На правах рукописи

УДК 621.375.2

ДУН ГЭ

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВОЙ СТАБИЛЬНОСТИ УСИЛИТЕЛЬНЫХ ТРАКТОВ НА ЛАМПАХ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ ТИПА "О" И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЕЕ ПОВЫШЕНИЯ

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии.

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

г. Москва- 2001

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

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент КАЗАНЦЕВ В. И.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор, лауреат государственной премии МЕЩАНОВ В. П.

- кандидат физико-математических наук, БЕЛЯВСКИЙ Б. А.

- ФГУП «Конструкторское бюро Лира»

1572673
Гэ Дун
Исследование фазовой стабильности усилите
2001 0.00

001 г. в 10 часов на заседании диссертационного Н. Э. Баумана по адресу: 107005, г.Москва, 2-ая

в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана.

2 2001 г.

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана
1572673
Дун Гэ Исследование фазовс

Власов И. Б.

1572673

НЕ ПРИДАЕТСЯ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время когерентные методы обработки сигналов находят широкое использование в радиолокационных, радионавигационных, телеметрических и многих других системах. При этом предъявляются высокие требования к стабильности фазы электромагнитных колебаний, полученных от радиопередающего устройства. Высокая стабильность фазы является одним из необходимых условий, обеспечивающих надежную бесперебойную работу радиолокационных станций (РЛС). Высокая стабильность фазы колебаний, генерируемых радиопередающим устройством, является необходимым условием качественной передачи информации, точного определения параметров цели. Высокая стабильность фазы может облегчить решение проблемы электромагнитной совместимости, что весьма важно при современной загруженности околоземного пространства электромагнитными полями, в том числе и быстропеременными.

В значительной степени фазовая стабильность электромагнитных колебаний обеспечивается качеством работы усилительного тракта радиопередающего устройства, в том числе, выходного каскада. В современных радиопередающих устройствах СВЧ – КВЧ диапазонов с импульсным или непрерывным излучением в этих каскадах широко применяются магнетроны в автогенераторном режиме и с синхронизацией, клистроны, лампы обратной волны типа «М» (ЛОВМ – амплитроны), лампы бегущей волны типа «М» (ЛБВМ) и типа «О» (ЛБВО) и т. д. Среди них, благодаря широкополосности усиления, усилительные тракты СВЧ на ЛБВО (особенно импульсные) в настоящее время находят все более широкое применение в передающих устройствах различных радиоэлектронных систем. Импульсные усилительные тракты СВЧ на ЛБВО могут применяться в радиолокационных станциях (РЛС), в частности, в РЛС с селекцией движущихся целей, в РЛС со сжатием импульсов по длительности для повышения разрешающей способности и дальности обнаружения, в РЛС бокового обзора на летательных аппаратах для увеличения угловой разрешающей способности путем искусственного синтезирования раскрыва антенны без увеличения геометрических размеров, также в системах радиолокации планет, сопровождения космических объектов и т. д. В настоящее время импульсные усилительные тракты СВЧ на ЛБВО находят широкое применение и в системах многоканальной радиосвязи, радионавигации, радиотелеметрических системах.

Для доплеровских РЛС, в которых в настоящее время все более широко используются усилительные тракты на ЛБВО, весьма существенны фазовые характеристики импульсных усилительных трактов СВЧ. Вариации фазы сигналов СВЧ в таких системах могут вызвать существенные нарушения работы РЛС с когерентным накоплением отраженных сигналов. В таких РЛС максимальная величина фазовой нестабильности обычно не должна превышать нескольких градусов. До сего времени исследованию фазовой стабильности в усилительных трактах СВЧ на ЛБВО не было уделено достаточного внимания. На практике постоянно возникает проблема объективного задания требований по обеспечению стабильности фазы колебаний на выходе усилительного тракта. По сравнению с методами стабилизации частоты методы стабилизации фазы можно считать недостаточно развитыми. Проблема исследования фазовой стабильности усилительных трактов СВЧ на ЛБВО и разработка методов ее повышения является актуальной.

Целью работы является разработка методов объективного определения требований по обеспечению желаемой фазовой стабильности и разработка практических методов стабилизации фазы колебаний на выходе усилительных трактов СВЧ на ЛБВО.

Задачи диссертационной работы:

1) Исследование зависимости между абсолютными значениями отклонения фазы колебаний на выходе усилительных трактов СВЧ и значениями параметров фазового шума, как в интегральной, так и в спектральной форме.

2) Исследование влияний питающих напряжений, входной мощности и нагрузки на величину фазового сдвига, создаваемого усилительными трактами СВЧ на ЛБВО.

3) Выработка методов объективного определения допустимого уровня нестабильности питающих напряжений, их пульсаций, допустимого уровня нестабильности входной мощности и степени развязки нагрузки.

4) Разработка эффективных методов повышения фазовой стабильности с учетом особенностей работы усилительных трактов СВЧ на ЛБВО.

5) Исследование систем быстродействующей автоматической коррекции фазы (БАКФ), которые могут быть включены в состав радиопередающего устройства с выходным усилителем мощности на ЛБВО.

Научная новизна.

1) 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, нестабильного уровня входной мощности и рассогласования нагрузки.

2) Сформулированы требования по обеспечению фазовой стабильности, достаточные для инженерно-практических расчетов.

3) Предложены новые методы повышения фазовой стабильности в усилительных трактах СВЧ на ЛБВО:

- Стабилизация питающих напряжений с использованием источника вторичного электропитания (ИВЭП) с преобразованием частоты и перенесенным на менее высокое напряжение накопительным конденсатором;
- Компенсация нежелательных фазовых уходов из-за спада ускоряющего напряжения во время импульса с помощью регулировки напряжения на вершине импульса управляющего напряжения.

4) Разработан общий подход к анализу и синтезу системы быстродействующей автоматической коррекции фазы. Представлена структурная схема системы БАКФ, легко реализуемой при использовании современных схем источников высоковольтного вторичного электропитания с преобразованием частоты и с возможностью воздействия на низковольтные цепи.

Положения, выносимые на защиту:

1) Для инженерно-практических расчетов допустимых значений нестабильности питающих напряжений и их пульсаций, нестабильности входной мощности и степени развязки нагрузки могут быть использованы представленные в диссертации результаты исследования дестабилизирующих влияний этих факторов, полученные на основе линейной теории ЛБВО.

2) Перенос накопительной емкости с выхода ИВЭП на низкое напряжение позволяет не только облегчить требования к защите ЛБВО от разрушений при внутренних пробоях (искрениях) и повысить эффективность стабилизации напряжения, но и получить значительный выигрыш по массе и габаритам источника питания и всего усилительного тракта СВЧ в целом.

3) В импульсных усилительных трактах СВЧ на ЛБВО повышение фазовой стабильности может быть достигнуто определенными схематическими решениями построения ИВЭП ЛБВО: использование раздельных источников питания ускоряющего и коллекторного напряжений; компенсация нежелательных фазовых уходов из-за спада ускоряющего напряжения во время импульса с помощью регулировки напряжения на вершине управляющего импульса.

4) Особенность применения системы БАКФ для повышения фазовой стабильности усилительных трактов СВЧ на ЛБВО состоит в том, что в качестве устройства электрически управляемого фазовращателя могут быть использованы сами лампы, так как ЛБВО имеют линейный участок электронного смещения фазы в зависимости от ускоряющего напряжения. Такая схема реализации стала возможной благодаря использованию ИВЭП с резонансным преобразованием частоты и переносом накопительного конденсатора. ИВЭП ускоряющего напряжения входит в систему управления БАКФ. Резонансный преобразователь частоты позволяет осуществлять регулировку высоковольтного напряжения в низковольтной цепи ИВЭП, что снимает большую часть трудностей, возникающих при использовании специальных электровакуумных регуляторов в высоковольтных цепях. Перенесенный на вход преобразователя накопительный конденсатор позволяет применить на выходе ИВЭП фильтрующий конденсатор малой емкости. В этом случае коррекция фазы может быть завершена в реальное время (в интервал времени, много меньший длительности импульса).

Практическая ценность результатов диссертации заключается в следующем:

Теоретические выводы и разработанные методы использовались в НИИРЛ МГТУ им. Баумана при проведении ОКР «Разработка и изготовление радиофизической установки для изучения особенностей распространения радиоволн КВ части миллиметрового диапазона волн в приземных слоях атмосферы» и «Тибет».

Апробация результатов работы. Материалы и основные положения диссертации докладывались на научно – технической конференции, посвященной 170-летию МГТУ им. Баумана (г. Москва, 2000г.), на комиссиях по приемке ОКР (г. Москва, 1999-2000г.) и на семинарах кафедры радиотехнических систем и устройств МГТУ им. Баумана.

Публикации. По результатам выполненных работ опубликованы тезисы одного доклада, одна статья, две статьи находятся в печати.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 136 страниц, включая 39 рисунков, 4 таблицы и 86 наименований использованных литературных источников.

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 приведен обзор литературы по теме диссертации. Проведенный обзор показывает, что до настоящего времени, несмотря на широкое применение усилительных трактов СВЧ на ЛБВО, вопрос об их фазовой стабильности нельзя считать исследованным в достаточной степени; необходимо рассмотреть влияния следующих основных дестабилизирующих факторов: нестабильность и пульсации питающих напряжений, нестабильность входной мощности и рассогласование нагрузки; недостаточно разработан инженерный метод для объективного определения требований, предъявленных к ним с целью обеспечения определенной фазовой стабильности. Кроме того, по сравнению с методами стабилизации частоты методы стабилизации фазы также нельзя считать достаточно развитыми. На практике часто возникает проблема, связанная с использованием различных параметров для характеристики фазовой стабильности. С позиции разработчиков передающих устройств желательно свести эти параметры в абсолютное значение отклонения фазы.

В этой главе с целью разработки методов объективного определения требований по обеспечению желаемой фазовой стабильности и разработки практических методов стабилизации фазы колебаний на выходе усилительных трактов СВЧ на ЛБВО сформулированы основные задачи, решаемые в диссертации.

Во второй главе даны определения основных параметров, характеризующих фазовую стабильность, исследована аналитическая зависимость между параметрами фазовой стабильности и фазового шума и рассмотрен вопрос об измерении фазовой стабильности и фазового шума.

На основе определений абсолютного отклонения фазы и параметров фазового шума после соответственных преобразований получены аналитические формулы, связывающие между собой значение отклонения фазы $\Delta\varphi$ и коэффициент фазового шума F_φ:

$$F_\varphi = 10\lg\left[(\Delta\varphi)^2 \cdot \left(P_0 / P_{фш}\right)_{вх}\right] = 10\lg\frac{(\Delta\varphi)^2 \cdot P_{0\,вых}}{K_1 \cdot P_{фш\,вх}}. \quad (1)$$

Согласно формуле (1), зная отношение мощности сигнал - фазовый шум на входе $\left(P_0 / P_{фш}\right)_{вх}$ прибора или параметры $K_1, P_{0\,вых}, P_{фш\,вх}$, где K_1 - коэффициент усиления прибора по мощности, можно определить коэффициент фазового шума. И наоборот, имея заданное значение допустимого коэффициента фазового шума, можно определить максимально допустимое отклонение фазы.

Относительная спектральная плотность мощности фазового шума (ОСПМФШ) B_φ на отстройке $\Delta f = |f - f_0|$ от несущей частоты определяется с помощью следующих формул

$$B_\varphi = 10\lg\frac{(\Delta\varphi)^2}{\pi^2(\Delta f)^2}\Bigg|_{\Delta\varphi\text{-[рад]}} = 10\lg\frac{(\Delta\varphi)^2}{180^2(\Delta f)^2}\Bigg|_{\Delta\varphi\,[\text{град}]}. \quad (2)$$

Следует заметить, что выражение (2) получено при условии незначительной отстройки частоты от несущей частоты. При стремлении частоты к бесконечности ОСПМФШ не может быть рассчитана по этой формуле и не стремится к нулю, а имеет определенное значение, которое зависит от рабочей температуры катода.

Представлены графики соответствия нестабильности фазы $\Delta\varphi$ и ОСПМФШ B_φ при отстройке частоты от несущей $\Delta f = 1, 5, 10, 50$ кГц.

Выведены формулы, связывающие значение отклонения фазы и параметр ОСПМФШ относительно 1мВт, часто использующийся на практике.

Кроме того, даны функциональные схемы измерителей флуктуаций фазы СВЧ сигналов в усилительных трактах.

В третьей главе рассматриваются структура современных усилительных трактов СВЧ на ЛБВО и схемы источников вторичного электропитания. Дан обзор линейной теории взаимодействия между электронными потоками и СВЧ электромагнитными полями, проходящего в ЛБВО.

На основе рассмотрения особенности работы усилительных трактов СВЧ на ЛБВО и схем источников вторичного электропитания ЛБВО выявлено, что при

импульсном питании спад ускоряющего напряжения из-за разряда накопительного конденсатора в его источнике является одной из главных причин нестабильности фазы колебаний на выходе усилительного тракта. Для снижения влияния этого фактора целесообразно использовать раздельные источники питания ускоряющего и коллекторного напряжения, при этом создать напряжение между катодом и ЗС отдельным стабилизированным ИВЭП, накопительный конденсатор включать параллельно именно этому промежутку ЛБВО, а коллектор конструктивно выполнять изолированным и питать от нестабилизированного ИВЭП.

Результаты приведенной в этой главе линейной теории ЛБВО являются основой исследования влияния основных дестабилизирующих факторов на фазовую стабильность усилительного тракта СВЧ на ЛБВО.

В четвертой главе с использованием линейной теории ЛБВО проведено количественное исследование влияния уровня пульсаций и нестабильности питающих напряжений, нестабильности входной мощности и нагрузки на фазовую стабильность усилительных трактов СВЧ на ЛБВО. Целью такого исследования является получение простых формул для инженерных расчетов допустимых значений этих параметров по заданным требованиям к фазовой стабильности.

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. В процессе преобразования был принят ряд допущений, обычно справедливых для ЛБВО со значением пространственного заряда, меньшим единицы. Для ускоряющего и управляющего напряжений в этих приближениях получено:

$$\Delta\varphi_{уск} \approx -0{,}58\pi N\left(\frac{\Delta U_{уск}}{U_{уск}}\right), \text{ рад}, \tag{3}$$

$$\Delta\varphi_{упр} \approx 0{,}5\pi NC\left(\frac{\Delta U_{упр}}{U_{упр}}\right), \text{ рад}, \tag{4}$$

где $\Delta\varphi_{уск}$ и $\Delta\varphi_{упр}$ - фазовые отклонения, вызванные изменениями ускоряющего и управляющего напряжений соответственно, $\frac{\Delta U_{уск}}{U_{уск}}$ и $\frac{\Delta U_{упр}}{U_{упр}}$ - относительные изменения ускоряющего и управляющего напряжений соответственно, $N = \frac{f \cdot l}{v_{\varphi}}$ - электрическая длина замедляющей системы (ЗС), зависящая от ее геометрической

длины l, рабочей частоты f и скорости электронного потока $\bar{v}_e$, $C = \sqrt[3]{\bar{I}Z_{сп}/(4U_{ик})}$ - параметр усиления Пирса, зависящий от постоянной составляющей тока конвекции через ЗС ЛБВО $\bar{I}$. сопротивления связи ЗС $Z_{сп}$ и ускоряющего напряжения $U_{ик}$.

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 $C = 0{,}02 \ldots 0{,}1$ то нестабильность фазы $\Delta\varphi_{ик}$, 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. Требования к стабильности напряжений ИВЭП должны назначаться, исходя из требований к стабильности ускоряющего напряжения.

Проведено сопоставление расчетных абсолютных значений фазовой нестабильности при уровне нестабильности ускоряющего напряжения $\frac{\Delta U_{ик}}{U_{ик}} = 1\%$ с типичными данными усилительных трактов на ЛБВО СВЧ - КВЧ диапазонов, полученными из различных литературных источников. Сопоставление показало, что при небольших электрических длинах ЗС ($N \le 50$) абсолютные значения фазовой нестабильности от нестабильности ускоряющего напряжения, рассчитанные по (3), с хорошей точностью совпадают с соответствующими параметрами реальных ламп. При больших значениях $N \ge 50$ расчетные значения расходятся с реальными, которые всегда меньше расчетных и имеют такой же порядок.

Нестабильность входной мощности и вариации внешней нагрузки приводят к изменению величины мощности, отбираемой от электронного потока. Последнее обстоятельство вызывает изменение скорости электронного потока и, следовательно, времени пролета электронов, фазы колебаний на выходе усилительного тракта СВЧ на ЛБВО. При исследовании влияния этих факторов предполагалось, что одновременно с нарастанием СВЧ мощности $P(z)$ вдоль лампы по оси z уменьшается кинетическая энергия электронов, поэтому каждому сечению z можно приписать некоторое фиктивное напряжение, которое отличается от напряжения, приложенного к ЗС, на величину

$$\Delta U = -\frac{P(z)}{\bar{I}} = -\frac{P_{вых}}{\bar{I}}\exp\left[-2\alpha_1(l-z)\right], \qquad (5)$$

где $P_{вых}$ - мощность на выходе ЛБВО, l - геометрическая длина ЗС, α_1 - амплитудный коэффициент усиливаемой волны, $\bar{I}$ – ток электронного луча.

Приведя в соответствие результаты исследования влияния ускоряющего напряжения и выходной СВЧ мощности, после интегрирования по всей длине ЗС и соответствующего преобразования получим формулы для определения абсолютного значения отклонения фазы колебаний на выходе усилительного тракта от нестабильности входной мощности и отраженной от нагрузки выходной мощности усилительного тракта.

Для входной мощности

$$\Delta\varphi \approx \frac{0{,}17}{\delta}\frac{\Delta P_{вх}}{P_{вх}}\frac{K_у P_{вх}}{P_к C}, \text{ рад}, \qquad (6)$$

где $K_у$ - коэффициент усиления по мощности в разах, $\frac{\Delta P_{вх}}{P_{вх}}$ - относительное изменение входной мощности, $P_к = \bar{I}_к U_{уск}$ - подводимая к ЛБВО мощность, $\delta = \frac{\bar{I}}{\bar{I}_к} = \frac{\bar{I}}{\bar{I} + \bar{I}_ж}$ - коэффициент токопрохождения, C - параметр усиления Пирса, $U_{уск}$ - ускоряющее напряжение, $\bar{I}_к$ - ток катода, $\bar{I}_ж$ - ток, оседающий на элементы ЗС.

В случае отражения выходной мощности от нагрузки (модуль коэффициента отражения от выхода ЛБВО по напряжению $\Gamma_{вых}$ и модуль коэффициента отражения от нагрузки по напряжению $\Gamma_н$) изменение фазы на выходе ЛБВО в первом приближении может быть рассчитано следующим образом:

$$\Delta\varphi \approx \frac{0{,}17}{\delta}\frac{\Gamma_н^2\left(1-\Gamma_{вых}^2\right)P_{вых}}{\left(1-\Gamma_н^2\Gamma_{вых}^2\right)P_к C}, \text{ рад}, \qquad (7)$$

В таблице 1 приведены максимальные значения изменения фазы от изменения входной мощности на 1 дБ (коэффициент амплитудно-фазовой конверсии - АФК) по расчету и для реальных ЛБВО. Расчет проводился с учетом того, что $\delta \geq 0{,}85...0{,}9$ и $P_{вых} \leq (2...2.5)CP_к$. Расчетное значение коэффициента примерно в три раза больше реальных значений для существующих ламп. Полученная точность достаточна для инженерных расчетов.

Таблица 1

	Максимальное значение коэффициента АФК, $^{o}/дБ$	Относительная входная мощность, соответствующая максимальному коэффициенту АФК, $10\lg(P_{вх}/P_{н.вх})$*, $дБ$
Расчетное	<6	-
ЛБВО для спутника «Интелсат»	1,6	-10
ЛБВО с мощностью 10 кВт и шириной полосы частот 5%	2,2	-
Типичные ЛБВО с ЗС типа "цепочка связанных резонаторов"	2	-3
Типичные ЛБВО со спиральными ЗС	1…2	-3…-5

* $P_{н.вх}$ - входная мощность, соответствующая режиму насыщения.

В пятой главе сформулированы требования к уровням пульсаций и нестабильности питающих напряжений, нестабильности входной мощности и развязывающим устройствам. Предложены методы повышения фазовой стабильности усилительных трактов СВЧ на ЛБВО.

В первом параграфе сформулированы основные требования по обеспечению фазовой стабильности усилительных трактов СВЧ на ЛБВО. Эти требования заключаются в определении допустимых значений уровней нестабильностей питающих напряжений, входной мощности и степени развязки нагрузки. При этом для расчетов допустимых значений каждого из этих параметров необходимо вместо требуемого значения фазовой нестабильности $\Delta\varphi_{трсб}$ использовать допустимое значение $\Delta\varphi = 0{,}1\Delta\varphi_{трсб}$, меньшее требуемого значения на порядок. Только в этом случае фазовая нестабильность, вызванная данным дестабилизирующим фактором, не может серьезно ухудшить суммарное значение нестабильности фазы колебаний на выходе усилительных трактов.

Требования к максимально допустимому уровню пульсаций и нестабильности выходных напряжений ИВЭП выражаются следующим образом.

Для ускоряющего напряжения:

$$\left|\frac{\Delta U_{уск}}{U_{уск}}\right| \le \frac{|\Delta\varphi|}{0.58\pi N}, \Delta\varphi \text{ - в радианах, или } \left|\frac{\Delta U_{уск}}{U_{уск}}\right| \le \frac{|\Delta\varphi|}{104N}, \Delta\varphi \text{ - в градусах.} \quad (8)$$

Для управляющего напряжения:

$$\left|\frac{\Delta U_{упр}}{U_{упр}}\right| \le \frac{|\Delta\varphi|}{0,5\pi NC}, \Delta\varphi \text{ - в радианах, или } \left|\frac{\Delta U_{упр}}{U_{упр}}\right| \le \frac{|\Delta\varphi|}{90NC}, \Delta\varphi \text{ - в градусах.} \quad (9)$$

Как следует из этих формул, допустимые уровни пульсаций и нестабильности ускоряющего $\left|\frac{\Delta U_{уск}}{U_{уск}}\right|$ и управляющего $\left|\frac{\Delta U_{упр}}{U_{упр}}\right|$ 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. Требования к стабильности ускоряющего напряжения должны быть жестче, как минимум, на порядок, чем требования к стабильности управляющего напряжения.

Требования к развязке нагрузки заключаются в определении минимально допустимого значения параметра ферритовых развязывающих устройств (вентилей или циркуляторов в вентильном включении) $\alpha_{пр} + \alpha_{обр}$, включенных между выходом усилительного тракта и нагрузкой. Здесь $\alpha_{пр}$ и $\alpha_{обр}$ - коэффициенты прямых потерь и развязки развязывающих устройств, выраженные в децибелах. Эти требования сводятся к выполнению следующих неравенств:

$$\alpha_{пр} + \alpha_{обр} \ge -7,7 + 10\lg\left[\frac{1_н^2\left(1-\Gamma_{вых}^2\right)P_{вых}}{\left(1-\Gamma_н^2\Gamma_{вых}^2\right)\delta P_к C|\Delta\varphi|}\right], \quad (10,а)$$

когда $\Delta\varphi$ - в радианах или

$$\alpha_{пр} + \alpha_{обр} \ge 10 + 10\lg\left[\frac{\Gamma_н^2\left(1-\Gamma_{вых}^2\right)P_{вых}}{\left(1-\Gamma_н^2\Gamma_{вых}^2\right)\delta P_к C|\Delta\varphi|}\right]. \quad (10,б)$$

когда $\Delta\varphi$ - в градусах.

При приближенных расчетах с учетом условия $\Gamma_н$=1, $\Gamma_{вых}$=0, $\delta \ge 0,85...0,9$ и $P_{вых} \le (2...2.5)CP_к$ минимально допустимое значение $\alpha_{пр} + \alpha_{обр}$ оценивается следующим образом:

$$\alpha_{пр} + \alpha_{обр} \ge -3 - 10\lg|\Delta\varphi|, \Delta\varphi \text{-в рад., или } \alpha_{пр} + \alpha_{обр} \ge 14,7 - 10\lg|\Delta\varphi|, \Delta\varphi \text{-в град.}$$

(11)

Для минимизации потерь выходной мощности требуется использование развязывающих устройств с минимальными потерями в прямом направлении, т. е.

$\alpha_{пр} \to 0$ д Б. Это означает, что развязку должны обеспечивать обратные потери (коэффициент развязки $\alpha_{обр}$).

Требования к уровню нестабильности входной мощности имеют вид:

$$\left|\frac{\Delta P_{вх}}{P_{вх}}\right| \le \frac{|\Delta\varphi|}{\frac{0.17}{\delta}\frac{K_y P_{вх}}{P_к C}}, \ \Delta\varphi\text{-в рад., или } \left|\frac{\Delta P_{вх}}{P_{вх}}\right| \le \frac{|\Delta\varphi|}{\frac{10}{\delta}\frac{K_y P_{вх}}{P_к C}}, \ \Delta\varphi\text{-в град.} \qquad (12)$$

С учетом оговоренных выше приближений, можем получить выражения для задания требований к максимально допустимой нестабильности входной мощности:

$$\left|\frac{\Delta P_{вх}}{P_{вх}}\right| \le \frac{|\Delta\varphi|}{0{,}5}, \ \Delta\varphi\text{-в рад., или } \left|\frac{\Delta P_{вх}}{P_{вх}}\right| \le \frac{|\Delta\varphi|}{29}, \ \Delta\varphi\text{-в град.} \qquad (13)$$

Из требований по обеспечению фазовой стабильности трудно реализуемым является требование к допустимому уровню питающих напряжений. Большинство мощных ЛБВО имеет значение параметра усиления Пирса C от 0,02 до 0,1, а электрическая длина N колеблется в пределах от 50 до 150. Для обеспечения фазовой нестабильности, меньшей нескольких градусов, допустимое значение уровня нестабильности и пульсаций ускоряющего напряжения должно быть на уровне 10^{-5}. Выполнение такого требования для современных ИВЭП является сложной задачей. Как правило, при этом приходится значительно увеличивать массу и габариты ИВЭП и ухудшать условия по защите ЛБВО от разрушений при внутренних пробоях. В следующих двух параграфах предложены решения этой проблемы.

Во втором параграфе предложен метод повышения фазовой стабильности при использовании ИВЭП с преобразованием частоты. Основные особенности заключаются в том, что накопительный конденсатор используется не на выходе ИВЭП, а во входной цепи, где действует относительно низкое напряжение. Структурная схема такого ИВЭП показана на рис.1. Входное устройство (ВУ) должно обеспечить гальваническую развязку от сети и предварительную стабилизацию напряжения питания преобразователя U_{IX}. Целесообразно ограничить U_{IX} величиной 400В, что позволит на входе преобразователя применять относительно недорогие электролитические конденсаторы на напряжение 450В. Преобразователь постоянного напряжения в переменное с высокой частотой (DC/AC) целесообразно выполнить по схеме резонансного инвертора с формирующим контуром (ФК). ИВЭП имеет систему обратной связи (ОС), которая является стабилизатором напряжения и должна обеспечить определенное качество стабилизации: коэффициент стабилизации, диапазон

регулировки, скорость реакции, устойчивость ИВЭП и т. д. В канал обратной связи входной сигнал подается с делителя напряжения (ДН) в виде напряжения $u_{ос}$, равного произведению мгновенного значения выходного напряжения ИВЭП $u_{уск}$ на коэффициент деления ДН $K_{дел}$: $u_{ос} = K_{дел} \cdot u_{уск}$. В систему заводится также стабильное опорное напряжение $U_{оп} = K_{дел} \cdot U_{уск}$, где $U_{уск}$ - требуемое значение стабильного высокого ускоряющего напряжения на выходе ИВЭП. Вырабатываемый системой сигнал ошибки преобразуется в соответствующее изменение параметра регулирования (частоты преобразования, коэффициента заполнения и т. д.) преобразователя DC/AC. Изменение этого параметра компенсирует изменение выходного напряжения.

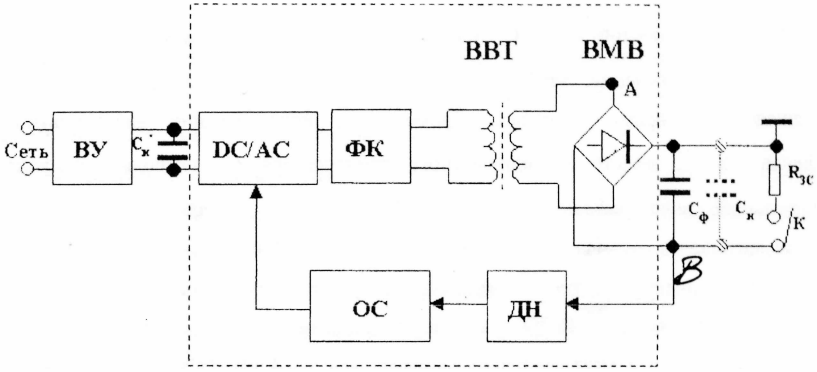

Рис. 1
Высоковольтный ИВЭП с преобразованием частоты и переносом накопительного конденсатора.
$R_н$ - активное сопротивление цепи "ЗС - катод", K - быстродействующий коммутатор, замыкающий цепь "ЗС - катод" на время импульса

В этом случае уровень нестабильности и пульсаций выходного напряжения обеспечивается контуром стабилизации, состоящим из блоков DC/AC, ФК, высоковольтного высокочастотного трансформатора (ВВТ), высоковольтного мостового выпрямителя (ВМВ) и ОС (часть ИВЭП, обведенная пунктиром), накопительным $C_н'$ и фильтрующим конденсатором $C_ф$. Чтобы снизить емкость целесообразно преобразование производить на частоту порядка нескольких сотен килогерц, тогда частота пульсаций высокого напряжения будет находиться в диапазоне МГц. В таких условиях даже при отсутствии $C_ф$ пульсации могут быть снижены до

уровня 10^{-4}. При этом требование не превысить накопленную энергию ограничивает емкость фильтрующего конденсатора $C_ф$, а не накопительного $C_н^{'}$. Так как в момент искрения по выходной цепи ИВЭП течет большой ток, происходит падение потенциала в точке A ВМВ из-за наличия собственного внутреннего сопротивления. Фильтрующий конденсатор $C_ф$ в этот момент поддерживает в точке B потенциал, равный по значению $U_{уск}$, т.е. превышающий потенциал в точке A (рис. 1). Ключи ВМВ разомкнуты и энергия, накопленная в накопительном конденсаторе $C_н^{'}$, не может быть передана в выходную цепь ИВЭП. Следовательно, эта энергия не выделяется при пробое (разряде) внутри ЛБВО, и нет необходимости защищать от нее прибор. В таком ИВЭП стабилизирующую функцию выполняют контур стабилизации и накопительный конденсатор $C_н^{'}$, значение $C_ф^{'} << C_н$. Емкость накопительного конденсатора $C_н^{'}$ может иметь большое значение, чтобы обеспечить малое значение спада ускоряющего напряжения во время импульса. Кроме того, использование низковольтного конденсатора $C_н^{'}$ вместо высоковольтного конденсатора $C_н$ позволяет получить значительный выигрыш по массе и габаритам. Это доказано расчетным и экспериментальным путями, в частности такая схема ИВЭП была использована при построении усилительного тракта 8-мм диапазона волн, имеющего предварительный и оконечный усилители на ЛБВО с соответствующими фидерными трактами и ряд источников питания с максимальным напряжением до 42кВ. Объем усилительного тракта составил 500×600×600мм^3 или 180дм^3, масса – 55кГ. Общая нестабильность высокого напряжения во время импульса находилась в пределах $5{\cdot}10^{-5}...10^{-4}$. Для достижения тех же параметров при использовании источников питания по так называемой линейной схеме потребовались бы в несколько десятков раз большие масса и объем.

В третьем параграфе на основе исследования закона изменения ускоряющего напряжения во время импульса и законов изменения фазового сдвига от ускоряющего и управляющего напряжений предлагается новый метод повышения фазовой стабильности. Суть метода заключается в том, что для компенсации фазового отклонения, вызванного спадом ускоряющего напряжения во время импульса, на управляющий электрод прикладывается импульс такой формы, что напряжение на его вершине меняется по полученному закону:

$$u_{упр}(t) \approx U_{упр} - \frac{1,2}{C} \cdot \frac{t}{\tau_и} \cdot U_{упр}, \quad t \le \tau_и, \tag{14}$$

где $u_{упр}(t)$ - управляющее напряжение во время импульса в момент времени t, $U_{упр}$ - управляющее напряжение в начале импульса, $\tau_и$ - длительность импульса, $\tau_н$ - постоянная времени контура разряда накопительного конденсатора.

Этот закон получен при условии $\tau_и << \tau_н$. В общем случае контур формирования вершины импульса управляющего напряжения должен иметь постоянную времени

$$\tau = \frac{C}{1,2} \tau_н. \tag{15}$$

Приведена схема импульсного модулятора, с помощью которого может быть осуществлена настройка изменения напряжения на вершине импульса. Условие (15) служит начальным условием предварительной настройки. Проанализированы пределы эффективного использования данного метода.

В последнем параграфе проведен анализ усилительного тракта с системой БАКФ на основе линеаризованной модели. Такое построение системы требует использования элементов, входящих в систему БАКФ, с линейными фазовыми статическими характеристиками. Сформулированы требования по обеспечению устойчивости системы, определенного коэффициента стабилизации и быстродействия. Дана схема системы БАКФ, коррекция фазы которой ведется относительно не фазы входных колебаний, а фазы колебаний сигнала промежуточной частоты с определенным видом модуляции.

Рассмотрена особенность построения системы БАКФ для усилительного тракта СВЧ на ЛБВО. Она заключается в использовании самой лампы (точнее промежутка "ЗС - катод") в качестве электрически управляемого фазовращателя. Структурная схема усилительного тракта СВЧ на ЛБВО показана на рис. 2. Система работает следующим образом. Часть мощности сигнала СВЧ с выхода усилителя через направленный ответвитель (НО) поступает на один из входов фазового детектора (ФД). На другой вход ФД через НО и линию задержки (ЛЗ) со временем запаздывания $\tau_{ЛЗ}$ подается опорный входной сигнал. Настраивается система так, чтобы выполнялось условие $\tau_{ЛЗ} = \tau_у$ ($\tau_у$ - время запаздывания в усилительном тракте).

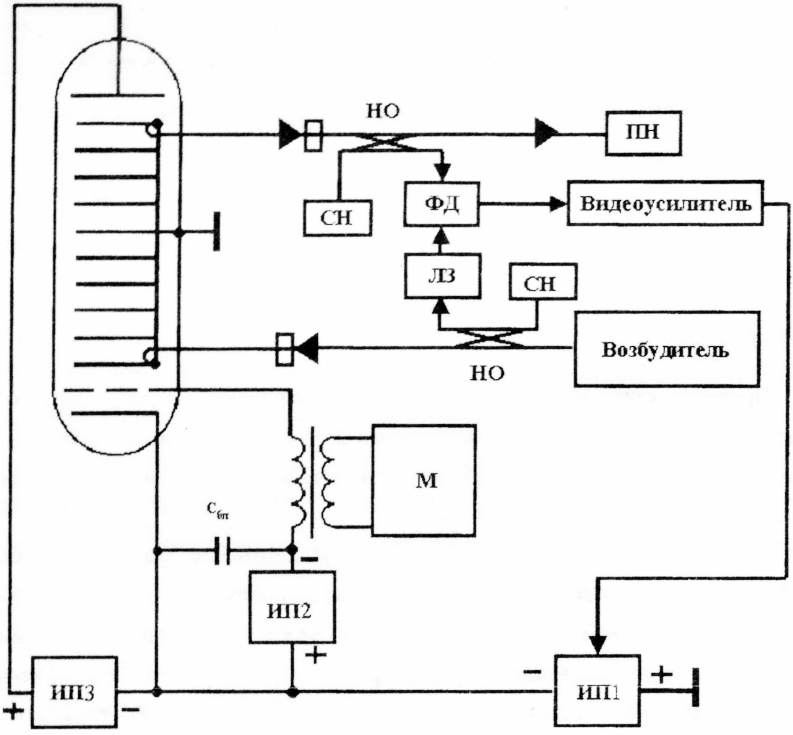

Рис. 2
Структурная схема усилительного тракта СВЧ на ЛБВО с системой БАКФ, в качестве электрически управляемого фазовращателя которой используется сама лампа (промежуток "ЗС – катод").
ИП1 - источник питания ускоряющего напряжения, ИП2 - источник питания управляющего напряжения, ИП3 - источник питания коллекторного напряжения, М – модулятор, ПН – полезная нагрузка, СН – согласованная нагрузка, НО - направленный ответвитель, ФД - фазовый детектор, ЛЗ - линия задержки, $C_{бп}$ - блокировочный конденсатор.

В этом случае сигнал ошибки на выходе ФД содержит информацию о величине абсолютного значения фазовой нестабильности Δφ на выходе усилителя. Это напряжение отрабатывается видеоусилителем и как управляющее подается на источник питания ускоряющего напряжения, выполненный по схеме (рис. 1). В этом случае источник питания ускоряющего напряжения ИП1 совместно с видеоусилителем (обычно однокаскадным) играет функцию системы управления (СУ). Сигнал с

видеоусилителя подается на дополнительный вход системы ОС, не показанный на рис.1, и воздействует на низковольтный блок DC/AC (рис. 1) так, чтобы фазовые сдвиги, вызванные изменениями ускоряющего напряжения, могли компенсировать фазовую нестабильность $\Delta\varphi$. При этом компенсируемое значение фазовой нестабильности должно лежать в пределах линейного участка характеристики электронного смещения фазы (ЭСФ) ЛБВО по ускоряющему напряжению и статической характеристики ФД. Система БАКФ может считаться системой непрерывного авторегулирования. Отработка рассогласования фазы должна завершаться в реальном масштабе времени, в импульсных усилителях - в течение возможно меньшей части длительности импульса. Такое построение системы стало возможным, благодаря тому, что фильтрующий конденсатор C_{φ} на выходе ИП1 может иметь очень малое значение емкости (он даже не обязательно присутствует на выходе). В противном случае СУ имеет большую постоянную времени из-за большого значения емкости накопительного конденсатора на выходе ИП1, коррекция фазы не может быть завершена во время импульса. Кроме того, значение $1/K_{ос1}$ может быть очень большим, следовательно, требование к коэффициенту усиления видеоусилителя облегчено. Но в то же время нецелесообразно слишком увеличивать значение $1/K_{ос1}$. Оно должно быть достаточным для реализации СУ и обеспечения стабильного опорного напряжения.

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

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выведены аналитические соотношения, связывающие между собой значение абсолютного отклонения фазы колебаний и параметры фазового шума. Они пригодны для практического использования при проектировании радиопередающих устройств.
2. Проведено теоретическое исследование дестабилизирующих влияний на фазу колебаний в усилительных трактах СВЧ на ЛБВО следующих основных факторов: нестабильности и пульсаций ускоряющего и управляющего напряжений, непостоянства входной мощности и рассогласования нагрузки. Рассмотрение проведено на основе линейной теории ЛБВО. Показано, что результаты исследования с приемлемой для практики точностью соответствуют реальным

М 171 у
им. Н. Э. Баумана

значениям фазовой стабильности практически используемых и выпускаемых промышленностью ламп. Выявлено, что нестабильность ускоряющего напряжения и его пульсации являются одной из главных причин нестабильности фазы колебаний на выходе усилительного тракта СВЧ на ЛБВО.

3. Разработаны инженерные методы задания требований по обеспечению фазовой стабильности. Получены простые расчетные формулы для определения допустимого уровня пульсаций и нестабильности питающих напряжений, допустимого уровня нестабильности входной мощности и степени развязки нагрузки.
4. При анализе особенностей импульсного питания усилительного тракта СВЧ на ЛБВО показано, что спад ускоряющего напряжения во время импульса является одной из главных причин нестабильности фазы колебаний на выходе усилительного тракта СВЧ на ЛБВО.
5. В результате исследования различных схем источников питания в усилительных трактах сделаны следующие выводы: для получения высокой фазовой стабильности целесообразно применять
   - раздельное формирование ускоряющего и коллекторного напряжения;
   - ИВЭП с преобразованием частоты.
6. Разработан ИВЭП с преобразованием частоты и перенесенным на вход преобразователя накопительным конденсатором, позволяющий получить высокую стабильность питающих напряжений. Использование такой схемы построения ИВЭП дает возможность не только обеспечить высокую фазовую стабильность при работе с большими длительностями импульса, но и облегчить выполнение требования к защите ЛБВО от разрушений при внутренних пробоях (искрениях) и получить значительный выигрыш по массе и габаритам ИВЭП и усилительного тракта в целом.
7. Предложен метод повышения фазовой стабильности с помощью регулировки напряжения на вершине импульса управляющего напряжения. Задача стабилизации фазы при изменении ускоряющего напряжения облегчена в результате компенсации фазовых отклонений, вызванных спадом ускоряющего напряжения во время импульса напряжением управляющего импульса, меняющимся на вершине по определенному закону.

8. Проведен анализ усилительных трактов с системой БАКФ. Разработана система БАКФ, в качестве электрически управляемого фазовращателя которой используется сама ЛБВО.

В целом можно считать, что поставленные задачи решены. Полученные расчетные формулы позволяют объективно задать требования по обеспечению фазовой стабильности, предлагаемые инженерные решения не приводят к лишним затратам времени и средств. Высокая фазовая стабильность может быть достигнута при правильном использовании предложенных методов.

РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Dong Ge. Kazantsev V. I., Shlyantyaev A. V. The Development of Magnetron Generator with High Frequency Stability // Journal of Microwaves. – 2000. - V. 16, №3. – P. 220 –230.
2. Мощные усилители СВЧ с высокой фазовой стабильностью на ЛБВО / Гэ Дун, В. И. Казанцев, М. Г. Абдульсалам и др. // 170-летию МГТУ им. Н. Э. Баумана.: Тез. докл. РНТК. – М., 2000. - С. 90.

Статьи, принятые к публикации:

1. Дун Гэ, Казанцев В. И., Полищук А. Г. Стабилизация фазы в мощных усилителях СВЧ на ЛБВО // Электронная техника. Серия СВЧ – Техника. - 2001. № 1 (477). С.20-28.
2. Обеспечение высокой фазовой стабильности мощных усилителей СВЧ на ЛБВО / М. Г. Абдульсалам, Гэ Дун, В. И. Казанцев и др. // Вестник МГТУ. Серия Приборостроение. - 2001. - № 3. С. .