

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Базовая кафедра «Основы проектирования приборов СВЧ»

Расчёт и экспериментальное исследование лампы бегущей волны
спутниковой связи Ku-диапазона

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 2231 группы
направления 03.04.03 «Радиофизика»
института физика
Разуваева Федора Павловича

Научный руководитель

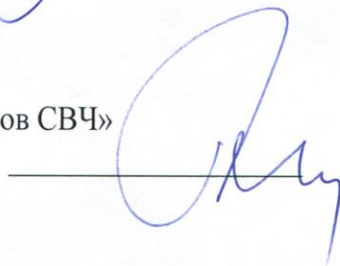
доцент, к. ф.-м. н.



В.И. Роговин

Зав. кафедрой

«Основы проектирования приборов СВЧ»
профессор, д.э.н., к.ф. - м.н.



Н. А. Бушуев

Саратов 2022 г.

Введение. Актуальность. В настоящее время лампы с бегущей волной (ЛБВ) являются основными усилителями СВЧ диапазона. Уникальные свойства ЛБВ, такие как широкополосность и линейность, позволяют использовать её в связи, телевидении, локации, навигации и других отраслях. Наибольшее распространение получили электровакуумные ЛБВ со спиральной замедляющей системой. Такие ЛБВ обладают широкой полосой усиливаемых частот до 120%, высоким КПД до 65% при использовании многоступенчатых коллекторов с рекуперацией, усилением до 60 дБ и долговечностью более 15 лет. На данный момент в РФ для систем спутниковой связи, РЛС и подвижной связи широко используются S и C диапазоны и длинноволновая составляющая X – диапазона. При этом за рубежом широко распространено применение французских ЛБВ Ku – диапазона, поэтому развитие ЛБВ в этом направлении является одним из приоритетных в РФ.

Целью данной научно-исследовательской работы является проектирование ЛБВ спутниковой связи Ku - диапазона с использованием программ, позволяющих исследовать физические процессы, происходящие в ЛБВ, и определить размеры основных узлов, обеспечивающих выходные характеристики ЛБВ (выходная мощность не менее 173 Вт, усиление от 53дБ до 57дБ). Задачами работы являются:

- Анализ работ по электровакуумной электронике и разработках аналогичных приборов для выявления способов повышения технического КПД.
- Расчёт электродинамических характеристик спиральной замедляющей системы с использованием программного пакета Ansys HFSS;
- Расчёт пространства взаимодействия пучка с электромагнитной волной и получение выходных характеристик по программе, использующей

одномерную и двумерную модели взаимодействия электронного потока с электромагнитной волной.;

- Расчёт электронной пушки и фокусировки пучка в магнитной периодической фокусирующей системе;
- Расчёт многоступенчатого коллектора с рекуперацией;
- Сравнение полученных теоретических расчётов с результатами эксперимента.

Содержание. Данная работа состоит из введения, 7 глав, заключения и списка используемой литературы.

Введение

1. Обзор литературы

Методы повышения технического КПД в ЛБВ спутниковой связи Ku – диапазона

- 1.1. Пространство взаимодействия
- 1.2. Электронная пушка
- 1.3. Коллектор
- 2. Расчёт электродинамических характеристик спиральной замедляющей системы с использованием программного пакета Ansys HFSS
 - 2.1. Выбор начальной конструкции
- 3. Расчёт пространства взаимодействия электронного потока с электромагнитной волной по одномерной программе
 - 3.1. Описание одномерной модели расчёта ЛБВ
 - 3.2. Расчёт выходных характеристик ЛБВ
- 4. Расчёт пространства взаимодействия электронного потока с электромагнитной волной по двумерной программе анализа
 - 4.1. Описание двумерной модели расчёта ЛБВ
 - 4.2. Расчёт выходных характеристик ЛБВ
- 5. Расчёт электронно-оптической системы
 - 5.1. Описание модели электронно – оптической системы
 - 5.2. Расчёт электронной пушки
- 6. Расчёт коллекторного узла
 - 6.1. Выбор первоначальной конструкции коллектора

- 6.2.Расчёт многоступенчатого коллектора по строгой двумерной программе
7. Сравнительный анализ теоретических расчётов с экспериментальными данными

Заключение

Список используемой литературы

Основное содержание работы. Проведён обзор литературы по разработкам ЛБВ спутниковой связи Ку – диапазона. Проанализировано 25 статей, выявлены основные способы повышения технического КПД. Анализ литературы показал, что, для получения ЛБВ спутниковой связи Ку – диапазона с высоким значением технического КПД, необходимо использовать разношаговую спиральную замедляющую систему (СЗС) с изохронностью [1-6,13,16-17,23] для соблюдения условия синхронизма между электронным потоком и электромагнитной волной (ЭМВ) и подавления генерации на обратной гармонике, двуханодную электронную пушку [1-5,9-11,19,24], повышающую долговечность прибора за счёт ионной ловушки и многоступенчатый коллектор с рекуперацией [1-9,11,12,18-21,25], который позволяет собрать на нём максимальный ток, свести к минимуму количество отражённых электронов и сделать низкой его рабочую температуру при всех режимах работы.

На первом этапе проектирования определены основные размеры СЗС. Диаметр пролетного канала определялся по соотношению для среднего радиуса спирали и составил 0.46 мм. Приближенное значение шага определено исходя из геометрического замедления. Замедление рассчитано из ускоряющего напряжения, которое известно из технического задания (в данном случае 5.8 кВ). Поперечный размер плущёной микроленты подбирался исходя из существующих на предприятии типов спиралей, которые являются оптимальными и не ухудшаются характеристики прибор. При этом выбор поперечного сечения спирали был обусловлен тем, что оптимальное соотношение ширины спирали к шагу имеет значение от 0.35 до

0.45 единиц. Был выбран размер 0.15×0.2 мм. Материал спирали был выбран МАГТ - 0.2 (медь – 99.98%, алюминий, гафний, титан – 0.02%). Оптимальное соотношение диаметра экрана D_s и диаметра пролётного канала d_k изменятся в пределах от 2 до 3. Но при выборе $\frac{D_s}{d_k} \approx 2$, уменьшается сопротивление связи и увеличивается амплитуда второй гармоники, а при выборе $\frac{D_s}{d_k} \approx 3$ возникает сложность в создании необходимого магнитного поля. С учётом этого и выбранной технологии изготовления ВЧ-пакета внутренний диаметр экрана составляет 2.8 мм. Размер клиновидных диэлектрических стержней из оксида бериллия (BeO) составил 0.8 мм с центральным углом 15° и толщиной у основания 0.2 мм.

Электродинамические характеристики (ЭДХ) были получены с использованием программного пакета HFSS [26,27], в котором система уравнений Максвелла решается методом конечных элементов. В первую очередь задавалась расчётная модель узла (а именно один период замедляющей системы) с помощью графической программы. Расчёты проводились для разношаговой СЗС с изохронностью и площадью поперечного сечения спирали 0.15×0.2 мм. В качестве исследуемого материала спирали был выбран сплав МАГТ-02. Результаты представлены в виде таблицы.

Далее в работе проведено описание математической модели, лежащей в основе одномерной программы расчёта выходных характеристик ЛБВ. Физические процессы взаимодействия бегущей ЭМВ описываются системой интегро-дифференциальных уравнений в частных производных [30], состоящей из уравнения движения заряженных частиц, уравнения возбуждения и уравнения для расчёта гармоник тока. При этом были использованы допущения, что все величины являются функциями одной продольной координаты, отсутствует обратное движение электронов,

рассматривается ЗС «волноводного типа» и отсутствует отражение электромагнитной энергии.

Проведена оптимизация ВЧ-пакета (длин выходных секций и поглотителей) для получения требуемых выходных характеристик пространства взаимодействия (ПВ) имеет два локальных поглотителя, с суммарным затуханием 88дБ, необходимых для получения усиления равного от 53 до 57дБ.

Расчёт выходных характеристик ЛБВ и конструкции ПВ проводился при напряжении на ЗС $U_{зс} = 5800$ В и токе электронного потока $I = 125$ мА. Полученные результаты представлены в виде таблицы и по этим данным построены амплитудные и частотные характеристики.

Проведен расчет выходных характеристик ПВ по двумерной программе расчёта. Многолетний опыт разработки ЛБВ показал, что использование двумерной программы для расчета ПВ [32 – 35] позволяет получить более точные значения выходных характеристик. Это связано с рядом отличий в допущениях, заложенных в модель одномерной и двумерной программ расчёта, а также возможностью задания определенной модели электронного пучка на входе в ПВ. Двумерная программа расчёта позволяет учесть тот факт, что в реальном приборе многоскоростной электронный пучок непараксиален и имеет разброс по поперечным составляющим скорости, вызванный тепловыми скоростями на катоде, а также рассчитать динамическую расфокусировку и минимизировать её за счёт увеличения амплитуд магнитного поля последних колец МПФС на выходе ЛБВ.

Взаимодействие аксиально-симметричного электронного пучка с электромагнитной волной в ЛБВО в двумерном приближении описывается системой интегро-дифференциальных уравнений, в состав которой входят уравнение возбуждения неоднородной ЗС, уравнения движения в

безразмерных величинах, уравнения фокусирующего магнитного поля МПФС, уравнения полей пространственного заряда.

Проведено моделирование электронного потока на входе в ПВ и получена форма электронного потока в ПВ в статическом режиме. Заполнение пролётного канала электронным потоком составило 0.58 при разбросе поперечных скоростей 0.03 рад (1.72°) и минимальном значении пульсаций, что согласуется с результатами двумерной программы расчёта фокусировки электронного пучка магнитным полем МПФС [36]. Описанный выше вариант профиля электронного пучка был использован в расчётах выходных характеристик по двумерной программе.

Проведён расчёт выходных характеристик по двумерной программе в динамическом режиме. Расчёт проводился с амплитудным значением магнитного поля 3400 Гс для всех магнитов магнитной периодической фокусирующей системы (МПФС) от ввода до вывода энергии. Полученные результаты представлены в виде таблицы, они удовлетворяют требованиям ТЗ и дают запас по выходной мощности 2.3 – 3.5 % в диапазоне, и по этим данным построены амплитудные и частотные характеристики.

В работе приводится описание модели электронно-оптической системы с ненулевым фазовым объемом. Проведено проектирование электронной пушки типа Пирса: получена первоначальная конфигурация электродов и межэлектродных расстояний по программе [36], в основе которой лежит метод синтеза, для уточнения формы электродов проведен расчет по программе анализа [37]. Первоначально был выбран радиус катода равный 1.65 мм. При этом плотность токоотбора с катода равно 4.6 А/см^2 , что является оптимальным значением для обеспечения долговечности ЛБВ до 150 тысяч часов. Проведен расчет двух пушек, эмитирующей ток силой 125 мА для двух распределений индукции магнитного поля, рассчитанных по аналитическим формулам и программному пакету Ansys «Maxwell», в основе математической модели которой лежит метод конечных элементов для решения уравнений

магнитостатики. Расчёт показал, что электронный поток сформированный пушкой с полем, рассчитанным по аналитическим формулам обладает заполнением 0.58 и минимальными пульсациями, не превышающими 5%. В свою очередь электронный поток сформированный электронной пушкой с полем, рассчитанным по программному пакету Ansys «Maxwell», требовал корректировки значений индукции магнитного поля первых двух магнитов МПФС, в следствии возникновения больших пульсаций, превышающих 35%. После корректировки электронный поток так же обладал заполнением 0.58 и минимальными пульсациями, не превышающими 5%.

Обзор статей [44-49] по разработке ЛБВ спутниковой связи Ku – диапазона показал, что использование многоступенчатых коллекторов с рекуперацией (возвращением энергии за счет торможения электронного пучка) является распространенной практикой, подтверждающей свою эффективность. Были проведены расчёты многоступенчатого коллектора с рекуперацией по приближенной [50-52] и строгой двумерной [53] программам

Проведён расчёт коллектора с 1-й, 2-я, 3-я, 4-я и 5-ю ступенями. Анализ результатов показал, что оптимальное количество ступеней равно 4-м. Проведён расчёт 4-х ступенчатого коллектора и получена приблизительная конфигурация электродов с значениями потенциалов. Приближенная конфигурация получена с помощью различных соотношений и формул аппроксимации.

Для повышения точности расчёта многоступенчатого коллектора с рекуперацией использована строгая двумерная программа, позволяющая задать сложную двумерную конфигурацию электродов коллектора.

Первоначальный расчёт коллектора проводился с потенциалами ступеней, полученными по программе, в основе которой лежат приблизительные соотношения. В этом случае обратный ток составил 1.5%. Обратный ток вызван сильным пространственным зарядом электронного

потока в области предколлектора. Медленные электроны не могут пройти в коллектор из-за возникающего провисания потенциала и отражаясь попадают обратно в пространство взаимодействия. С целью решить проблемы обратного потока электронов и получения максимального технического КПД была совершена корректировка значений потенциалов ступеней коллектора, значения которых составили $U_1=0.89U_{1п}$, $U_2=0.92U_{2п}$, $U_3=0.67U_{3п}$, $U_4=0.8U_{4п}$, где $U_{1п}$, $U_{2п}$, $U_{3п}$, $U_{4п}$ - значения потенциалов ступеней коллектора, рассчитанные по двумерной оценочной программе для середины рабочего диапазона. Расчётное значение электронного КПД ЛБВ с ЗС из материала МАГТ-02 при напряжении ЗС $U_{зс}=5800В$ и токе пучке $I=0.125А$ составило 25-26%. Далее все расчеты проводились при указанных потенциалах ступеней.

Далее был проведён расчёт коллектора по строгой двумерной программе анализа в динамическом режиме (Рис.25). При этом коэффициент вторичной эмиссии материала электродов коллектора соответствует меди. Расчёт показал, что при выбранных значениях потенциалов ступеней обратный поток электронов из коллектора отсутствует. Величина потребляемой мощности ЛБВ равна $0,91P_{пп}$, где $P_{пп}$ – потребляемая мощность, рассчитанная по двумерной оценочной программе для середины рабочего диапазона. Технический КПД при указанном электронном КПД составил $1,1\eta_{техп}$ – где $\eta_{техп}$ технический КПД рассчитанный по двумерной оценочной программе для середины рабочего диапазона

Итогом работы является сравнительный анализ теоретических расчётов с экспериментальными данными, который показал, что результаты экспериментальных измерений согласуются с результатами теоретических расчётов по одномерной и двумерной программе.

Заключение. Проведён обзор литературы по разработкам ЛБВ спутниковой связи Ку-диапазона: выявлены основные методы повышения технического КПД. Проведено проектирование СЗС и рассчитаны ЭДХ по программному пакету Ansys HFSS. Для полученной ЗС проведено

проектирование ПВ и расчёт выходных характеристик по одномерной и двумерной программам. Также проведено проектирование электронно-оптической системы: электронной пушки, обеспечивающей требуемую долговечной катод, для двух вариантов распределения магнитного поля, полученного с помощью программы, использующей аналитические формулы и программного пакета Ansys «Maxwell», в основе которой лежит метод конечных элементов для решения уравнений магнитостатики. Проведено проектирование многоступенчатого коллектора с рекуперацией. Расчёт по строгой двумерной программе, позволяющей задать сложную конфигурацию электродов коллектора, показал, что выбранные напряжения на ступенях коллектора являются оптимальными и позволяют добиться нужного технического КПД.

Создан расчётный проект основных функциональных узлов ЛБВ. Полученные характеристики отвечают требованиям ТЗ, решения, принятые в ходе проектирования, обеспечивают технологический запас по выходной мощности 2.3 – 3.5 % в диапазоне, что является достаточным. Заполнение пролётного канала электронным потоком составило 0.58. Проведено сравнение теоретических расчётов с экспериментальными данными. Результаты экспериментальных измерений согласуются с результатами теоретических расчётов по одномерной и двумерной программе. Изучены теории, методы и приближения, заложенные в программы расчёта основных функциональных узлов ЛБВ.

Список используемой литературы

1. J. Collomb, A. Pelletier, H. Raye. Performance results and interface considerations for a 200-230 W, 12 GHz DBS TWT. – AIAA

- Communications Satellite Systems Conference, - San-Doego, California. – 1982, p. 707-714.
2. Morishita I., Sasaki M. Development of 200 W TWT's for broadcast satellites. – NHK Laboratories Note – (1984), p. 2 -11.
 3. Morishita I., Sasaki M., Sugimori K., Uchida M., Kazui K. A 12 GHz 150 W travelling wave tube for broadcasting satellites. – AIAA 11th Commun. Satell. Syst. Conference. – New York. – 1986, p.525-532.
 4. Marishita I., Sasaki M. Development of 12 GHz 100 W TWT for satellite broadcasting. – 13th ISTS – (1982), p. 737-742.
 5. Morishita Y., Sasaki M., Kimura T., Tsutaki K., Koike T., Iwanami Y. A 12 GHz 150 W travelling - wave amplifier for broadcasting satellites. – AIAA 11th Commun. Satell. Syst. Conference. – New York. – 1986, p.586-593.
 6. H. Hochino et al. High-power space TWT development activities for new broadcasting satellites. AIAA 13th Commun. Satell. Syst. Conf. and Exhib., Los Angeles, Calif. – 1990, p.759-769.
 7. Bosch E. et al. Achievements and new development trends of satellite communication TWT's. - Proceedings Second European Conference on Satel. Commun. - Liege, Belgium. – 1991, p. 513-516.
 8. John Welter, Conrad Marotta, Richard True, Tom Hargreaves, Adrian Donald, Tom Schoemehl. Recent Results on a 200W Ku-band Power Booster TWT, IEEE IVEC 2008.
 9. Amitavo R. Choudhury, Rajendra K. Sharma, Anirban Bera, Sudhir M. Sharma,
and Vishnu Srivastava. Design and Development of Ku-Band 140W Space TWT, IEEE IVEC 2008.
 10. Rajendra K Sharma, Prashant Sharma, Amitavo R Choudhury, Sudhir M Sharma, Suneeta Arya and Vishnu Srivastava. Design of Dual Anode Electron Gun and Beam Focusing for Ku-band 140W Short Length Space TWT, IEEE IVEC 2008.

- 11.Xiaofeng Liang, Bo chen, Bo qu, Li L. Development of Ku-Band 150W Space TWT, IEEE IVEC 2013.
- 12.William L. Menninger, David C. Eze, Roger S. Hollister, Russell H. Martin. High-Efficiency, 200-W Ku-band Traveling-Wave Tubes for Satellite Communications Downlinks, IEEE IVEC 2013.
- 13.Peter Ehret, Alain Laurent, Ernst Bosch. Broadband Traveling Wave Tubes in Ka- and Ku-Band, IEEE IVEC 2014.
- 14.K. Venkateswara Rao, Talur Chanakya, Vemula Bhanu Naidu, and Subrata Kumar Datta. Investigation into a Triangular-Helix Slow-Wave Structure, IEEE IVEC 2014.
- 15.Yinfu Hu, Jinjun Feng, Tianyi Li, Minghui Liu, Jun Cai, Yinghua Du, Xianping Wu, Fujiang Liao. Progress of Integrated TWT, IEEE IVEC 2014.
- 16.Gennady A. Azov, Mariya V. Efremova, and Sergei A. Khritkin. Wide-band TWT of X/Ku-Range for Microwave Power Module, IEEE IVEC 2014.
- 17.Haijian Qiu, Yulu Hu, Zhonghai Yang, Jianqing Li, Bin Li. The Study of Group Delay, IEEE IVEC 2014.
- 18.Xiaoran Zhang, Quan Hu, Yulu Hu, Tao Huang, Jianqing Li, Bin Li. Design of Multistage Depressed Collector for Ku-Band Three-Beam TWT, IEEE IVEC 2015.
- 19.XIAO Liu, YI Hong-xia, YUAN Guang-jiang, WANG Li, LI Yan-wei, CHEN Zhi-liang, CAO Lin-lin, SHANG Xin-wen, SU Xiao-bao. Development of a Ku-Band 150W Space TWT, IEEE IVEC 2015.
- 20.Jayateertha D, Seshadri R, Sudhir Kamath & Lalit Kumar. Design & Development of Three Stage Depressed Collector for Helix Micro-TWT, IEEE IVEC 2016.
- 21.Yanmei Wang, Changjiang Zhao, Li Qiu, Lei Zhang, Xiaojin Kong. Development of Ku band miniature TWT, IEEE IVEC 2017.
- 22.Subhradeep Chakraborty, Chirag Mistry, Pawan Pareek, Narashiman Purushottaman, Amitavo Roy Choudhury, Mukesh Kumar Alaria, Sanjay

- Kumar Ghosh. Optimization of Resistive Attenuator Coating for TWT Performance Improvement, IEEE IVEC 2018.
23. Hai-jian Qiu, Yu-lu Hu, Quan Hu, Xiao-Fang Zhu, Zhong-Hai Yang, Bin Li. Optimization of Intermodulation Distortion for a Ku-Band Helix TWT, IEEE IVEC 2018.
24. Abhay Shankar, Nagaraju Atmakuru, A.R. Choudhury, S.K. Shosh . Design and Simulation of Electron Gun and Focusing System for High Power Space TWT, IEEE IVEC 2019.
25. Lei Song, Bo Qu, Lan Xia, An Li, Qi Li , Rusi Wang. Development of Ku-Band 200W radiation-cooled Space TWT, IEEE IVEC 2021.
26. Банков С.Е. Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ-структур с помощью HFSS/ Банков С.Е., Курушин А.А., Разевиг В.Д., «СОЛОНПресс», 2004, 208 с., ISBN 5-98003-137-5.
27. Золотых Д.Н. Проектирование замедляющих систем электровакуумных приборов СВЧ с длительным взаимодействием и анализ электродинамических характеристик: Учебно-методическое пособие / Золотых Д.Н., Роговин В.И., Саратов: ООО Издательский центр «Наука», 2016, 68 с. ISBN 978-5-9999-2579-4.
28. 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.
29. 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.
30. Кац А.М. Нелинейные явления в СВЧ приборах О-типа с длительным взаимодействием/ Кац А.М., Ильина Е.М., Манькин И.А., М., «Советское радио», 1975, 296 с.

- 31.Цейтлин М.Б. Лампа с бегущей волной/ Цейтлин М.Б., Кац А.М., «Советское радио», М., 1964, 312 с.
- 32.Конторин Ю.Ф. Расчет характеристик интенсивного электронного пучка в лампах бегущей волны/Конторин Ю.Ф., Роговин В.И., Роговин И.В., Прикладная физика, №3, 2011.
- 33.Журавлева В.Д. Программа расчета многоскоростного аксиальносимметричного электронного пучка в магнитном поле/ Журавлева В.Д., Морев С.П., Пензяков В.В., Роговин В.И., Электронная техника, серия 1, Электроника СВЧ, №1, 1985, с. 70.
- 34.Манькин И.А. Двумерный расчет взаимодействия аксиальносимметричных электронных потоков с волной в ЛБВО на основе модели с большим числом частиц / Манькин И.А., Ушерович Б.Л., Электронная техника, серия 1, Электроника СВЧ, выпуск 6, 1978, с. 50.
- 35.Манькин И.А. Метод ускоренного счета поля пространственного заряда в двумерных моделях электронных потоков. «Электронная техника», серия 1, «Электроника СВЧ», 1978, вып. 2, с 14-24.
- 36.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.
- 37.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.

- 38.Бушуев Н.А., Роговин В. И., Семенов С. О. Избранные вопросы теории конструирования электронных приборов СВЧ. Формирование интенсивных протяжённых электронных потоков: Учебное пособие. Саратов: ООО Издательский Центр «Наука», 2018. – с.76 – 80.
- Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки, М., 1966.
- 39.Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки, М., 1966.
- 40.Петросян А.И. Программа синтеза электронных пушек О-типа/ Петросян А.И., Иванова З.П., Пензяков В.В., Электронная техника, серия 1, Электроника СВЧ, №10, 1976, с. 109 – 110.
- 41.Григорьев Ю.А. Программа анализа электронно-оптической системы с многоскоростным пучком/ Григорьев Ю.А., Журавлева В.Д., Морев С.П., Пензяков В.В., Петросян А.И., Роговин В.И., Электронная техника, серия 1, Электроника СВЧ, №3, 1988, с. 71 – 72.
- 42.Журавлева В.Д. Программа расчета многоскоростного аксиальносимметричного электронного пучка в магнитном поле/ Журавлева В.Д., Морев С.П., Пензяков В.В., Роговин В.И., Электронная техника, серия 1, Электроника СВЧ, №1, 1985, с. 70.
- 43.Журавлева В.Д. Программа анализа аксиально-симметричных коллекторных систем/ Журавлева В.Д., Пензяков В.В., Роговин В.И., Электронная техника, серия 1, Электроника СВЧ, №1, 1977.
- 44.Гинзбург В.Б. Повышение КПД электронных приборов СВЧ О-типа посредством торможения электронов в коллекторе (обзор). – М.: ГКЭТ СССР, 1963.
- 45.Муравьев В.В., Тараненко В.П. Рекуперации энергии отработанных электронов в ЛБВ и ЛОВ типа О (обзор) // Электронная техника. Сер. I, Электроника СВЧ. – 1967. – Вып. 2. – С. 3-16.
- 46.Левин Ю.И., Тореев А.И. Вопросы рекуперации кинетической энергии электронов в приборах СВЧ О-типа (обзор) // Вопросы электроники сверхвысоких частот. – Саратов: Изд-во Сарат. Ун-та, 1969. - Вып. 6. - 3-31.

47. Муравьев А.А., Роговин В.И. Многоступенчатые коллекторные системы: Обзоры по электронной технике. Сер. I, Электроника СВЧ. – М.: ЦНИИ «Электроника», 1977. – Вып. I. – 40 с.
48. Kosmahl H.G. Modern multistage depressed collectors – a review // Proc. IEEE. – 1982. – Vol.70, N11. – P.1325-1334.
49. Сандалов А.Н., Родякин В.Е. Коллекторные системы приборов СВЧ с продольным взаимодействием // Зарубежная радиоэлектроника. – 1984. – № 9. – С.63-76
50. Журавлева В.Д. Оптимизация многоступенчатых коллекторов произвольной конфигурации с рекуперацией для приборов О-типа/ Журавлева В.Д., Роговин В.И., Роговин И.В., Прикладная физика, №5, 2008, с. 89 – 93.
51. Журавлева В.Д. Программа анализа коллекторных систем с нарушениями осевой симметрии, Электронная техника, серия 1, Электроника СВЧ, №12, 1983, с. 59.
52. Разработка и исследование программ конструирования многоступенчатых коллекторных узлов ЛБВ с использованием режима диалога – «Лестница»: Отчет о НИР/ Руководитель Роговин В.И. - №ГРФ 34910: Инв. № Д57072, 1989, с. 186.
53. Журавлева В. Д. Комплекс программ расчета трехмерных электроннооптических систем. Журавлева В.Д., Семенов С.О. Прикладная физика №6, с. 97 – 102, 2006.