

ВЛИЯНИЕ МИКРОНЕОДНОРОДНОСТЕЙ В РЕЗОНАТОРНЫХ БЛОКАХ МАГНЕТРОНОВ НА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГАРМОНИКАХ НА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Е.В. Фурсова, В.М. Береснев, Д.В. Прибыш

Научный физико-технологический центр МОН и НАН Украины (Харьков)

Украина

Поступила в редакцию 05.03.2007

Предложен метод быстрого расчета свойств колебательной системы магнетрона, позволяющий осуществлять анализ влияния малых случайных неоднородностей, связанных с неточностью изготовления анодных систем, на характеристики магнетронов на пространственных гармониках, генерирующих в 3 мм и 8 мм диапазонах длин волн. Проведена оценка возможности воспроизведения характеристик колебательных систем при наличии в них случайных микронеоднородностей.

ВВЕДЕНИЕ

Специфический режим работы магнетронов на пространственных гармониках определяет ряд преимуществ этих приборов над магнетронами других типов [1]. Например, более сильное разделение между рабочей и соседней модами, дающее возможность отказаться от использования в анодных системах связей (которые на высоких частотах могут вносить существенные потери), позволяя снизить значения постоянного магнитного поля и использовать более простые и компактные конструкции магнитных систем.

Однако использование такого режима работы сопряжено с рядом трудностей, обусловленных двукратной вырожденностью не π -видовых типов колебаний. Поскольку анодная система магнетрона асимметрична (из-за наличия устройств вывода энергии и неточностей изготовления анодного блока), каждый вырожденный вид колебаний расщепляется на два невырожденных с очень близкими резонансными частотами – дублет. При этом одна из составляющих дублета сильно связана с нагрузкой, а другая – слабо. Близость собственных частот у двух компонент дублета приводит к их одновременному возбуждению, а слабая связь одной из компонент с нагрузкой приводит к снижению общего контурного КПД [2].

Данная работа посвящена исследованию влияния случайных микронеоднородностей, обусловленных возможными неточностями изготовления резонаторных систем, на воспроизведение их характеристик.

В работе приведена методика расчета холодных характеристик колебательных систем, основанная на использовании приближения эквивалентных цепей с сосредоточенными параметрами. С помощью этой методики проведен статистический анализ разброса характеристик резонаторных систем магнетронов, генерирующих в 3 мм и 8 мм диапазонах длин волн, и проведена оценка возможности серийного воспроизведения их характеристик при наличии в резонаторных системах случайных неоднородностей, обусловленных технологическими неточностями изготовления.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК НЕОДНОРОДНОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Предлагаемый метод расчета холодных характеристик основан на использовании эквивалентной цепи колебательной системы. Правомерность использования этой методики объясняется тем, что разработчика магнетронных генераторов обычно интересует узкая полоса частот: рабочая мода и ее ближайший конкурент. Кроме того, чтобы не допустить существенного уменьшения амплитуды рабочей пространственной гармоники поля, отклонение геометрии колебательной системы от симметричной, должно быть малым. Следовательно, вполне правоммерным является использование симметричной колебательной системы в качестве основы для расчетов. Используемая эквивалентная цепь

магнетрона имеет вид аналогичный описанному в [3]. Каждый резонатор представляется в виде параллельного $L - C$ контура, а пространство взаимодействия – емкостями C' . Для моделирования вывода энергии и диссипации энергии на стенках колебательной системы эквивалентная цепь дополняется проводимостями G_i , включаемыми параллельно колебательным контурам, моделирующим анодные резонаторы. При этом проводимость G_i одного из резонаторов существенно превышает проводимости остальных, что моделирует вывод энергии (рис. 1).

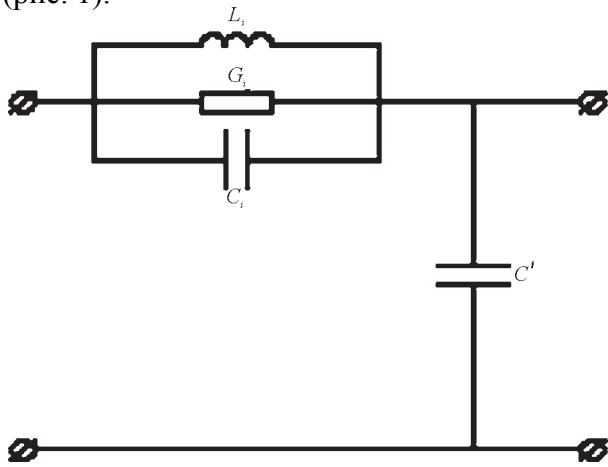


Рис. 1. Эквивалентная схема резонатора.

Для определения собственных частот эквивалентной цепи необходимо решить систему уравнений Кирхгофа в виде:

$$-\omega^2 CU + j\omega GU + L^{-1}U = 0, \quad (1)$$

где ω – частота, U – вектор комплексных амплитуд узловых напряжений, размерность которого равна числу резонаторов анодного блока N , j – мнимая единица, C, G, L^{-1} – матрицы размерности $N \times N$, описывающие емкости, проводимости и обратные индуктивности. Поскольку каждый из узлов эквивалентной цепи имеет непосредственную связь только с двумя соседними узлами, в матрицах C, G, L^{-1} ненулевыми являются только три диагонали:

для C : $C_{i,i} = C' + C_i + C_{i-1}$

$$C_{i,i+1} = -C_i$$

$$C_{i,i-1} = -C_{i-1}$$

для G : $G_{i,i} = G_i + G_{i-1}$

$$G_{i,i+1} = -G_i$$

$$G_{i,i-1} = -G_{i-1}$$

для L^{-1} : $L^{-1}_{i,i} = 1/L_i + 1/L_{i-1}$

$$L^{-1}_{i,i+1} = -1/L_i$$

$$L^{-1}_{i,i-1} = -1/L_{i-1}$$

Решение системы уравнений (1) существует только при выполнении условия

$$\det(-\omega^2 C + j\omega G + L^{-1}) = 0, \quad (2)$$

в соответствии, с которым вычисляются собственные частоты и добротности эквивалентной цепи. Подставляя результат решения (2) в систему уравнений (1), находятся комплексные амплитуды напряжения в узлах эквивалентной цепи, с использованием которых вычисляются контурные КПД собственных колебаний [4].

Анализ несимметричной колебательной системы начинается с подбора параметров эквивалентной цепи, соответствующих исходной, симметричной колебательной системе (далее – опорных значений параметров). Основными критериями подбора являются собственные частоты и добротности двух мод: рабочей и ближайшей к ней по частоте.

Затем вычисляются параметры, соответствующие несимметричной колебательной системе. Поскольку неоднородности геометрии предполагаются малыми, эквивалентные параметры для искаженной системы можно вычислить умножением опорных значений параметров на коэффициент изменения запасенной в анодном резонаторе энергии магнитной либо электрической составляющей:

$$L(\delta) = L_0 \cdot \frac{W_H^0}{W_H^\delta}, \quad C(\delta) = C_0 \cdot \frac{W_E^\delta}{W_E^0}. \quad (3)$$

Здесь $L(\delta), C(\delta)$ – индуктивность и емкость; L_0, C_0 – опорные значения индуктивности и емкости; W_H^0, W_E^0 – средние значения энергий магнитного и электрического полей в неискаженном анодном резонаторе; W_H^δ, W_E^δ – средние значения энергий магнитного и электрического полей в анодном резонаторе, соответствующие измененной геометрии. При этом величины энергии вычисляются в соответствии с

$$W_E = \int_V |E|^2 dv \quad \text{и} \quad W_H = \int_V |H|^2 dv, \quad (4)$$

где E и H – распределения электрического и магнитного поля в резонаторе.

Рассмотрим выражения (3) и (4) на примере частного случая. Проведем анализ анодного блока с резонаторами секторного (лопаточного) типа, основные параметры которых приведены на рис. 2.

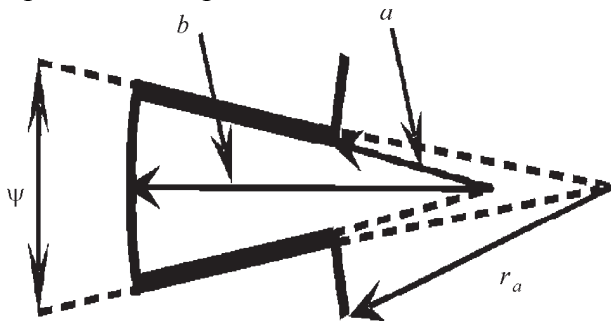


Рис. 2. Геометрические параметры резонатора.

В случае, когда рассматриваемое искажение представляет собой изменение глубины каждого i -го резонатора анодного блока (нумерация резонаторов выбрана таким образом, что нагруженный резонатор имеет номер 0 на некоторую величину, электромагнитное поле в таком резонаторе можно описать

$$E(r) = E_0 \frac{Z_1(kb, kr)}{Z_1(kb, ka)}, \quad (5)$$

$$H(r) = j \frac{E_0}{\xi} \frac{Z_0(kb, kr)}{Z_1(kb, ka)}, \quad (6)$$

где $k = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ – волновое число (здесь ω – частота генерации, μ_0 и ϵ_0 – магнитная и электрическая постоянные соответственно);

$\xi = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$ – волновое сопротивление свободного пространства; a и b – параметры, описывающие геометрию анодного резонатора; r – радиальная координата внутри резонаторного сектора; а $Z_0(kb, x)$ и $Z_1(kb, x)$ определены как

$$Z_0(kb, x) = N_1(kb) J_0(x) - N_0(x) J_1(kb), \quad (7)$$

$$Z_1(kb, x) = N_1(kb) J_1(x) - N_1(x) J_1(kb), \quad (8)$$

здесь N_0, N_1 и J_0, J_1 – функции Неймана и Бесселя нулевого и первого порядка соответственно.

Подставляя (5 – 8) в (3) и (4), получим эквивалентные параметры для несимметричной резонаторной системы в виде:

$$L(\delta) = L_0 \cdot \frac{Z_1^2(kb', ka)}{Z_1^2(kb, ka)} \times \quad (9)$$

$$\times \frac{b^2 Z_0^2(kb, kb) - a^2 (Z_0^2(kb, ka) + Z_1^2(kb, ka))}{b'^2 Z_0^2(kb', kb') - a^2 (Z_0^2(kb', ka) + Z_1^2(kb', ka))},$$

и

$$C(\delta) = C_0 \cdot \frac{Z_1^2(kb, ka)}{Z_1^2(kb', ka)} \cdot (b'^2 k^2 Z_1'^2(kb', kb') -$$

$$- a^2 k^2 (Z_1^2(kb', ka) + Z_1'^2(kb', ka)) +$$

$$+ Z_1^2(kb', ka)) / (b^2 k^2 Z_1'^2(kb, kb) -$$

$$- a^2 k^2 (Z_1^2(kb, ka) + Z_1'^2(kb, ka)) + Z_1^2(kb, ka)),$$

где $Z_1'(x) = Z_0(x) - Z_1(x)/x$, а $b' = b + \delta$ – параметр, описывающий продольный размер резонаторов неоднородного анодного блока.

Поскольку вносимое искажение состоит исключительно в изменении глубин анодных резонаторов, величины емкостей сегмент-катод (C') остаются неизменными.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МАГНЕТРОНОВ И ЕГО ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Описанная выше методика была применена для теоретического анализа воспроизведения характеристик магнетронов на пространственных гармониках, генерирующих в волны 3 мм и 8 мм диапазонов, в случае наличия в их резонаторных системах случайных микро-неоднородностей. При этом рабочие частоты рассматриваемых магнетронов были 90,9 ГГц и 36,4 ГГц соответственно, а в качестве рабочего вида колебаний использовался $\pi/2 - 1$ вид.

Резонаторные системы магнетронов имели следующие характеристики (в скобках указаны параметры для магнетрона 8 мм диапазона): число резонаторов – 24 (16), радиус анода – 1,3 (2,25) мм, радиус катода – 0,775 (1,3) мм, осевая длина – 2 (6) мм, ширина анодных резонаторов – 0,24 (0,486) мм, глубина анодных резонаторов – 0,55 (1,385) мм.

Использовались следующие опорные значения параметров эквивалентной цепи для колебательной системы данного магнетрона:

| Опорный параметр | Магнетрон 3 мм диапазона | Магнетрон 8 мм диапазона |
|------------------|--|--|
| L | $9,824 \cdot 10^{-11}$ Гн | $1,396 \cdot 10^{-10}$ Гн |
| C | $2,011 \cdot 10^{-14}$ Ф | $1,065 \cdot 10^{-13}$ Ф |
| C' | $1,649 \cdot 10^{-14}$ Ф | $3,803 \cdot 10^{-14}$ Ф |
| G_0 | $1,000 \cdot 10^{-3}$ Ом ⁻¹ | $2,466 \cdot 10^{-3}$ Ом ⁻¹ |
| G_i | $5,476 \cdot 10^{-5}$ Ом ⁻¹ | $6,194 \cdot 10^{-5}$ Ом ⁻¹ |

Здесь G_0 – проводимость нагруженного резонатора.

Существует множество вариантов размещения случайных технологических неоднородностей, а поскольку их влияние на свойства собственных и вынужденных колебаний резонаторной системы носит случайный характер, с целью выявления закономерностей и оценки наиболее вероятного отклика колебательной системы, содержащей такого рода асимметрию, был проведен статистический анализ влияния этих неоднородностей на частоту и контурный КПД магнетрона. Микро-неоднородности моделировались в виде искажения продольного размера каждого резонатора анодной системы на некоторую малую

величину, описываемую с помощью распределения Гаусса с различными дисперсиями.

Основные результаты расчетов представлены в виде гистограмм распределения частот (f_1, f_2) и контурных КПД (η_1, η_2) обеих составляющих дублета рабочего вида колебания магнетронов, генерирующих волны в диапазонах 3 мм (рис. 3) и 8 мм (рис. 4). Индексом “1” отмечены характеристики высокочастотной компоненты дублета.

Поскольку колебательная система магнетрона 3 мм диапазона в силу малости геометрических размеров более чувствительна, по сравнению с резонаторной системой магнетрона 8 мм диапазона, к наличию различных искажений ее симметрии, исследование проводилось для трех значений дисперсии случайных величин: $\sigma = 0,001$ мм, $\sigma = 0,005$ мм и $\sigma = 0,010$ мм. При этом число рассмотренных вариантов размещения случайных неоднородностей составило 1500.

Сравнение результатов, представленных на рис. 3 с данными, полученными для коле-

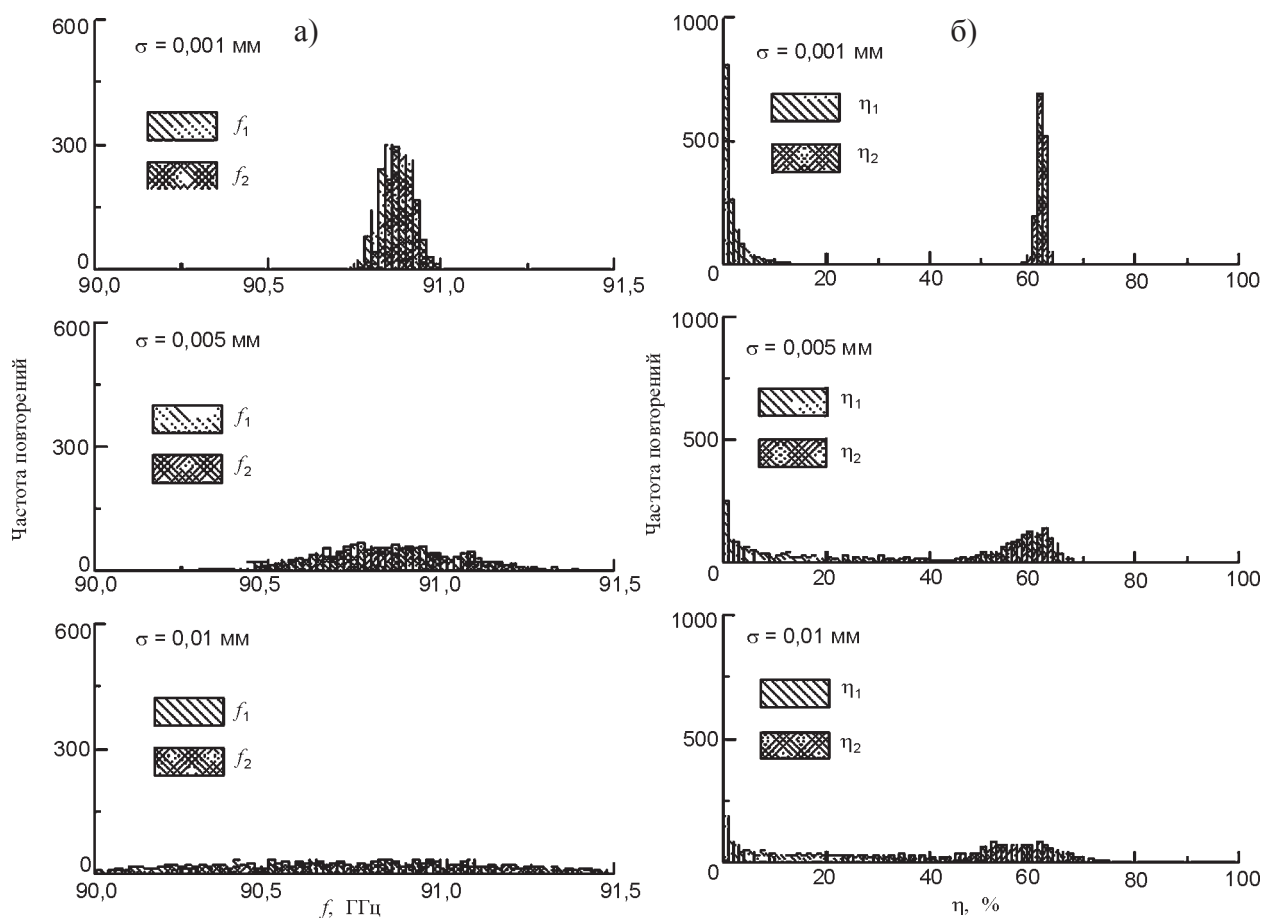


Рис. 3. Гистограммы распределения частот: а) и контурных КПД; б) обеих составляющих дублета рабочего вида колебания магнетрона с длиной волны генерации 3 мм.

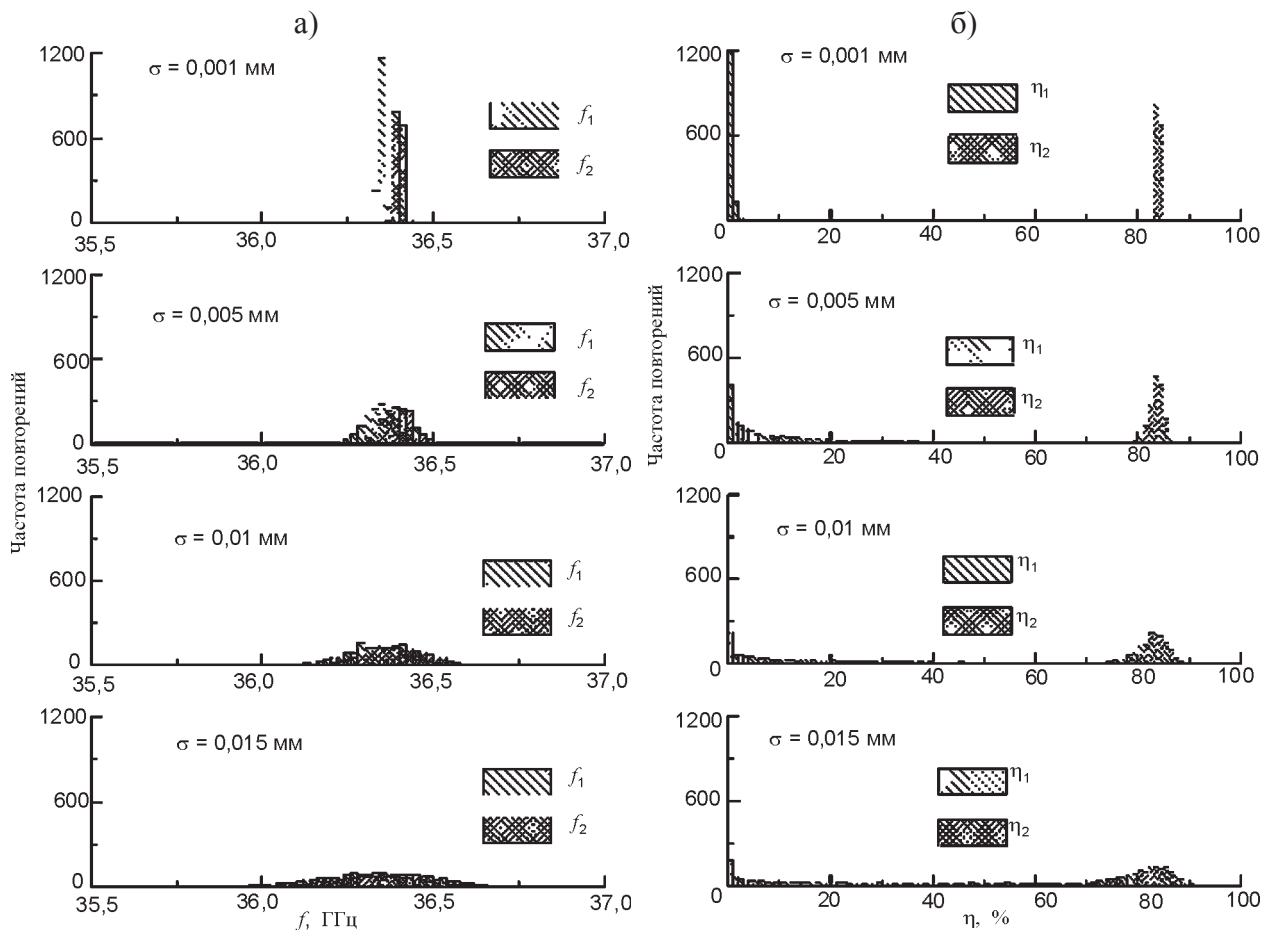


Рис. 4. Гистограммы распределения частот: а) и контурных КПД б) обеих составляющих дублета рабочего вида колебания магнетрона с длиной волны генерации 8 мм.

бательной системы без случайных неоднородностей, показало, что при $\sigma = 0,001$ мм средние значения частот и контурных КПД, полученные путем статистического анализа, слабо отличаются от значений, полученных при отсутствии случайных искажений ($f_1 = 90,86$ ГГц, $f_2 = 90,89$ ГГц, $\eta_1 = 1,8$ %, $\eta_2 = 61,7$ %). Увеличение дисперсии до 0,005 мм приводит к существенному изменению формы распределения рассматриваемых характеристик: разброс частот и контурных КПД увеличивается, приводя к квазиравномерному их распределению, которое имеет место при дисперсии равной 0,010 мм.

Таким образом, видно, что при наличии в резонаторной системе рассматриваемого магнетрона неоднородностей, характеризующихся малыми случайными величинами с дисперсией превышающей 0,005 мм, невозможно предсказать поведение его характеристик, поскольку в этом случае, получение тех

или иных значений рассматриваемых характеристик имеет одинаковую вероятность.

Аналогичные данные получены в результате статистического анализа устойчивости к возможным случайным искажениям характеристик магнетрона 8 мм диапазона длин волн.

На рис. 4 приведены гистограммы распределений ненагруженной f_1 и ненагруженной f_2 компонент дублета рабочего вида и соответствующие им контурные КПД, полученные в результате расчетов для четырех значений дисперсии случайных величин: $\sigma = 0,001$ мм, $\sigma = 0,005$ мм, $\sigma = 0,010$ мм и $\sigma = 0,015$ мм. Число рассмотренных вариантов размещения случайных неоднородностей, как и в предыдущем случае, составило 1500.

Такой выбор величины дисперсии случайных величин обусловлен тем, что колебательная система этого магнетрона менее чувств-

вительна к наличию малых неоднородностей. Так, в отличие от предыдущего случая, при дисперсии равной 0,001 мм, средние значения рассматриваемых характеристик полностью совпадают со значениями, полученными для магнетрона, колебательная система которого не имела случайных искажений.

С увеличением дисперсии, форма распределения этих характеристик меняется также как и в предыдущем случае. Однако переход к квазиравномерному распределению частот и контурных КПД происходит медленнее, чем для магнетрона 3 мм диапазона. Так, несмотря на то, что при дисперсии 0,005 мм, ширина распределения увеличилась, видны отчетливые максимумы, позволяющие сделать выводы о наиболее вероятных значениях характеристик колебательной системы рассматриваемого магнетрона. При значениях дисперсии, превышающих 0,015 мм, разброс рассматриваемых характеристик настолько увеличивается, что их распределение становится квазиравномерным.

Ниже, в таблице, для магнетронов 3 мм и 8 мм диапазонов, представлены интервалы разброса собственных частот обеих компонент дублета рабочего вида колебания в зависимости от величины дисперсии случайных величин, которые достигаются с вероятностью 90%.

Таким образом, для хорошего воспроизведения характеристик магнетронов необходимо, чтобы дисперсия погрешности изготовления была в пределах 0,001 мм для магнетрона 3 мм диапазона и 0,005 мм для магнетрона, генерирующего волны в диапазоне 8 мм. При этом с вероятностью 90% отличие разброса частот не будет превышать ± 75 МГц.

Проведенный статистический анализ позволяет предсказать наиболее вероятный отклик характеристик собственных колебаний на присутствующую асимметрию анодного блока магнетрона, он в какой-то степени решает проблему, связанную с оценкой свойств резонаторной системы при их серийном производстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведена методика расчета колебательных характеристик магнетрона, основанная на анализе собственных комплексных частот эквивалентной цепи резонаторной системы магнетрона. Данный метод позволяет существенно сократить время расчета собственных частот, что особенно важно в случае необходимости определения оптимальных параметров колебательной системы или оценки статистических распределений холодных характеристик.

Проведена оценка чувствительности характеристик колебательной системы к наличию в ней малых случайных неоднородностей, обусловленных возможными технологическими неточностями изготовления анодных систем. Получены критерии воспроизведения характеристик колебательных систем магнетронов на пространственных гармониках. Данный подход может быть использован для проведения анализа колебательных систем и других СВЧ приборов, имеющих замедляющую систему типа гребенка.

Авторы выражают глубокую благодарность доктору физико-математических наук, профессору, члену-корреспонденту НАН Украины Д.М. Вавриву за помощь в организации исследования, интерес к результатам и ценные замечания. Авторы также признательны кандидату физико-математических наук С.В. Сосницкому за предоставленные компьютерные программы и полезные консультации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн/Под ред. А. Ю. Усикова. – К.: Наукова Думка, 1986. – 350с.
2. Ковалев Ю.А., Масленников Ю.В. О взаимодействии электронного потока с вырожденными модами колебательной системы магнетрона//Электронная техника. Серия I. – 1969. – № 10. – С. 28-33.
3. Магнетроны сантиметрового диапазона. Т.1./Перевод под ред. С.А. Зусмановского. – М.: Сов. Радио, 1950. – 420 с.

4. Sosnytskiy S.V., Vavriv D.M. Theory of the Spatial-Harmonic Magnetron: An Equivalent Network Approach//IEEE Transactions on Plasma Science. – 2002. – Vol. 30, №. 3. – P. 984-992.

**ВПЛИВ МІКРОНЕОДНОРІДНОСТЕЙ
В РЕЗОНАТОРНИХ СИСТЕМАХ
МАГНЕТРОНІВ НА ПРОСТОРОВИХ
ГАРМОНІКАХ НА ВІДТВОРЕННЯ
ЇХНІХ ХАРАКТЕРИСТИК**

О.В. Фурсова, В.М. Береснев, Д.В. Прибиш

Запропоновано метод швидкого розрахунку властивостей коливальної системи магнетрона, що дозволяє здійснювати аналіз впливу малих випадкових неоднорідностей, пов'язаних з неточністю виготовлення анодних систем на характеристики магнетронів на просторових гармоніках, що генерують в 3 мм та 8 мм діапазонах довжин хвиль. Проведено оцінку можливості відтворення характеристик коливальних систем за наявності в них випадкових мікронеоднорідностей.

**INFLUENCE OF MICRODISTORTIONS
IN RESONATORS SYSTEMS OF
SPATIAL HARMONIC MAGNETRONS
ON REPRODUCING OF THEIR
CHARACTERISTICS**

E.V.Fursova, V.M.Beresnev, D.V.Pribysh

The method of fast calculation of magnetron oscillatory system properties is proposed. This method allows carry out the analysis of influence of small random distortions caused by inaccuracy during anode systems manufacturing on characteristics of spatial harmonic magnetrons oscillating in 3 mm and 8 mm wave bands. The estimation of the opportunity of reproduction of oscillatory systems characteristics is carried out at the presence of random microdistortions.