВ ЛБВ и, как следствие, оценить ключевые выходные характеристики. Для расчета выходных характеристик использовалась конструкция ПВ, имеющая общую длину, равную 125 мм, и состоящая из двух

секций. На разрыв между ними приходилось затухание 10 дБ. Лампа характеризовалась постоянным шагом на входе и изохронностью. Кроме того, в схеме присутствовал один поглотитель, затухание которого равно 27 дБ.

В рамках анализа были рассчитаны выходные характеристики в линейном и нелинейном режимах. Максимальное усиление в линейном режиме достигалось при напряжении 12.8 кВ. Однако, при наличии шероховатости, коэффициент усиления снижался с 66.2 дБ на 1.4 дБ (на 2.2%). В нелинейном режиме выходная мощность достигала насыщения при напряжении, равном 13.6 кВ, и, в условиях наличия шероховатости, выходная мощность уменьшалась с 72.1 Вт на 11.3%, КПД – на 1%, а коэффициент усиления с 42 дБ на 1.1 дБ (на 2.6%).

Таким образом показано что в V-диапазоне возможно изготовление ЛБВ с выходной мощностью не менее 50 Вт, коэффициентом усиления не менее 40 дБ, КПД на уровне 7.5% при напряжении 13.6 кВ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гилмор-мл А. Лампы с бегущей волной. – Litres, 2015.
- [2] Гнатюк Д. Л. и др. Электроника и микроэлектроника СВЧ //Электроника. – 2022. – Т. 1. – С. 79-83.
- [3] Belov L. A., Smolskiy S. M., Kochemasov V. N. Handbook of RF, microwave, and millimeter-wave components. – Artech house, 2012.
- [4] Kizer G. Digital microwave communication: engineering point-to-point microwave systems. – John Wiley & Sons, 2013.
- [5] Palm A., Shin Y. M. Development of novel traveling wave tube amplifiers for V-band microwave power modules (MPMs) at the Northern Illinois University (NIU) //IEEE International Vacuum Electronics Conference. – IEEE, 2014. – С. 201-202.
- [6] Li L. et al. Design and experiment of a V-band helix TWT //2013 IEEE 14th International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2013. – С. 1-2.
- [7] Robbins N. R. et al. Space qualified, 75-watt V-band helix TWTA //IVEC 2012. – IEEE, 2012. – С. 349-350.
- [8] Robbins N. R. et al. Space qualified, 75-watt V-band helix TWTA //IVEC 2012. – IEEE, 2012. – С. 349-350.
- [9] Liao M. et al. A novel folded waveguide for V-band TWT //IEEE Transactions on Plasma Science. – 2015. – Т. 43. – №. 12. – С. 4088-4091.
- [10] J. H. Booske et al., "Vacuum Electronic High Power Terahertz Sources," in IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, vol. 1, no. 1, pp. 54-75, Sept. 2011.
- [11] A. Baig, D. Gamzina, T. Kimura, J. Atkinson, C. Domier, B. Popovic, L. Himes, R. Barchfeld, M. Field and N. C. Luhmann, "Performance of a nano-cnc machined 220-ghz traveling wave tube amplifier", IEEE Transactions on Electron Devices, vol.64, no.5, pp. 2390-2397 2017
- [12] Tao C. et al. Design and Simulation of a V Band High-power TWT with Rectangular-ring Vertex Double-bar SWS //2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – IEEE, 2024. – С. 1-3.

- [13] N. M. Ryskin, A. G. Rozhnev, A. V. Starodubov, A. A. Serdobintsev, R. A. Torgashov, V. V. Galushka and A. M. Pavlov, "Development of planar slow-wave structures for low-voltage millimeter-band vacuum tubes", in 2018 43rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), pp. 1-2, IEEE, 2018
- [14] M. Vinothkumar, A. Chauhan and S. Gupta, "Review of planar slow wave structures for travelling wave tube", International Journal of Pure and Applied Mathematics, Vol. 119 No. 10 2108, 273-277
- [15] Ryskin N. M. et al. Development and Modeling of a V-Band Traveling-Wave Tube With a Microstrip Meander-Line Slow-Wave Structure //2023 24th International Vacuum Electronics Conference (IVEC). – IEEE, 2023. – С. 1-2.
- [16] Морев С.П. Проектирование электронно-оптических систем ЭВП О-типа с многоскоростным электронным пучком в режиме диалога с ЭВМ. Ч.1 Математическая модель, алгоритмы/ Морев С.П., Журавлева В.Д., Филатов В.А., Полищук Е.К., Кивокурцев А.Ю., Роговин В.И., Электронная техника, серия 1, Электроника СВЧ – 1990, вып.4(428) – с. 37 – 42
- [17] Морев С.П. Проектирование электронно-оптических систем ЭВП О-типа с многоскоростным электронным пучком в режиме диалога с ЭВМ. Ч.2. Программа, примеры расчета// Морев С.П., Журавлева В.Д., Филатов В.А., Полищук Е.К., Кивокурцев А.Ю., Роговин В.И., Электронная техника, серия 1, Электроника СВЧ – 1990, вып.5(429) – с. 33 – 38
- [18] Д.Н. Золотых, В.И. Роговин, «Проектирование замедляющих систем электровакуумных приборов СВЧ с длительным взаимодействием и анализ электродинамических характеристик», учебно-методическое пособие к лабораторным работам в интегрированном учебно-научном практикуме «Автоматизированное проектирование приборов СВЧ», 2016.
- [19] Филатов В.А. Программа расчета в режиме диалога выходных характеристик, технического КПД и анализа устойчивости к самовозбуждению неоднородных спиральных ЛБВ. Электронная техника, серия 1, Электроника СВЧ. – 1990 – вып.3(427) – с. 73 – 74.

- [20] Бушуев Н.А. Проектирование спиральной лампы бегущей волны и расчет выходных характеристик: Учебно-методическое пособие/ Бушуев Н.А., Роговин В.И., Семёнов С.О., Саратов: изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2006, 56 с., ISBN 5-94409-052-9.
- [21] Groiss S. et al. Parameters of lossy cavity resonators calculated by the finite element method //IEEE Transactions on Magnetics. – 1996. – Т. 32. – №. 3. – С. 894-897.
- [22] Xiao M. A. Modeling of conductor surface roughness effect. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign. 2014.
- [23] Chu Y. Method for modeling conductor surface roughness : пат. 8527246 США. – 2013.