

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНЕТРОНА С ДВУМЯ ВЫВОДАМИ ЭНЕРГИИ

Г.И. ЧУРЮМОВ, А.И. ЭКЕЗЛИ

Рассматриваются особенности и результаты моделирования частотных характеристик магнетронов в непрерывном режиме. Предложены математические модели расчета характеристик «холодной» электродинамической системы магнетрона (анодного блока) и двумя выводами энергии (метод эквивалентных схем), а также самосогласованная математическая модель магнетрона (модель крупных частиц) исследования электронно-волнового процесса нелинейного взаимодействия в пространстве взаимодействия магнетрона. Представлены результаты экспериментальных исследований возможной нестабильности частоты в магнетронах, включая результаты исследования влияния температуры анодного блока на частоту генерации, а также анализируется роль катода и наличия помех от источника питания при обеспечении повышения стабильности частоты магнетрона. На основе качественного анализа системы нелинейных уравнений возбуждения дается феноменологическое описание механизма флуктуаций частоты в магнетронах, объясняются причины нестабильности частоты и особенности уширения спектральной линии генерирующего магнетрона в непрерывном режиме. Результаты анализа подтверждаются данными численных расчетов.

Ключевые слова: магнетрон, математическая модель, метод эквивалентных схем, девиация частоты, стабильность частоты, перестройка частоты.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к вопросам изучения и понимания процессов, протекающих в классических магнетронах, а также соответствия некоторых положений их теории эксперименту не ослабевает [1]. Особое внимание вызывают вопросы, связанные с улучшением частотных характеристик магнетронов, включая повышение стабильности частоты, расширение диапазона и скорости ее перестройки, уменьшение нежелательных (паразитных, внекратовых) излучений, снижение уровня шумов в выходном спектре и т.п. [2-5]. В сочетании со свойственными данному прибору высокой эффективностью работы, технологичностью и относительно невысокой стоимостью улучшение частотных характеристик магнетронов позволит рассматривать магнетроны как конкурентоспособные приборы на рынке источников электромагнитных колебаний и расширить их практическое применение.

Целью данной работы является дальнейшее развитие и совершенствование методологии моделирования физических процессов в магнетронах, анализ причин ухудшения стабильности частоты и изучение факторов, приводящих к ее улучшению, а также выбора путей и методов увеличения диапазона перестройки частоты.

1. АНАЛИЗ ПРИЧИН НЕСТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ

Исследование частотных характеристик магнетронов и их анализ показывает, что флуктуация частоты в магнетронных генераторах зависит от многих факторов и связана с электронно-волновым механизмом взаимодействия, режимом работы прибора, условиями и особенностями его эксплуатации. Для изучения причин, вызывающих частотную нестабильность

в магнетронах, были исследованы непрерывные 2-х и 3-х сантиметровые магнетроны с оксидными катодами косвенного накала.

Блок-схема экспериментальной установки для измерения флуктуаций частоты магнетронов приведена на рис. 1. Питание магнетронов осуществляется от высоковольтного блока питания (БП) с регулируемым стабилизированным анодным напряжением постоянного тока с нестабильностью напряжения не более $\pm 0,1\%$ и нестабилизированным переменным напряжением накала 6,3 В. Измерение временной зависимости флуктуаций частоты в магнетроне проводится методом прямого детектирования [6]. В качестве частотного детектора используется дискриминатор частоты резонансного типа, который настраивается так, чтобы его частотная характеристика соответствовала ширине спектра исследуемого сигнала Δf (рис. 1). В результате флуктуации частоты, генерируемой магнетроном, преобразуются во флуктуации амплитуды напряжения $\tilde{U}_m(t)$, которые фиксируются на осциллографе.

Среди факторов, влияющих на частоту генерации в магнетронах и вызывающих ее сдвиг и флуктуацию (техническая флуктуация), а также оказывающих в целом негативное влияние на частотные характеристики магнетронов, следует выделить:

- тепловые эффекты, которые, с одной стороны, вызывают изменение геометрических размеров анодного блока магнетрона (особенно в коротковолновой части сантиметрового и миллиметрового диапазонов) [7], а с другой — влияют на эмиссионные процессы, протекающие на катоде и вызывающих колебания суммарного тока, эмитируемого с поверхности катода [8];
- нестабильность источника питающих напряжений [9];

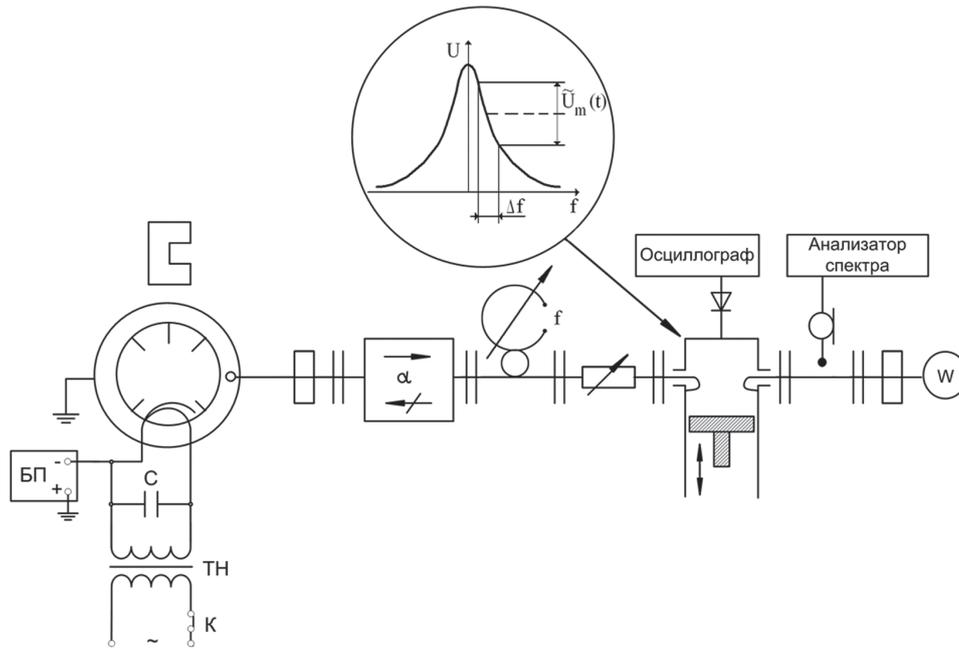


Рис. 1. Блок-схема измерительной установки

- наличие внешних цепей, обеспечивающих регулировку рабочего режима магнетронов (цепи питания и СВЧ цепи) и т.п.

В работе [5] представлены результаты исследований непрерывного бытового магнетрона с частотой генерации 2450 МГц. Изучение теплового ухода частоты показало, что диапазон изменения частоты генерируемых магнетроном колебаний зависит от температуры анодного блока T_a , вызванной бомбардировкой его поверхности (ламелей) электронами (анодный ток I_a), и увеличивается с ее ростом. Так, в диапазоне изменений температуры анодного блока от 50 °С до 90 °С, тепловой уход частоты составил 2 МГц при условии, что $I_a = 300$ мА.

На рис. 2 представлены экспериментальные временные зависимости температуры анодного блока непрерывного магнетрона 3-см диапазона, которые измерены температурным датчиком на внешней поверхности анодного блока. Температурные зависимости снимались при условиях применения различных методов охлаждения магнетрона: конвективного (кривая 1) и принудительного воздушного (кривые 2 и 3). Зависимости изменения частоты данного магнетрона от температуры анодного блока для разных значений анодного тока магнетрона показаны на рис. 3.

Известно [7], что вылет электронов на анод в динамическом режиме работы магнетронов приводит к выделению дополнительной энергии на ламелях анодного блока и, как результат, к его нагреву. Для стабилизации температурного режима магнетронов используют различные виды охлаждения анодного блока. Как видно из рис. 2 и 3, применение принудительного воздушного охлаждения (кривые 2) по сравнению с конвективным охлаждением (кривая 1) позволяет регулировать процессом установления температуры анодного блока. При этом увеличение воздухообмена в 2

раза (кривая 3) приводит к уменьшению температурного коэффициента частоты и сокращению (в 1,2 ... 1,4 раза) времени установления температурного режима работы магнетрона. Рост температуры анодного блока, как видно из рис. 3, вызывает изменение генерируемой частоты. При этом как в режиме малых амплитуд ВЧ поля при $I_a = 50$ мА (низковольтный участок вольтамперной характеристики (ВАХ)), так и в режиме больших амплитуд при $I_a = 150$ мА (высоковольтный участок ВАХ) с ростом температуры частота магнетрона уменьшается, т.е. наблюдается линейное расширение внутреннего объема анодного блока и увеличение значений эквивалентных емкости $C_p(t)$ и индуктивности $L_p(t)$ анодного блока. В целом следует отметить, что в силу значительной инерционности тепловых процессов их влияние на процесс установления частоты магнетронов можно рассматривать как аperiодический процесс.

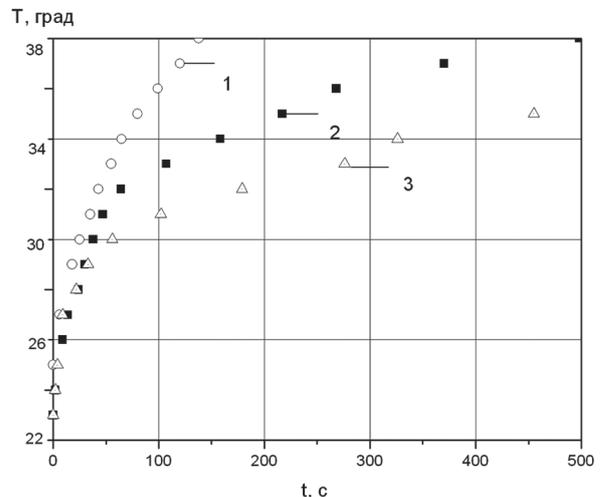


Рис. 2. Экспериментальные зависимости температуры анодного блока непрерывного магнетрона 3-см диапазона от времени работы

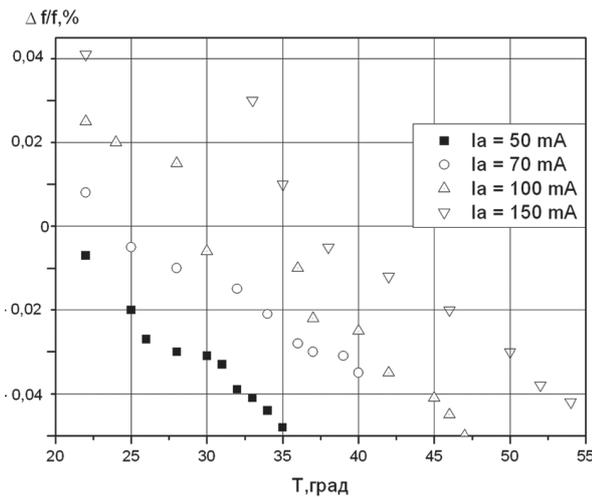


Рис. 3. Экспериментальные зависимости изменения частоты непрерывного 3-см магнетрона от температуры анодного блока в режиме принудительного охлаждения

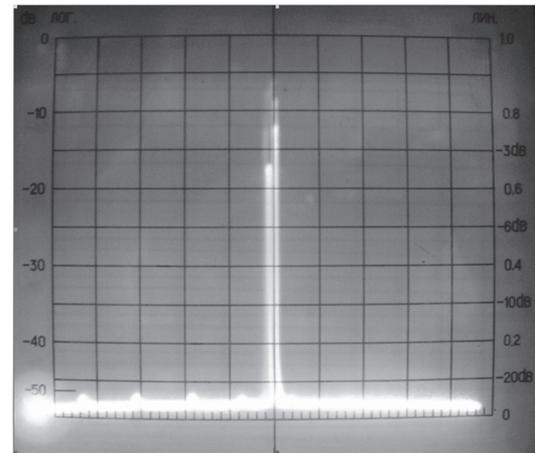
Более сложный и неоднозначный характер имеет проявление тепловых процессов на катоде. Особенности такого проявления зависят от типа используемого катода (прямоанодный катод, вторично-эмиссионный катод косвенного накала или «холодный» вторично-эмиссионный металлический катод). Как показано теоретически в работе [8] применительно к непрерывному магнетрону 3-см диапазона с вторично-эмиссионным катодом косвенного накала (оксидный катод), наличие электронной бомбардировки поверхности оксидного катода приводит к дополнительному выделению энергии и подогреву поверхности катода. В результате роста температуры увеличивается ток термоэлектронной эмиссии до момента установления режима ограничения эмиссии полем пространственного заряда (ПЗ). В установившемся режиме работы магнетрона значение температуры поверхности катода будет колебаться около некоторого среднего значения, определяемого напряжением цепи накала. Максимальное отклонение температуры, по данным численных расчетов [8], составляет 3÷4 % от среднего значения и уменьшается с увеличением плотности ПЗ в области втулки. Показано, что колебания тока эмиссии приводят к изменению анодного тока и колебаниям частоты генерации.

Сравнение результатов применения в магнетронах различных типов катодов показывает, что наименее подвержены влиянию температурного фактора «холодные» металлические вторично-эмиссионные катоды в отличие от подогреваемых термоэмиссионных катодов (как прямоанодных, так и подогреваемых с косвенным накалом). С учетом низкого потребления мощности и высокой плотности тока эмиссии, данный тип катодов обладает также безынерционным включением (выключением) и удовлетворяет условиям микроминиатюризации [10].

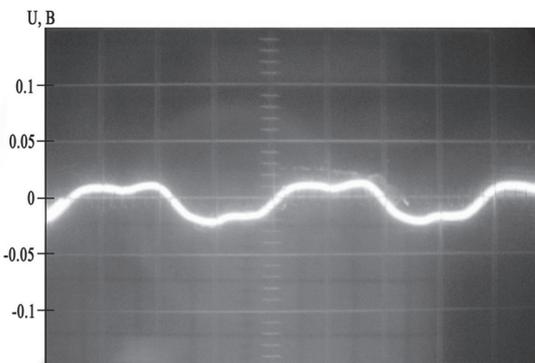
С другой стороны, не менее важным фактором стабильной работы магнетронов является

выбор и использование источников электропитания с требуемыми выходными параметрами (анодным напряжением и напряжением накала) [9]. Показано, что нестабильность питающих напряжений (более 0,1%) приводит к ухудшению спектральных характеристик магнетронов, в частности, к дополнительной модуляции амплитуды и частоты выходного сигнала.

На рис. 4 показаны экспериментальные зависимости выходного спектра непрерывного магнетрона 3-см диапазона в режиме непрерывной генерации (а) и изменения частоты магнетрона от времени (б) для фиксированной точки ВАХ при $I_a = 100$ мА.



а



б

Рис. 4. Выходной спектр непрерывного магнетрона 3-см диапазона (расстояние между метками 1 МГц) (а) и зависимость изменения частоты магнетрона от времени (б)

Как видно, выходной спектр магнетрона представляет собой сложный модулированный по амплитуде и частоте выходной сигнал с девиацией частоты для выбранного случая равной 340 кГц. Указанное значение девиации частоты получено при условии, что пульсации анодного напряжения не превышают $\pm 0,1\%$ и соответствуют стабильности частоты выходного сигнала порядка $6,0 \cdot 10^{-5}$. Выключение тока накала после запуска магнетрона (разрыв цепи накала с помощью ключа К на рис. 1) приводит к незначительному уменьшению девиации частоты до 280÷300 кГц. С ростом пульсаций напряжения источника питания (нестабильность по напряжению более

$\pm 1 \%$) девиации частоты увеличивается и превышает 8 МГц.

С другой стороны, экспериментальные исследования показали, что флюктуации частоты магнетрона имеют периодический характер с частотой 50 Гц (рис. 4, б). Это свидетельствует о возможном влиянии на работу магнетрона внешней помехи от источника питания и указывает на необходимость применения дополнительных мер по защите (фильтрации) цепей питания магнетрона от внешних и внутренних помех.

На рис. 5 показана зависимость относительного изменения частоты генерации магнетрона от амплитуды внешней помехи при условии, что $I_a = 100$ мА. Как видно, с уменьшением амплитуды внешней помехи нестабильность частоты генерации магнетрона уменьшается и достигает прогнозируемого минимального значения $2 \cdot 10^{-5}$.

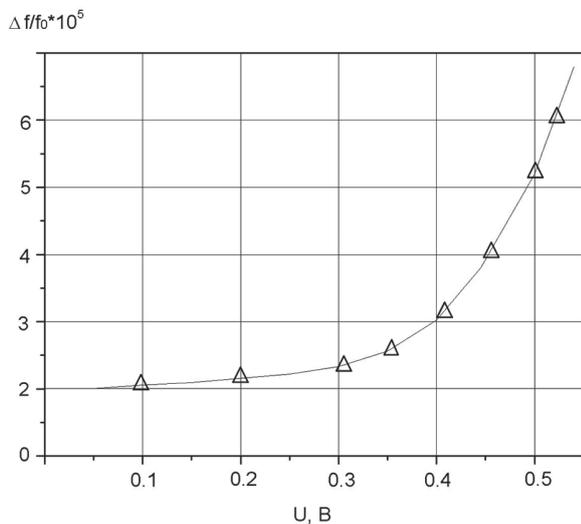


Рис. 5. Зависимость относительного изменения частоты генерации 3-см магнетрона от амплитуды внешней помехи

Анализ путей улучшения частотных свойств магнетронов показывает, что вопросы повышения стабильности частоты в значительной степени зависят от типа катода и возможного применения различных путей стабилизации частоты и ее программируемой перестройки [11]. В этом случае практический интерес вызывают конструкции магнетронов с внешним стабилизирующим резонатором (коаксиальный магнетрон) или магнетрон с дополнительным (вторым) выводом энергии (реактивный вывод) [12].

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Существующая практика моделирования магнетронов сводится к исследованию нелинейного взаимодействия в системах типа «резонансная электродинамическая система – замкнутый электронный поток» при соответствующих граничных и начальных условиях. При этом решается единая самосогласованная задача, которая для фиксированного момента времени сводится, с одной стороны, к решению волнового уравнения

и расчету электромагнитного поля в пространстве взаимодействия резонансной электродинамической системы магнетрона, а с другой – к решению уравнения движения электронного облака в фиксированном (рассчитанном) электромагнитном поле резонансной электродинамической системы. В результате фазовой группировки образуются спицы ПЗ и происходит передача энергии, запасенной в электронном потоке электромагнитному полю резонансной электродинамической системы. Энергетические и частотные характеристики магнетрона и особенности их изменения являются целью большого количества исследований, направленных на их оптимизацию и получение максимальной эффективности взаимодействия (кпд), минимизацию девиации частоты, повышение ее стабильности и увеличение диапазона перестройки.

Практическая реализация задач моделирования нелинейных процессов в магнетронах основывается на применении различных методов (см., например, [7]). Особенностью предлагаемого подхода является сочетание метода «эквивалентных схем» для расчета частотных свойств «холодной» электродинамической системы магнетрона (определение резонансной частоты, оценка диапазона ее перестройки для разных конструкций анодных блоков, определение собственной и нагруженной добротностей основного и ближайших паразитных видов колебания анодного блока, и т.д.) и метода крупных частиц (Particle-in-Cell (PIC) Method) для моделирования нелинейного взаимодействия электронного облака с электромагнитным полем.

3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ)

Применение метода эквивалентных схем и определение составляющих ее элементов основывается на предположении об известной структуре электромагнитного поля, возбуждаемом в резонансной системе многорезонаторного магнетрона («одноволновое» приближение). В этом случае возможно перейти от реальной конструкции многоволновой колебательной системы магнетрона к ее эквивалентной схеме для заданного рабочего вида колебания (например, колебания π -вида).

На рис. 6 представлены эквивалентные схемы для конструкции восьмirezонаторного анодного блока ($N = 8$, где N – количество резонаторов) с одним выводом энергии (активный вывод) (а) и двумя выводами энергии (активным и реактивным) (б), полученные для случая возбуждения рабочего π -вида колебания.

Для определения количественных значений элементов эквивалентных схем воспользуемся прямыми методами теории цепей и длинных линий [13]. В качестве плоскости представления эквивалентной схемы магнетрона выбирается

плоскость $11'$ на рис. 6, а. С учетом этого определяется входное комплексное сопротивление «холодного» резонансного анодного блока магнетрона как $Z_p(j\omega) = R_p + jX_p$. Полагая $Jm(Z(j\omega)) = 0$, получаем значение резонансной частоты анодного блока для рабочего вида колебания (рис. 6, а).

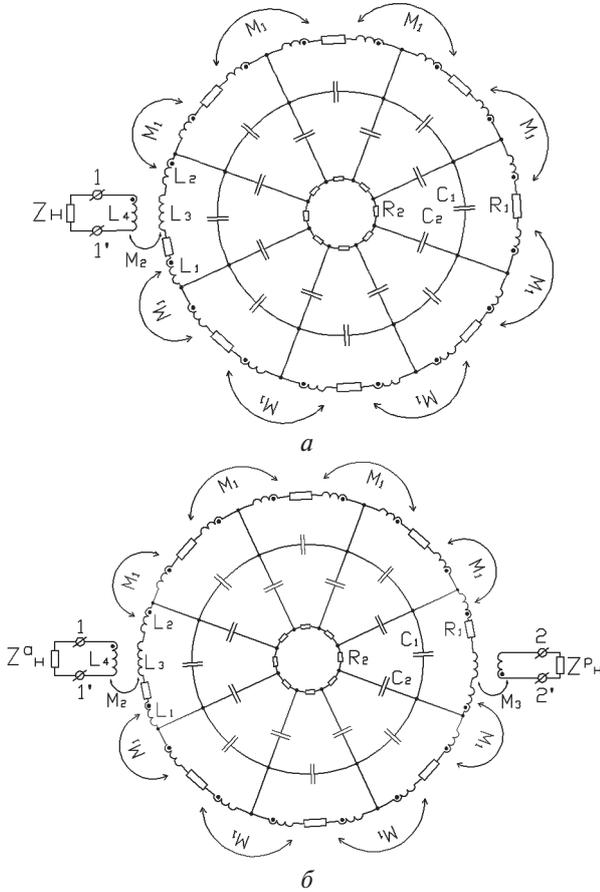


Рис. 6. Эквивалентные схемы магнетронов с одним (а) и двумя (б) выводами энергии: C_1 – емкость резонатора анодного блока; C_2 – емкость пространства взаимодействия; R_1 – сопротивление потерь анодного блока; R_2 – сопротивление потерь на катоде; $L = L_1 + L_2$ – индуктивность резонатора анодного блока; L_3 и L_4 – индуктивности выводов энергии; M_1 – взаимная индуктивность резонаторов анодного блока; M_2 – взаимная индуктивность активного вывода энергии и резонатора анодного блока; M_3 – взаимная индуктивность реактивного вывода энергии и резонатора анодного блока

Для конструкции магнетрона с двумя выводами энергии входное комплексное сопротивление анодного блока магнетрона относительно плоскости $11'$ запишется с учетом влияния параметров второго (реактивного) вывода энергии в виде $Z_p'(j\omega) = R_p' + jX_p'$. В данном выражении учитываются значения реактивной нагрузки, включенной во второй вывод энергии. Записывая условия резонанса анодного блока $Jm(Z'(j\omega')) = 0$ получаем значение резонансной частоты анодного блока на рабочем виде колебания для конструкции анодного блока с двумя выводами энергии. Изменение реактивной нагрузки Z_H^p приводит к сдвигу резонансной частоты «холодного» анодного

блока. Таким образом осуществляется перестройка его частоты в пределах заданного межвидового диапазона разделения частот.

На рис. 7 представлена экспериментальная зависимость перестройки частоты 3-см магнетрона с двумя выводами энергии. В качестве реактивной нагрузки Z_H^p второго (реактивного) вывода использовался короткозамыкающий поршень. При этом отрезок короткозамыкающего поршня рассматривается как реактивная нагрузка с входным реактивным сопротивлением $Z_{вх} = jZ_0 \operatorname{tg} \beta L$, где Z_0 – характеристическое сопротивление линии передач, $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_B}$ – фазовая постоянная, L – длина линии передач. Как видно из рис. 7, изменение длины линии передач (волновода) L приводит к периодическому изменению частоты генерации магнетрона. Полученная экспериментально величина перестройки частоты превышает 200 МГц.

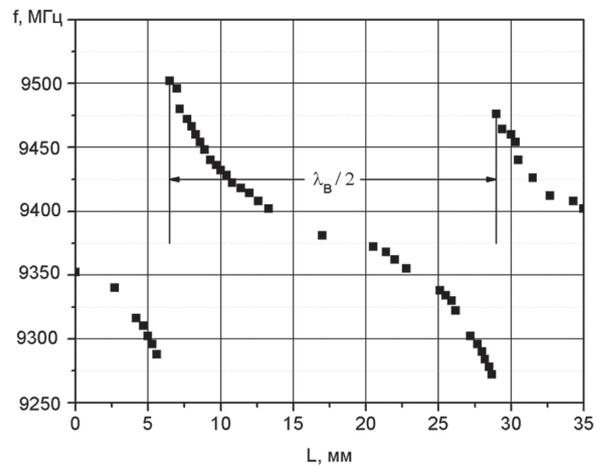


Рис. 7. Экспериментальная кривая перестройки частоты

Для феноменологического описания флуктуации и перестройки частоты в магнетроне рассмотрим универсальную эквивалентную схему магнетрона с учетом присутствия замкнутого электронного потока, выводов энергии и внешней (активной и реактивной) нагрузки (рис. 8).

Как видно, универсальная эквивалентная схема магнетрона включает в себя эквивалентные емкость C_p и индуктивность L_p «холодной» резонансной колебательной системы (анодного блока), емкость электронного потока $C_{эл}$, эквивалентные емкость $C_H^{ЭКВ}$ и индуктивность $L_H^{ЭКВ}$ активного вывода энергии и нагрузки, трансформированные к сечению $11'$, а также реактивную нагрузку второго (реактивного) вывода энергии Z_H^p , обусловленной подключенной линией передач длиной L . Изменение длины L вызывает соответствующее изменение входного ее реактивного сопротивления Z_H^p и, как следствие, изменяется резонансная частота анодного блока. Данное изменение частоты π -вида можно представить как функцию частоты от времени в виде:

$$f_{\text{п-вид}}(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{L_{\text{экв}}(t)C_{\text{экв}}(t)}}, \quad (1)$$

где

$$C_{\text{экв}}(t) = C_p(t) + C_{\text{эл}}(t) + C_{\text{н реакт}}^{\text{экв}}(t) + C_{\text{н акт}}^{\text{экв}}(t); \quad (2)$$

$$L_{\text{экв}}(t) = \frac{L_p(t) \cdot L_{\text{н акт}}^{\text{экв}}(t)}{L_p(t) + L_{\text{н акт}}^{\text{экв}}(t)} \quad (3)$$

— эквивалентные емкость и индуктивность «горячей» колебательной системы магнетрона; $C_{\text{н реакт}}^{\text{экв}}(t)$ — эквивалентная емкость реактивного вывода энергии; $C_{\text{н акт}}^{\text{экв}}(t)$ — эквивалентная емкость активного вывода энергии магнетрона.

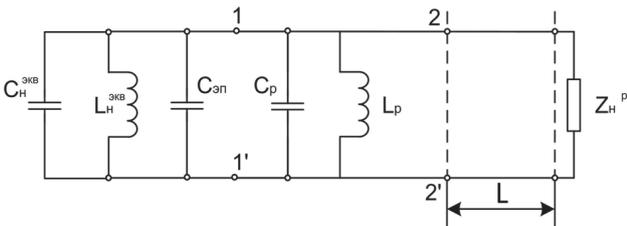


Рис. 8. Универсальная эквивалентная схема

Как видно из выражений (1) – (3), частота генерации магнетрона зависит от параметров «холодной» резонансной колебательной системы, свойств электронного потока, условий согласования магнетрона с активной нагрузкой магнетрона (явление затягивания частоты), выбора режима работы прибора (электронное смещение частоты) и величины вносимой реактивной составляющей полного комплексного сопротивления второго вывода энергии. Указанные параметры зависят от теплового режима работы, эмиссионных процессов на катоде, особенностей токопереноса объемного заряда с катода на анод (фазовая группировка электронного потока), характера реактивной нагрузки второго вывода энергии и т.д.

4. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАГНЕТРОНА (МЕТОД КРУПНЫХ ЧАСТИЦ)

Проведенный анализ показывает, что механизм изменения емкости электронного потока $C_{\text{эл}}(t)$ является более «тонким» и сложным фактором, включающим влияние на частоту генерации магнетрона колебательных процессов, которые происходят в электронном потоке и связаны с перераспределением объемного заряда как внутри электронной втулки, так и внутри электронных спиц ПЗ. Количественно данные процессы проявляются значительно слабее по сравнению с влиянием на частоту магнетронов тепловых процессов и являются квазипериодическими по характеру воздействия.

Условием возбуждения колебаний на различных видах является выполнение условия синхронизма в движениях электронного потока и ВЧ волн данных видов, т.е. когда $\Omega_e = \Omega_\gamma$,

где Ω_e — угловая скорость вращения замкнутого электронного потока (скорость вращения подвижной системы координат); $\Omega_\gamma = \omega/\gamma$ — угловая частота вращения ВЧ волны γ -вида; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота генерируемых колебаний; $\gamma = n + mN$; $n = 0, 1, 2, \dots, N/2$ — номер основного вида колебаний ($m = 0$); $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ — целые числа, соответствующие номерам высших пространственных гармоник. Данное условие выполняется автоматически при увеличении анодного напряжения от нуля до рабочего (порогового) значения, вызывая последовательно возбуждение различных видов колебаний в резонансной системе. Каждый вид колебаний соответствует замкнутой вращающейся ВЧ волне, содержащей вдоль окружности резонансного анодного блока целое число γ полных ВЧ периодов (или замедленных длин волн).

В качестве численной математической модели магнетрона рассмотрим модель, ранее описанную в работе [14]. Основу модели составляет самосогласованная система уравнений движения для скоростей $\vec{v} = \vec{v}(r, \phi')$ и координат $\vec{r} = \vec{r}(r, \phi')$ электронов:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\eta(\vec{E}_0 - \text{grad}U + \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}); \quad (4)$$

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}, \quad (5)$$

уравнение Пуассона для расчета потенциала ПЗ $U_{\text{пз}}$:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial t} (r \cdot \frac{\partial U_{\text{пз}}}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 U_{\text{пз}}}{\partial \phi'^2} = -\frac{\rho(r, \phi')}{\epsilon_0} \quad (6)$$

и уравнение возбуждения

$$-\frac{dC_\gamma}{dt} + j(\omega - \omega_\gamma)C_\gamma = \frac{1}{2N_\gamma} \int_V \vec{J}(t) \vec{E}_\gamma dV, \quad (7)$$

где $N_\gamma = \frac{1}{2} \int_V \epsilon' \epsilon_0 \vec{E}_\gamma^2 dV = -\frac{1}{2} \int_V \mu' \mu_0 \vec{H}_\gamma^2 dV$ — норма

собственного вида колебаний резонансной колебательной системы, \vec{E}_γ и \vec{H}_γ — собственное ВЧ поле γ -вида колебания «холодной» резонансной системы, $\omega_\gamma = \omega'_\gamma - j\omega''_\gamma$ — комплексные частоты собственных видов колебаний; ω'_γ — круговая «холодная» частота собственного вида; ω''_γ — коэффициент затухания. Полагаем, что $C_\gamma = |C_\gamma| e^{j\vartheta_\gamma}$, где $|C_\gamma|$ и $\vartheta_\gamma = (\omega - \omega'_\gamma)t = \Delta\omega t$ — модуль амплитуды и фаза «горячей» ВЧ волны. После подстановки данного выражения в уравнение возбуждения (7), а также с учетом принятой нормировки координат и скоростей электронов в подвижной системе координат в виде

$$R = \frac{r - r_c}{r_a - r_c}; \quad \Phi' = \gamma\phi - \omega t; \quad (8)$$

$$u_r = \frac{\tilde{v}_r}{\Omega_\gamma r_a}; \quad \Theta = \frac{\tilde{\Omega}}{\Omega_\gamma}, \quad (9)$$

где $\Omega_\gamma = \frac{\omega'_\gamma}{\gamma}$ – угловая скорость вращения ВЧ волны рабочего вида колебания; и разделения его на действительную и мнимую части получаем систему уравнений для мгновенных значений амплитуды и фазы возбуждаемого вида колебаний,

$$\frac{d\tilde{V}_\gamma}{dT} + \frac{\omega'_\gamma}{\omega_c} \cdot \frac{1}{2Q_H} \cdot \tilde{V}_\gamma = -\chi_\gamma \sum_i \{ (1 + \Theta^i) \times \Psi_\Phi^\gamma(R^i) \cdot \cos(\bar{\Phi}_\gamma^i) + u_r^i \cdot \Psi_r^\gamma(R^i) \cdot \sin(\bar{\Phi}_\gamma^i) \}; \quad (10)$$

$$\frac{d\vartheta_\gamma}{dT} = \frac{\chi_\gamma}{\tilde{V}_\gamma} \cdot \sum_i \{ u_r^i \cdot \Psi_r^\gamma(R^i) \cdot \cos(\bar{\Phi}_\gamma^i) - (1 + \Theta^i) \cdot \Psi_\Phi^\gamma(R^i) \cdot \sin(\bar{\Phi}_\gamma^i) \}. \quad (11)$$

Здесь:

$$\chi_\gamma = \frac{\omega}{\omega_c} \cdot \frac{N}{\pi\gamma} \cdot \frac{Q_e}{2U_a C_{\text{экв}}} \cdot \frac{\sin \gamma\theta}{\gamma\theta} \cdot \frac{1}{1 - \left[\frac{r_c}{r_a} \right]^{2\gamma}};$$

$$\bar{\Phi}_\gamma = \Phi' - \vartheta_\gamma; \quad Q_e = K \cdot |e|$$

– заряд крупной частицы ($K \gg \gg 1$ – коэффициент укрупнения); $\omega_c = \eta_e B_0$ – циклотронная частота, $\tilde{V}_\gamma = |C_\gamma| \cdot \frac{\tilde{U}_m}{U_a}$ – нормированная амплитуда ВЧ поля; \tilde{U}_m – амплитуда ВЧ потенциала на уровне анода; U_a – анодное напряжение; $C_{\text{экв}}$ – эквивалентная емкость резонансной системы магнетрона; Q_H – нагруженная добротность и

$$\Psi_r^\gamma(r) = \frac{Z'_\gamma(kr)}{Z'_\gamma(kr_a)} \approx \left(\frac{r}{r_a} \right)^{\gamma-1} \cdot \frac{1 - \left(\frac{r_c}{r} \right)^{2\gamma}}{1 - \left(\frac{r_c}{r_a} \right)^{2\gamma}}$$

$$\Psi_\Phi^\gamma(r) = \frac{\gamma Z'_\gamma(kr)}{kr Z'_\gamma(kr_a)} \approx \left(\frac{r}{r_c} \right)^{\gamma-1} \cdot \frac{1 + \left(\frac{r_c}{r} \right)^{2\gamma}}{1 - \left(\frac{r_c}{r_a} \right)^{2\gamma}}$$

– структурные функции ВЧ поля в пространстве взаимодействия магнетрона [7].

Система уравнений возбуждения для амплитуды (10) и частоты (11) ВЧ поля представлена в нормированном виде. Суммирование в правых частях указанной нормированной системы уравнений возбуждения проводится по всем электронам, находящимся в пространстве взаимодействия. Таким образом, полученная система уравнений возбуждения позволяет определить амплитуду и фазу (частоту) “горячего” ВЧ поля в разных режимах работы магнетрона, а также возможность (или условия) формирования узкополосного сигнала с амплитудной, частотной или фазовой модуляцией в полосе пропускания анодной резонансной системы.

Бомбардировка электродов магнетрона (катода и анода) вылетающими электронами

приводит к нагреву данных электродов и росту их температуры. Изменение температурного режима работы прибора, как было показано экспериментально, ухудшает его характеристики и, в частности, приводит к изменению частоты генерируемых колебаний. Для учета тепловых процессов, обусловленных вылетом электронов на катод и анод, модель магнетрона дополняется уравнением теплопроводности в виде

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_T \Delta T + Q, \quad (12)$$

где $\alpha_T = K_M / \rho_M c_V$ – коэффициент теплопроводности; K_M – теплопроводность материала катода и анода (медь); ρ_M – плотность материалов катода и анода; c_V – удельная теплоемкость материалов катода и анода; T – температура; $Q = q / \rho_M c_V$; q – заданная плотность тепловых источников (тепловыделения), в качестве которой выступает плотность энергии, выделяемой на электродах прибора бомбардирующими их электронами.

Моделирование тепловых процессов на катоде связано с определением дополнительного роста температуры поверхности катода за счет обратной бомбардировки его первичными электронами (вторичная электронная эмиссия). Полная кинетическая энергия, выделяемая на всей поверхности катода возвращающимися электронами, равна:

$$W_c = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_c} M_e \left| (\vec{v}_{\text{уд}}^i)_{r=r_c} \right|^2, \quad (13)$$

где $\left| (\vec{v}_{\text{уд}}^i)_{r=r_c} \right| = r_a \Omega_\gamma \sqrt{(u_r^2)_{r=r_c} + (\varepsilon^2 \Theta^2)_{r=r_c}}$ – модуль вектора скорости удара о катод i -ой частицы; $M_e = K_e m$ – масса крупной частицы; N_c – количество частиц, вылетевших на катод за шаг решения по времени ΔT . Для упрощения расчетов предполагается, что данная энергия выделяется в бесконечно тонком слое и равномерно по всей поверхности катода $\Delta S_c = 2\pi r_c h_c$, где h_c – высота катода.

Результатом решения уравнения (12) является зависимость роста и колебаний температуры катода от времени. Знание такой зависимости позволяет определить колебание термоэмиссионного тока и влияние дополнительной термоэлектронной эмиссии на рост вторично-эмиссионного тока и, как следствие этого, на стабильность частоты генерируемых магнетронном колебаний [8].-

Полная кинетическая энергия, выделяемая на аноде вылетающими частицами при $R=1$, равна

$$W_a = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^{N_a} M_e \left| (\vec{v}_{\text{уд}}^p)_{r=r_a} \right|^2, \quad (14)$$

где $\left| (\vec{v}_{\text{уд}}^p)_{r=r_a} \right| = r_a \Omega_\gamma \sqrt{(u_r^2)^p_{r=r_a} + (\Theta^2)^p_{r=r_a}}$ – модуль вектора скорости удара о анод p -ой частицы;

N_a – количество частиц, вылетающих на анод за шаг решения по времени ΔT . Для моделирования тепловых процессов предполагается их стационарность во времени, т. е. $\partial/\partial t=0$. В этом случае решением уравнения (12) является установившееся распределение температуры в анодном блоке магнетрона (без применения принудительных способов охлаждения: воздушного или водяного). Это позволяет определить излишек энергии, который необходимо отвести с помощью вышеуказанных способов охлаждения анодного блока для поддержания частотной стабильности.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Для понимания роли и влияния процесса фазовой группировки на стабильность частоты генерации магнетрона рассмотрим и проанализируем правую часть уравнения возбуждения для фазы ВЧ волны (11). Как видно, величина фазового набег ВЧ волны ϑ_γ , равного разности частоты генерации магнетрона и «холодной» резонансной частоты анодного блока, определяется реактивной составляющей интеграла возбуждения. Для повышения стабильности частоты генерации необходимо, чтобы в установившемся режиме работы магнетрона значение реактивной составляющей интеграла возбуждения представляло собой некую постоянную минимальную величину с незначительными колебаниями относительно ее среднего значения. Учитывая, что значения правых частей интеграла возбуждения зависит от координат и скоростей электронов, рассмотрим движение электронов в пространстве взаимодействия магнетрона.

На рис. 9 представлены рассчитанные траектории движения электронов в пространстве взаимодействия как результат решения системы уравнений движения (4) и (5). Электроны 1 и 2 в пределах фаз вылета с катода $-\frac{\pi}{2} < \Phi' < +\frac{\pi}{2}$ образуют спицы ПЗ, а электроны 3 и 4 с фазами вылета $-\frac{3\pi}{2} < \Phi' < -\frac{\pi}{2}$ и $\frac{\pi}{2} < \Phi' < \frac{3\pi}{2}$ составляют электронную втулку.

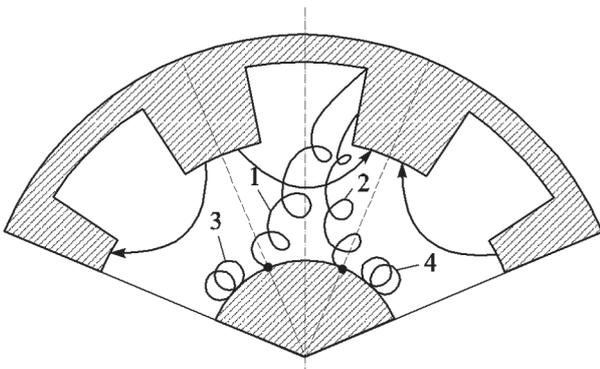


Рис. 9. Траектории движения электронов в пространстве взаимодействия магнетрона

Как видно, электроны двигаются по циклоидальным траекториям, вид и характер которых

изменяется во времени. Связано это с различными начальными условиями вылета электронов с катода, их движением в различных по величине статическом электрическом поле, ВЧ поле и поле ПЗ. В целом это указывает на сложный колебательно-излучательный процесс, который сопровождается механизмом фазовой группировки электронного потока. Различный характер движения электронов приводит к тому, что суммарное их излучение не является когерентным, т.е. его энергия и частота не строго фиксированы, а распределены в некотором энергетическом ΔW_e и частотном $\Delta \omega_e$ диапазонах. В результате наблюдается незначительное уширение спектральной линии излучения с шириной, которая определяется интервалом $\Delta \omega_e$ ($\Delta \omega_e \ll \Delta \omega_p$, где $\Delta \omega_p$ – полосу пропускания резонансного анодного блока), в пределах которого мощность излучения падает в 2 раза по сравнению с ее значением на центральной частоте излучения ω . Учитывая, что в процессе работы магнетрона происходит перераспределение энергии излучения, изменяется и его частота генерации, соответствующая максимальной мощности излучения в пределах $\Delta \omega_e$. В результате имеет место нестабильность частоты колебаний с девиацией, которая обусловлена особенностями электронного процесса фазовой группировки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования и результаты моделирования показали, что наиболее вероятными причинами ухудшения частотных характеристик магнетронов являются нестабильности напряжения накала и анодного напряжения, рост температуры анодного блока, дополнительный подогрев катода вторичной электронной эмиссией, а также влияние внешних электрических помех, связанных, например, с источником питания. Установлено, что повышение температуры анодного блока от 20 до 60 °С приводит к снижению частоты генерации магнетрона на 0,1 %. Применение стабилизированного источника питания с нестабильностью не превышающей $\pm 0,1 \%$ и учетом дополнительной фильтрацией питающих напряжений позволяет получить стабильность колебаний $2 \cdot 10^{-5}$.

Приводится феноменологическое объяснение нестабильности и перестройки частоты генерации в магнетроне, а также показывается их связь с электронным механизмом фазовой группировки электронного потока.

Показано, что относительно просто и достаточно эффективно можно осуществлять перестройку частоты в магнетронах с двумя выводами энергии [12]. Полученная экспериментально перестройка частоты в магнетроне 3-см диапазона с двумя выводами энергии превышает 200 МГц.

В заключении авторы хотели бы выразить благодарность ст. инженеру Иванцову В.П. за помощь и содействие в проведении экспериментальных исследований.

Литература.

- [1] Ланда П.С., Трубецков Д.И., Гусев В.А. Заблуждения и реальность в некоторых задачах физики (теория и эксперимент). УФН, т. 179, № 3, 2009. С. 255 – 277.
- [2] Chen X., Esterson M., Lindsay P. A. Computer modeling of phase locking in magnetrons, SPIE Proc. Intensive Microwave Pulses IV. 1996. vol. 2843, pp. 47–56.
- [3] Martin D., Jianu A., Ighigeanu D. A Method for the 2,45-GHz Magnetron Output Power Control // IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. 2001, vol. 49, # 3 March. – P. 542 – 544.
- [4] G. I. Churyumov, T. I. Frolova, A. V. Gritsunov, O. M. Nikitenko, V. N. Zin'kovsky. The Magnetrons – EMI Sources: Computer Modeling and Experimental Investigations. Proceedings of EMC Europe. Eindhoven, The Netherlands, 2004.
- [5] Tahir I., Dexter A., Carter R. Noise performance of frequency and phase locked CW magnetrons operated as current controlled oscillators. IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-52, November, 2005.
- [6] Чернушенко А.М., Майбородин А.В. Измерение параметров электронных приборов дециметрового и сантиметрового диапазонов волн. Под ред. А.М. Чернушенко. – М.: Изд-во “Радио и связь”. 1986. – 335 с.
- [7] Магнетроны сантиметрового диапазона. Под. Ред. С.А. Зусмановского. – М.: Изд-во “Сов. Радио”. Т.1. 1950. – 416 с.
- [8] Чурюмов Г.И., Фролова Т.И., Басрави К.М., Сивоконь К.В. Влияние тепловых процессов на катоде и аноде на частотные характеристики магнетронов. Радиоэлектроника и информатика, 2007, № 2. С. 15–27.
- [9] Обрезан О.И. Оценка влияния параметров пульсаций источников питания на спектральные характеристики выходных СВЧ приборов. Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, вып. 2(396), 1987, с. 30-39.
- [10] Васильковская Е.А. Пленочные холодные катоды типа «сэндвич». Обзоры по электронной технике. Серия: Микроэлектроника, вып. № 7 (227), 1970. – 36 с.
- [11] Половков И.П. Стабилизация частоты генераторов СВЧ внешним объемным резонатором. – М.: Изд. «Сов. Радио». 1967. – 192 с.
- [12] Положительное решение на патент Украины, Н01J25/00. Магнетронный генератор с перестройкой частоты от импульса к импульсу. Г.И. Чурюмов, А.И. Экезли, К.В. Сивоконь (Украина). Заявлено 14.04.2011.
- [13] Коваленко В.Ф. Введение в электронику сверхвысоких частот. – М.: Сов. радио, 1955. – 344 с.
- [14] Чурюмов Г.И., Басрави К.М., Сивоконь К.В. Многопериодная математическая модель магнетрона. Радиоэлектроника и информатика, 2006, № 2, с. 15–27.

Поступила в редколлегию 2.02.2012



Чурюмов Геннадий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор. Область научных интересов: математическое моделирование вакуумных приборов СВЧ; теория и техника СВЧ, применение СВЧ технологий.



Экезли Андрей Игоревич, аспирант кафедры ФОЭТ ХНУРЭ. Область научных интересов: микроволновые приборы и техника.

УДК 621.385.6

Моделювання частотних характеристик магнетрона з двома выводами енергії / Г.І. Чурюмов, А.І. Екезлі // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2012. Том 11. № 1. – С. 63-71.

Розглядаються особливості і результати моделювання частотних характеристик магнетронів в безперервному режимі. Запропоновано математичні моделі розрахунку характеристик «холодної» електродинамічної системи магнетрона (анодного блоку) і двома висновками енергії (метод еквівалентних схем), а також самоузгоджена математична модель магнетрона (модель великих часток) дослідження електронно-хвильового процесу нелінійної взаємодії в просторі взаємодії магнетрона. Представлені результати експериментальних досліджень можливої нестабільності частоти в магнетронах, включаючи результати дослідження впливу температури анодного блоку на частоту генерації, а також аналізується роль катода і наявності перешкод від джерела живлення при забезпеченні підвищення стабільності частоти магнетрона. На основі якісного аналізу системи нелінійних рівнянь збудження дається феноменологічне опис механізму флуктуацій частоти в магнетронах, пояснюються причини нестабільності частоти і особливості розширення спектральної лінії генеруючого магнетрона в безперервному режимі. Результати аналізу підтверджуються даними чисельних розрахунків.

Ключові слова: магнетрон, математична модель, метод еквівалентних схем, девіація частоти, стабільність частоти, перебудова частоти

Л. 9. Бібліогр.: 14 найм.

UDC 621.385.6

Simulating frequency characteristics of two energy outputs magnetron / G.I. Churyumov, A.I. Ekezli // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2012. Vol. 11. № 1. – P. 63-71.

Peculiarities and results of simulating frequency characteristics of magnetrons in a continuous regime are considered. Mathematical models of calculating characteristics of a “cold” electrodynamic magnetron system (anode block) and two outputs of energy (method of equivalent circuits) as well as a semimatched mathematical magnetron model (model of big particles) of researching the electronic wave process of nonlinear interaction in the space of magnetron interaction are suggested. Results of experimental studies of possible frequency instability in magnetrons, including results of investigating the anode block temperature effect on generation frequency are represented. In addition, the role of the cathode and availability of power supply interferences in ensuring the increase of the magnetron frequency stability are analyzed. The paper gives a phenomenological description of the mechanism of frequency fluctuations in magnetrons on the basis of qualitative analysis of a system of nonlinear oscillation equations and explains the causes of frequency instability and peculiarities of extending the spectrum line of a generating magnetron in a continuous regime. Results of the analysis are confirmed by the data of numerical calculations.

Keywords: magnetron, mathematical model, method of equivalent circuits, frequency deviation, frequency stability, frequency adjustment.

Fig. 9. Ref.: 14 items.