

**Донецкий Р.В.², Ефремова М.В.^{1,3}, Иванов И.М.¹,
Платонов С.А.¹, Скрипкин Н.И.¹, Шмелев А.В.¹**
¹ОАО «ПЛУТОН»

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

³Московский институт электроники и математики НИУ ВШЭ

Магнетроны коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн с перестройкой и стабилизацией частоты. Новые возможности

Представлены результаты работ по созданию реактивных устройств для перестройки частоты импульсных магнетронных генераторов коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн. Приведены экспериментальные данные для схемы электронной перестройки магнетронов с двумя выводами. Рассматривается эквивалентная схема генератора с двумя выводами. Определен диапазон перестройки частоты. Обсуждается область применения в радиолокационных системах различного назначения. Предлагается использовать полученный опыт в разработке интегрированных генераторных блоков.

Ключевые слова: Миллиметровый диапазон, магнетрон с двумя выводами, эквивалентная схема генератора.

1. Введение

Более чем полувековая история использования магнетронных генераторов позволила разработать большое количество способов перестройки и стабилизации частоты генерации с учетом особенностей их применения в радиолокационных системах. Однако продвижение в область все более коротких волн заставляет находить новые решения на новых уровнях технологии. При длинах волн менее 4 мм не удастся реализовать магнетронный генератор высокого уровня мощности в классическом π -видном варианте. Крайне проблематично создание коаксиальных магнетронов в этом диапазоне. Однако потребность в высокостабильных источниках (до 10^{-7}) с перестройкой частоты заставляет искать технические решения для реализации таких устройств. Принимая во внимания, что импульсные магнетронные генераторы в коротковолновой части миллиметрового диапазона имеют несомненные преимущества по совокупности параметров (мощности, долговечности, технологичности изготовления) и в то же время понимая, что изменение генерируемой частоты и «неопределенность» начальной фазы колебаний от импульса к импульсу ограничивает эффективность передатчиков на основе магнетронов в сложных системах радиолокационных системах, следует рассмотреть возможность создания модернизированных генераторов с возможностью управления частотой СВЧ колебаний. Основанием для эффективной реализации является применение современных управляющих программных и аппаратных решений с высокой скоростью обработки информации.

2. Общие положения

Следует рассмотреть следующие направления модернизации импульсных магнетронных генераторов коротковолновой части мм-диапазона:

- перестройка рабочей частоты от импульса к импульсу;
- перестройка рабочей частоты внутри импульса по заданному закону;
- стабилизация рабочей частоты.

Как показал опыт последних разработок в данном диапазоне все эти направления наиболее эффективно реализуются при применении магнетронов с двумя выводами – активным и реактивным. Эквивалентная схема магнетронного генератора с двумя выводами представлена на рисунке 1.

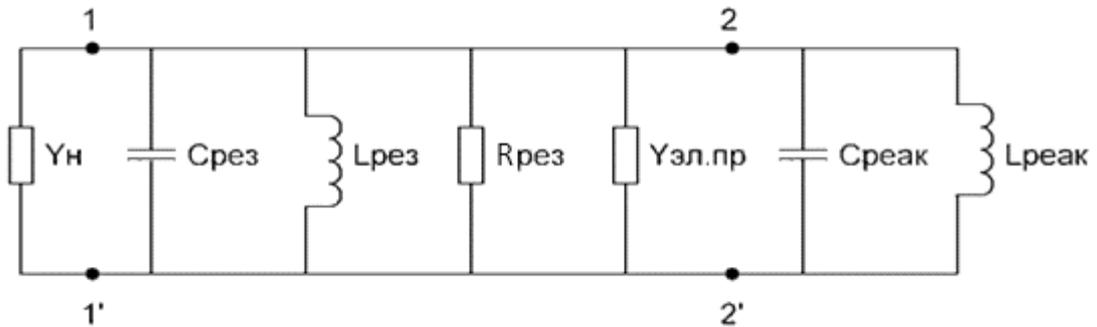


Рис.1. Эквивалентная схема магнетронного генератора с двумя выводами.

Активная нагрузка Y_n подключена в плоскости $1 - 1^1$, а реактивная нагрузка – в плоскости $2 - 2^1$. $C_{рез}$, $L_{рез}$, $R_{рез}$ – «холодные» параметры собственной резонансной системы магнетрона. $C_{реак}$, $L_{реак}$ – параметры реактивной нагрузки. $Y_{эл.пр} = g + jb$ – полная электронная проводимость. Y_n – проводимость активной нагрузки.

При изменении реактивной нагрузки в плоскости $2-2^1$ происходит изменение «холодной» резонансной частоты данного вида колебаний.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_{эkv} \times C_{эkv}}}, \text{ где } C_{эkv} = C_{рез} + C_{реак}, \quad L_{эkv} = \frac{L_{рез} \times L_{реак}}{L_{рез} + L_{реак}}$$

При этом магнетрон в «горячем» режиме изменяет рабочую частоту в соответствии с изменением параметров реактивной нагрузки. Таким образом происходит изменение частоты от импульса к импульсу или внутри импульса, при этом скорость изменения определяется видом реактивного элемента (механические элементы, ферриты, сегнетоэлектрики) и скоростью работы схем управления.

Также при подключении к реактивному выводу высокочастотного стабилизирующего резонатора (квазиоптического в данном диапазоне длин волн) происходит дополнительная стабилизация рабочей частоты.

Следует отметить, что все эти режимы также возможно реализовать в магнетроне с одним выводом [1]. В этом случае, при воздействии внешнего дополнительного сигнала в плоскости $1-1^1$ происходит «фазирование» магнетрона с изменением рабочей частоты. По сути тут имеет место явление «затягивания частоты» генератора. При этом в рабочем режиме изменяются реактивные параметры электронной проводимости (в случае магнетрона – форма и плотность электронных спиц в пространстве взаимодействия), а параметры «холодной» системы остаются неизменными. Однако, как показывают расчетные и экспериментальные данные в этом случае диапазон перестройки сокращается в 3-4 раза по сравнению с двухвыводной системой.

3. Ферритовый фазовращатель в реактивном выводе: экспериментальные результаты

Исходные параметры магнетрона:

- | | |
|--|-------|
| - частота генерации (ГГц) | f_0 |
| - длительность импульса, регулируемая (нс) | 200 |
| - частота посылок, регулируемая (Гц) | 2500 |

- импульсная мощность, максимальная (КВт)
- вариант исполнения – с двумя выводами.

12

Для успешной реализации не π -видного магнетрона с двумя выводами были произведены расчетные работы с применением компьютерного моделирования и осуществлена оптимизация конструкции магнетрона[2].

Для целей перестройки и стабилизации частоты генерации в ОАО «ПЛУТОН» разработаны импульсные магнетроны со вторым вспомогательным выводом энергии, являющимся элементом перестройки частоты магнетрона. При подключении к такому выводу различных устройств была получена высокоэффективная электронно-управляемая перестройка частоты.

В качестве элемента изменяющего фазу (и в конечном итоге, параметры резонансного контура, подключенного в плоскости 2 – 2¹) был использован ферритовый фазовращатель высокого уровня мощности разработки ОАО «Феррит – Домен». Управление осуществлялось электронным способом, с помощью изменения тока в электромагните фазовращателя. Структурная схема представлена на рисунке 2а, внешний вид с магнетроном – на рисунке 2б.

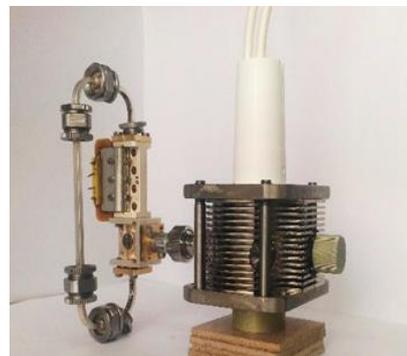
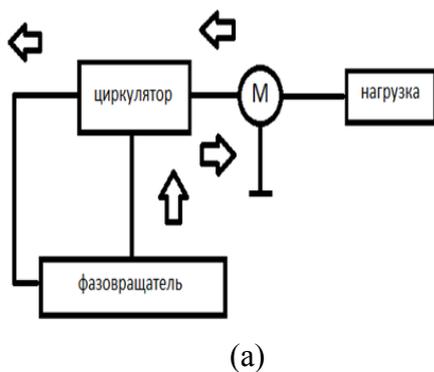


Рис. 2. Структурная схема (а) и внешний вид (б) устройства быстрой перестройки в сборе с двухвыводным магнетроном.

Фазовращатель обеспечивает изменение фазы $\pm 90^\circ$ при изменении тока через обмотки электромагнита ± 500 мА. Этого достаточно для достижения максимальной полосы перестройки при правильной настройке электрической длины обратной связи во вспомогательном выводе. Максимальная величина перестройки в эксперименте составила 90 МГц. Спектрограмма выходного сигнала магнетрона при отсутствии управляющего сигнала представлена на рисунке 3а. Спектрограмма с перестройкой частоты от импульса к импульсу (два поочередных значения) представлена на рисунке 3б.

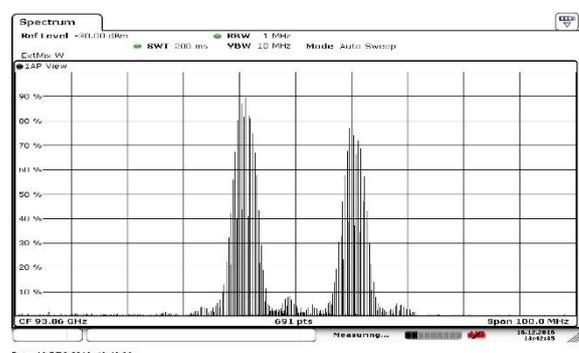
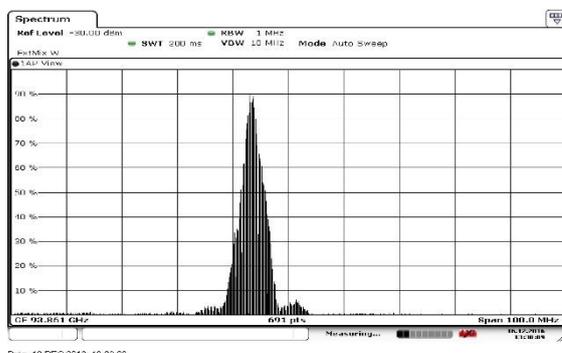


Рис.3. Спектрограмма выходного сигнала магнетрона при отсутствии управляющего сигнала (а) и при наличии управляющего сигнала (б).

В обычном режиме работы для обеспечения требуемой напряженности магнитного поля на обмотку фазовращателя необходимо подать напряжение порядка 2В. При этом изменение частоты резонансного контура (Рис.3) обеспечивается в течение 10 мс.

Для обеспечения «быстрой» перестройки частоты специальный импульсный источник питания осуществлял поочередное перемагничивание магнитопровода фазовращателя. На управляющую обмотку фазовращателя подавались импульсы напряжения положительной и отрицательной полярности. Длительности этих импульсов были ограничены периодом повторения СВЧ импульсов ($T_{\text{перестройки}} < 400 \text{ мкс}$) и в эксперименте составляли 200 мкс. Амплитуда импульсов составляла 50 В. Таким образом, благодаря применению данного источника питания удалось перейти от управления пачкой импульсов к управлению одиночными импульсами с частотой посылок 2500 Гц. Временная диаграмма импульсов управления (перемагничивания) и синхронизированных с управлением импульсов магнетрона приведена на рисунке 4.

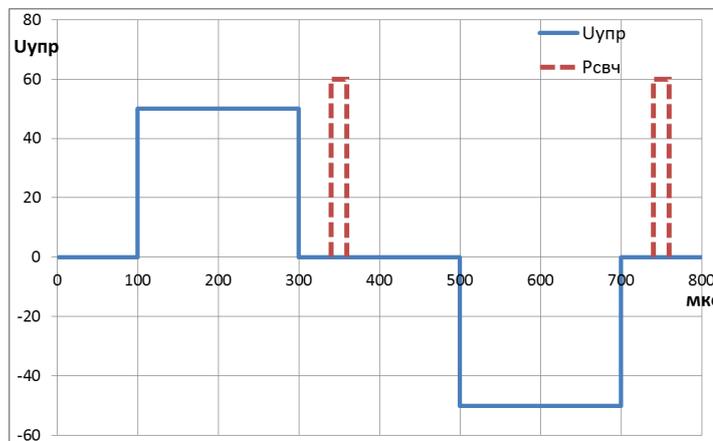


Рис.4. Временная диаграмма импульсов управления и синхронизированных с управлением импульсов магнетрона.

Если рассматривать ферритовый фазовращатель в импульсном режиме совместно со схемой управления, ширина диапазона перестройки от импульса к импульсу в зависимости от управляющего напряжения $U_{\text{упр}}$ пропорциональна интегралу:

$$\Delta F_{\text{max}} \sim \int_0^{t_1} U_{\text{упр}} dt, \text{ где } t_1 \text{ — длительность импульса управления.}$$

Следует отметить, что в данной схеме проблематично реализовать внутриимпульсную перестройку частоты при длительностях импульса 100 – 200 нс в силу значительной инерционности ферромагнетиков. Некоторым недостатком данной схемы являются также значительные габариты волноводных цепей схемы и необходимость применения циркулятора (как следствие «невозможности» ферритовых элементов). Как альтернативный вариант мы предлагаем использовать сегнетоэлектрические фазовращатели в схеме с короткозамкнутым волноводом в реактивном выводе энергии магнетрона.

4. Короткозамыкатель в реактивном выводе

Структурная схема магнетрона с короткозамыкателем представлена на рисунке 5.

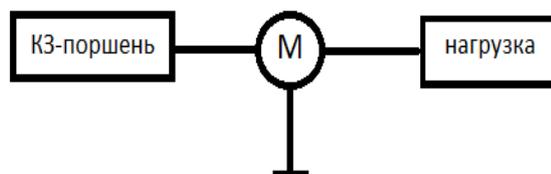


Рис. 5. Структурная схема магнетрона с короткозамыкателем.

Плавнопереключающийся механический поршень в круглом или прямоугольном волноводе, подключенный к реактивному выводу энергии, экспериментально обеспечил значительную перестройку частоты магнетронного генератора (в 3-мм диапазоне). При выходной импульсной мощности до 10 кВт в импульсе, диапазон перестройки составил не менее 200 МГц. Однако требования быстрой перестройки исключают наличие механических систем. Возникло предложение о размещении в реактивном короткозамкнутом волноводе взаимного электронно-управляемого сегнетоэлектрического фазовращателя.

В последнее время ряд работ выполненных в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете "ЛЭТИ" позволяет говорить о возможности применения сегнетоэлектрических фазовращателей в системах быстрой перестройки частоты в миллиметровом диапазоне. В работах [3] отмечаются уникальные характеристики материалов на основе $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BST): высокая диэлектрическая проницаемость (больше 500); существенный фактор перестройки K - отношение $\epsilon(0)/\epsilon(E_{max})$, где E_{max} - максимальное смещение электрического поля; низкие диэлектрические потери $\tan \delta$ (меньше 0,01) и отсутствие гистерезиса на вольт-фарадных характеристиках. Фактически это говорит о возможности применения сегнетоэлектриков в системах внутриимпульсной перестройки частоты для магнетронных генераторов. В настоящее время ведутся совместные расчетные работы для применения сегнетоэлектрических фазовращателей для внутриимпульсной перестройки частоты в импульсных магнетронных генераторах 3-мм диапазона высокого уровня мощности.

5. Высокодобротный стабилизирующий резонатор в реактивном выводе.

Теория применения стабилизирующего резонатора в реактивном выводе энергии для π -видных систем как «асимметричная настройка» магнетрона достаточно полно разработана в 60-е годы XX века [4]. В 3-мм диапазоне в связи с проблемой разделения видов колебаний сложно реализовать полый стабилизирующий резонатор высокого уровня мощности и требуется переход на технику квазиоптического типа. В качестве прототипа была использована эшелеттная система, предложенная ИРЭ им. А.Я.Усикова [5] для стабилизации твердотельных генераторов 8-мм диапазона. Была изменена конструкция и произведено моделирование системы для 3-мм диапазона. Результаты численного моделирования представлены на рисунках 6 и 7.

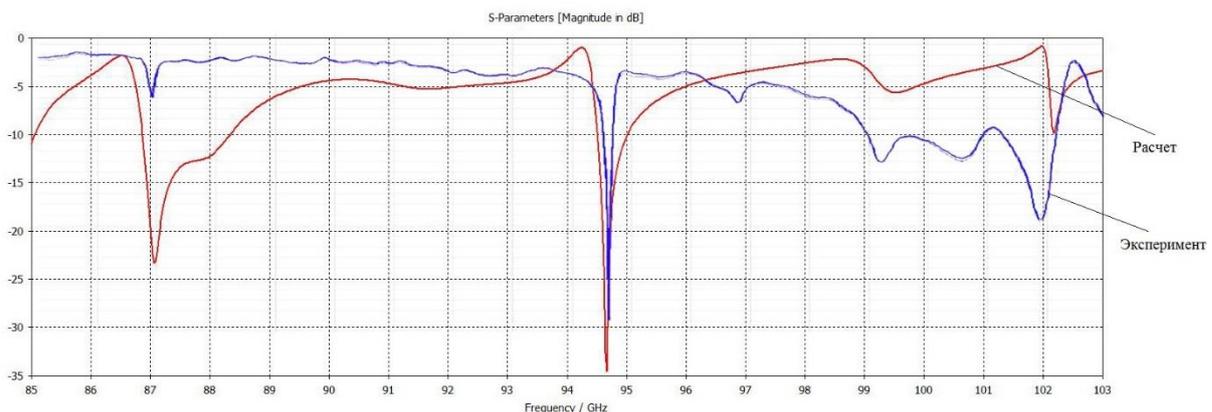


Рис. 6. Расчетная и экспериментальная зависимости параметра S_{11} от частоты.

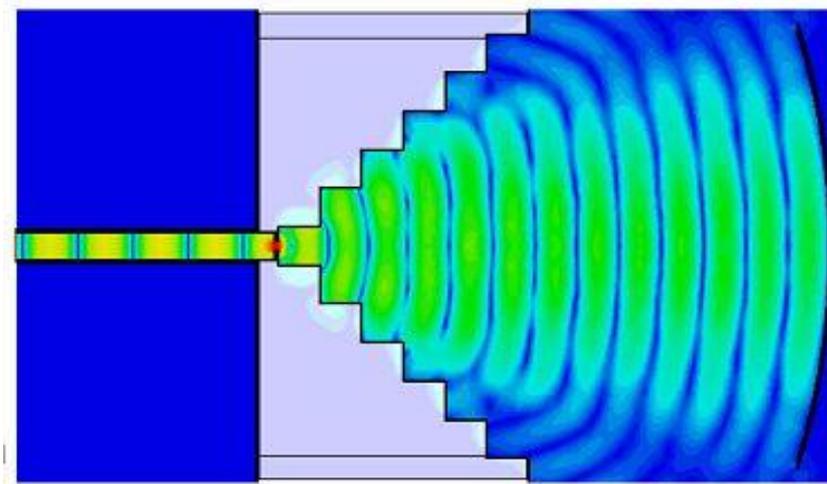


Рис. 7. Распределение E-компоненты ВЧ поля.

Резонатор через прямоугольный или круглый волновод подсоединяется к реактивному выводу магнетрона и обеспечивает необходимую внутриимпульсную стабильность. При перемещении сферического зеркала в пределах $\lambda/2$ по направлению главной оси эшелетта происходит эффективная перестройка резонансной частоты эшелетта ± 2.0 ГГц с сохранением типа колебания TEM_{0013} . Собственная добротность эшелеттной системы составляет не менее 1000. По результатам расчетов была изготовлена эшелеттная система (рис. 8а) и проведены «холодные» измерения (рис. 6). Стабилизирующая система в сборе с магнетроном представлена на рисунке 8б.

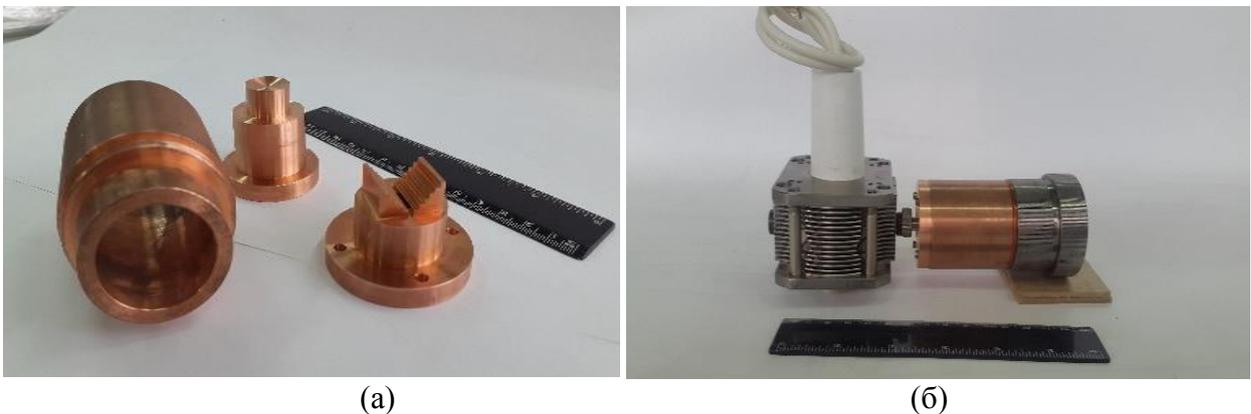


Рис. 8. Эшелеттная система (а) и стабилизирующая система с магнетроном (б).

В настоящее время проводятся «горячие» измерения магнетронного генератора со стабилизирующим перестраиваемым резонатором. Получены первоначальные положительные результаты. Можно предположить, что в данном устройстве также возможна замена механической перестройки на электронно-управляемую с применением сегнетоэлектрических материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных работ позволяют говорить о возможности существенного повышения информационных качеств «магнетронных» радиолокационных систем коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн за счет быстрой перестройки частоты генерируемых колебаний. Также за счет увеличения стабильности частоты внутри импульса возможна реализация режима селекции движущихся целей. Рассмотренные устройства для быстрой перестройки частоты и стабилизации импульсных магнетронов могут быть интегрированы в реальные конструкции корпусов магнетронов.

Библиографический список

1. В.А. Осипов, С.А. Шостак «Анализ работы самосинхронизированного магнетрона» // доклады БГУИР, г. Минск, 2013 г. №1 (71), стр.84-90.
2. Н.И. Скрипкин, С.Л. Моругин «Магнетрон 3-миллиметрового диапазона длин волн на пространственной гармонике не π -вида колебаний» // ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ И ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, г. Москва, 2016 г. №9, том 21.
3. П.Ю. Белявский, А.А. Иванов, И.Г. Мироненко «Электрически управляемый фазовращатель на основе многощелевой линии для применения в фазированных антенных решетках» // Материалы VI Международной научно-технической конференции МИРЭА, г. Москва, 2007 г.
4. Д.Е. Самсонов, «Основы расчета и конструирования магнетронов» // Советское радио, г. Москва, 1974 г.
5. О.И. Белоус, А.А. Кириленко, А.И. Фисун «Квазиоптические резонансные системы в приборах твдотельной электроники миллиметровых и субмиллиметровых длин волн» // РАДИОФИЗИКА И ЭЛЕКТРОНИКА, Том 13, спец.выпуск, 2008 г.