Правительство Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего профессионального образования

«Национальный исследовательский университет   
«Высшая школа экономики»

**Московский институт электроники и математики Национального**

**исследовательского университета "Высшая школа экономики"**

###### Факультет электроники и телекоммуникаций

**Кафедра радиоэлектроники и телекоммуникаций**

###### ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(дипломная работа)

На тему: «Двулучевое взаимодействие разноскоростных электронных потоков в резонансных замедляющих системах»

Студент группы № ЭПВ-111

Лисицин А.В.

(Ф.И.О.)

Руководитель ВКР

Доцент, Хриткин С.А.

(должность, звание, Ф.И.О.)

Консультант[[1]](#footnote-1)\*\*

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(должность, звание, Ф.И.О.)

Москва, 2013

**Оглавление:**

[1 .Аннотация 4](#_Toc358372160)

[2. Список сокращений 5](#_Toc358372161)

[3. Введение 6](#_Toc358372162)

[4. Специальная часть. 10](#_Toc358372163)

[4.1.1Теоретические основы взаимодействия электронных потоков. 10](#_Toc358372164)

[4.1.2. Термодинамически неравновесная плазменная среда и проблема ее устойчивости 13](#_Toc358372165)

[4.1.3. Основные виды неустойчивости. 14](#_Toc358372166)

[4.2 Анализ взаимодействия многолучевых потоков с полями электродинамических систем в мощных микроволновых приборах 17](#_Toc358372167)

[4.2.1 Общие сведения о двухлучевых усилителях 17](#_Toc358372168)

[4.2.2 Эквивалентное описание резонансных замедляющих систем и электронного потока 19](#_Toc358372169)

[4.2.3 Матричный и волновой методы анализа усиления и самовозбуждения в мощных электронных приборах 25](#_Toc358372170)

[4.2.4 Двулучевое взаимодействие электронных потоков с полями резонансных замедляющих систем. Дисперсионное уравнение. 30](#_Toc358372171)

[4.3 Анализ дисперсионных характеристик. 35](#_Toc358372172)

[4.3.1 Взаимодействие одного потока с РЗС 35](#_Toc358372173)

[4.3.2 Взаимодействие двух потоков с РЗС. 40](#_Toc358372174)

[4.4 Анализ коэффициентов усиления и распределения мощности 44](#_Toc358372175)

[5Охрана труда. 49](#_Toc358372176)

[5.1. Основные понятия охраны труда, опасные и вредные производственные факторы. 49](#_Toc358372177)

[5.2. Микроклимат рабочей зоны с ПЭВМ 52](#_Toc358372178)

[5.3. Обеспечение электробезопасности. Расчет защитного зануления. 58](#_Toc358372179)

[5.4 Пожарная безопасность 62](#_Toc358372180)

[6 Экологическая часть дипломной работы. 63](#_Toc358372181)

[6.1. Источники СВЧ-излучений. 63](#_Toc358372182)

[6.2. Защита от СВЧ-излучений. 64](#_Toc358372183)

[7. Экономическая часть 67](#_Toc358372184)

[8. Выводы 68](#_Toc358372185)

[9. Список литературы: 69](#_Toc358372186)

1 .Аннотация.

В данной работе рассмотрено усиление в микроволновых приборах, основанное на взаимодействии одного и двух потоков с резонансной замедляющей системой. Рассмотренна система волновых уравнений, описывающая электронные потоки, рассмотрен переход к нормальным волнам, для чего введены параметры эквивалентных линий передач, описан переход от широкого к узкому потоку. Рассмотрены дисперсионные уравнения для попутных и встречных электронных потоков, рассмотрена периодическая и апериодическая связь волн.. Приведены результаты моделирования многоволновых процессов взаимодействия для попутных и встречных электронных потоков с различными коэффициентами взаимодействия с резонансной замедляющей системой и различными коэффициентами связи между потоками. Рассмотрены преимущества двулучевых систем по сравнению с однолучевыми системами.

2. Список сокращений:

БВПЗ – быстрая волна пространственного заряда

ВПЗ - Волны пространственного заряда.

ВДТ – видео-дисплейный терминал

ВЧ - Высокие частоты.

ЛБВ – Лампа бегущей волны.

ЛОВ – Лампа обратной волны.

ЗС – Замедляющая система.

МВПЗ - Медленна волна пространственного заряда

ПЗ – пространственный заряд.

ПЭВМ - Персональная электронно-вычислительная машина.

СВЧ – Сверхвысокие частоты.

ССБТ - Система безопасности стандартов труда.

# 3. Введение

В настоящее время мощные источники микроволнового излучения являются неотъемлемой частью арсенала средств современной науки и техники. Они находят применение в различных областях науки и техники: радиолокации, радиоастрономии, системах дальней связи, а также интенсивно используются в ряде физических направлений: управляемом термоядерном синтезе, возбуждении химических и газовых лазеров, взаимодействии электронных потоков с газом и плазмой. Наука электроника сверхвысоких частот изучает процессы взаимодействия потоков заряженных частиц с переменными электромагнитными полями. При этом электроника СВЧ исследует преимущественно такие системы, в которых время пролета электронов через пространство взаимодействия является срав­нимым с длительностью периода возбуждаемых электронным потоком колебаний или даже намного превосходит его. Получение когерентного электромагнитного излучения большой мощности открывает широкие перспективы для дальнейшего его применения, так как сильноточные потоки позволяют повысить мощность за счет увеличения используемых токов потоков, а также продвинуться в область более коротких длин волн, вплоть до оптического диапазона. Возможность получения микроволнового излучения с помощью электронных потоков во многом зависит от качества формирования и эффективности их взаимодействия с электромагнитными полями.

Для получения высоких уровней мощности СВЧ излучения наибольшее распространение получили электронные приборы, основанные на длительном продольном взаимодействии потока с полем резонансной замедляющей структуры. Значительные успехи, достигнутые в области микроволновой электроники средней и большой мощности, являются следствием многих теоретических и экспериментальных исследований, проводимых на протяжении многих лет.

Экспериментальные успехи в создании приборов во многом определяется тщательностью их теоретической проработки. Физические процессы, протекающие при работе некоторых типов мощных приборов, и принципы их работы недостаточно изучены. Поэтому актуальной является разработка и развитие теории таких процессов, и применение ее к конкретным приборам.

Проведение экспериментальных исследований с целью создания устройств с более высокими выходными характеристиками (расширенной полосой усиления, повышенными выходной мощностью и КПД), а также проведение тестовых испытаний в последнее время стало весьма дорогостоящим мероприятием, ввиду трудности поддержания на необходимом уровне производственной и экспериментальной базы. Поэтому, для микроволновой электроники остаются актуальными задачи развития теоретических методов проведения разработки приборов, методов анализа электроннооптических и электродинамических систем. Остаются актуальными практические задачи развития конструкторско-технологического моделирования узлов и систем приборов, в частности, таких как электронная пушка, электродинамическая система, коллектор электронов, магнитная система, вакуумная система, система охлаждения прибора.

В любом электронном приборе на первое место по своей значимости выходит условие синхронизма скорости волн электронного потока и волны замедляющей системы, таким образом, рассматривается взаимодействие переменного электромагнитного поля с электронным потоком. Поле воздействует на электронный поток, создает в нем переменный ток, который, в свою очередь, изменяет поле.

Электроника сверхвысоких частот возникла как развитие низкочастотной радиотехники по мере продвижения в сторону высоких частот.

В настоящее время для усиления и генерирования электромагнитных колебаний в диапазоне сверхвысоких частот широкое применение находят электронные приборы, основанные на использовании индуцированного излучения электронов. Физические размеры среды распространения волны и неоднородностей в этих приборах не должны превышать длины волны, следовательно, принципиально наличие находящихся в непосредственной близости от электронного потока электродов, размеры которых не превышают длину волны усиливаемого или генерируемого излучения. Это обстоятельство и является основным препятствием при создании мощных усилителей и генераторов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн.

Таким образом, возникает вопрос о возможности использования в генераторах сверхвысоких частот другого вида излучения, реализация которого не требовала бы применения замедляющих систем, резонаторов с узкими зазорами, либо применение замедляющих систем получило бы новый виток развития за счет взаимодействия с целым рядом усиливающихся и находящихся между собой в синхронизме электронных потоков.

В месте c тем, электронные потоки представляют собой сложные многоэлектронные системы, в которых электроны участвуют в тепловом движении и, следовательно, характеризуются некоторым разбросом по скоростям. Значит, встает вопрос о том, чтобы описать электронный поток более полным образом, учитывающим статистический характер системы, тепловое движение электронов, разброс электронов в потоке по скоростям.

Для описания электронных потоков воспользуемся теорией многолучевой, или электронно-волновой, лампы, нового типа усилителя и генератора радиоволн сантиметрового диапазона, использующего взаимодействие параллельных электронных потоков .

Взаимодействие двух попутных или встречных электронных потоков перспективно для усиления и генерации микроволн в режиме электронной моды, а также для вывода энергии с помощью направленного излучения. Будем считать, что в области дрейфа потоки хорошо перемешаны и реализуется продольное взаимодействие частиц. При ограниченной интенсивности потоков частицы движутся с постоянной скоростью, задаваемой ускоряющими потенциалами [18].

В двулучевых устройствах на попутных потоках усиление сигнала определяется взаимодействием потоков, имеющих различные скорости [15-16]. Использование встречных потоков позволяет рассмотреть процессы генерации микроволн при продольном взаимодействии с обратной связью по потоку. Электронная мода генерации отличается перекачкой энергии между волнами без участия электродинамических систем. В двулучевых устройствах усиление или генерация сигнала получается вследствие взаимодействия между потоками, при этом часть энергии одного потока превращается в энергию возрастающей волны второго потока [15-17].

Настоящая работа представляет собой исследование двулучевого взаимодействия электронных потоков с резонансной замедляющей системой в режиме усиленная ЛБВ. Рассмотрены системы, как с положительной, так и отрицательной дисперсией, а также для обоих случаев рассмотрены системы как на попутных, так и на встречных потоках.

# 4. Специальная часть.

**4.1 Общие теоретические основы работы СВЧ устройств.**

# 4.1.1Теоретические основы взаимодействия электронных потоков.

Волновые процессы в электронных потоках рассматриваются на основе гидродинамической модели. Потоки в данной модели рассматриваются в виде электронной жидкости с ламинарным движением. Поток электронов в вакууме можно рассматривать как дрейфующую плазму. Поведение плазмы характеризуется поведением ее микроскопических элементов. Только в длинноволновом приближении имеет смысл рассматривать коллективное поведение плазмы, когда рассматриваются волновые процессы с длиной волны, много большей дебаевского радиуса:

.

Здесь  – средняя тепловая скорость электронов потока,  – плазменная частота бесконечно широкого электронного потока, *η* – удельный заряд электрона, *ρ0* – плотность заряда и *ε* – диэлектрическая проницаемость. Поскольку СВЧ волновые процессы удовлетворяют данному требованию, мы можем проводить их анализ на основе гидродинамической модели.

Из гидродинамического описания электронного потока следует необходимость введения понятий волн пространственного заряда, которые распространяются в потоке заряженных частиц. Применение концепции ВПЗ позволяет объяснить принцип работы двулучевой лампы – усилителя, в котором используются два электронных потока с слабо различающимися скоростями, движущихся параллельно друг другу и сильно связанных через общее поле пространственного заряда

Рассмотрим два ионно-скомпенсированных потока без столкновений и диффузии. Опишем данные потоки с помощью линеаризованных гидродинамических уравнений, связывающих конвекционный ток и поле, с уравнениями для плотности конвекционного тока и уравнением Пуассона. Получаем следующую систему уравнений:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.1а)  (4.1б) |
| (4.1в) |

Индекс «1» относится к первому, а «2» - ко второму потоку. Используя стандартное предположение, что переменные величины меняются по закону , запишем систему уравнений в виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.2а) |
| (4.2б) |

Получившаяся система уравнений представляет собой математическое описнаие самосогласованной модели возбуждения электронного волновода электронными потоками. Первое уравнение описывает возбуждение электронного волновода, второе - группирование электронного потока под действием поля пространственного заряда.

Модуляция по плотности потока наблюдается за счет инерционной группировки в предварительно модулированном потоке с невозмущенной скоростью  инерционной группировки. Данная ситуация, эквивалентна распространению в потоке двух волн пространственного заряда – быстрой и медленной, их фазовые скорости определяются соотношением: . Второй, быстрый пучок () взаимодействует c продольной составляющей замедленной волны в первом потоке, в результате чего при соответствующем выборе скорости *v0,2* второго потока последний будет отдавать энергию ВЧ-полю, т.е. будет происходить усиление сигнала. Подставив из уравнения (4.1) выражение для поля пространственного заряда в уравнения (4.2), окончательно получим систему уравнений относительно  и :

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.3) |
| (4.4) |

Данная система имеет решение , когда между потоками нет взаимодействия. Однако возникает вопрос: будет ли такое решение устойчивым? Для выяснения этого будем искать решение в виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.5) |

Подставив соотношение (4.5) в уравнения (4.3) и (4.4), получим систему линейных алгебраических уравнений вида:



Условием разрешимости этой системы уравнений является равенство нулю детерминанта системы, которое и дает дисперсионное уравнение:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Последнее можно переписать в виде:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

4.1.2. Термодинамически неравновесная плазменная среда и проблема ее устойчивости**.**

Плазма – это газ, состоящий из носителей заряда (электронов, ионов, дырок) и нейтральных частиц, в котором идут процессы рождения и гибели заряженных частиц (ионизация и рекомбинация). Эти процессы часто разделены в пространстве, из-за этого чего плазма становится неоднородной и занимает определенный конечный объем. Из ограниченности в пространстве следует термодинамическая неравновесность плазменной среды. Также в равновесии все виды частиц должны обладать одинаковой температурой, а их распределения по тепловым скоростям должны быть равновесными. Поэтому термодинамически равновесная плазменная среда является исключением. Реальная плазменная среда всегда ограничена в пространстве, т.е. всегда неравновесна. Только полностью нейтральная, однородная и покоящаяся по всем компонентам плазменная среда может существовать без наличия каких-либо полей. Поэтому плазму правильнее рассматривать как совокупность заряженных и нейтральных частиц, а также фотонов, находящихся в постоянном взаимодействии друг с другом. При этом проявляется основная особенность плазменной среды: в плазменных средах взаимодействие заряженных частиц с электромагнитными полями всегда превалирует над прямым взаимодействием частиц друг с другом (над столкновениями частиц). Именно благодаря этому факту, который, в свою очередь, является следствием кулоновского взаимодействия частиц, и условию применимости газового приближения:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

где *N* – плотность заряженных частиц, а *<ε>* – средняя энергия их теплового движения (температура, либо энергия Ферми), для описания динамики частиц плазмы применимо кинетическое уравнение Власова:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Здесь *f(r,p,t)* функция распределения носителей с зарядом *e* по импульсам *p* в момент времени *t* в точке *r*.

# 4.1.3. Основные виды неустойчивости.

Для исследования спектров частот малых электромагнитных колебаний плазменных сред используется метод нормальных мод. В случае если моды не ограниченны в пространстве сред этот метод сводится к анализу дисперсионного уравнения

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4.6) |

где *εij(ω,k)* – тензор диэлектрической проницаемости, описывающий отклик среды на малые колебания поля вида: E(*r,t*) ~ *e-iωt+ikr*, *ω* и *k* - частота и волновой вектор нормальной моды колебаний поля.

Малые колебания среды, не имеют вид отдельной плоской монохроматической волны ~ *e-iωt+ikr*, а представляют собой суперпозицию таких волн, т.е. являются волновыми пакетами. Асимптотическое поведение всего волнового пакета может существенно отличаться от поведения отдельной его гармоники. Может быть так, что в волновом пакете отдельные гармоники со временем возрастают, а пакет при этом остается ограниченным во времени в заданной точке пространства или может со временем затухать. Если в волновом пакете возмущение поля E(*r,t*) в заданной точке r0 = const с ростом времени остается ограниченным по амплитуде

|  |  |
| --- | --- |
| , |  |

то при наличии в пакете Фурье - гармоник с Im*ω*(*k*) *> 0* говорят о конвективной или сносовой неустойчивости. Если же возмущение неограниченно возрастает со временем, т.е.

|  |  |
| --- | --- |
| , |  |

то неустойчивость называют абсолютной.

Таким образом, для определения характера электромагнитной неустойчивости среды необходимо проследить за временной динамикой возмущений, решая начальную задачу электродинамики. Предположим , что источники поля существуют только в начальный момент времени, а также будем считать, что нарастание происходит вдоль оси Oz. Это позволяет перейти к одномерному случаю, записав решение в виде:

|  |  |
| --- | --- |
| . | (4.7) |

Рассмотрим, какому типу неустойчивости могут соответствовать корни с Im*ωn*(*k*) *> 0* и при каких условиях. Для этого положим в (4.7) для определенности *z = 0* и перейдем от интегрирования по *k* к интегрированию по *ωn*(*k*) с учетом дисперсионного уравнения (4.6):

|  |  |
| --- | --- |
| , | (4.8) |

здесь , причем – групповая скорость волны с частотой *ω*(*k*), а интегрирование ведется по контуру *Gn* в комплексной плоскости *ωn*(*k*), соответствующему действительной оси в комплексной плоскости *k*. Если между действительной осью *ωn* и контуром *Gn* для любых *n* у подынтегрального выражения (4.8) нет особых точек, то контур *Gn* можно деформировать в действительную ось, тогда (4.8) будет представлять собой преобразование Фурье и согласно теореме Лебега, при  величина, возмущения поля , что соответствует конвективному характеру неустойчивости.

Таким образом, если среди корней дисперсионного уравнения (4.6) есть корень с Im*ωn*(*k*) *> 0*, и между действительной осью в комплексной плоскости *ωn* и контуром *Gn*, соответствующим действительной оси *k* в комплексной плоскости *ωn*(*k*) нет особых точек подынтегрального выражения Фурье-разложения Е(*0,t*) (т.е. подынтегрального выражения (3.6)), то неустойчивость конвективная и  при . Если же между контуром *Gn* и действительной осью *ωn* у этого выражения есть хотя бы одна особая точка с Im*ωn*(*k*)*> 0*, то при деформации контура *Gn* в действительную ось *ωn* (1.14) появляется вклад от этой особой точки, нарастающий со временем как , и неустойчивость становится абсолютной.

Характер неустойчивости среды определяется решениями уравнений

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

Характер неустойчивости в случае, когда корень дисперсионного уравнения *ωn* имеет положительную мнимую часть Im*ωn > 0*, определяется расположением на комплексной плоскости *ω* точек ветвления *k*(*ωn*), совпадающих с решениями уравнения Λ*k = 0*. Именно, если между контуром *Gn* и вещественной осью нет ветвлений функции *k*(*ωn*), то неустойчивость конвективная, в противном случае она абсолютная.

Рассуждения об усилителе и генераторе верны в том случае, когда дисперсионное уравнение имеет неустойчивые решения при рассмотрении временной задачи, т.е. решения с Im*ω > 0*. В противном случае наличие точек ветвления, либо появление решений с Im*k ≠ 0* будут соответствовать непропусканию колебаний (полное внутреннее отражение), либо невозможности колебаний в среде

# 4.2 Анализ взаимодействия многолучевых потоков с полями электродинамических систем в мощных микроволновых приборах

# 4.2.1 Общие сведения о двухлучевых усилителях

Первые попытки создания двухлучевых усилителей были предприняты в середине прошлого века, но они не получили дальнейшего развития из-за сложности их реализации по сравнению, например, со спиральными ЛБВ. В данное время вновь стали возвращаться к использованию взаимодействия потоков заряженных частиц, движущихся в попутном направлении или навстречу друг другу с разными скоростями для создания усилителей и генераторов с расширенной полосой усиливаемых частот, а также для продвижения в миллиметровый диапазон длин волн [6,7].

Взаимодействие двух попутных или встречных электронных потоков может быть использовано для усиления и генерации микроволн в режиме электронной моды, а также для вывода энергии с помощью направленного излучения. Многоволновое взаимодействие электронных потоков и поверхностного поля в резонансных ЗС зависит от вида резонанса у периодической поверхности и сопровождается значительным динамическим увеличением или уменьшением плазменной частоты потоков [10]. Возникающие резонансные эффекты важны для понимания физических процессов в двулучевых и многолучевых мощных микроволновых приборов. Взаимодействие полей резонансных ЗС и волн электронных потоков относится к одномодовому черенковскому излучению при большом влиянии электронной среды [7-9].

Процессы взаимодействия двулучевых потоков в трубе дрейфа или с полями периодических ЗС можно рассматривать с точки зрения теории неравновесных плазмоподобных сред с конвективной и абсолютной неустойчивостями [11].

В двулучевых устройствах, построенных на попутных потоках, усиление сигнала определяется продольным взаимодействием полей периодических ЗС с электронными потоками, имеющими различные скорости, при этом часть кинетической энергии одного потока превращается в энергию возрастающей волны второго потока. Двулучевое усиление в мощных ЛБВ на резонансных ЗС наблюдается в системе попутных потоков. Дисперсионные характеристики для много волнового взаимодействия попутных потоков и полей периодических ЗС вблизи границ полосы прозрачности в двулучевой ЛБВ во многом аналогичны кривым дисперсии однолучевой ЛБВ[6, 12].

Использование встречных потоков позволяет рассмотреть процессы усиления и генерации микроволн при продольном взаимодействии с внутренней обратной связью по потоку. Двулучевое усиление с обратной связью (типа ЛОВ – усилитель), а также двулучевая генерация (типа ЛОВ – генератор) отмечаются в системе встречных потоков. Электронная мода генерации отличается перекачкой энергии между волнами пространственного заряда без участия ЗС или с учетом обратной связи в периодических системах с отрицательной дисперсией.

Поскольку большинство электродинамических систем мощных электронных приборов имеют достаточно сложную, нерегулярную поверхность для них , как правило, отсутствуют аналитические решения краевой задачи, поэтому для их описания ипользуются энергетические (приближенные) методы. При решении самосогласованных задач электродинамики и электроники, ввиду их сложности, можно ограничиться минимальными сведениями об электродинамических свойствах резонансной замедляющей системы. [10]

# 4.2.2 Эквивалентное описание резонансных замедляющих систем и электронного потока

Взаимодействие электронного потока и вихревых полей периодических структур происходит в емкостных зазорах одиночных или связанных резонаторов, в щелях резонансных замедляющих систем, в неоднородностях волноводов. Эффективное взаимодействие потока и поля происходит при временах пролета электронов, много меньших периода колебаний, а размеры этих областей гораздо меньше длины волны, то сами области представляют собой зазоры взаимодействия.

Поскольку вблизи зазоров взаимодействия электродинамическая система периодической структуры является квазистационарной, будем считать, что зазоры взаимодействия и примыкающие к ним проводники могут быть представлены в виде сосредоточенных емкостей и участков подводящих квазистационарных цепей. Отсюда следует, что рассматриваемую структуру можно описать эквивалентной схемой, и вести расчеты для нее.

Вихревые поля могут реактивно затухать, проявлять колебательные или волновые свойства в резонансных замедляющих системах. Для определения структуры полей в продольном и поперечном направлении резонансная замедляющая система разбивается на последовательности областей (ячейки), в пределах которых структура полей остается неизменной. Каждая из ячеек заменяется волноводным трансформатором, а всю электродинамическую систему представляют в виде цепочки волноводных трансформаторов, которые преобразуют комплексные амплитуды волн (или эквивалентные напряжения и токи) между сечениями входа и выхода ячеек.[10]

Для того, чтобы исследовать большинство важных, с практической точки зрения, конструкций резонансных замедляющих систем (рис. 1) достаточно рассматривать эквивалентные цепочки типа полосовых фильтров с положительной или отрицательной дисперсией волны основной пространственной гармоники и считать, что взаимодействие потока с полем происходит в емкостных зазорах.

|  |
| --- |
| (*а*)  (*в*)  (*б*)  (*г*) |
| Рисунок 1. Периодические волноведущие системы:  *а*) – диафрагмированный волновод;  *б*) – гофрированный волновод;  *в*) – волновод на полуторах;  *г*) – ребристый стержень в гладком волноводе. |

Для решения конкретных задач осуществляют переход от последовательностей волноводных трансформаторов к цепочкам связанных многополюсников, каждый из которых представляется в виде эквивалентной схемы с сосредоточенными параметрами (рис. 2). Параметры эквивалентной схемы, которые определяют основные электродинамические характеристики ЗС, могут быть найдены с помощью решения строгой трехмерной электродинамической задачи для конкретной резонансной замедляющей системы с помощью программ трехмерного электромагнитного моделирования, по аналогии с тем, как это сделано для замедляющих систем спиральных ЛБВ [13,14].

В случае одномодового приближении периодическая структура рассматривается как цепочка связанных четырехполюсников, которые сводятся к эквивалентным схемам. Выбор эквивалентной схемы определяется конфигурацией замедляющей системы и зависит от ее физических свойств. При учете электронного потока к токам, протекающим в эквивалентных цепях, добавляется наведенный ток, а к проводимости цепей дополнительно включается электронная проводимость.

|  |
| --- |
| *J*′НS+1  *E*0  *Z*0  *E*Н  *Z*Н  *J*′НS  *J*НS  *a*1S  *a*2S  *a*1S+1  *a*2S+1  *I*′S  *I*S  *I*″S  *I*S+1  *Z*1  *Z*1  *Z*2  *Z*3  *U*S  *U*′S  *U*″S  *U*S+1  *a*3S  *a*4S  *a*3S+1  *a*4S+1 |
| Рисунок 2. Общая эквивалентная схема электронного прибора с продольным двулучевым взаимодействием потока с полем резонансной замедляющей системы. |

В случае продольного взаимодействия одного электронного потока и электромагнитного поля эквивалентная резонансная замедляющая система представляет собой последовательность соединенных восьмиполюсников. Для двух потоков количество полюсов увеличивается до 12 [12]. Положительная или отрицательная дисперсия основной волны пространственной гармоники зависит от выбора эквивалентной схемы.

В случае линейного приближении к емкости зазора взаимодействия подключается суммарная электронная проводимость *Y*s = *Y*es + *Y*нs, состоящая из электронной проводимости *Y*es = *G*es + *jB*es, которая обеспечивает электронную нагрузку области взаимодействия немодулированным электронным потоком, и проводимости *Y*нs = *J*нs / *V*s, которая определяется наведенным на стенках зазора током *J*нs и напряжением *V*s. В дальнейшем в активную часть электронной проводимости будут включаются другие источники потерь.

Наведенный ток определяется произведением коэффициента электронного взаимодействия *M* и амплитуды первой гармоники конвекционного тока *J*s, *J*нs = *M J*s. Анализируя распространение сигнала на частоте *ω*, и полагая, что все величины изменяются во времени с той же частотой, в дальнейшем множитель exp(*jωt*) опускаем из рассмотрения.

Ограничиваясь рассмотрением одного электронного потока в электродинамической системе и воспользовавшись теорией цепей, запишем уравнения, связывающие напряжения и токи на выходе s-ой ячейки эквивалентной схемы (рис. 02) со значениями токов и напряжений на входе в s-ю ячейку при учете амплитуды первой гармоники тока в s-м зазоре:

 (4.9)

где 

Подставляя соотношение для напряжения в зазоре *V*S в уравнение (4.9), получаем уравнения, связывающие относительные комплексные напряжения и токи на выходе s-ой ячейки схемы с относительными комплексными значениями токов и напряжений на входе в ячейку,

 (4.10)

где  - полное сопротивление в последовательной ветви эквивалентной схемы, *G*0*=|J*0*|/V*0 - электронная проводимость потока, *J*0 ‑ постоянная составляющая тока электронного потока, *V*0 – ускоряющий потенциал, *M* ‑ коэффициент электронного взаимодействия, учитывающий только продольное взаимодействие потока с полем.

При исследовании процессов в электронном потоке имеет смысл использовать представление о волнах потока. В малосигнальном приближении проводится линеаризация основных уравнений, описывающих взаимодействие потока с высокочастотным полем резонансной замедляющей системы.

Исходя из предположения, что имеется бесконечно большое однородное постоянное магнитное поле, направленное в положительном направлении оси *z* будем рассматривать только продольное взаимодействие потока и поля. Из предположения об одномерности потока и использовании нормальных и связанных волн следует, что в потоке распространяются медленная и быстрая волны пространственного заряда. Эти две волны можно полностью описать с помощью переменных составляющих скорости и плотности тока потока.

В случае если поперечное сечение потока конечно в нем существует бесконечное число электронных волн , а это означает, что в общем случае его нельзя рассматривать только с помощью скорости и плотности тока. Необходимо учитывать также составляющие электрического и магнитного полей, удовлетворяющих граничным условиям. При этом соотношения для бесконечно широкого потока остаются в силе, в том случае если плазменную частоту *ω*p потока заменить редуцированной плазменной частотой *ωq* = *ωp* *R*, где *R* – коэффициент понижения (редукции) плазменной частоты.

Поскольку взаимодействие потока с полями резонансных замедляющих структур дискретно участки труб дрейфа между центрами соседних зазоров можно заменить трансформаторами волн потока, которые в свою очередь сводятся к эквивалентным четырехполюсникам. Из линейной теории связанных продольных волн электронного потока известно, что кинетический потенциал *V*es+1 и первая гармоника тока потока *J*s+1, определяются по следующим соотношениям:

 (4.11)

где  ‑ комплексные амплитуды быстрой и медленной волн потока на выходе s-ой ячейки, *z*- период структуры,  ‑ комплексные амплитуды нормальных продольных волн потока на входе s-й ячейки после прохождения потоком зазора взаимодействия, *Ze* - эквивалентное волновое сопротивление потока.

После ряда преобразований из соотношений (4.11) получим уравнения для волн пространственного заряда в электронном потоке

 (4.12)

где, – параметр угла пролета.

Подставляя выражение (4.9) для напряжения *V*s в s-м зазоре в уравнения (4.12), получаем уравнения, описывающие электронный поток, представленный в виде последовательности связанных шестиполюсников,

 (4.13)

# 4.2.3 Матричный и волновой методы анализа усиления и самовозбуждения в мощных электронных приборах

Из уравнений связанных шестиполюсников (4.13) и уравнений для напряжений и токов s-ой ячейки эквивалентной замедляющей системы (4.10), описывающих электронный поток, определяются коэффициенты матрицы передачи *G*s для s-ой ячейки связанных восьмиполюсников. Запишем в следующем виде уравнения для напряжений и токов последовательности восьмиполюсников

**** (4.14)

или система (4.14) более кратко представляется с помощью следующего матричного уравнения

**** (4.15)

где **** - комплексный вектор, |*Gs*|=|*Aij*| - комплексная матрица передачи.

Решение системы уравнений (4.14) или матричного уравнения (4.15) в линейном приближении ищется в виде

*X*s*+*1*= X*s*eГ*, (4.16)

где *Г = α+iϕ* - комплексная постоянная распространения, *ϕ* - сдвиг фаз на ячейку замедляющей системы.

Подставляя выражение (4.16) в матричное уравнение (4.14), получаем следующую систему уравнений

 (4.17)

Условием разрешимости системы уравнений (4.17) является равенство нулю детерминанта системы

. (4.17)

Уравнение (4.17) можно переписать в более компактном виде

 (4.18)

где *δik* = 0 при *i* ≠ *k*, *δik* = 1 при *i* = *k*; *i*, *k* = 1, 2, 3, 4.

Полученное дисперсионное уравнение (4.18) используем для нахождения постоянной распространения *Г = α+iϕ* , можно применять в широких пределах изменения параметров связанной системы на произвольных частотах, включая области частот вблизи границ полосы прозрачности и за ее пределами. Оно описывает взаимодействие электронного потока с полями периодических замедляющих систем с положительной или отрицательной дисперсией при синхронизме волн потока с различными пространственными гармониками номера *n*.

Для разных вариантов цепочек связанных многополюсников комплексный вектор *X*s в общем матричном уравнении (4.14) будет иметь разный вид. Следовательно, и элементы матрицы передачи *G*s также будут иметь разные коэффициенты. При описании связи амплитуд волн потока, напряжений и токов системы в s-й ячейке, комплексный вектор имеет следующий вид: *X*s = (*U, I*, *a*б, *a*м)s, где *U* и *I* - соответственно напряжение и ток в s-й ячейке, *a*б, *a*м - амплитуды быстрой и медленной нормальных волн пространственного заряда, зависящие от отношения редуцированной плазменной частоты к частоте сигнала **q.

Матрица передачи всей секции прибора определяется соотношением



где s- общее число ячеек, s=1,2,..,S. Учитывая его, запишем матричное уравнение связи между векторами входа и выхода системы

*X*N+1 *= G X*1. (4.19)

Уравнение (4.19) дополняется граничными условиями на концах связанной системы, наличием внешних источников модулирующего сигнала и начальной модуляции электронного потока:

*E*0*=U*1*+Z*0*I*1*, a*б*=*б, *a*м*=*м, *E*н*=U*s*+*1*–Z*н*I*s*+*1*,* (4.20)

где **б и **м - амплитуды быстрой и медленной волн потока на входе в систему, *E*0 и *E*н -амплитуды входного сигнала, позволяющие рассмотреть режим ЛБВ (*E*0 0, *E*н  0) или ЛОВ (*E*0 0, *E*н 0); *Z*0 и *Z*н - эквивалентные сопротивления нагрузок соответственно. Решив системы уравнений (4.19) и (4.20) сможем определить амплитуды волн в потоке, напряжения и токи в ячейках структуры, “горячее” входное сопротивление системы, а также коэффициент усиления

*K = 10* lg(*P*вых*/P*вх),

где *P*вх*=*Re(*U*1*I*1*\**)*/*2 - входная, *P*вых*=*Re(*U*S+1*I*S+1*\**) / 2- выходная мощности прибора.

Применим волновой анализ, чтобы понять теорию физики взаимодействия, благодаря чему процесс сводится к определению постоянных распространения и структуры собственных волн в системе с одинаковыми ячейками. Перезапишем уравнения связи в более удобном виде исходя из выше изложенных предположений- использем вместо матрицы передачи *G* эквивалентную волновую матрицу преобразования:

,

где *Xb*s*=*(*U, I, aб, aм*), амплитуды прямых и обратных нормальных волн в структуре.

Постоянные распространения нормальных волн связанной системы *Гj*  *j*  *ij* находятся из решения дисперсионного уравнения (4.18), которое можно переписать в следующем виде

*|* *G*S–*E·*exp(*-Гj*) *|* = 0*,* (4.21)

где *j* - параметр нарастания или затухания, *j* - фазовый сдвиг *j*-ой волны на ячейку, *j* = *jz*, *j* - постоянная распространения, *z* - период системы, *E*- единичная матрица, *j* = 1…4. Уравнение (4.21) по существу является задачей на нахождение собственных значений *Gj* = *e-Гj* матрицы передачи *Gs*.

Нормальные волны связанной системы удобно представлять в виде суперпозиции волн “холодной” системы, *Хsbj =*(*Aj+, Aj-, aбj, aмj*). Суммарное распределение мощности в структуре определяется с учетом принципа суперпозиции



где  - амплитуды нормальных волн, определяемые из уравнений (4.19)-(4.21). Нахождение коэффициентов разложений  позволяет определить структуру поля в терминах нормальных волн.

Для исследования влияния отражений от оконечных нагрузок на усиление сигнала, изрезанность АЧХ и самовозбуждение колебаний в мощных приборах необходимо учитывать граничные условия. Амплитуды нормальных волн в электронном потоке на входе в связанную систему определяются наличием (в многосекционных устройствах) или отсутствием (в односекционных приборах) начальной модуляции электронного потока.

Для решения общей краевой задачи с учетом граничных нагрузок матричное уравнение (4.18) дополняется уравнениями граничных нагрузок на концах связанной системы (4.19), которые определяются особенностями согласующих устройств и оконечных нагрузок на входе и выходе системы, наличием внешних источников модулирующего сигнала и начальной модуляции электронного потока.

Учет граничных нагрузок на концах системы при волновом анализе сводится к записи граничных условий (4.19) с учетом разложения поля структуры по собственным волнам нагруженной системы. Эти разложения на входе и выходе системы имеют следующий вид:



кроме того, выполняются соотношения



Учитывая записанные соотношения и выражения для комплексных амплитуд тока и напряжения замедляющей системы



получим из уравнений связи (2.14) следующие уравнения:

 (4.22)

где

.

Решая граничные уравнения (4.22) совместно с общим дисперсионным уравнением (4.20), находим неизвестные коэффициенты разложений , т.е. определяем амплитуды нормальных волн и, определяем структуру поля

# 4.2.4 Двулучевое взаимодействие электронных потоков с полями резонансных замедляющих систем. Дисперсионное уравнение.

Для исследования взаимодействия двух электронных потоков с полями резонансных замедляющих систем, связанная система разбивается на последовательности областей (ячеек), в пределах которых структура полей остается неизменной. Каждая из ячеек заменяется волноводным трансформатором, а вся электродинамическая система представляется в виде цепочки волноводных трансформаторов, которые преобразуют комплексные амплитуды волн (или эквивалентные напряжения и токи) между сечениями входа и выхода ячеек.

При рассмотрении задач в линейном приближении электронные потоки из общей системы можно не выделять и рассматривать обобщенные многополюсники, описывающие преобразование полей и волн резонансной замедляющей системы и обоих электронных потоков.

Решение ищется в виде *~egωt*, с помощью матрицы шесть на шесть, в столбцах которой стоят последовательно: напряжение, ток, амплитуды первой, второй волны первого электронного потока, амплитуды первой, второй волны второго электронного потока.

Каждая ячейка резонансной замедляющей системы представляется в виде многополюсников, описываемых матрицами передачи Gs . Учитывается продольное взаимодействие волн двух электронных потоков с полями замедляющей системы. Для определения коэффициентов матрицы передачи Gs каждая s-я ячейка резонансной замедляющей системы разбивается на отдельные вспомогательные области. В первой и третьей областях взаимодействия нет, во второй области осуществляется продольное взаимодействие двух потоков с полем, учитываемое коэффициентом взаимодействия М.

В выделенных отдельных вспомогательных областяхнапряжения и токи эквивалентной схемы и комплексные амплитуды нормальных продольных волн двух электронных потоков преобразуются по следующим соотношениям:

а) для матрицы q1

;

   (2.22а)

б) для матрицы q2



, (2.22б)



в) для матрицы q3



  (2.22в)



Определяются элементы матриц преобразования каждой отдельной выделенной вспомогательной области g1, g2 и g3, причем в нашем случае будет g1=g3. Матрица передачи Gs для всей s-ой ячейки области взаимодействия определяется из произведения этих матриц Gs= g1 g2 g3.

С помощью нахождения коэффициентов матрицы передачи переходим от общего вида к матрице с определенными коэффициентами:















































Текущие значения комплексных амплитуд напряжений и токов эквивалентных схем, описывающих резонансные ЗС, и продольных нормальных волн электронных потоков, представленных в виде цепочек связанных многополюсников различного вида, преобразуются от ячейки к ячейке связанной системы по формулам линейной алгебры.

В матричной форме записи это преобразование для ячейки последовательности связанных многополюсников записывается с помощью следующего матричного уравнения:

Xs+1=GsX (4.23)

Комплексный вектор Xs в общем матричном уравнении (4.23) для различных вариантов цепочек связанных многополюсников имеет различный вид. Соответственно и элементы матрицы передачи Gs также имеют различные коэффициенты.

Для s-ой ячейки цепочки связанных 12-полюсников, описывающих продольное взаимодействие двух электронных потоков с полями резонансной замедляющей системы., комплексный вектор Xs имеет следующий вид:

Xs = (U, I, a1 , a2, a3, a4).

Дисперсионное уравнение двулучевого взаимодействия двух электронных потоков с полями резонансных замедляющих систем. Знание матрицы передачи отдельной s-ой ячейки связанной системы Gs позволяет определить комплексные постоянные распространения нормальных волн связанной системы Гj = aj + iфj,

j = 1,….,6, из следующего дисперсионного уравнения:

| Gs – E е | = 0 (4.24a)

где aj – параметр нарастания или затухания, фj – фазовый сдвиг j-ой волны на ячейку, определяющий постоянные распространения волн связанной системы Bj = фj / z изм, Е – единичная матрица. Записанное дисперсионное уравнение (2.24), по существу, является уравнением для нахождения собственных значений матрицы передачи.

Дисперсионное уравнение (2.36) в общем виде можно записать так:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2.24 б) |

В случае анализа взаимодействия только одного электронного потока с полем резонансной замедляющей системы количество нормальных волн связанной системы уменьшается. В линейном приближении решение матричного уравнения (4.23) ищется в виде:

Xs+1 = Xs е , j = 1,….,4

Подставляя это решение в уравнение (4.23) и приравнивая к нулю детерминант получающейся системы, получаем дисперсионное уравнение связанной системы в виде уравнения (4.24).

Полученное дисперсионное уравнение для анализа продольного взаимодействия двух потоков с полями резонансных замедляющих систем справедливо в широких пределах изменения параметров связанной системы, на произвольных частотах, включая области частот вблизи границ полосы прозрачности и за ее пределами.

Два попутных электронных потока, не связанных между собой, движутся в резонансной замедляющей системе и взаимодействуют с ее гармониками, коэффициент взаимодействия задается в каждом конкретном случае.

# 4.3 Анализ дисперсионных характеристик.

Используя полученные в предыдущей части математические описания для систем с положительной и отрицательной дисперсией рассмотрим одно и двух взаимодействие с резонансной замедляющей системой.

Исследования будут проводиться для систем, эквивалентные схемы которых представлены на рисунке 3.

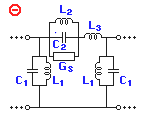
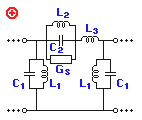
 

Рисунок 3. Общие эквивалентные схемы для систем с отрицательной и положительной дисперсией соответственно.

# 4.3.1 Взаимодействие одного потока с РЗС

Вначале рассмотрим взаимодействия одного потока с резонансной замедляющей системой. Движущийся электронный поток взаимодействует с «0» и «-1» пространственной гармоникой резонансной замедляющей системы, коэффициент связи задается в каждом конкретном случае. Дисперсионные характеристики представлены в системе координат: сдвига фазы от нормированной частоты В полосе прозрачности при выполнении условий синхронизма медленной волны пространственного заряда (МВПЗ) с нулевой гармоникой резонансной замедляющей системы (РЗС) с положительной дисперсией наблюдается усиление – режим ЛБВ усилителя. Также режим ЛБВ усилителя наблюдается при взаимодействии МВПЗ с «+1» пространственной гармоникой РЗС с отрицательной дисперсией.

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\mumin\Desktop\noname1.bmp  а) | C:\Users\mumin\Desktop\noname13.bmp  б) |
| в) | |

Рисунок 4. Дисперсионные характеристики для системы с положительной дисперсией (а). Показано нарастание коэффициента |α| в зависимости от коэффициента связи (0.1 –сплошная линия, 0.2 – прерывистая, 0.3 - пунктир) (б). Параметры системы, для которой были получены графики (в).

На рисунке 4 показано взаимодействие электронного потока с нулевой гармоникой РЗС с положительной дисперсией, коэффициент связи 0.1, процесс взаимодействия рассматривается в полосе прозрачности от 0.50-1.00 нормированной длины волны. Взаимодействие БВПЗ электронного потока с нулевой гармоникой РЗС в точке синхронизма приводит к режиму периодической связи потока и поля. Взаимодействие МВПЗ электронного потока с нулевой гармоникой РЗС в точке синхронизма приводит к режиму усиления типа ЛБВ. Также показано увеличение размеров и коэффициента усиления области синхронизма при увеличении коэффициента связи в пределах от 0.1 до 0.4.Приведены параметры системы, для которой получены данные.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| C:\Users\mumin\Desktop\noname3.bmp  а) | C:\Users\mumin\Desktop\noname14.bmp  б) | |
| в) | |

Рисунок 5. Дисперсионные характеристики для системы с отрицательной дисперсией (а). Показано нарастание коэффициента |α| в зависимости от коэффициента связи (0.1 –сплошная линия, 0.12 – прерывистая, 0.13 – пунктир, 0.14 – штрих-пунктир) (б). Параметры системы, для которой были получены графики (в).

На рисунке 5 показано взаимодействие электронного потока с нулевой гармоникой РЗС с отрицательной дисперсией, коэффициент связи 0.1, процесс взаимодействия рассматривается в полосе прозрачности от 0.9-1.00 нормированной длины волны. Взаимодействие БВПЗ электронного потока с нулевой гармоникой РЗС в точке синхронизма приводит к режиму периодической связи потока и поля. Взаимодействие МВПЗ электронного потока с нулевой гармоникой РЗС в точке синхронизма приводит к режиму усиления типа ЛБВ. Также показано увеличение размеров и коэффициента усиления области синхронизма при увеличении коэффициента связи в пределах от 0.1 до 0.14.Приведены параметры системы, для которой получены данные.

Усиление сигнала типа режима ЛБВ усилителя имеет место в системе с положительной дисперсией при взаимодействии МВПЗ электронного потока с нулевой пространственной гармоникой РЗС, и в системе с отрицательной дисперсией при взаимодействии МВПЗ электронного потока с «-1» пространственной гармоникой РЗС

# 4.3.2 Взаимодействие двух потоков с РЗС.

Рассмотри устройства, работающие на принципе двух потокового взаимодействия. При малых значениях коэффициентов связи потоков с полями ЗС отмечается наличие двух областей усиления. Постепенное увеличение значений коэффициентов связи приводит к заметному расширению областей комплексных решений и образованию расширенной области усиления сигнала. При увеличении коэффициентов связи между потоками наблюдается сверхширокополосное усиление, определяемое в основном двулучевым взаимодействием потоков[13].

На рисунках 06 и 07 представлено взаимодействие двух потоков с резонансной замедляющей системой. Дисперсионные характеристики приведены как для попутных, так и для встречных потоков. В полосе прозрачности при выполнении условий синхронизма МВПЗ электронных потоков с нулевой гармоникой резонансной замедляющей системы с положительной дисперсией наблюдается усиление – режим ЛБВ усилителя. Также режим ЛБВ усилителя наблюдается при взаимодействии МВПЗ электронных потоков с «+1» пространственной гармоникой РЗС с отрицательной дисперсией.

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\mumin\Desktop\noname5.bmpа) | C:\Users\mumin\Desktop\noname15.bmpб) |
| C:\Users\mumin\Desktop\noname8.bmpв) | C:\Users\mumin\Desktop\noname16.bmpг) |

Рисунок 6. Дисперсионные характеристики двухлучевого взаимодействия для системы с положительной дисперсией с резонансной замедляющей структурой, для попутных (а) и встречных (в) потоков. Показано нарастание коэффициента |α| в зависимости от коэффициента связи (0.1 –сплошная линия, 0.2 – прерывистая, 0.3 – пунктир, 0.4 – штрих-пунктир), для попутных потоков (б) и встречных (г)

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\mumin\Desktop\noname9.bmpа) | C:\Users\mumin\Desktop\noname17.bmpб) |
| C:\Users\mumin\Desktop\noname12.bmpв) | C:\Users\mumin\Desktop\noname18.bmpг) |

Рисунок 7, Дисперсионные характеристики двухлучевого взаимодействия для системы с отрицательной дисперсией с резонансной замедляющей структурой, для попутных (а) и встречных (в) потоков. Показано нарастание коэффициента |α| в зависимости от коэффициента связи (0.1 –сплошная линия, 0.15 – прерывистая, 0.2 – пунктир, 0.3 – штрих-пунктир), для попутных потоков (б) и встречных (г)

Из рисунков 6 и 7 можно сделать следующие выводы при использовании систем реализованных на взаимодействии двух потоков с РЗС происходит значительное уширение полосы пропускания сигнала, как в случае встречных, так и в случае попутных потоков. Наблюдается возрастание коэффициента |α| с ростом коэффициента связи системы и потоков.

# 4.4 Анализ коэффициентов усиления и распределения мощности

Рассмотрим модели трехсекционных ЛБВ с двулучевым взаимодействием и сравним с коэффициентом усиления для однолучевых ЛБВ. Два разноскоростных потока (медленный и быстрый) взаимодействуют с нулевой пространственной гармоникой РЗС, в случае положительной дисперсии, и с минус первой пространственной гармоникой, в случае отрицательной дисперсии. Система представляет собой усилитель типа ЛБВ.

Рассмотрим вначале систему с положительной дисперсией. На рисунках 08 и 09 представлена зависимость коэффициента усиления и распределения мощности от нормированной частоты. Из графиков видно что при одинаковых параметрах системы система с двулучевым взаимодействием дает вдвое большее усиление чем система с одним потоком, а по мощности выигрыш составляет 2 порядка.

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\mumin\Desktop\noname19.bmp  а) | C:\Users\mumin\Desktop\noname20.bmp  б) |

Рисунок 8, Зависимость коэффициента усиления (а) и распределения мощности от нормированной частоты (б), для системы с положительной дисперсией, с однолучевым взаимодействием. Ток потока 1А. Ускоряющее напряжение 60кВ.

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\mumin\Desktop\2p 1A + pop.bmpа) | C:\Users\mumin\Desktop\noname22.bmpб) |

Рисунок 9, Зависимость коэффициента усиления (а) и распределения мощности (б) от нормированной частоты, для системы с положительной дисперсией, с двулучевым взаимодействием. Ток потоков1А.Ускоряющее напряжение быстрого потока 60кВ, медленного 25кВ.

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\mumin\Desktop\noname23.bmpа) | C:\Users\mumin\Desktop\noname24.bmpб) |

Рисунок 10. Зависимость коэффициента усиления (а) и распределения мощности (б) от нормированной частоты, для системы с положительной дисперсией, с двулучевым взаимодействием для встречных потоков. Ток потоков1А. Ускоряющее напряжение быстрого потока 60кВ, медленного 25кВ.

Из рисунков 9 и 10 видно, что системы на основе двулучевого взаимодействия, реализованные на встречных потоках, выигрывают у систем, реализованных на попутных потоках, и по коэффициенту усиления и по мощности.

Зависимости коэффициента усиления и распределения мощности для систем с отрицательной дисперсией показаны на рисунках 11, 12, 13.

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\mumin\Desktop\noname25.bmpа) | C:\Users\mumin\Desktop\noname26.bmpб) |

Рисунок 11. Зависимость коэффициента усиления (а) и распределения мощности (б) от нормированной частоты, для системы с отрицательной дисперсией, с однолучевым взаимодействием. Ток потока1А. Ускоряющее напряжение 63кВ

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\mumin\Desktop\noname27.bmpа) | C:\Users\mumin\Desktop\noname28.bmpб) |

Рисунок 12. Зависимость коэффициента усиления (а) и распределения мощности (б) от нормированной частоты, для системы с отрицательной дисперсией, с двулучевым взаимодействием. Ток потоков1А.Ускоряющее напряжение быстрого потока 63кВ, медленного 35кВ

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\mumin\Desktop\noname29.bmpа) | C:\Users\mumin\Desktop\noname30.bmpб) |

Рисунок 13. Зависимость коэффициента усиления (а) и распределения мощности (б) от нормированной частоты, для системы с отрицательной дисперсией, с двулучевым взаимодействием для встречных потоков. Ток потоков1А. Ускоряющее напряжение быстрого потока 63кВ, медленного 35кВ.

Из рисунков 11 и 12 видно, что в отличие от систем с положительной дисперсией, системы с отрицательной дисперсией не дают выигрыша в коэффициенте усиления рисунка 13, наблюдается многократное увеличение мощности и коэффициента усиления. Что может говорить о том, что в случае с отрицательной дисперсией системы, построенные на встречных потоках намного перспективнее систем на попутных, зато наблюдается двукратное увеличение мощности при одних и тех же параметрах системы. Для системы, построенной на встречных потоках, как видно из.

# 5Охрана труда.

# 5.1. Основные понятия охраны труда, опасные и вредные производственные факторы.

Главная цель охраны труда - исследование условий труда, аппаратуры и оборудования, технологических процессов с точки зрения возможности возникновения вредных и опасных производственных факторов. Исходя из полученных результатов, определяют опасные и вредные участки производства, возможные аварийные ситуации, а также разрабатывают мероприятия по их устранению или ограничению последствий.

209 статья Трудового Кодекса Российской Федерации вводит следующие основные понятия области охраны труда. ,

«Охрана труда – система сохранения жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности, включающая в себя правовые, социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические, реабилитационные и иные мероприятия.

Условия труда – совокупность факторов производственной среды и трудового процесса, оказывающих влияние на работоспособность и здоровье работника.

Вредный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работника может привести к его заболеванию.

Опасный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работника может привести к его травме.

Безопасные условия труда – условия труда, при которых воздействие на работающих вредных и (или) опасных производственных факторов исключено либо уровни их воздействия не превышают установленных нормативов.

Рабочее место – место, где работник должен находиться или куда ему необходимо прибыть в связи с его работой и которое прямо или косвенно находится под контролем работодателя»[1].

Вредный производственный фактор может стать опасным в зависимости от уровня и продолжительности воздействия на человека.

В соответствии со стандартом ГОСТ 12.0.003-74 (99) ССБТ [2] опасные и вредные производственные факторы подразделяются по природе действия на следующие группы:

* физические;
* химические;
* биологические;
* психофизиологические.

В реальной жизни в производственных условиях действует комплекс опасных и вредных факторов. Данные факторы приводят к профессиональным заболеваниям, в том числе хроническим.

Основными опасными и вредными производственными факторами являются: повышенная запыленность и загазованность воздуха рабочей зоны; повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны; повышенная или пониженная влажность и подвижность воздуха в рабочей зоне; повышенный уровень шума; повышенный уровень вибрации; повышенный уровень различных электромагнитных излучений; отсутствие или недостаток естественного света; недостаточная освещенность рабочей зоны и другие.

Основными опасными и вредными производственными факторами в контексте данной дипломной работы являются электромагнитные излучения, в основном, СВЧ диапазона.

Данный ГОСТ подразделяет опасность излучения на следующие виды:

* повышенный уровень ионизирующих излучений в рабочей зоне;
* повышенный уровень электромагнитных излучений;
* повышенная напряженность электрического поля;
* повышенная напряженность магнитного поля;
* повышенная яркость света;
* повышенный уровень ультрафиолетовой радиации;
* повышенный уровень инфракрасной радиации.

Источниками электромагнитных излучений служат радиотехнические и электронные устройства, индукторы, передатчики, трансформаторы, антенны, соединения волноводных трактов, генераторы сверхвысоких частот и др.

Очевидно, что одним из наиболее распространенных источников электромагнитных излучений на предприятиях и в организациях являются персональные электронно-вычислительные машины (ПЭВМ), в основном, их мониторы. У жидкокристаллических мониторов отсутствуют электростатическое поле и рентгеновское излучение, в отличие от постепенно электронно-лучевых трубок, колличество которых постепенно уменьшается. Но ЭЛТ – не единственный источник электромагнитных излучений. Генерировать поля могут преобразователь напряжения питания, схемы управления и формирования информации на дискретных жидкокристаллических мониторах и другие элементы аппаратуры.

5.2. Микроклимат рабочей зоны с ПЭВМ**.**

Требования СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03[5] направлены на предотвращение или уменьшение неблагоприятного влияния, на здоровье человека вредных факторов производственной среды и трудового процесса при работе с ПЭВМ и его периферийными устройствами.

Рабочие места где предусмотрено использование ПЭВМ должны соответствовать требованиям СанПиН.

Гигиенические параметры вредных и опасных факторов, такие как уровни электромагнитных полей (ЭМП), акустического шума, концентрация вредных веществ в воздухе, визуальные показатели видеодисплейных терминалов (ВДТ), мягкое рентгеновское излучение (только для ЭЛТ), не должны превышать значений, установленных Санитарными правилами..

Возможность поворота корпуса как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости, с возможностью фиксации в заданном положении для обеспечения фронтального наблюдения экрана ВДТ, должна обеспечиваться конструкцией ПЭВМ. Корпус ПЭВМ должен быть окрашен в спокойные мягкие тона с диффузным рассеиванием света. Корпус ПЭВМ, клавиатура и другие блоки и устройства ПЭВМ должны иметь матовую поверхность с коэффициентом отражения 0,4 - 0,6 и не иметь способных создавать блики блестящих деталей,.

Конструкция ВДТ должна предусматривать регулирование яркости и контрастности.

Помещения, где эксплуатируются ПЭВМ, должны иметь естественное и искусственное освещение. Эксплуатация ПЭВМ в помещениях без естественного освещения допускается только при соответствующем обосновании и наличии положительного санитарно-эпидемиологического заключения, выданного в установленном порядке.

Естественное и искусственное освещение должно соответствовать требованиям действующей нормативной документации. к. Оконные проемы должны быть оборудованы регулируемыми устройствами типа: жалюзи, занавесей, внешних козырьков и др.

Площадь на одно рабочее место пользователей ПЭВМ с ВДТ на базе ЭЛТ должна составлять не менее 6 м2, с ВДТ на базе плоских дискретных экранов (жидкокристаллические, плазменные) – 4,5 м2. При использовании ПЭВМ с ВДТ на базе ЭЛТ (без вспомогательных устройств – принтер, сканер и др.), отвечающих требованиям международных стандартов безопасности компьютеров, с продолжительностью работы менее 4 часов в день допускается минимальная площадь 4,5 м2 на одно рабочее место пользователя.

Помещения, где размещаются рабочие места с ПЭВМ, должны быть оборудованы защитным заземлением (занулением) в соответствии с техническими требованиями по эксплуатации. Не следует размещать рабочие места с ПЭВМ вблизи силовых кабелей и вводов, высоковольтных трансформаторов, технологического оборудования, создающего помехи в работе ПЭВМ.

Уровни положительных и отрицательных аэроионов в воздухе данных помещений должны соответствовать действующим санитарно-эпидемиологическим нормативам, а содержание вредных химических веществ в воздухе не должно превышать предельно допустимых концентраций в соответствии с действующими гигиеническими нормативами.

При выполнении работ с использованием ПЭВМ в производственных помещениях уровни шума и вибрации на рабочих местах не должны превышать предельно допустимых значений, установленных в соответствии с действующими санитарно-эпидемиологическими нормативами. Шумящее оборудование (печатающие устройства, серверы и т.п.), уровни шума которого превышают нормативные, должно размещаться вне помещений с ПЭВМ.

Рабочие столы следует размещать таким образом, чтобы ВДТ были ориентированы боковой стороной к световым проемам, чтобы естественный свет падал преимущественно слева.

Искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПЭВМ должно осуществляться системой общего равномерного освещения..

Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300 - 500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк.

Следует ограничивать прямую блесткость от источников освещения, при этом яркость светящихся поверхностей (окна, светильники и др.), находящихся в поле зрения, должна быть не более 200 кд/м2. Следует ограничивать отраженную блесткость на рабочих поверхностях (экран, стол, клавиатура и др.) за счет правильного выбора типов светильников и расположения рабочих мест по отношению к источникам естественного и искусственного освещения, при этом яркость бликов на экране ПЭВМ не должна превышать 40 кд/м2 и яркость потолка не должна превышать 200 кд/м2.

Следует ограничивать неравномерность распределения яркости в поле зрения пользователя ПЭВМ, при этом соотношение яркости между рабочими поверхностями не должно превышать 3:1 - 5:1, а между рабочими поверхностями и поверхностями стен и оборудования 10:1.

Для освещения помещений с ПЭВМ следует применять светильники с зеркальными параболическими решетками, укомплектованными электронными пуско-регулирующими аппаратами (ЭПРА). Допускается использование многоламповых светильников с электромагнитными пуско-регулирующими аппаратами (ЭПРА), состоящими из равного числа опережающих и отстающих ветвей. Применение светильников без рассеивателей и экранирующих решеток не допускается.

При отсутствии светильников с ЭПРА лампы многоламповых светильников или рядом расположенные светильники общего освещения следует включать на разные фазы трехфазной сети.

Общее освещение при использовании люминесцентных светильников следует выполнять в виде сплошных или прерывистых линий светильников, расположенных сбоку от рабочих мест, параллельно линии зрения пользователя при рядном расположении ВДТ. При периметральном расположении компьютеров линии светильников должны располагаться локализовано над рабочим столом ближе к его переднему краю, обращенному к оператору.

Коэффициент запаса (Кз) для осветительных установок общего освещения должен приниматься равным 1,4. Коэффициент пульсации не должен превышать 5%.

Для обеспечения нормируемых значений освещенности в помещениях для использования ПЭВМ следует проводить чистку стекол оконных рам и светильников не реже двух раз в год и проводить своевременную замену перегоревших ламп.

При размещении рабочих мест с ПЭВМ расстояние между рабочими столами с видеомониторами (в направлении тыла поверхности одного видеомонитора и экрана другого видеомонитора), должно быть не менее 2,0 м, а расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов – не менее 1,2 м.

Рабочие места с ПЭВМ в помещениях с источниками вредных производственных факторов должны размещаться в изолированных кабинах с организованным воздухообменом. Рабочие места с ПЭВМ при выполнении творческой работы, требующей значительного умственного напряжения или высокой концентрации внимания, рекомендуется изолировать друг от друга перегородками высотой 1,5 - 2,0 м.

Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600 - 700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.

Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, характера выполняемой работы. При этом допускается использование рабочих столов различных конструкций, отвечающих современным требованиям эргономики. Поверхность рабочего стола должна иметь коэффициент отражения 0,5 - 0,7.

Конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПЭВМ и позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Тип рабочего стула (кресла) следует выбирать с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПЭВМ.

Рабочий стул (кресло) должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию. Поверхность сиденья, спинки и других элементов стула (кресла) должна быть полумягкой, с нескользящим, слабо электризующимся и воздухопроницаемым покрытием, обеспечивающим легкую очистку от загрязнений.

Высота рабочей поверхности стола для взрослых пользователей должна регулироваться в пределах 680 - 800 мм; при отсутствии такой возможности высота рабочей поверхности стола должна составлять 725 мм.

Модульными размерами рабочей поверхности стола для ПЭВМ, на основании которых должны рассчитываться конструктивные размеры, следует считать: ширину 800, 1000, 1200 и 1400 мм, глубину 800 и 1000 мм при нерегулируемой его высоте, равной 725 мм. Рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее место пользователя ПЭВМ следует оборудовать подставкой для ног, имеющей ширину не менее 300 мм, глубину не менее 400 мм, регулировку по высоте в пределах до 150 мм и по углу наклона опорной поверхности подставки до 20°. Поверхность подставки должна быть рифленой и иметь по переднему краю бортик высотой 10 мм.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100 - 300 мм от края, обращенного к пользователю или на специальной, регулируемой по высоте рабочей поверхности, отделенной от основной столешницы.

Лица, работающие с ПЭВМ более 50% рабочего времени (профессионально связанные с эксплуатацией ПЭВМ), должны проходить обязательные предварительные при поступлении на работу и периодические медицинские осмотры в установленном порядке

# 5.3. Обеспечение электробезопасности. Расчет защитного зануления.

Электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

Как уже говорилось выше, помещения, где размещаются рабочие места с ПЭВМ, в соответствии с техническими требованиями по эксплуатации, должны быть оборудованы защитным заземлением (занулением).

Защитное заземление – преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических нетоковедущих частей, которые могут оказаться под напряжением вследствие замыкания на корпус и по другим причинам.

Защитное зануление (в электроустановках напряжением до 1 кВ) – преднамеренное соединение открытых проводящих частей с глухозаземленной нейтралью генератора или трансформатора в сетях трехфазного тока, с глухозаземленным выводом источника однофазного тока, с заземленной точкой источника в сетях постоянного тока, выполняемое в целях электробезопасности.

Принцип действия зануления. При замыкании фазного провода на зануленный корпус электропотребителя образуется цепь тока однофазного короткого замыкания (то есть замыкания между фазным и нулевым защитным проводниками). Ток однофазного короткого замыкания вызывает срабатывание максимальной токовой защиты, в результате чего происходит отключение поврежденной электроустановки от питающей сети. Кроме того, до срабатывания максимальной токовой защиты происходит снижение напряжения поврежденного корпуса относительно земли, что связано с защитным действием повторного заземления нулевого защитного проводника и перераспределением напряжений в сети при протекании тока короткого замыкания.

Следовательно, зануление обеспечивает защиту от поражения электрическим током при замыкании на корпус за счет ограничения времени прохождения тока через тело человека и за счет снижения напряжения прикосновения.

В ГОСТе 12.1.030-81 (2001) ССБТ [3] приводятся следующие требования к защитному занулению :

В стационарных электроустановках трехфазного тока в сети с заземленной нейтралью или заземленным выводом однофазного источника питания электроэнергией, а также с заземленной средней точкой в трехпроводных сетях постоянного тока должно быть выполнено зануление.

При занулении фазные и нулевые защитные проводники должны быть выбраны таким образом, чтобы при замыкании на корпус или на нулевой проводник, возникал ток короткого замыкания, обеспечивающий отключение автомата или плавление плавкой вставки ближайшего предохранителя.

В цепи нулевых защитных проводников не должно быть разъединяющих приспособлений и предохранителей.

В цепи нулевых рабочих проводников, если они одновременно служат для целей зануления, допускается применение разъединительных приспособлений, которые одновременно с отключением нулевых рабочих проводников отключают также все проводники, находящиеся под напряжением.

Сопротивление заземляющего устройства, к которому присоединены нейтрали генераторов (трансформаторов) или выводы однофазного источника питания электроэнергией, с учетом естественных заземлителей и повторных заземлителей нулевого провода должно быть не более 2,4 и 8 Ом соответственно, при междуфазных напряжениях 660, 380 и 220 В трехфазного источника питания или 380, 220 и 127 В однофазного источника питания.

При удельном электрическом сопротивлении "земли" ρ выше 100 Ом·м допускается увеличение указанной нормы в ρ/100 раз.

Рассчитаем ток короткого замыкания для цепи представленной на рисунке 14.

|  |  |
| --- | --- |
| Drawing3-Model+words |  |
|
|
|
|
|

Рисунок 14. Принципиальная схема зануления.

Ф1, Ф2, Ф3 – фазные провода;

НРП – нулевой рабочий проводник;

НЗП – нулевой защитный проводник;

ЗА – защитный автомат.

*ρ* – удельное сопротивление проводника, *ρ1* = *ρ2* = 0,028 Ом∙м (алюминий),

*ρ3* = 0,0175 Ом∙м (медь);

*l1* – расстояние от питающего трансформатора, *l1* = 800 м;

*l2* – расстояние от фазного провода до потребителя, *l2* = 50 м;

*l3* – длина НЗП, *l3* = 40 м;

*S* – площадь поперечного сечения провода, *S1* = *S2* = 2 мм2, *S3* = 0,5 мм2;

*Uф* – фазное напряжение, зависящее от типа сети, *Uф* = 127 В;

*RT* – сопротивление обмоток трансформатора, *RT* = 0,316 Ом;

*Rчел* – среднее сопротивление человека, *Rчел* = 1 кОм = 1∙103 Ом;

*k* – коэффициент надежности защитного трансформатора, *k* = 1,4;

полное сопротивление цепи 

ток короткого замыкания  тогда .

Получается, что при  время отключения автомата *tоткл* = 50/7,2 ≈ 6,94 секунды.

**Выводы:**

В рассчитанном мной защитном занулении берется защитный автомат на 4 А, который позволяет защитить человека от поражения электрическим током и пробоя его на корпус.

# 5.4 Пожарная безопасность

Для борьбы с пожаром на предприятии необходимо соблюдать требования пожарной безопасности.

На основании ППБ 01-03 [4] на рабочем месте должны быть соблюдены следующие правила пожарной безопасности :

* Обязательная установка пожарного режима на объекте где располагается рабочее место.
* Все помещения должны быть оборудованным системами и установками противопожарной защиты, средствами пожаротушения.
* На видных местах должны быть вывешены планы пожарной эвакуации
* Курение на рабочем месте не допускается – для курения должны быть оборудованы специальные места
* Обязательно наличие системы противопожарного оповещения.
* Силовые провода не должны быть покрашены, а также проходить внутри газопроводов – во избежание повреждения изоляции и связанных с этим замыканий
* Запрещено разведение в помещениях огня, включение электрооборудование при наличии запаха газа, сушка чего либо на электроотопительных приборах, перекрытие вентиляционных отверстий электрооборудования
* После окончания работы необходимо обесточить все средства вычислительной техники и периферийное оборудование. В случае непрерывного производственного процесса необходимо оставить включенными только необходимое оборудование

Выводы : Предложенные мной меры противопожарной безопасности позволят предупредить возникновение пожара на рабочем месте ПЭВМ, а в случае возникновения пожара эвакуировать персонал.

# 6 Экологическая часть дипломной работы.

# 6.1. Источники СВЧ-излучений.

Сверхвысокочастотные приборы широко распространены и используются в самых разнообразных областях науки и техники – радиолокации, радиоуправлении, связи, телевидении, промышленной электронике, ракетной и атомной технике, различных технологиях по обработке материалов, медицине, физических исследованиях и др.

Примером источников СВЧ-излучения могут служить: локаторы, ретрансляторы, телевышки, вышки сотовой связи, электростанции.

Источниками электромагнитного излучения являются части приборов и изделий, которые способны создавать электромагнитные волны: антенные системы, генераторные лампы, катодные выводы магнетронов, места неплотного сочленения фидерных трактов, , экраны электронных визуальных средств отображения информации; на установках по термообработке материалов – рабочие индукторы и конденсаторы, согласующие трансформаторы, радиолокационные

Существуют два основных опасных случая облучения:

* непосредственно в районе размещения антенны;
* при приближении к оси главного луча на всем его протяжении.

На территории России в настоящее время размещается значительное количество передающих радиоцентров различной принадлежности. Защита населения и природы от их неблагоприятного воздействия является важной задачей экологии.

# 6.2. Защита от СВЧ-излучений.

Защита организма человека от ЭМИ направлена на снижения влияния ЭМИ на организм человека , обеспечивается выбором конкретных методов и средств, учетом их экономических показателей, простотой и надежностью эксплуатации.

В диапазоне СВЧ интенсивность ЭМИ оценивается значениями плотности потока энергии (ППЭ, Вт/м2, мкВт/см2).

Безопасными считают следующие предельно допустимые плотности потока мощности поля СВЧ: 10 мкВт/см2 в течение 7-8 часов, 100 мкВт/см2 в течение 2 часов, 1000 мкВт/см2 в течение 15-20 минут (при обязательном пользовании защитными очками) [20].

Существую следующие способы защиты от ЭМИ:

* Экранирование рабочего места или источника излучения.
* Увеличение расстояния от рабочего места до источника излучения.
* Рациональное размещение оборудования в рабочем помещении.
* Использование средств предупредительной защиты.
* Применение специальных поглотителей мощности энергии для уменьшения излучения в источнике.
* Использование возможностей дистанционного управления и автоматического контроля и др.

Рабочие места следует располагать в зоне минимальной интенсивности электромагнитного поля.

Индивидуальные средства защиты :

* Для защиты глаз от действия СВЧ-излучений используют специальные защитные очки, стекла которых покрыты тонким слоем металла (золота, диоксида олова).
* Защитная одежда изготовляют из металлизированной ткани и применяется в виде комбинезонов, халатов, курток с капюшонами, с вмонтированными в них защитными очками.

Определенными защитными свойствами, оцениваемыми по степени сквозного затухания, обладают некоторые строительные материалы и конструкции из них.

Сквозное затухание обусловлено проникновением электромагнитной энергии через какой-либо материал или изделие из этого материала и определяет кратность защиты. Наибольшим сквозным затуханием обладают сплошные металлические экраны.

Защита, основанная на принципе радиопоглощения, применяется при создании аналогов свободного пространства при антенных нагрузках; при невозможности применения каких-либо других защитных материалов вследствие возможного нарушения технологического процесса; при обкладывании мест стыков внутренней поверхности шкафов с генераторной и усилительной аппаратурой, генерирующей ЭМИ; при закладывании щелей между теми деталями волноведущих структур, которые не могут быть соединены сваркой или пайкой.[20]

Радиопоглощающие материалы разделяются на материалы интерференционного типа, где гашение электромагнитных волн происходит за счет интерференции, и материалы, в которых электромагнитная энергия превращается в тепловую за счет наведения рассеянных токов, магнитогистерезисных или высокочастотных диэлектрических потерь. По электрическим и магнитным свойствам различают диэлектрические и магнитодиэлектрические материалы, по рабочему диапазону частот поглощения – узко- и широкодиапазонные. Со стороны, не подлежащей облучению, радиопоглощающие материалы покрываются, как правило, радиоотражающими, в результате чего характеристики всей радиоэкранирующей конструкции во многом улучшаются. Критерием, характеризующим защитные свойства радиопоглощающего материала, выступает коэффициент отражения по мощности.

Для понижения уровня мощности излучения в тракте (или на открытое излучение) можно применять и аттенюаторы. По принципу действия их разделяют на поглощающие и предельные. Поглощающие являются отрезками коаксиальной или волноводной защиты, в которой помещены детали с радиоизлучающим покрытием.

При нахождении источников СВЧ внутри помещений защиту целесообразно проводить в местах проникновения электромагнитной энергии из экранирующих кожухов, улучшать методы радиогерметизации стыков и сочленений, применять насадки с радиопоглощающей нагрузкой. При внешних источниках применяются различные защитные изделия из радиоотражающих материалов: металлизированные обои, металлизированные шторы, сетки на окнах и другие. Наибольшей эффективностью эти защитные средства обладают в СВЧ диапазоне, на более низких частотах их применение ограничено дифракцией.

В некоторых случаях для защиты от излучений внешних источников используют специальные коридоры со стенками из радиоотражающих материалов, таких как листовой алюминий, латунная сетка и т.п.. Оценку эффективности перечисленных коллективных средств защиты производят по степени сквозного и дифракционного затуханий.

**Выводы:**

Предложенные мной индивидуальные и коллективные средства защиты позволяют защитить людей от ЭМИ и создать достаточно безопасную рабочую обстановку.

# 7. Экономическая часть

Под экономической эффективностью обычно понимают следующее – отношение полученного экономического эффекта к затратам всех факторов производственного процесса (кадры, оборудование, материалы и т.д.).

Экономический эффект – разность между результатами деятельность и затратами на данную деятельность.

В данной работе рассматривается моделирование работы одно и двух лучевых приборов работающих на принципе ЛБВ. Поскольку исследование носит исключительно теоретический характер и может служить только основой для разработки приборов, говорить об экономическом эффекте от производства приборов данного типа преждевременно.

Основными конкурентными преимуществами приборов работающих на принципе двух волнового взаимодействия будут практически вдвое больший, по сравнению с одно волновыми приборами, коэффициент усиления сигнала и расширение полосы пропускания сигнала.

В случае если будет принять решение о разработке устройства, работающего на данном принципе показатель его экономической эффективности будет складываться из следующих затрат : затраты на научно-исследовательскую работу , включающие в себя затраты на оплату труда, оборудование в том числе и спецоборудование, материалы и комплектующие, налоги, затраты на производство, в том числе заработная плата рабочим, материалы и комплектующие, износ инструментов и приспособлений, расходы на эксплуатацию оборудования, затраты на новое оборудование, его монтаж и транспортировку, у потребителя затраты составляют стоимость изделия, стоимость транспортировки и монтажа.

Учитывая затраты на разработку, производство, себестоимость изделия и затраты потребителя можно будет рассчитать коэффициент экономической эффективности для конкретного устройства

# 8. Выводы

На основании проведенных исследований взаимодействия потоков с РЗС можно сделать следующие выводы:

* Проведено исследование усиления высокочастотного сигнала в режиме ЛБВ усилителя с положительной дисперсией при взаимодействии волн электронного потока с высокочастотным полем нулевой и «-1» пространственных гармоник резонансных замедляющих систем с положительной и отрицательной дисперсией.
* По мере увеличения коэффициента связи между потоками частотная характеристика коэффициента усиления пропорционально возрастает, полоса усиливаемых частот расширяется. Образуются два максимума в высокочастотной и низкочастотной областях.
* Увеличение связи между потоками приводит к появлению изрезанности амплитудно-частотной характеристики, обусловленной влиянием электронной среды и появлением «горячего» рассогласования.
* Увеличение тока быстрого пучка при фиксированном значении тока медленного потока ведет к смещению максимума частотной характеристики коэффициента усиления в сторону нижних частот. Увеличение тока только медленного пучка максимум частотной характеристики коэффициента усиления смещается в высокочастотную область.
* Показано, что при равномерном увеличении токов пучков и связи между потоками при двулучевом взаимодействии можно получить равномерное усиление практически во всей полосе прозрачности РЗС и увеличения амплитуды усиления. По принципу суперпозиции вклад в усиление на верхних частотах вносит взаимодействие с медленным потоком, а в низкочастотной области - взаимодействие с быстрым потоком. Вклад в увеличение мощности, при повышении токов пучков, в основном вносит взаимодействие с быстрым пучком.

# 9. Список литературы:

1. Трудовой кодекс Российской Федерации 30 декабря 2001 года N 197-ФЗ
2. ГОСТ 12.0.003-74 (99) ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
3. ГОСТ 12.1.030-81 (2001) ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.
4. ППБ 01-03 Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.
5. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы
6. Канавец В.И. Электронно-позитронное вещество: от позитрония до сверхжидкости и шаровой молнии. М.: Изд-во «Педагогическое общество России». 2009.
7. Канавец В.И., Мозговой Ю.Д., Хриткин С.А. Обменное взаимодействие электронных и позитронных сгустков // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 4. С. 500-505.
8. Бугаев С.П., Канавец В.И., Кошелев В.И., Черепенин В.А. Релятивистские многоволновые СВЧ-генераторы. Новосибирск: Наука. 1991.
9. В.И. Канавец, Ю.Д. Мозговой, А.И. Слепков. Излучение мощных электронных потоков в резонансных замедляющих системах. М.: Изд. МГУ, 1993.
10. Канавец В.И., Мозговой Ю.Д., Слепков А.И., Хриткин С.А. Четырехволновое взаимодействие потока и поля в резонансном периодическом волноводе. //Радиотехника и электроника. 1997. Т. 42, №3, С. 341-347.
11. Александров А.Ф., Рухадзе А.А. Лекции по электродинамике плазмоподобных сред. М.: МГУ. 1999.
12. Ю.Д. Мозговой, С.А. Хриткин. Волновые процессы в микроволновой электронике. М: МИЭМ, 2012.
13. Азов Г.А., Хриткин С.А. Моделирование спиральной замедляющей системы мощной лампы бегущей волны // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55. № 3. С. 369-373.
14. Азов Г.А., Хриткин С.А. Моделирование выходных характеристик мощных спиральных ламп бегущей волны // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. № 6. С. 686-690.
15. В.И. Канавец, Ю.Д. Мозговой, А.И. Слепков. Излучение мощных электронных потоков в резонансных замедляющих системах. - Москва.: Издательство МГУ, 1993 г. - 160 с.
16. Д.И. Трубецков, А.Е. Храмов. Лекции по СВЧ электронике для физиков (том 1). – Москва.: Издательство Физматлит, 2003 г. – 496 с.
17. В.М. Лопухин. Возбуждение электромагнитных колебаний и волн электронными потоками. – Москва 1953 г
18. В.И. Канавец, Ю.Д. Мозговой, А.И. Слепков, С.А. Хриткин. Взаимодействие затухающей обратной волны периодического волновода с медленной волной электронного потока. – Радиотехника и электроника. 1997 г., том 42. № 7. стр. 857-862
19. <http://grachev.distudy.ru/Uch_kurs/sredstva/Templ_1/templ_1_6.htm>

1. \*\* указывается в случае назначения консультанта [↑](#footnote-ref-1)