

Министерство образования и науки Российской Федерации

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

Кафедра физики открытых систем

**Обзор основных элементов высокомошных СВЧ систем**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

Студента 4 курса 431 группы

направления 03.03.03 «Радиофизика»

факультета нелинейных процессов

Синицына Павла Валерьевича

Научный руководитель  
доцент, к.ф.-м.н

\_\_\_\_\_

С.А. Куркин

Зав. кафедрой  
д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_

А.А. Короновский

Саратов 2017 г.

## ВВЕДЕНИЕ

В XX веке развитие СВЧ электроники привело к созданию множества приборов, применяемых в различных областях, таких как радиолокация, связь, телевидение, медицина, ускорительная техника, космическая промышленность и т.д.

Впервые в России в 1920 г. С.И. Зилитинкевичем были обнаружены когерентные СВЧ-колебания в триодах при положительном потенциале на сетке и отрицательном на аноде.

Н.Д. Девятковым и его сотрудниками в 1938-1939 гг. были разработаны новые типы металлостеклянных триодов и коаксиальные генераторы на них.

К середине 50-х годов были заложены основы для создания отечественных усилительных многоконтурных клистронов в широком диапазоне длин волн – от коротковолновой части сантиметрового диапазона до дециметровых волн на уровне мощности от единиц ватт (в непрерывном режиме) до десятков мегаватт (в импульсном режиме). Также в 1950-х годах усилия по контролю термоядерного синтеза для производства энергии привели к необходимости разработки новых трубок с использованием гиротронов на частотах, более чем 100 ГГц.

Сверхвысокочастотная (СВЧ) электроника многообещающая технология в различных отраслях. Системы СВЧ строятся, изучаются и применяются не только в США, России и западноевропейских странах, таких как Великобритания, Франция, Германия и Швеция, но также и в Китае и развивающихся странах, таких как Индия, Тайвань и Южная Корея. С появлением средств, конкретно предназначенных для изучения эффектов высокомошных СВЧ систем и развитием технологий, основными вопросами стали их эксплуатация, обеспечение безопасности обслуживающего персонала и вспомогательного электронного оборудования от воздействия высокомошных импульсов. Разделять систему на определенные компоненты и оптимизировать их по отдельности больше нельзя. При решении задачи каждый начинает с понимания ее ограничений. Затем определяют

компоненты подсистемы и то, как они взаимодействуют, а также принимают во внимание требования вспомогательного оборудования.

Данная работа является обзорной, в ней будут систематизированы данные основных систем и подсистем высокомошной СВЧ электроники. Также будут описаны основные подходы для описания, построения и преобразования СВЧ систем. На данный момент существует много литературы, в особенности зарубежной, посвященной сформулированной проблеме, поэтому обзор является актуальной задачей.

Цель данной работы - показать из чего состоят отдельные компоненты высокомошной СВЧ системы, и как эти компоненты будут взаимодействовать между собой.

## 1. Системный подход к СВЧ электронике

Подсистемы СВЧ (рис. 1) выполняют следующие функции:

1. Подсистема первичного источника питания генерирует относительно низкий электрический ток в длительном или непрерывном режиме.
2. Подсистема импульсной мощности потребляет электроэнергию с низким энергопотреблением / длительным импульсом, сохраняет ее, а затем отключает ее с помощью мощных электрических импульсов гораздо меньшей длительности.
3. Микроволновый источник преобразует кратковременные электрические импульсы высокой мощности в электромагнитные волны.
4. Антенна направляет выходящие электромагнитные волны, существенно сжимая эти волны в пространстве в более жесткий интенсивный луч.

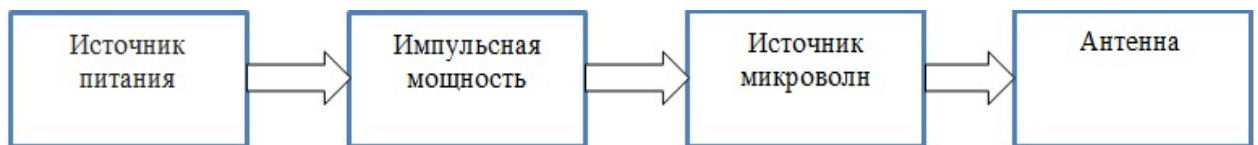


Рисунок 1. Компоненты СВЧ системы

Чтобы получить представление о сложном характере проектирования системы, необходимо чтобы приложение обеспечивало набор общих требований, которые определяют следующее:

- (1) пиковая энергия на импульс, который должен быть доставлен к цели в заданном диапазоне,
- (2) частота повторения импульсов,
- (3) длительность всплеска импульсов,
- (4) частота повторения всплесков,
- (5) объем системы,
- (6) масса системы, и
- (7) максимальная угловая скорость нарастания для перенаправления пучка.

Разработка системы, которая удовлетворяла бы этим семи требованиям, имеет множество вариантов.

## 2. Общий взгляд на компоненты системы

Номенклатура, которую мы будем использовать, показана на рисунке 2. Вся система состоит из подсистем. Общий набор подсистем - это источник питания, импульсная мощность и т. д. Как показано на рисунке 2. каждая подсистема состоит из отдельных компонентов. В свою очередь, компоненты состоят из отдельных частей; например, частями генератора Маркса были бы конденсаторами и резисторы. В антенне компоненты представляют собой постамент, блюдо, а также рупорный облучатель.

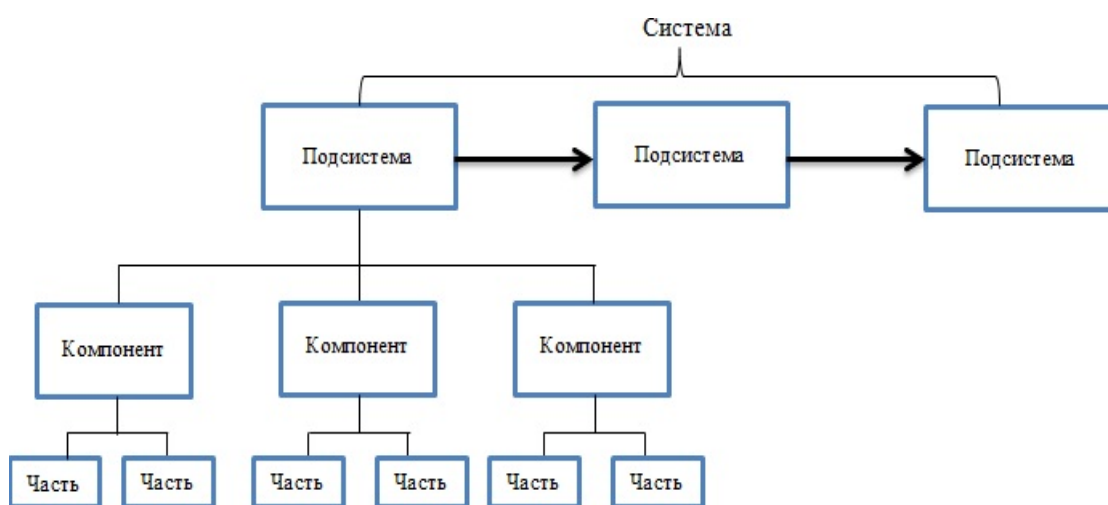


Рисунок 2. Системы состоят из подсистем (источник питания, импульсная мощность и т.д.), у которых есть компоненты (аккумулятор, генератор Маркса и т.д.), состоящие из частей (конденсаторы и т.д.)

### 3. Связующие компоненты системы

#### 3.1. Источник питания

Существует много технологий для выбора мощности. На рисунке 3 показан набор опций, которые можно использовать для обеспечения непрерывной мощности источника питания для нескольких импульсных параметров мощности, упомянутых справа от рисунка, что в конечном итоге приведет к использованию микроволнового источника.

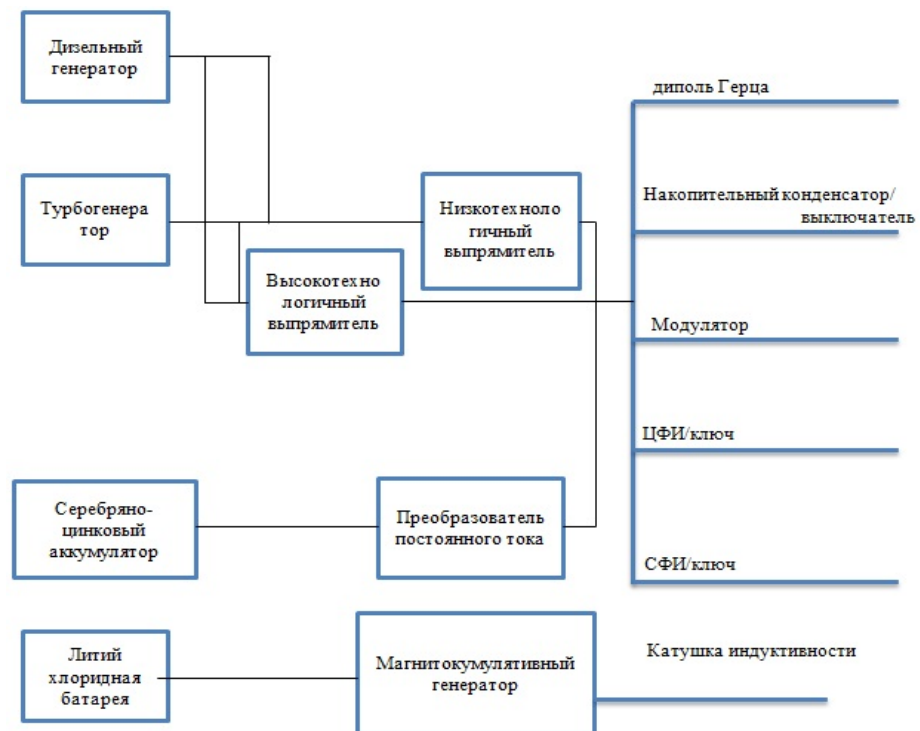


Рисунок 3. Соединения источника питания для непрерывной мощности

Использование термина «непрерывный» несколько охраняется, потому что подсистема внизу рисунка, которая включает в себя взрывчатый магнитокумулятивный генератор (MCG), является чисто однозарядной подсистемой. Подчеркнем, что диаграмма не является схемой соединений для первичной силовой подсистемы, а представляет собой возможные варианты компонентов в основной силовой подсистеме. Общим для многих систем является использование генератора, работающего от двигателя внутреннего сгорания, такого как дизельный генератор или турбогенератор, но также можно долго управлять системами с батареями. В любом случае общая

особенность этих подсистемных опций заключается в том, что либо генератор внутреннего сгорания переменного тока (AC), либо батарея постоянного тока (DC) обеспечивает долговременную или непрерывную мощность, которая преобразуется в выход постоянного тока, функционирующего как входной сигнал импульсной мощности.

### **3.2. Импульсная мощность**

Импульсная мощность – термин, описывающий генерацию коротких электрических импульсов, которые связаны с очень высокой электрической мощностью и, следовательно, с высоким напряжением и амплитудой тока.

Одним из основных источников импульсного высокого напряжения является генератор Маркса, также называемый генератором Аркадьева – Маркса.

Принцип его действия основан на зарядке электрическим током соединённых параллельно (через резисторы) конденсаторов, соединяющихся после зарядки последовательно при помощи различных коммутирующих устройств (например, газовых разрядников или тригатронов). Таким образом, выходное напряжение увеличивается пропорционально количеству соединённых конденсаторов. Эти схемы нашли очень широкое применение в технике мощных импульсов. В технике генерирования мощных наносекундных импульсов генераторы Маркса (ГМ) используются в двух случаях.

Во-первых, они являются зарядными устройствами для накопительных линий генераторов. В этом случае они работают в микросекундном диапазоне времени. Накопительные линии затем разряжаются и генерируют уже наносекундные импульсы. Напряжение таких генераторов достигает десятка мегавольт. Во-вторых, при определенной компоновке сам ГМ может генерировать непосредственно на нагрузку импульс длительностью  $10^{-8}$  с или даже  $10^{-9}$  с. Максимальное напряжение, как правило, не превышает 1 МВ.

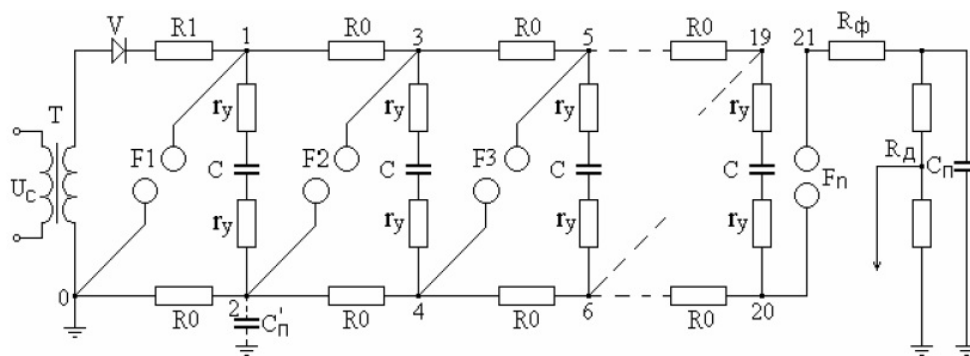


Рисунок 4. Схема генератора Аркадьева Маркса

### 3.3 Источники микроволн

Сверхвысокочастотными колебаниями (СВЧ) называют колебания с частотой  $f > 300$  МГц или длиной волны  $\lambda < 1$  м. Принято следующее деление на диапазоны по длине волны и частоте:

дециметровые волны 1 м—10 см (300—3000 МГц)

сантиметровые волны 10 см — 1 см (3—30 ГГц)

миллиметровые волны 1 см — 1 мм (30—300 ГГц)

субмиллиметровые волны 1 мм—0,1 мм (300—3000 ГГц)

К субмиллиметровым волнам примыкает диапазон оптических волн (инфракрасное, видимое и ультрафиолетовое излучения).

Электронные приборы СВЧ по характеру энергообмена между электронным потоком и колебательной системой (или полем) подразделяются на приборы типа О и типа М.

В приборах типа О происходит преобразование кинетической энергии электронов в энергию СВЧ-поля в результате торможения электронов этим полем. Магнитное поле или не используется совсем, или применяется только для фокусировки электронного потока и принципиального значения для процесса энергообмена не имеет. В приборах типа М в энергию СВЧ-поля переходит потенциальная энергия электронов.

Электронные приборы СВЧ по продолжительности взаимодействия с СВЧ-полем подразделяются на приборы с кратковременным (прерывным) и длительным (непрерывным) взаимодействием. В первом случае используется



взаимодействие электронов с СВЧ-полем резонаторов, а во втором — с бегущей волной.

Приборы с кратковременным взаимодействием одновременно являются приборами типа О (пролетные и отражательные клистроны). Приборы с длительным взаимодействием могут быть как типа О—лампа бегущей волны типа О (ЛБВО), лампа обратной волны типа О (ЛОВО), так и типа М—лампа бегущей волны типа М (ЛБВМ), лампа обратной волны типа М (ЛОВМ) магнетрон, платинотрон и др.

Примером прибора с кратковременным взаимодействием типа О является отражательный клистрон.

### **3.4. Антенны.**

Антенна – устройство, предназначенное для приема и излучения радиоволн.

Наиболее распространенный тип антенн – апертурные.

К апертурным относятся антенны, у которых излучающая система выполнена в виде плоской поверхности, ограниченной замкнутой кривой (чаще всего прямоугольником или окружностью). Возбуждение антенны стараются осуществить таким образом, чтобы поле в апертуре оказалось синфазным, что обеспечивает остронаправленное излучение, максимум которого совпадает нормалью к апертуре.

К апертурным антеннам относятся волноводные, рупорные, линзовые и зеркальные антенны.

#### 4. Основные направления развития СВЧ систем

Для военных нужд, которые обычно требуют мобильности управляющих параметров для системы, как правило, требуют средней мощности и объем бортовой системы. Вес менее важен, что может показаться нелогичным. СВЧ оружие, как правило, устанавливается на уже существующую платформу в пространстве, ранее зарезервированную для другого оружия.

Генератор сжатия потока (ГСП) и магнито-кумулятивный генератор (МКГ) были широко развиты в России и США, и в настоящее время широко изучаются. МКГ и ГСП работают при изменяющихся во времени полного сопротивления значительно ниже  $1\Omega$ , производя очень высокие токи при низких напряжениях.

В 1990-е годы поиски высокой мощности, СВЧ с низким сопротивлением источников для лучшего соответствия ГСП и МКГ, привели к созданию магнитно изолированный линейным осцилляторам (МИЛО), которые имеют импеданс  $\sim 10$ . Но МИЛО не перестраиваемый, тяжелый и требует более сложной антенны для излучения. Таким образом, россияне решили использовать источник микроволнового излучения высокой мощности - виркатор, у которого, хотя и выше импеданс, но ниже, чем у других российских источников, и генератор на лампе обратной волны (ГЛОВ). Преимуществами виркаторов являются его небольшие размеры и простое, недорогое производство.

## 5. Обзор усовершенствованных СВЧ систем.

Усовершенствованную систему будем называть суперсистемой, которой мы предварительно задали требования системы верхнего уровня, показанные в таблице 3.

Таблица 3. Требования системы

Параметр	Значение
Мощность излучения	500 МВт
Длительность импульса	10-20 нс
Частота повторения импульсов	500 Гц
Частота	Диапазон частот X (5,2-11 ГГц)
Коэффициент усиления антенны	40-50 дБ
Межпакетный период	10 сек

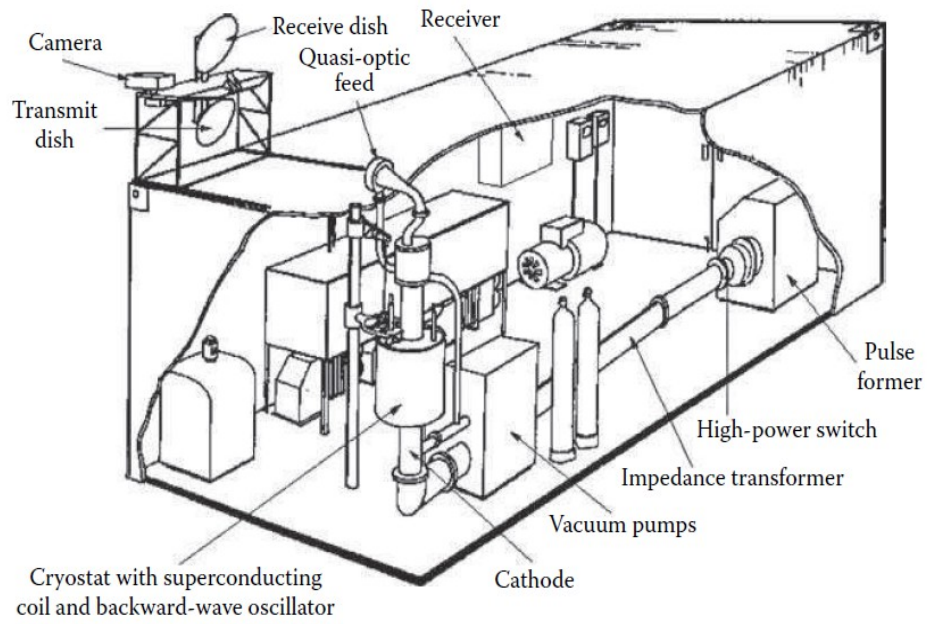
Все эти требования регулируют выход системы. Там нет явных ограничений на размер или массу; тем не менее, мы предполагаем, что система будет мобильной наземной станцией связи, так что выбор платформы будет в конечном счете, ограничивать размеры и массу системы. Работа в пакетном режиме имеет важное значение, если суперсистемы должны иметь переносной размер и вес.

### 5.1. НАГИРА: Прототип для суперсистемы.

Высокомощный СВЧ радар НАГИРА. Размещается в двух контейнерах, кабина передатчика и контейнера операций. SINUS ускоритель в системе NAGIRA производит электронный пучок 600 кВ и 5 кА в 10-нс импульсе с частотой повторения 150 Гц. Этот 3-ГВт электронный луч подается в генератор на лампе обратной волны (ГЛОВ), чтобы генерировать выходной сигнал радиочастот в X-диапазоне с мощностью 500 МВт, что предполагает мощность ЛОВ около 17%.

Компоновка системы НАГИРА в передающем устройстве кабины показана на рисунке 5. Часть системы на правом, формирующей линии,

высокий выключатель питания и трансформатор импеданса, которые включают импульсный генератор энергии.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В написании выпускной квалификационной работы был проведен обзор и изучена специальная литература, включающая в себя статьи и монографии по производству и эксплуатации высокомошных СВЧ систем. Рассмотрены основные компоненты систем, направления развития СВЧ систем. В данном обзоре рассмотрено около тридцати литературных источников.

Можно сделать вывод, что любая СВЧ система состоит из источника питания, импульсной мощности, источника микроволн и антенны, а также различного рода сопутствующая электроника: магнитные системы, системы охлаждения и т.д.

Каждое из этих направлений, будь то создание источника питания или импульсной мощности, является целым научным направлением, в каждом направлении есть свои достижения, задачи и проблемы.

Сегодня целью ученых, разрабатывающих СВЧ электронику и СВЧ системы в целом, является оптимизация всех уже известных узлов, повышение мощностей, стабильности работы, высокой эффективности, достижение высокого КПД, а также миниатюризация. Мощная СВЧ электроника является одним из основных векторов развития электроники в целом.