

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра дискретной математики и информационных технологий

**РАЗРАБОТКА ПРОГРАММ НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА С ПОЛЕМ
ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ТИПА ЦЕПОЧЕК СВЯЗНЫХ
РЕЗОНАТОРОВ В СРЕДЕ ПРОГРАММИРОВАНИЯ LABVIEW**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 271 группы

направления 09.04.01 Информатика и вычислительная техника

факультета компьютерных наук и информационных технологий

Смагина Владислава Дмитриевича

Научный руководитель:

доцент кафедры ДМиИТ, к.т.н, доцент _____ А.О. Соколов

подпись, дата

Зав. кафедрой:

к.ф.-м.н., доцент _____ Л.Б. Тяпаев

подпись, дата

Саратов 2019

ВВЕДЕНИЕ

Математическое моделирование поведения различных динамических систем и процессов в них является одним из основных методов исследования в самых разных областях знаний, охватывающих практически все сферы человеческой деятельности [2]. Например, одной из таких областей являются процессы передачи электромагнитных волн в СВЧ-трактах и образующих их элементах, широко используемых в современных телекоммуникационных системах и системах передачи информации [3].

Одной из проблем при разработке мощных СВЧ ламп бегущей волны О-типа (ЛБВО), используемых в качестве выходных усилителей спутниковых систем связи и радиолокационных систем, является разработка адекватных математических моделей замедляющих систем ЛБВО, позволяющих осуществлять не только анализ их электродинамических характеристик (ЭДХ), но и синтез ЗС в реальном времени для получения требуемых выходных параметров ЛБВО [1].

В основном для решения таких задач используют представление замедляющей системы (ЗС) мощной ЛБВО, часто представляющей собой цепочку связанных резонаторов (ЦСР), ввиду ее надежности, в виде цепочки соответствующих ячейкам замедляющей системы шестиполосников [2,3,4]. Реализация подобного решения с использованием метода крупных частиц представлена в [1].

Рассмотрим подробнее предложенное решение. Так как мы представляем ЗС мощной ЛБВО в виде ЦСР, то траектория движения электронов от трубки дрейфа к зазору становится дискретной величиной, потому что рассматриваются только зазоры между резонаторами. Как следствие, для решения задачи переходим к решению ОДУ вместо решения частных производных.

В момент движения электронов от трубки дрейфа к зазору, заряд электрона имеет свое электрическое поле. При формировании электронов в пучок, электрическое поле вокруг них становится неравномерным, так как

электроны передают свою энергию полю. При накоплении определенного количества энергии, поле отдает свою энергию электронам обратно. Это называется самосогласованной задачей, в данной реализации она решается методом крупных частиц.

Исходя из выше сказанного, можно выделить три этапа решения задачи:

- Моделирование электронных полей.
- Нахождение параметров RLC в эквивалентной схеме.
- Нахождение решения самосогласованной задачи.

Реализации описанных алгоритмов представлены в [1], но осуществлены на языке программирования Fortran. Представленное решение требует оптимизации, так как на выполнение программы за разумное время, даже в случае сведения задачи к одномерной, требуются мощные вычислительные средства. Достаточной оптимизации можно добиться заменой реализации одного этапа нахождения RLC параметров, а также заменой программного обеспечения. Требуемыми параметрами обладает язык графического программирования LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench).

Таким образом, целью магистерской работы является разработка программ необходимых для расчета взаимодействия электронного потока с полем замедляющей системы типа цепочек связанных резонаторов, параметры которых определяются регрессионными моделями, построенными с использованием планирования численного эксперимента в среде программирования LabVIEW. Для достижения этой цели были сформулированы следующие задачи:

- изучение алгоритма расчета полей пространственного заряда;
- изучение алгоритма расчета поля зазора;
- изучение алгоритма моделирования замедляющих систем типа ЦСР с помощью эквивалентных схем;
- программная реализация алгоритма расчета полей пространственного

- заряда в среде программирования LabVIEW;
- программная реализация алгоритма расчета поля зазора в среде программирования LabVIEW;
 - программная реализация алгоритма расчета параметров RLC цепочки с использованием эквивалентных схем в среде программирования LabVIEW.

Методологические основы расчета взаимодействия электронного потока с полем замедляющей системы типа цепочек связанных резонаторов представлены в работах Аксенчика А.В., Солнцева В.А., Савина А.Н., Фишера В.Л., Гаврилова Н.В., Кириличева Б.В., Сазонова Д.М., Григорьева А.Д., Кузнецова А.П., Рожнева А.Г.

Структура работы. Магистерская работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников и трех приложений. Общий объем работы – 61 страница, из них 51 страница – основное содержание, включая 21 рисунок, 3 таблицы и 30 формул, список использованных источников информации – 21 наименование.

Основное содержание работы

Первая и вторая главы посвящены исследованию общей теории электронных приборов СВЧ и обзору среды программирования, в которой производились расчеты.

1 Характеристика электронных приборов СВЧ

В основе принципа действия всех электронных приборов СВЧ (сверхвысокочастотного излучения) лежит преобразование энергии постоянного тока в энергию высокочастотного электромагнитного поля с помощью электронных пучков.

В приборах СВЧ наиболее применяемым является способ динамического управления током, при котором, как правило, на поле объемного заряда у катода действует только постоянное ускоряющее поле, а возникновение переменного тока происходит в области, удаленной от катода, где происходит взаимодействие электронов с полем СВЧ и их смещение относительно друг друга при дальнейшем движении. Выше сказанное относится к приборам типа «О», особенность которых заключается в линейном потоке электронов. Выделяют два способа взаимодействия СВЧ поля с электронами: дискретный и постоянный. Первый способ характеризуется наличием скоростной модуляции. Смысл данного явления заключается в ускорении электронов в момент прохождения СВЧ поля в ускоряющий полупериод, а в тормозящем полупериоде наоборот – уменьшении скорости относительно среднего значения. После прохождения поля СВЧ электронный поток движется по пространству, называемого дрейф поток, что ведет к смещению одних зарядов по отношению к другим. В итоге постоянный по плотности электронный поток получает переменную составляющую, это называется электронным уплотнением. Весь процесс от начала и до конца получил название процесса группирования.

2 Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench

LabVIEW — программное обеспечение для системного проектирования в отраслях, где требуется проведение испытаний, измерений и осуществление управления, а также быстрый доступ к оборудованию и результатам анализа данных.

LabVIEW предлагает графический подход к программированию, который поможет Вам визуализировать любую деталь Вашей задачи, включая конфигурирование оборудования, данные измерений и отладку. Эта визуализация упрощает интеграцию измерительного оборудования, изображение сложных алгоритмов на диаграмме, разработку алгоритмов анализа данных и специализированных интерфейсов пользователя.

В основе LabVIEW лежит парадигма потоков данных. Принцип потока данных подразумевает архитектуру параллельных вычислений, в которых выполнение каждой функции выполняется лишь тогда, когда они получают на вход все необходимые данные, при этом последовательность выполнения команд заранее не задаётся. Как уже упоминалось, все элементы будут выполняться параллельно. Это означает, что среда разработки сама распараллелит задачу на несколько потоков, которые будут выполняться параллельно на нескольких процессорах. Очередность выполнения определяется самой программой и может быть различны. Также нужно отметить, что в распоряжении разработчика богатый выбор инструментов для синхронизации потоков — семафоры, очереди и т.д.

Третья и четвертая главы посвящены реализации и описанию программного модуля, необходимого для расчета взаимодействия электронного потока с полем замедляющей системы типа цепочек связанных резонаторов, параметры которых определяются регрессионными моделями.

3 Моделирование замедляющих систем типа ЦСР с помощью эквивалентных схем

Для описания свойств ЗС в частотной области используются дисперсионные характеристики – зависимости длины волны в ЗС или набега фазы на ячейку ЗС от частоты входного сигнала или соответствующей длины волны в свободном пространстве.

Пространственная гармоника называется рабочей, если фазовая скорость и направление распространения совпадают со скоростью и направлением перемещения электронного потока ЛБВО. Поэтому для расчёта взаимодействия электромагнитного поля замедляющей системы типа цепочки связанных резонаторов с электронным потоком обычно требуется знать дисперсионную характеристику «-1» пространственной гармоники резонаторной полосы пропускания. В таком случае амплитуда рабочей пространственной гармоники определяет эффективность взаимодействия и оценивается сопротивлением связи. Дисперсионные характеристики остальных гармоник в полосе пропускания вычисляются с учётом кратности их набега фазы на ячейку замедляющей системы.

Выше рассмотрен метод расчёта выходных параметров ЛБВО с замедляющей системой типа цепочки связанных резонаторов. Основной идеей данного метода является дискретное взаимодействие электронного пучка с полем распространяющейся в замедляющей системой электромагнитной волны, а также представление замедляющей системы в виде цепочки шестиполюсников. Такой метод предполагает точное определение параметров эквивалентных шестиполюсников.

Одним из вариантов получения таких параметров являются полевые методы, использующие размеры ячеек замедляющей системы. Они основаны на решении системы уравнений Максвелла для заданных граничных условий. Недостатком такого метода является большие вычислительные затраты, поэтому дальнейшая оптимизация выходных параметров ЛБВО является трудно выполнимой задачей.

Оптимальным способом вычисления электродвижущих характеристик замедляющей системы типа цепочки связанных резонаторов является замена её электродинамической модели на эквивалентную схему с параметрами, величины которых могут определяться с помощью различных эмпирических формул [6]. Стоит учесть, что хорошо составленная эквивалентная схема, которая практически полностью имитирует структуру полей с распределением высокочастотных токов в замедляющей системе, позволяет без особых сложностей понять процессы взаимодействия электромагнитного поля в замедляющей системе с электронным потоком. Такой подход обеспечит наиболее правильное восприятие системы, следовательно, результаты при компьютерном моделировании будут оптимальными.

Основной идеей предложенных эквивалентных схем является разделение ячейки замедляющей системы на две колебательные подсистемы – резонаторную и щелевую.

В работе [8] для моделирования эквивалентных параметров ячеек ЗС типа ЦСР с повернутыми на 180° секторными щелями связи, определяющиеся эквивалентной схемой Карно, использовался регрессионный анализ данных пассивного физического эксперимента.

Эти математические регрессионные модели для расчёта эквивалентных параметров (собственной длины волны резонатора), (резонансной длины волны щели связи), (коэффициента связи между соседними ячейками), представляют собой полиномиальные функции от нормированных размеров ячеек ЗС.

С помощью результатов планируемого численного эксперимента моделируем волновое сопротивление резонатора ячейки ЗС типа ЦСР.

На основе симплекс-суммируемого симметричного, ротатабельного, ортогонального плана второго порядка, предложенного в [8], был написан план эксперимента.

В завершении, с помощью полученных эквивалентных параметров, определяем значения уравнений дисперсионных характеристик и сопротивления связи .

4 Реализация программы GARMONIKA-1 в среде программирования LabVIEW

Программа предназначена для анализа процессов группирования приборов типа «О» на основе одномерной модели взаимодействия электронных потоков с СВЧ-полями [1].

Программа состоит из головной программы TW22 и 9-ти программных модулей. Блок-схема взаимодействия модулей приведена на рисунке 1. В головной подпрограмме TW22 задаются параметры системы, необходимые для корректной работы программы.

Подпрограмма TW22 вызывает последовательно следующие подпрограммы: TREAD4, TSPO, TZN1, TTTF4, которые выполняют соответствующие функции.

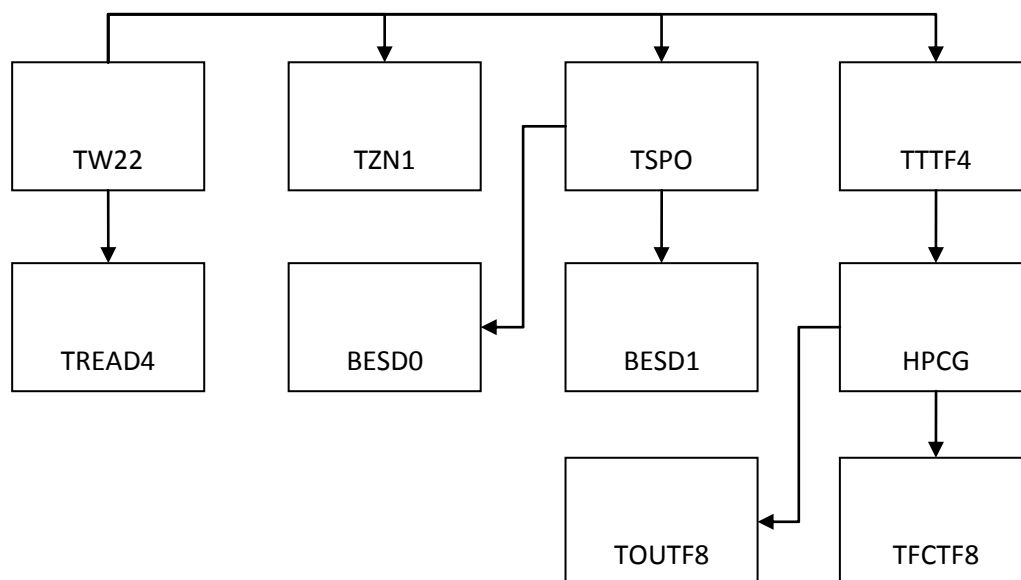


Рисунок 1 Блок-схема взаимодействия модулей в программе GARMONIKA-1

Подпрограмма TREAD4. На основе заданных входных параметров определяется минимальный зазор в резонаторе, оценивается корректность

входных данных и структурируются основные параметры для дальнейшего использования.

Подпрограмма TSPO. Рассчитываются поля пространственного заряда заряженных частиц с помощью подпрограмм BESD0 и BESD1, выполняющих расчет электростатического разряда с разными коэффициентами. На выходе подпрограммы получаем набор дискретных значений пространственного распределения напряженности электрического поля крупной частицы.

Подпрограмма TZN1. Производится расчет полей зазоров резонаторов однозазорных и двухзазорных с синфазными и противофазными полями в резонаторах. На выходе получаем дискретные значения пространственного распределения напряженности электрического поля зазора резонатора. Вызывается дважды, в первый раз рассчитывается среднее значение, во второй раз – на основе средних значений вычисляются требуемые значения.

Подпрограмма TTTF4. С помощью подпрограмм HPCG, TOUTF8 и TFCTF8 интегрируются полученные значения методом Хэмминга с целью получения скорости и фазы частиц. Расчет правых частей уравнений состояния осуществляется в подпрограмме TFCTF8. Подпрограмма TOUTF8 выводит промежуточную информацию при интегрировании и управляет процессом интегрирования. Результатом программы является характеристика прибора типа "O".

При выполнении алгоритмов на языке программирования Lab VIEW были написаны две программные реализации, одна из которых повторяет аналогичные команды из листинга, представленного в [1], а вторая – выполняет алгоритм с учетом модификаций этапа расчета RLC параметров системы. Это требуется для того, чтобы с помощью такой реализации получить эталонные значения реализации алгоритмов, и уже от них отталкиваться для определения точности полученных значений от собственной реализации.

Как указывалось во введении, реализуемый в магистерской работе метод нахождения ЭДС приборов типа "О" делится три этапа решения задачи:

1) Моделирование электронных полей. Для удобства решения рассматриваем резонаторы с накоплением энергии поля в середине резонатора. Так как одноименные заряды имеют свойство расталкиваться, то для препятствия саморазрушения системы требуется удерживать частицы внутри прибора. Это достигается свойствами приборов О-типа, магнитное поле которых действует вдоль прибора и сжимает внутрь электроны. Резонаторы заменяются эквивалентными схемами, а поле в этих системах заменяется конденсатором, поэтому задача сводится к нахождению напряжения в зазорах.

2) Нахождение параметров RLC в эквивалентной схеме. Для нахождения искомых параметров используются алгоритмы, в которых по заданным размерам составляющих вычисляются оптимальные значения параметров RLC.

3) Нахождение решения самосогласованной задачи. В рассматриваемом случае самосогласованной задачей называется процесс передачи энергии электронами своему электрическому полю, а при достижении определенного количества энергии, передачей энергии от поля к электронам. Для решения этой задачи используется метод крупных частиц. Основной смысл метода заключается в соединении пучка электронов в кольца, что позволяет свести решение задачи к вычислению значений ОДУ.

Подробнее рассмотрим 2 этап решения задачи. В листинге, представленного в [1], параметры из этапа 2 получены по размерам ячеек полевыми методами, основанными на решении системы уравнений Максвелла для заданных граничных условий. Данный метод, как уже описывалось в разделе 3, имеет существенный недостаток – требовательность к вычислительным затратам ЭВМ. Поскольку для адекватного использования программы требуется приемлемые

вычислительные и временные затраты, то необходимо было заменить такой метод. Оптимальным способом вычисления электродвижущих характеристик замедляющей системы типа цепочки связанных резонаторов является замена её электродинамической модели на эквивалентную схему. На рисунке 2-3 проиллюстрирована работа подпрограммы, реализующая методы, описанные в разделе 3.

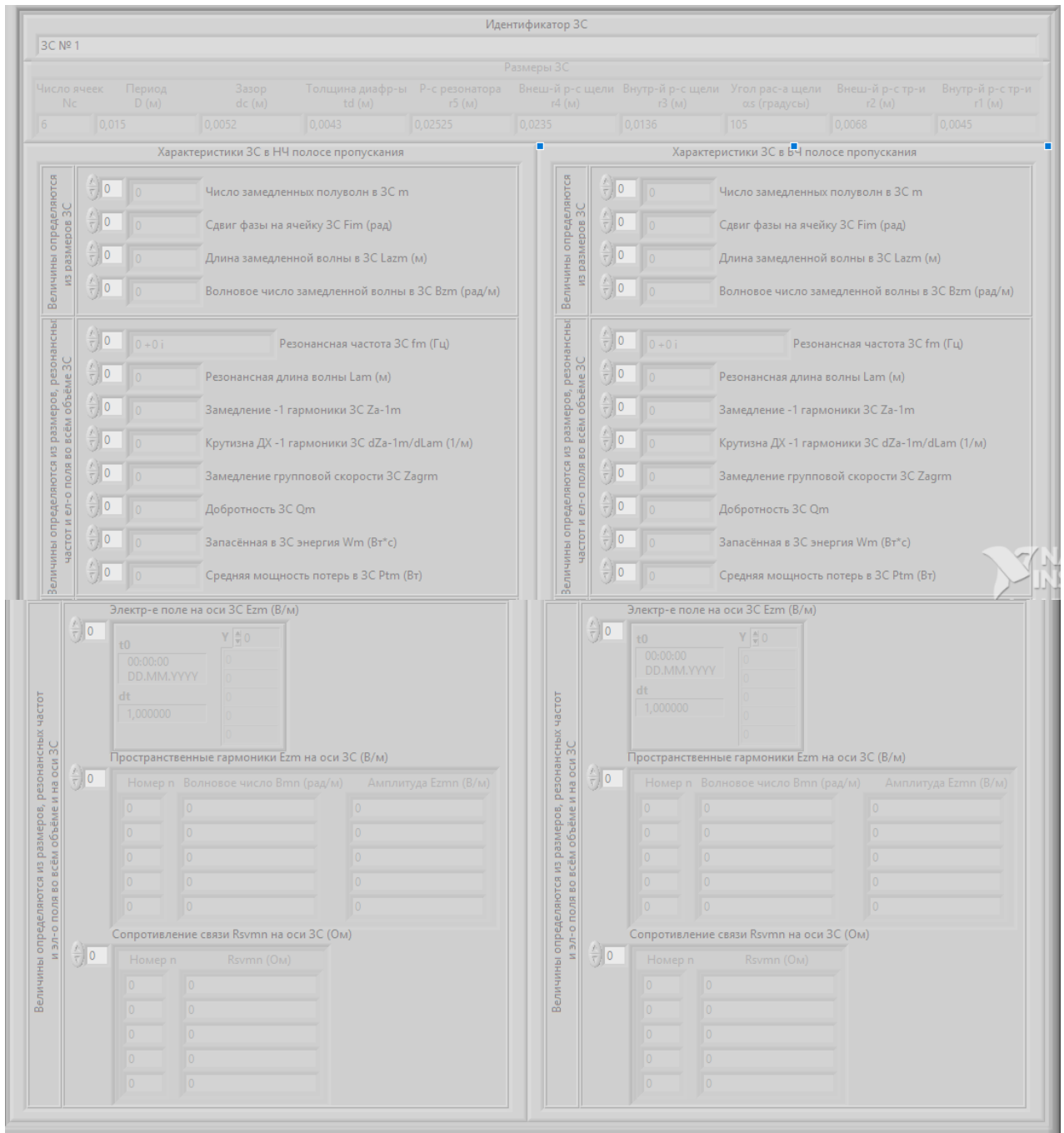


Рисунок 2, 3 Вид подпрограммы расчета параметров RLC цепочки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе магистерской работы были разработаны программы, необходимые для расчета взаимодействия электронного потока с полем замедляющей системы типа цепочек связанных резонаторов, параметры которых определяются регрессионными моделями, построенными с использованием планирования численного эксперимента в среде программирования LabVIEW.

Для достижения этой цели были выполнены следующие задачи:

- изучен алгоритм расчета полей пространственного заряда;
- изучен алгоритм расчета поля зазора;
- изучен алгоритм моделирования замедляющих систем типа ЦСР с помощью эквивалентных схем;
- реализован алгоритм расчета полей пространственного заряда в среде программирования LabVIEW;
- реализован алгоритм расчета поля зазора в среде программирования LabVIEW;
- реализован алгоритм расчета параметров RLC цепочки с использованием эквивалентных схем в среде программирования LabVIEW.

Таким образом, все поставленные задачи выполнены, цель магистерской работы достигнута.

Основные источники информации:

1. Аксенчик, А.В. Мощные приборы СВЧ с дискретным взаимодействием (теория и оптимизация) / А.В. Аксенчик, А.А. Кураев МН. : Бестпринт, 2003. 376 с.
2. Кириличев Б.В. Моделирование систем: Учебное пособие. –М.: МГИУ, 2009. – 274 с.
3. Сазонов Д.М., Гридин А.Н., Мишустин Б.А. Устройства СВЧ/ Под ред. Д.М. Сазонова. – М.: Высшая школа, 1981. – 295 с.
4. Григорьев А.Д. Методы вычислительной электродинамики. – М.: ФИЗМАТЛИТ. 2012. – 432 с.
5. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1977. 456 с
6. Фишер В.Л., Гаврилов Н.В. Методика расчета "холодных" параметров замедляющих систем типа цепочек связанных резонаторов // Известия вузов СССР. сер. Радиоэлектроника. 1982. Т. XXV. № 11. С. 13–17
7. Кузнецов А.П., Рожнев А.Г. О методе эквивалентных схем в теории цепочек связанных резонаторов // Известия вузов СССР. сер. Радиоэлектроника. 1982. Т. XXV. № 11. С. 2199–2205
8. Савин А.Н. Исследование электродинамических характеристик структур вакуумной электроники и магнитоэлектроники СВЧ на основе регрессионных моделей: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Саратов, Саратовский гос. ун-т, 2003. 184 с.
9. Солнцев В.А., Ведяшкина К.А. Двумерные модели и нелинейные уравнения аксиально-симметричных электронных потоков // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1975. Вып. 2. С. 34–47