

1575829

На правах рукописи  
УДК 621.391.82

АБДАЛСАЛАМ МУХАММАД ГХАССАН

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ И  
РАЗРАБОТКА РАДИОПЕРЕДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА  
СИСТЕМЫ АКТИВНЫХ ПОМЕХ

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и  
устройства радионавигации, радиолокации и телевидения.

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их  
технологии.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

*Защещена 19.12.2001г.*

г. Москва - 2001

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом  
Университете им. Н. Э. Баумана

Научные руководители

- кандидат технических наук,  
доцент КАЗАНЦЕВ В. И.  
- кандидат технических наук,  
доцент ХАРЧЕНКО В. Ф.

Оппоненты

- доктор технических наук,  
профессор, НИКОЛАЕВ А. И.  
- кандидат технических наук,  
доцент МАРЮХА В. П.

Ведущая организация

-АООТ Конструкторское бюро  
«Кунцево».

2001г. в 10 часов на заседании  
в МГТУ им. Н. Э. Баумана по  
ул., д. 5.

библиотеке МГТУ им. Н. Э.

11 - 2001 г.

1575829

ВЛАСОВ И. Б.

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1575829

Абдусалам М. Г. Исследован

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время за рубежом большое внимание уделяется средствам постановки активных помех, предназначенных для уменьшения боевой эффективности РЛС ПВО, обеспечивающих радиолокационной информацией зенитно-ракетные войска и истребительную авиацию. Использование средств постановки активных помех РЛС ПВО является основным условием выживания боевых самолетов в случае боевых действий. Опыт последних локальных войн показал, что средства радиоэлектронного подавления (РЭП) экономически выгодны.

Активные помехи формируются передатчиками, устанавливаемыми на земле или на летательных аппаратах и кораблях.

Наиболее распространенными способами РЭП являются использование средств имитации ложных целей, создание шумовых и имитирующих помех, применение средств искажения среды распространения радиоволн, алгоритмические воздействия и т. п. Весьма важной и сложной для реализации оказывается задача генерации помехового сигнала, выполняемая в радиопередающем устройстве.

Современные требования к радиопередающим устройствам СВЧ для систем радиоэлектронной борьбы заставляют искать пути повышения эффективности, надежности, снижения массы и габаритных размеров аппаратуры. В первую очередь это относится к высоковольтным источникам питания, которые пока оказывают основное влияние на указанные параметры.

СВЧ электровакуумные приборы являются наиболее универсальными приборами для усиления и генерирования мощных СВЧ-колебаний в системах РЭП. Обычно это клистроны, магнетроны и ЛБВ, а также некоторые менее известные типы приборов. Актуальной задачей является правильный выбор типа используемого генераторного прибора.

При проектировании мощных выходных каскадов современных радиопередающих устройств (РПУ) на электровакуумных приборах возникает проблема получения высоких питающих напряжений. К таким высоковольтным источникам питания (ВИП) предъявляются весьма жесткие требования: высокие выходные напряжения и мощности, малые уровни пульсаций выходного напряжения.

Представляются весьма важными исследования направленные на создание таких ВИП которые обеспечивают также получение возможности модуляции генерируемых колебаний по фазе и по уровню мощности.

**Целью работы** является обоснование требований, предъявляемых к передатчику помех для радиоэлектронного подавления самолетных РЛС с синтезированной апертурой антенны (на примере системы «Джистарс»), исследование возможности создания и разработка такого передатчика, в том числе разработка его выходного усилительного блока, предназначенного для усиления по мощности помеховых СВЧ сигналов.

**Задачи диссертационной работы.** Основными задачами работы являются:

1. Обоснование состава вертолетного комплекса РЭБ.
2. Расчет управляемого по мощности передающего устройства вертолетной станции активных помех.
3. Разработка требований к передающей антенной системе вертолетной станции активных помех.
4. Оценка эффективности предложенных передающего устройства и антенной системы.
5. Выбор элементной базы для выходных усилителей передающего устройства, выполняемого по схеме АФАР.
6. Обоснование возможности использования в выходных усилителях быстрого электронного управления фазой выходного сигнала в интересах управления положением луча АФАР и управления уровнем генерируемой мощности.
7. Разработка высокоэффективных малогабаритных быстро управляемых вторичных источников электропитания выходных усилителей, исследование их параметров и характеристик, создание методов их расчёта.
8. Экспериментальная проверка правильности найденных решений.

**Научная новизна.**

1. Исследованы параметры и проанализированы возможности РЛС АРУ-3 системы «Джистарс», сформулированы требования по подавлению РЛС АРУ-3 «Джистарс».
2. Сформулированы требования, предъявляемые к передатчику помех на ЛБВО по усилению, мощности и частоте.
3. Проанализированы с помощью линейной теории ЛБВО влияния основных дестабилизирующих факторов на фазовую стабильность усилительных трактов СВЧ на ЛБВО: нестабильных питающих напряжений, в том числе и с учетом накладываемых на них пульсаций. При этом предложен новый метод управления ДН антенны передатчика путем изменения или регулирования ускоряющего или управляющего напряжения источника питания ЛБВО.
4. Проведен анализ требований, предъявляемых к современным источникам электропитания передатчиков на ЛБВ. Выбрана и обоснована схема построения источника. Исследованы характеристики резонансных преобразователей напряжения, являющихся основными функциональными единицами источника питания.
5. Разработаны высокоэффективные алгоритмы управления работой резонансных инверторов, стабилизации вырабатываемых напряжений и управления ими.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Анализ возможности РЛС с синтезированной апертурой антенны как объектов РЭБ.
2. Оценка эффективности работы управляемого по мощности передатчика помех в системе РЭБ.

3. Построение передатчика помех по схеме АФАР с выходными усилительными каскадами на ЛБВ типа О и с управлением уровнем мощности и фазой выходных колебаний с помощью управляемого источника вторичного электронитания.
4. Разработка принципов построения быстроуправляемых малогабаритных высоковольтных источников питания на основе резонансных инверторов напряжения с преобразованием частоты до 100..200кГц.
5. Разработка практических методов анализа и расчёта параметров и характеристик резонансных инверторов.
6. Создание высокоэффективных алгоритмов управления работой резонансных инверторов, стабилизации вырабатываемых ВЧ напряжений и управления ими.

#### **Практическая часть, и реализация результатов работы.**

В МГТУ им. Н. Э. Баумана (факультет радиоэлектроники и лазерной техники), при участии автора был разработан, изготовлен и исследован источник питания для ЛБВ сантиметрового диапазона, изготовлен и исследован усилитель мощности СВЧ сигналов на ЛБВО. Данная работа имеет практическую значимость для Дамасского технического центра. Алгоритмы и основные результаты работы докладывались в Сирии, поэтому руководство Сирийского научно-технического центра приняло решение о начале таких исследований и разработало план первоочередных исследовательских и конструкторских работ при участии МГТУ им. Н. Э. Баумана.

**Апробация результатов работы.** Материалы и основные результаты работы докладывались на научно - технической конференции, посвященной 170 – летию МГТУ им. Баумана (г. Москва, 2000г.) и в Дамасском техническом центре (институт электронного исследования) 2001г.

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликованы 4 печатные работы, из которых две опубликованы в России и две в Сирии.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 166 страниц, включая 64 рисунка, 2 таблицы и список использованных литературных источников, включающий 93 наименования.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели работы и ее научная новизна, приведены основные положения, выносимые на защиту, дано краткое содержание работы.

**В первой главе** работы рассмотрены различные критерии эффективности радиоэлектронной борьбы при радиоэлектронном подавлении радиоэлектронных средств различного назначения. Показано, что

обнаружители приемных устройств подавляемых РЛС, входящих в систему ВТО, применяют критерий Неймана-Пирсона.

Проанализированы различные системы ВТО и показана общность их принципа действия, заключающаяся в реализации концепции «выстрел-поражение». Количество типов ВТО определяется многообразием целей, характеризующихся объективными признаками, дающими возможность выделять их на земной поверхности среди других целей. К таким признакам относятся излучение, движение, ведение стрельбы и радиолокационная контрастность целей.

В настоящее время в США создана качественно новая радиолокационная система воздушной разведки наземных целей и управления нанесением ударов «Джигстарс», рассчитанная на одновременное использование в интересах ВВС и сухопутных войск. Она обеспечивает обнаружение, классификацию и слежение за бронетанковой техникой на всю глубину оперативного построения войск в полосе одного - двух армейских корпусов независимо от погодных условий и времени суток. При этом определяются координаты движущихся целей с точностью, достаточной для их поражения на больших дальностях обычным оружием классов «воздух-земля» и «земля-земля» (рис.1).

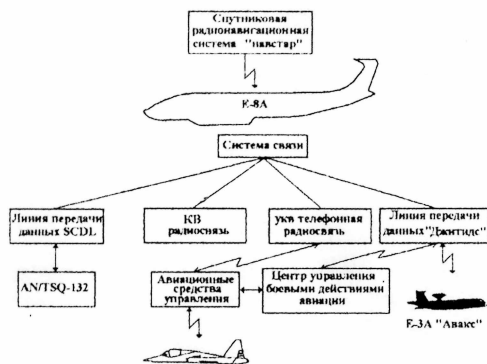


Рис.1.

#### Схема связи самолета Е-8

Проведена оценка тактико-технических данных РЛС АРУ-3 системы «Джигстарс» и предъявлены требования к комплексу радиоэлектронной борьбы для подавления этой системы. По результатам расчетов определены задачи на исследование:

1. Обоснование состава вертолетного комплекса РЭБ.
2. Расчет управляемого по мощности передающего устройства вертолетной станции активных помех.

3. Разработка требований к передающей антенной системе вертолетной станции активных помех.

4. Оценка эффективности предложенных передаточного устройства и антенной системы при их работы в системе РЭБ.

При оценке системы ВТО «Джистарс» получены следующие результаты:

1. Система воздушной разведки наземных целей и управления нанесением ударов «Джистарс» имеет самолетную РЛС с синтезированным раскрывом антенны и высокой разрешающей способностью по угловым координатам и дальности ( $I_r = I_\phi = 3\text{ м}$ ).

2. Для радиоэлектронного подавления такой РЛС необходима станция активных помех, создающая инверсную помеху, с энергетическим потенциалом  $P_{пер\ n} G_n = 10^5\text{ Вт}$ .

3. Создание инверсной помехи ухудшает разрешающую способность самолетной РЛС системы «Джистарс» с  $I_\phi = 3\text{ м}$  до  $I_\phi = 750\text{ м}$ .

4. Для прикрытия боевых порядков наземных целей от воздействия системы «Джистарс» необходимы вертолеты – постановщики помех, размещаемые через 750 метров.

5. Применение станций активных помех с энергетическим потенциалом  $10^5\text{ Вт}$  снижает вероятность поражения целей управляемым оружием системы «Джистарс» с  $P_{пор} = 0,8 - 0,85$  до  $P_{пор} = 0,12$ .

**Во второй главе** Вторая глава посвящена рассмотрению структуры вертолетного комплекса РЭБ, предназначенного для радиоэлектронного подавления РЛС АРУ-3 системы «Джистарс». Такой комплекс РЭБ должен включать в себя системы информационного обеспечения для добывания информации о различных системах ВТО; систему управления комплексом, систему исполнительных устройств, осуществляющих радиоэлектронное подавление различных элементов ВТО (РЛС, головки самонаведения ракет) и систему контроля работоспособности и эффективности комплекса РЭБ.

Сформулированы основные требования к передающей АФАР станции помех. Показано, что система РЭП должна излучать сигналы помех против наиболее опасных РЛС или излучать соответствующий сигнал противодействия обратно в том направлении, с которого сигнал был принят. Основной задачей РЭП является одновременное подавление множества опасных объектов различных типов.

Следовательно:

1. В состав вертолетного комплекса РЭБ, подавляющего систему «Джистарс», необходимо включить системы: информационного обеспечения, исполнительных устройств, контроля.

2. В системе исполнительных устройств требуется передающее устройство с мощностью  $P_{пер\ n} = 500\text{ Вт}$ , способное вырабатывать инверсную по мощности помеху.

3. Требования достижения высокого энергетического потенциала станции

активных помех ( $P_{пер\ n} \cdot G_{II} = 10^5$  Вт), требуемого для эффективного радиоэлектронного подавления самолетной РЛС системы «Джистарс» может удовлетворить активная передающая ФАР.

Таким образом, для повышения эффективности РЭП необходимо иметь в системе СВЧ - прибор для управления диаграммой направленности антенн при регулировании фаз сигналов на входе СВЧ - прибора.

Предложена показанная на рис.2 структурная схема одного из вариантов системы РЭП, представляющего собой автоматический ретрансляционный передатчик активных помех на основе АФАР с двумя диаграммообразующими схемами.

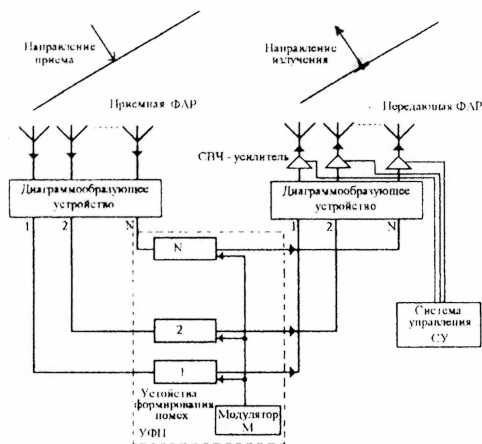


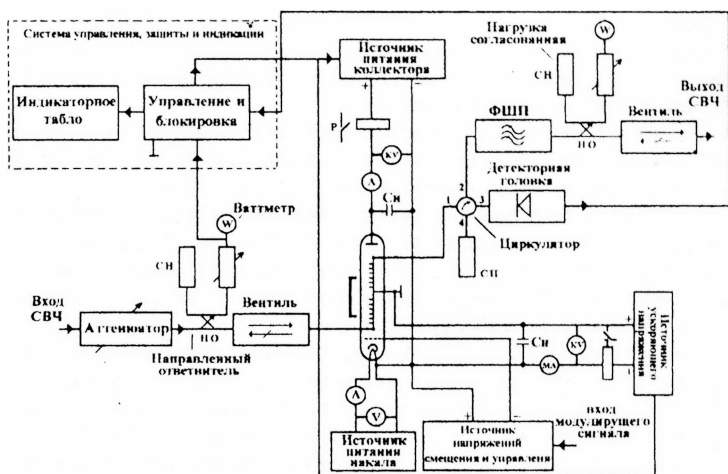
Рис.2.

Структурная схема системы РЭП с АФАР

**В третьей главе** рассматриваются общая структурная схема радиопередающего устройства (РПУ) системы РЭП, работающей в режиме ответной помехи, и основные элементы ее схемы, определяются технические параметры передатчика радиоэлектронного подавления.

На основе рассмотрения усилителей мощности и основных характеристик мощных генераторных приборов СВЧ на твердотельных и на электровакуумных приборах появилась возможность прийти к выводу о том, что в настоящее время для выходных каскадов радиопередающих устройств систем РЭП целесообразно использование ламп бегущей волны типа О. ЛБВО имеет широкую полосу рабочих частот, высокую выходную мощность,

В четвертой главе рассматриваются принципы работы и основные характеристики ЛБВО. Схема структурная электрическая усилителя на ЛБВ показана на рис.3. Она включает в себя лампу бегущей волны, источники вторичного электропитания, входной и выходной тракты и систему управления, защиты и индикации (СУЗИ). Входной тракт состоит из аттенюатора, предназначенного для регулировки входного уровня мощности, подаваемого на вход ЛБВ, а также направленного ответвителя, сигнал с которого измеряется по ваттметру и подается в блок СУЗИ для контроля качества входного сигнала и его уровня.



### Структурная схема усилителя на ЛБВ

Отраженная от нагрузки (антенны) мощность передается в плечо 3, где включена детекторная головка, сигнал с которой пропорционален уровню отражений от нагрузки и подается в блок СУЗИ. В 4-е плечо циркулятора включена согласованная нагрузка. Установка во входном и выходном трактах вентилей совместно с циркулятором защищает ЛВВ от больших по амплитуде

отраженных колебаний, существенно повышает устойчивость усилителя на ЛБВ и уменьшает уровень паразитных колебаний. Между выходным плечом циркулятора и СВЧ выходом энергии включен направленный ответвитель, используемый для контроля уровня выходной мощности.

На блок системы управления, защиты и индикации СУЗИ могут поступать команды оператора на включение и выключение усилителя (не показано на рисунке). По сигналам, вырабатываемым этим блоком, производится контроль работоспособности остальных блоков и систем усилителя. Информация об их состоянии высвечивается на индикаторном табло.

Индикаторное табло (ИТ) обычно закрепляется на передней панели корпуса усилителя и служит для высвечивания цифровой и буквенной информации о входных и выходных электрических колебаниях и работоспособности основных узлов усилителя.

Для того, чтобы лампа нормально работала, на нее надо подать несколько напряжений питания. Обычно ЛБВО объединяется с преобразователем напряжения (источником вторичного электропитания), на вход которого подается одно напряжение от шин питания, и который вырабатывает разные напряжения, требуемые для работы ЛБВО.

Подогреватель катода питается либо постоянным, либо переменным током. Использование для подогрева катода переменного тока может вызывать небольшую фазовую модуляцию, что ухудшает фазовую стабильность усилителя. Один из выводов подогревателя соединен с катодом ЛБВО. Для некоторых типов катода недопустимо применение постоянного тока для питания подогревателя, так как возникающие при этом явления электролитического характера, несмотря на свою замедленность, приводят все же к снижению срока службы прибора.

С использованием линейной теории ЛБВО проведено количественное исследование влияния уровня пульсаций и нестабильности питающих напряжений на фазовую стабильность усилительных трактов СВЧ на ЛБВО. Зависимости отклонений фазы колебаний на выходе усилительного тракта от изменений ускоряющего и управляющего напряжений получаются на основе дифференцирования выражения для фазового сдвига по соответствующим напряжениям. Для ускоряющего и управляющего напряжений в этих приближениях получено:

$$\Delta\varphi_{\text{УСК}} \approx -0,58\pi V \left( \frac{\Delta U_{\text{УСК}}}{U_{\text{УСК}}} \right), \text{ рад}, \quad (1)$$

$$\Delta\varphi_{\text{УПР}} \approx 0,5\pi V \left( \frac{\Delta U_{\text{УПР}}}{U_{\text{УПР}}} \right), \text{ рад}, \quad (2)$$

где  $\Delta\varphi_{\text{УСК}}$  и  $\Delta\varphi_{\text{УПР}}$  - фазовые отклонения, вызванные изменениями ускоряющего и управляющего напряжений соответственно,  $\frac{\Delta U_{\text{УСК}}}{U_{\text{УСК}}}$  и  $\frac{\Delta U_{\text{УПР}}}{U_{\text{УПР}}}$  - относительные

изменения ускоряющего и управляющего напряжений соответственно,  $N = \frac{l \cdot l}{v_e}$

- электрическая длина замедляющей системы (ЗС), зависящая от ее геометрической длины  $l$ , рабочей частоты  $f$  и скорости электронного потока  $v_e$ ,  $C = \sqrt{R_{сн} I_0 / (4U_{уск})}$  - параметр усиления Пирса, зависящий от постоянной составляющей тока конвекции через ЗС ЛБВО  $I_0$ , сопротивления связи ЗС  $R_{сн}$  и ускоряющего напряжения  $U_{уск}$ .

Одинаковые относительные приращения ускоряющего и управляющего напряжений приводят к разным изменениям фазового сдвига колебаний на выходе усилительного тракта как по величине, так и по знаку. Если учитывать, что параметр усиления Пирса для большинства ЛБВО имеет значение  $C = 0,02 \dots 0,1$ , то нестабильность фазы  $\Delta\varphi_{уск}$ , вызванная непостоянством ускоряющего напряжения, намного больше нестабильности фазы  $\Delta\varphi_{упр}$ , вызванной таким же непостоянством управляющего напряжения. Следовательно, нестабильность ускоряющего напряжения является главной причиной нестабильности фазы колебаний на выходе усилительных трактов СВЧ на ЛБВО.

Используя формулы (1), (2) можно оценить фазовые нестабильности усилительных трактов СВЧ на ЛБВО, вызванные пульсациями и нестабильностями ускоряющего и управляющего напряжений.

Знак минус в формуле (1) показывает, что с увеличением ускоряющего напряжения сдвиг фаз уменьшается, что соответствует влиянию этого напряжения на время пролета электронов луча.

Используя формулы (1) и (2), можно задать требования к допустимому уровню пульсаций и нестабильности выходных напряжений ИВЭП по заданным требованиям к нестабильности фазы колебаний на выходе усилительного тракта  $|\Delta\varphi|$ . Для ускоряющего напряжения это требование выражается следующим образом:

$$\left| \frac{\Delta U_{уск}}{U_{уск}} \right| \leq \frac{|\Delta\varphi|}{0,58\pi N}, \quad (3)$$

когда  $\Delta\varphi$  - в радианах.

Для управляющего напряжения:

$$\left| \frac{\Delta U_{упр}}{U_{упр}} \right| \leq \frac{|\Delta\varphi|}{0,5\pi NC}. \quad (4)$$

Здесь также  $\Delta\varphi$  - в радианах.

Как следует из этих формул, допустимые уровни пульсаций и нестабильности ускоряющего и управляющего напряжений, удовлетворяющие определенным требованиям к стабильности фазы колебаний на выходе усилительного тракта СВЧ, зависят от значений электрической длины  $N$  и параметра усиления Пирса  $C$  ЛБВО.

В заключение отметим что, как показывают соотношения (1) и (2), можно изменить фазу на выходе тракта усиления, изменяя ускоряющее напряжение или управляющее напряжение ЛБВ. При этом точность установки фазы зависит от точности установки напряжения источника питания.

В пятой главе проведен анализ требований, предъявляемых к современным источникам электропитания радиопередающих устройств на ЛБВ. Выбрана и обоснована схема построения источника питания, основанная на использовании унифицированных модулей. Подробно исследованы характеристики резонансных преобразователей напряжения (см. рис. 4), являющихся основными функциональными единицами источника питания.

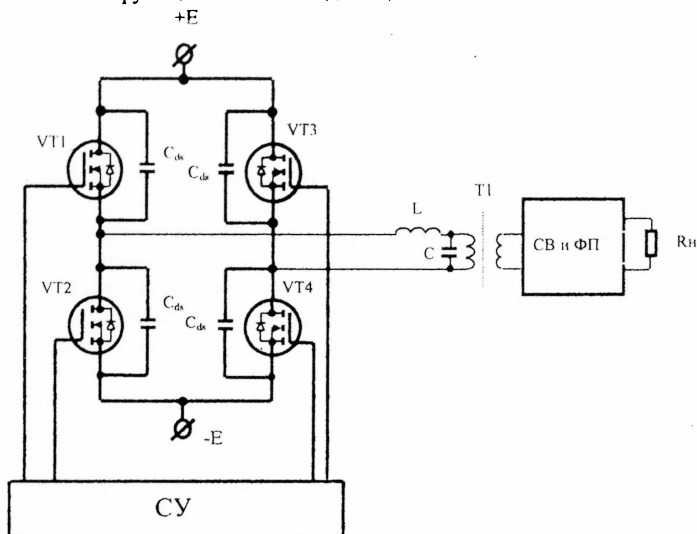


Рис.4.

Схема резонансного преобразователя напряжения мостового типа

Преобразователь состоит из мостового инвертора на ключевых транзисторах VT1–VT4 и последовательного резонансного формирующего контура, включенного в диагональ моста. Нагрузка подключена параллельно емкости контура  $C$  и, как правило, представляет собой высокочастотный трансформатор со схемой выпрямления (СВ) и фильтром пульсаций (ФП) выпрямленного напряжения. Формирующий контур выполняет функцию трансформатора сопротивления нагрузки и фильтра первой гармоники прямоугольного напряжения. Система управления (СУ) формирует управляющие напряжения для каждого транзистора таким образом, что ток через формирующий резонансный контур возбуждается последовательностью симметричных

прямоугольных импульсов с амплитудой, равной напряжению питания  $E$ , и частотой следования  $F$ .

Резонансная частота контура  $\omega_p$  имеет вид:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \frac{1}{R_H^2 \cdot C^2}}, \quad (5)$$

где  $L$ ,  $C$  - параметры формирующего контура,  $R_H$  - приведенное сопротивление нагрузки.

Использование понятия характеристического сопротивления контура  $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$

позволяет получить условие

$$R_H > \rho, \quad (6)$$

выполнение которого необходимо для обеспечения возможности настройки контура в резонанс.

**Выполнена оценка потерь в резонансном преобразователе.** Все виды потерь подразделяются на статические и динамические.

Статическими потерями являются:

1. потери на сопротивлении сток-исток МДП- транзистора в открытом состоянии  $P_{st}$ ;

2. потери на активной составляющей сопротивления дросселя  $P_L$ .

К динамическим потерям относятся:

1. потери на выключение транзистора при ненулевом токе  $P_{off}$ ;

2. потери на перезаряд выходной паразитной емкости ключевых транзисторов  $P_C$ ;

3. потери на рассасывание накопленного заряда в диодах, включенных параллельно каналу МДП- транзистора.

**Анализ алгоритмов работы резонансных преобразователей.**

Имея возможность рассчитать мощность потерь в ключах и дросселе, можно проанализировать возможные режимы работы резонансного преобразователя напряжения и сделать выводы об эффективности их реализации в ИП различного назначения.

**Алгоритм с отстройкой «вверх».**

Наиболее прост в реализации алгоритм с отстройкой «вверх», то есть алгоритм, в котором имеет место отстройка частоты преобразования выше резонансной. Однако данный алгоритм применим лишь для источников питания, работающих в небольшом диапазоне изменения нагрузок (например, ИП работающих в непрерывном режиме магнетронов, ЛБВ и т.п.), либо в ИП малой и средней мощности.

Основным достоинством рассмотренных преобразователей является малый уровень радиопомех и относительная простота системы управления.

**Алгоритм с отстройкой «вниз».**

Несколько отличается алгоритм с отстройкой «вниз», то есть работа на частоте ниже частоты резонанса. В таком режиме контур для инвертора имеет емкостную реакцию. По эффективности данный алгоритм значительно

превосходит алгоритм с отстройкой «вверх», однако это превосходство достигается за счет усложнения схемы управления и, таким образом, удорожания источника.

*Алгоритм с частотно-импульсной регулировкой.*

Одним из высокоэффективных методов регулировки и стабилизации напряжения резонансных преобразователей является частотно-импульсный. Схема источника питания, реализующего подобный алгоритм, показана на рис.5. На выходе выпрямителя VD1, VD2 установлен конденсатор  $C_0$ , на котором напряжение изменяется от максимального до минимального значений, устанавливаемых с помощью компаратора окна (КО) исходя из требуемого уровня пульсаций на нагрузке  $R_H$ .

Достоинством данного алгоритма является выполнение условия резонанса во всем диапазоне нагрузок. Для расчета потерь достаточно взять для алгоритма с расстройкой «вниз» значения, соответствующие расчетному наименьшему сопротивлению нагрузки  $R_{H \min}$ . При этом необходимо учитывать, что скважность пачек управляющих импульсов при отстройке частоты преобразования от резонансной больше единицы и возрастает с увеличением сопротивления нагрузки.

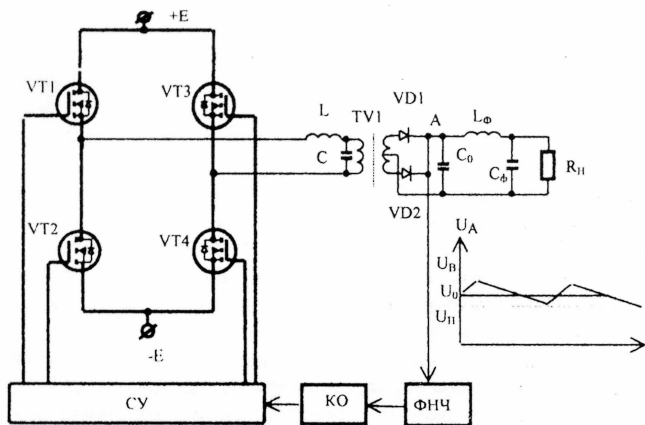


Рис.5.

Преобразователь с частотно-импульсной регулировкой

Недостатком алгоритма с частотно-импульсной регулировкой является наличие низкочастотных пульсаций выпрямленного напряжения (до нескольких килогерц), для подавления которых требуются довольно громоздкие НЧ-фильтры.

#### *Алгоритм с резонансным переключением транзисторов.*

Характерной особенностью этого алгоритма является наличие двух резонансных процессов:

1. резонансный процесс в формирующем контуре на емкости  $C$  и индуктивности  $L$ , имеющий место при открытых ключах и обеспечивающий передачу энергии от инвертора к нагрузке;

2. резонансный процесс перезаряда выходных емкостей транзисторов во время паузы между управляющими импульсами энергией, накопленной в индуктивности  $L$ . Емкость формирующего контура  $C$  практически не участвует в этом процессе, так как ее значение по крайней мере на порядок больше выходных емкостей транзисторов.

Для реализации этого алгоритма необходимо выполнение следующих требований:

1. преобразователь должен всегда работать с отстройкой «вверх», чтобы к моменту выключения транзисторов дроссель формирующего контура сохранял некоторую энергию за счет еще продолжающего протекать через него контурного тока;

2. пауза между импульсами управления на диагоналях должна быть такой, чтобы за это время успевал пройти процесс резонансного перезаряда выходных емкостей транзисторов вплоть до открывания встроенных диодов.

Схема резонансного преобразователя напряжения мостового типа, работающего в режиме резонансного переключения, приведена на рис. 6. Транзисторы VT1, VT4 и VT2, VT3 переключаются попарно, как и в классической схеме, обеспечивая амплитуду прямоугольного напряжения на последовательном контуре  $\approx E_{пит}$ .

На рис. 7 приведены временные диаграммы импульсов управления ключами диагоналей моста  $U_{упр1}(t)$ ,  $U_{упр2}(t)$  и напряжения на диагонали инвертора  $U_{AB}(t)$  (см. рис. 7). Между импульсами управления введена специальная пауза длительностью  $\tau$ . Во время этой паузы все ключи закрыты. В этих условиях в контуре, образованном элементами  $C$ ,  $C_{пит}$  и  $L$  протекает процесс свободных колебаний, который обеспечивает включение следующей пары транзисторов при нулевом напряжении (рис. 7).

В результате можно отметить, что данный алгоритм значительно эффективнее простого алгоритма с отстройкой «вверх», а при работе на максимальной мощности его КПД приблизительно равен КПД преобразователя, в котором реализован алгоритм с отстройкой «вниз» и датчиками тока.

Дополнительным преимуществом режима резонансного переключения является возможность запараллеливания МДП- транзисторов в ключе без увеличения динамических потерь на перезаряд их паразитных выходных емкостей, которые в данном случае участвуют в резонансном процессе, проходящем во время паузы между импульсами управления. Параллельное соединение транзисторов в этом случае приводит к снижению сопротивления открытого ключа и увеличению КПД инвертора.

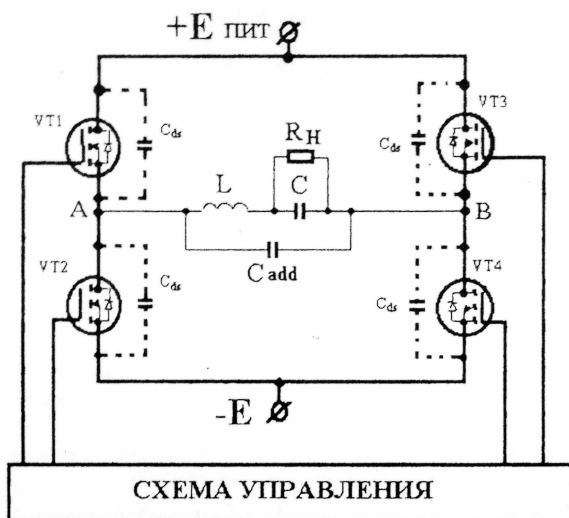


Рис.6.

Схема преобразователя с резонансным переключением транзисторов

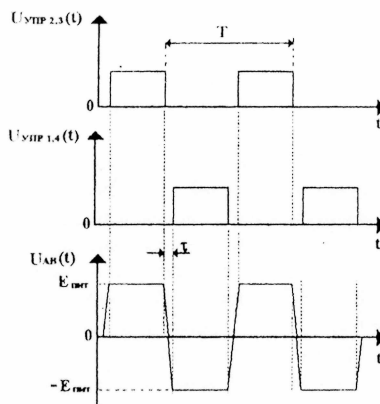


Рис.7.

Временные диаграммы импульсов управления ключами моста и напряжение на диагонали инвертора

Таким образом, алгоритм с резонансным переключением позволяет существенно повысить эффективность резонансного преобразователя практически без усложнения системы управления.

В шестой главе рассматриваются требования к усилителю системы. Анализ показывает, что в системах РЭП с АФАР применимы усилители на лампах бегущей волны (ЛБВО), где управление лучом антенны осуществляется при регулировании (изменении) питания ускоряющего или управляющего напряжений усилителя ЛБВО. Анализ требований предъявляемых к передатчикам (мощность, коэффициент усиления, диапазон рабочих частот) позволяют сделать вывод, что ЛБВ типа О марки СУВ-2352 является вполне подходящим прибором для усиления сигнала в системе РЭП. Как было показано, необходимо использовать 100 ЛБВО, в этом случае необходимо также применять отдельные РВИП для каждой ЛБВО, это позволит в свою очередь управлять фазой на выходе каждого усилителя, изменяя ускоряющее или управляющее напряжение ЛБВО.

Выполнена экспериментальная проверка работоспособности усилителя СВЧ на ЛБВО сантиметрового диапазона, и измерение его основных характеристик. Результаты измерений показывают:

1. Выходная мощность ЛБВО марки СУВ-2352 10Вт (требование системы 7Вт), применение этих приборов в многоэлементной решетке для распределенной системы усилителей позволяет получить высокую эффективную излучаемую мощность.

2. Коэффициент усиления ЛБВО марки СУВ-2352  $36 \pm 50$ дБ (требование системы - 31 дБ).

В заключении сформулированы основные результаты и сделаны выводы по диссертационной работе.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В процессе работы получены следующие результаты:

1. Для радиоэлектронного подавления РЛС «Джистарс» необходима станция активных помех, создающая инверсную помеху, с энергетическим потенциалом  $P_{пер} G_n = 10^5$  Вт.
2. Создание инверсной помехи ухудшает разрешающую способность самолетной РЛС системы «Джистарс» с  $l_\phi = 3$ м до  $l_\phi = 750$ м.
3. Для прикрытия боевых порядков наземных целей от воздействия системы «Джистарс» необходимы вертолеты – постановщики помех, размещаемые через 750 метров.

4. Применение станций активных помех с энергетическим потенциалом  $10^5$  Вт снижает вероятность поражения целей управляемым оружием системы «Джистарс» с  $P_{\text{поп}} = 0,8 - 0,85$  до  $P_{\text{поп}} = 0,12$ .
5. В системе исполнительных устройств требуется передающее устройство с мощностью  $P_{\text{пер.п}} = 500$  Вт, способное вырабатывать инверсную по мощности помеху.
6. Требования достижения высокого энергетического потенциала станции активных помех ( $P_{\text{иср.п.}} \cdot G_{\text{п}} = 10^5$  Вт) для эффективного радиоэлектронного подавления самолетной РЛС системы «Джистарс» может удовлетворить активная передающая ФАР.
7. Для получения мощности 500 Вт на выходе передатчика (требование радиоэлектронного подавления системы «Джистарс») требуемое усиление составляет не менее 31 дБ.
8. В системе с АФАР применяются усилители на лампах бегущей волны (ЛБВО), где управление лучом антенны осуществляется при регулировании (изменении) питания ускоряющего напряжения или управляющего напряжения усилителя ЛБВО.
9. Показано, что для питания мощных высоковольтных генераторных приборов СВЧ, таких как ЛБВО, магнетроны, клистроны целесообразно использование ВИЭП с преобразованием частоты напряжения первичных сетей и повышением этой частоты до 100...200 кГц.
10. Разработаны ИВЭП с преобразованием частоты и усилительный тракт СВЧ на ЛБВО. ИВЭП дает возможность регулирования ускоряющего и управляющего напряжений ЛБВО. Получен значительный выигрыш по массе и габаритам ИВЭП и усилительного тракта в целом. Проведено экспериментальное исследование СВЧ усилителя на ЛБВО типа СУВ-2352 с разработанным ИВЭП, показано, что этот усилитель может послужить основой при создании передатчика инверсной активной помехи для системы РЭБ.

## РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Мощные усилители СВЧ с высокой фазовой стабильностью на ЛБВО / В. И. Казанцев, М. Г. Абдалсалам, Гэ Дун и др. // 170-летию МГТУ им. Н. Э. Баумана: Тез. докл. РНТК. – М., 2000. – С. 90.
2. Обеспечение высокой фазовой стабильности мощных усилителей СВЧ на ЛБВ / М. Г. Абдалсалам, Гэ Дун, В. И. Казанцев и др. // Вестник МГТУ. Приборостроение. -2001.- №3. -С.71-84.
3. Abd al salam M. G. Introduction in active jamming and the requirement of repeater amplification. –Damascus (Syria), -2001. - 10p. (Rep. Institute of electronic research).
4. Abd al salam M. G. Mono pulse radar and electronic warfare – Damascus (Syria), -2001. - 8p. (Rep. Institute of electronic research).

Заказ № 2072. Тираж 100 экз. Объем 1 п. л.  
Отпечатано в ЗАО «ТИНО»  
Подписано в печать 15.11.2001 г.