

## 32 ГГц МАГНЕТРОН С ХОЛОДНЫМ КАТОДОМ НА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГАРМОНИКАХ – АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ В РАМКАХ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ И 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ

*В. Д. Ерёмка<sup>1</sup>, М. А. Копоть<sup>2</sup>, О. П. Кулагин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины

<sup>2</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Проведена аналитическая оценка оптимальных параметров импульсного магнетрона с холодным вторично-эмиссионным катодом – генератора электромагнитного излучения на частоте 32 ГГц при анодном напряжении 8 кВ и магнитном поле около 0.4 Тл. Установлено, что выбранная геометрия пространства взаимодействия магнетрона может обеспечивать взаимодействие электронов с высокочастотным полем как  $(-1)$ -й пространственной гармоники колебаний  $\pi/2$ -вида, так и  $(+1)$ -й пространственной гармоники колебаний  $\pi$ -вида в режиме дрейфово-орбитального резонанса. Трёхмерное численное моделирование процессов взаимодействия в таком генераторе показывает, что обе модификации прибора способны обеспечить требуемые энергетические характеристики. Подтверждена возможность применения предложенной нелинейной аналитической модели при оценке рабочих параметров неклассических приборов М-типа на пространственных гармониках.

*Ключевые слова:* Дрейфово-орбитальный резонанс, магнетроны на пространственных гармониках, нелинейная аналитическая модель, трёхмерная численная модель.

### Введение

Решение задач, связанных с разработкой и созданием импульсных магнетронов миллиметрового диапазона длин волн с холодным катодом, большим сроком службы и сравнительно невысокими рабочими напряжением и магнитным полем, является актуальным. Известен ряд магнетронов с основным холодным вторично-эмиссионным катодом – импульсных генераторов электромагнитного излучения миллиметрового диапазона волн, которые работают на пространственной гармонике колебаний не  $\pi$ -вида при напряжениях около 8...10 кВ [1]. Такие генераторы относят к нетрадиционным (неклассическим) приборам М-типа. Существующие в литературе методики расчета и проектирования традиционных магнетронов [2] не соответствуют задачам, которые возникают при создании нетрадиционных приборов М-типа, в частности, магнетронов на пространственных гармониках. Это обусловлено, прежде

всего, отсутствием единства позиций авторов и фрагментарностью решаемых ими проблем.

Кроме того, разработчики магнетронов в своих публикациях, посвященных методам расчета геометрии пространства взаимодействия генератора и его выходных характеристик, в частности, рабочих напряжения, тока и магнитного поля, оперируют с некой обоснованной компромиссами исходной геометрией и (или) с неким рациональным выбором параметров его режима работы. Как известно, в пространстве взаимодействия магнетронов (между катодом и анодом) электроны, перемещающиеся в скрещенных электрическом и магнитном полях, имеют дрейфовую и орбитальную компоненты скорости. Обычно второй компонентой пренебрегают – в этом случае потенциал синхронизации описывается линейным относительно магнитного поля уравнением Хартри:

$$U = \frac{1884 \cdot B}{2p\lambda} (r_a^2 - r_c^2) - 4.04 \cdot 10^7 \left( \frac{r_a}{2p\lambda} \right)^2. \quad (1)$$

Здесь  $U$  – рабочее напряжение;  $B$  – индукция магнитного поля;  $p = |\gamma + \mu N|$  – число вариаций ВЧ-поля по периметру пространства взаимодействия, где  $N$  – число резонаторов,  $\mu$  – номер пространственной гармоники,  $\gamma$  – мода (вид) колебаний;  $r_a$ ,  $r_c$  – радиусы анода и катода, соответственно;  $\lambda$  – длина рабочей волны в сантиметрах.

Однако вызывает большие сомнения справедливость этого соотношения при расчете и проектировании магнетронов на пространственных гармониках. Данное уравнение, как известно, справедливо при малых по сравнению с длиной рабочей волны орбитах электронов – иначе говоря, при сильных рабочих магнитных полях, когда движение электронов фактически можно аппроксимировать движением ведущих центров их орбит. При этом орбитальное движение считается «быстрым». При описании процессов в классических магнетронах, для которых характерен параметр заkritичности  $h = B/B_{cr} \sim 2.5...3$ , такое приближение допустимо и результаты эксперимента подтверждают достаточно хорошее совпадение с уравнением Хартри.

При величине параметра заkritичности  $h \sim 1...1.5$ , характеризующей режим работы большинства нетрадиционных магнетронов миллиметрового диапазона, упомянутое приближение не приемлемо. В магнетронах миллиметрового диапазона часть энергии электронов, связанная с орбитальной компонентой их скорости, может составлять более 60 % их полной энергии. То есть пренебрежение орбитальным движением электронов не соответствует физике процессов в таких магнетронах и приводит к серьёзным ошибкам при их практической реализации.

Результаты экспериментов подтверждают, что уравнение Хартри фактически не соблюдается при описании физики процессов в магнетронах, работающих при  $h \sim 1...1.5$ . Причём даже для магнетронов сантиметрового диапазона, работающих на  $(-1)$ -й пространственной гармонике в режимах вблизи критического, это несоответствие носит систематический характер [3]. Как видно из рис. 1, чем ближе рабочая точка к параболе критических режимов, тем сильнее она удалена от прямой, соответствующей уравнению Хартри. При дальнейшем укорочении длины волны и переходе в миллиметровую область данная закономерность полностью сохраняется [4].

Таким образом, при расчёте всех приборов М-типа, работающих в близкритических режимах, в качестве отправной точки необходима аналитическая модель, более адекватно учитывающая все компоненты электронного движения [5].

В настоящее время, основой теоретического изучения физики процессов в генераторах М-типа остаётся численное моделирование [6]. Однако нелинейная динамика электронно-волнового взаимодействия в магнетронах на пространственной гармонике (с основным холодным вторично-эмиссионным катодом) недостаточно изучена с помощью численного эксперимента.

Без адекватной аналитической модели в близкритических режимах такие расчеты оказываются малоэффективными. Первые шаги к модели, учитывающей орбитальную составляющую скорости электронов, были сделаны в работе [7] около 30 лет назад. К сожалению, несмотря на плодотворное развитие идей, высказанных ранее в [8] и [9], данный подход не стал основой для полноценной аналитической теории приборов М-типа миллиметрового диапазона. Среди причин отметим следующие. Автор работы [7], применяя уравнение Хартри, не сформулировал условия применимости полученных им соотношений для реальных магнетронов, не получил выражения для минимального потенциала, определяющего начало дрейфово-орбитального взаимодействия. Кроме того, он практически не рассматривал реальные магнетроны на пространственных гармониках, ограничившись режимом «слабых полей».

В последние годы тенденции развития электроники магнетронов возродили интерес к задаче построения нелинейной относительно рабочего магнитного поля аналитической теории, общей для всех неклассических приборов М-типа. В ряде статей описаны первые шаги в этом направлении [4, 5, 10].

Целью данной работы является краткое описание новой методики расчета параметров неклассических приборов М-типа на примере 32 ГГц магнетрона, в котором взаимодействие электронов и электромагнитного поля осуществляется в режиме дрейфово-орбитального резонанса. В основе методики – аналитическое моделирование и 3D численное моделирование.

## 1. Аналитическая модель

**1.1. Взаимодействие на (-1)-й пространственной гармонике колебаний  $\pi/2$ -вида.** Как известно, для компьютерного расчета и проектирования нетрадиционных магнетронов с использованием двумерных и трехмерных численных моделей необходимо создать непротиворечивый общий алгоритм проектирования элементов, узлов и прибора в целом, а также соответствующий ему программный продукт и банк данных. При решении указанного комплекса задач первоочередным является этап нахождения (расчета и оптимизации) упомянутой выше исходной геометрии пространства взаимодействия и параметров режима работы (рабочего магнитного

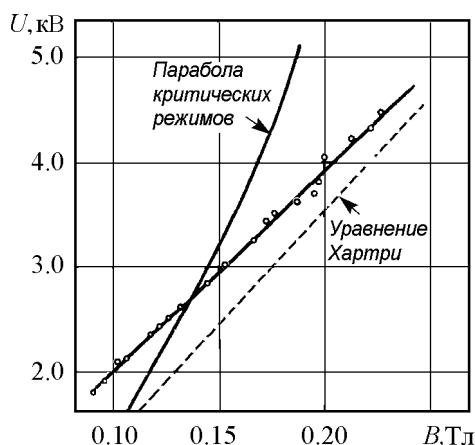


Рис. 1. Экспериментальные результаты для магнетрона с боковым катодом (радиус анода  $r_a = 5.0$  мм, радиус катода  $r_c = 3.5$  мм, число резонаторов  $N = 20$ , длина волны  $\lambda = 3.2$  см, вид колебаний  $\gamma = 3(N/4 - 2)$ , число вариаций ВЧ-поля  $p = 17$ )

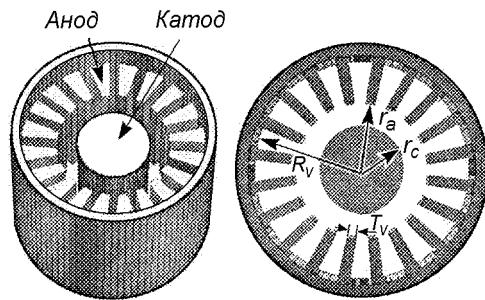


Рис. 2. Схематическое изображение пространства взаимодействия 32 ГГц магнетрона с 20 лопаточными резонаторами, работающего на (-1)-й пространственной гармонике

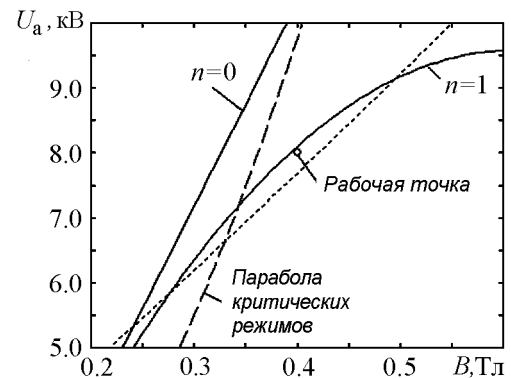


Рис. 3. Зависимость  $U_a(B)$  для  $N = 20$  и  $p = 16$  (пунктирная линия – пороговое напряжение для первой гармоники  $n = 1$  дрейфово-орбитального резонанса)

поля и анодного напряжения), которые, как «первое приближение», соответствовали бы основным требованиям технического задания на проектирование и могли бы быть применены в качестве исходных при численном 3D-моделировании и расчетах. Последнее позволяет существенно уменьшить число экспериментальных образцов на пути к созданию оптимальной конструкции генератора.

Исходные требования к параметрам магнетрона: рабочий ток обеспечивает основной холодный катод с вторично-электронным эмиттером, генерирование электромагнитных колебаний осуществляется на частоте 32 ГГц при рабочем напряжении  $U_a = 8.0$  кВ, рабочем магнитном поле  $B$  около 0.4 Тл.

С помощью аналитической модели [4] определены следующие геометрические размеры узлов пространства взаимодействия импульсного магнетрона: радиус анода  $r_a = 3.0$  мм, радиус катода  $r_c = 2.0$  мм (рис. 2). Для данной геометрии в режиме взаимодействия синхронных электронов с ВЧ-полем первой отрицательной пространственной гармоники (рабочая мода  $N/4 - 1$ ) аналитическая модель позволяет определить оптимальное число лопаточных резонаторов  $N = 20$  и число вариаций ВЧ-поля  $p = 16$ .

Подстановка рассчитанных параметров в формулу (2) [4]

$$U_a = U_1 (B/B_1)^2 - \left( \frac{1 - B/B_1}{1 - 2n/p} \right)^2, \quad (2)$$

где  $B_1 = 2 \frac{m \omega}{e p}$ ,  $U_1 = (1 - \sigma^2) \frac{m r_a^2 \omega^2}{e 2p^2}$ ,  $\sigma = \frac{r_c}{r_a}$ , позволяет построить зависимость, представленную на рис. 3. Кружочком на рисунке указана рабочая точка магнетрона. Очевидно, что она с достаточной точностью ложится в рабочую область первой дрейфово-орбитальной гармоники ( $n = 1$ ). Величина  $h = B/B_{cr} \sim 1.13$ ,  $B \approx 0.46$  Тл. Оценка максимального электронного КПД в рамках аналитической модели даёт достаточно высокую величину, порядка 30%.

**1.2. Взаимодействие на (+1)-й пространственной гармонике колебаний л-вида.** Имеем следующие исходные требования к параметрам магнетрона: генерирование электромагнитных колебаний на частоте 32 ГГц при рабочем напряжении  $U_a = (7.5...12.0)$  кВ, рабочем магнитном поле  $B$  около 0.4 Тл.

С помощью аналитической модели [4] мы определили следующие геометрические размеры узлов импульсного магнетрона с основным холодным вторично-эмиссионным катодом: радиус анода  $r_a = 3.5$  мм, радиус катода  $r_c = 2.6$  мм, длина эмиттера основного катода  $l_{ec} = 4$  мм. Для режима взаимодействия синхронных электронов с ВЧ-полем первой положительной пространственной гармоники (рабочая мода  $N/2$ ), оптимальное число лопаточных резонаторов  $N = 12$  (рис. 4) и число вариаций ВЧ-поля  $p = 18$ .

Ниже представлены результаты аналитического моделирования для магнетрона с  $N = 12$  и  $p = 18$ .

Подстановка рассчитанных параметров в формулу (1) позволяет построить зависимость, представленную на рис. 5. Оценка максимального электронного КПД для этого случая даёт около 32%.

Как видно из рисунков и расчётов, использование (+1)-й пространственной гармоники колебаний  $\pi$ -вида даёт выигрыш по сравнению с первым случаем – и по размерам пространства взаимодействия, и по уменьшенному числу резонаторов. 12-резонаторная периодическая структура анодного блока такого магнетрона обеспечивает устойчивость к повышенным тепловым нагрузкам, а соответственно, и увеличенный срок его службы.

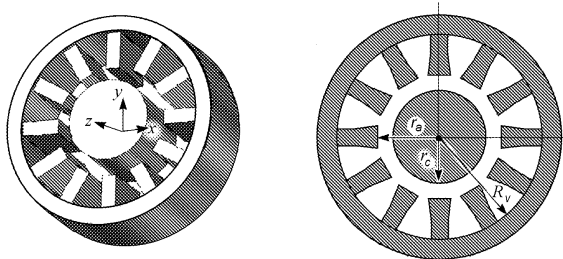


Рис. 4. Схема пространства взаимодействия 12-резонаторного 32 ГГц магнетрона на (+1)-й пространственной гармонике

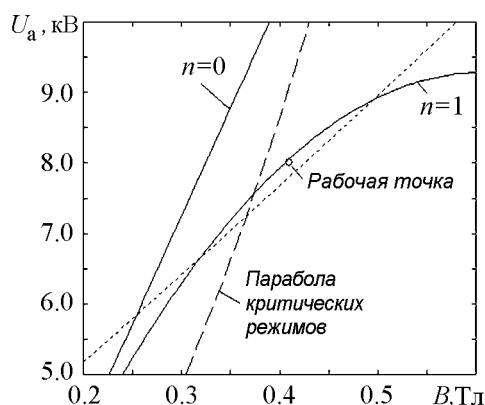


Рис. 5. Зависимость  $U_a(B)$  для  $N = 12$  и  $p = 18$

## 2. Трехмерная численная модель магнетрона

**2.1. Взаимодействие на (-1)-й пространственной гармонике колебаний  $\pi/2$ -вида.** При построении трехмерной численной модели импульсного магнетрона с холодным вторично-эмиссионным катодом применена геометрия пространства взаимодействия, количество резонаторов, величины анодного напряжения и рабочего магнитного поля, которые соответствуют вышеописанной аналитической модели. Моделирование процессов вторично-электронной эмиссии осуществлено с использованием работ [11, 12]. Коэффициент вторичной эмиссии выбран равным 1.8 при энергии бомбардировки 780 эВ. Разброс энергии первичных электронов, которые вылетают с дополнительного термоэлектронного катода, взят в интервале 2...5 эВ. В основе трехмерной модели лежит концепция самосогласованного поля, в кото-

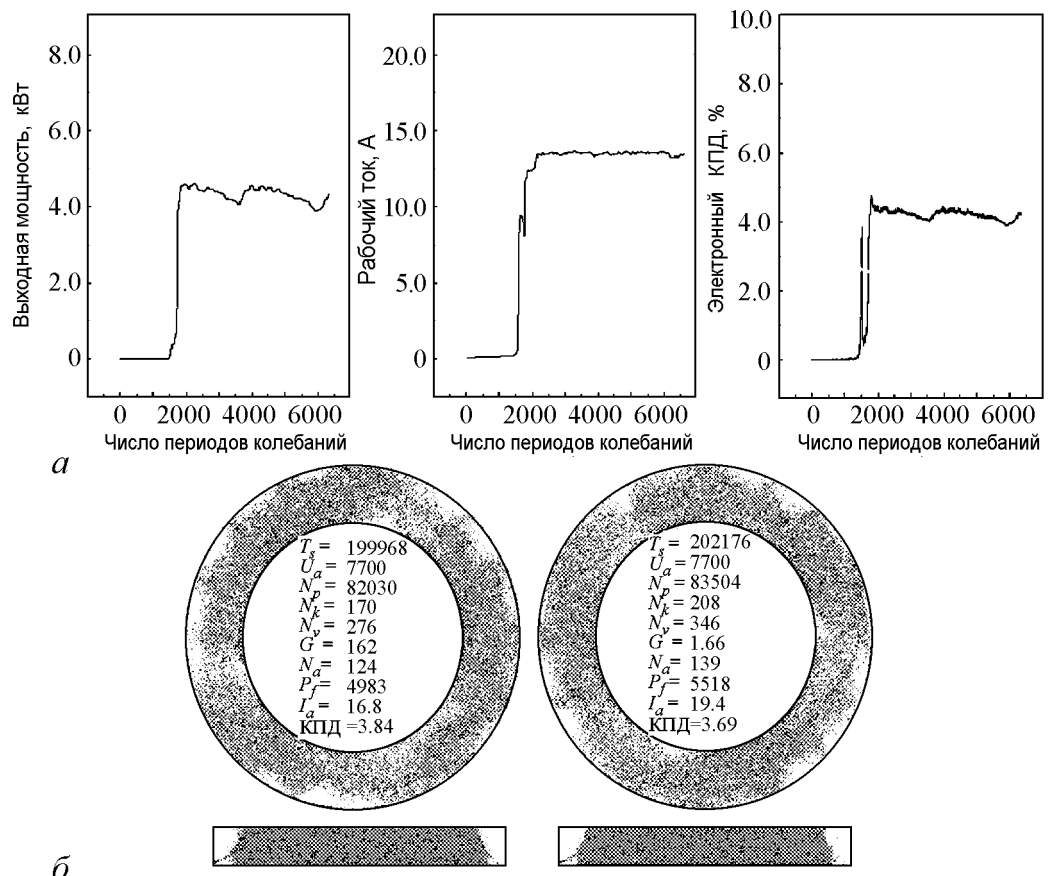


Рис. 6. *a* – Зависимость рабочего тока, КПД и выходной мощности магнетрона с холодным катодом от длительности процесса моделирования (на  $(-1)$ -й пространственной гармонике); *б* – 3D-моделирование распределения электронов в пространстве взаимодействия генерирующего магнетрона (черные точки – синхронные электроны)

ром кинетическое уравнение решают методом крупных частиц. Метод базируется на совместном решении уравнений возбуждения анодной резонаторной замедляющей системы электронным потоком, уравнения Пуассона, уравнений движения. Результаты численного моделирования методом крупных частиц представлены на рис. 6. Рабочая частота 32 ГГц, выходная мощность около 4 кВт, КПД около 4.3% при  $U_a = 7.7$  кВ,  $B \approx 0.37$  Тл, рабочем токе около 13 А. Рассчитанные значения выходной мощности и КПД можно увеличить путем оптимизации геометрии пространства взаимодействия магнетрона и режима его работы.

**2.2. Взаимодействие на  $(+1)$ -й пространственной гармонике колебаний  $\pi$ -вида.** Аналогичным образом, при построении трехмерной численной модели 32 ГГц импульсного магнетрона с холодным вторично-эмиссионным катодом используются параметры, определенные в рамках вышеописанной аналитической модели:  $r_a = 3.5$  мм,  $r_c = 2.6$  мм, количество резонаторов  $N = 12$ , величина анодного напряжения  $U_a = 8.0$  кВ и рабочего магнитного поля  $B = 0.4$  Тл.

Моделирование процессов вторично-электронной эмиссии осуществлено с использованием работ [11, 12]. Коэффициент вторичной эмиссии выбран равным 1.8 при энергии бомбардировки 780 эВ. Разброс энергии первичных электронов, кото-

рые вылетают с дополнительного термоэлектронного катода, выбран в интервале 2...5 эВ.

В основе трехмерной модели лежит концепция самосогласованного поля, для решения кинетического уравнения применен метод крупных частиц, коэффициент укрупнения  $0.85 \cdot 10^6$  электронов в частице. Метод базируется на совместном решении уравнений возбуждения анодной резонаторной замедляющей системы электронным потоком, уравнения Пуассона, уравнений движения. Результаты численного моделирования методом крупных частиц представлены на рис. 7. Рабочая частота 32 ГГц, выходная мощность около 6 кВт, КПД около 9% при  $U_a = 8.0$  кВ,  $B \approx 0.4$  Тл, рабочем токе около 8.3 А.

Полученные выходные значения мощности и КПД могут быть увеличены после оптимизации конструкции магнетрона, так как в модели было использовано одномодовое приближение. В силу этого не учитывалось «размывающее» действие на электронную втулку со стороны остальных видов колебаний анодной системы.

Как показало моделирование, режим взаимодействия на (+1)-й пространствен-

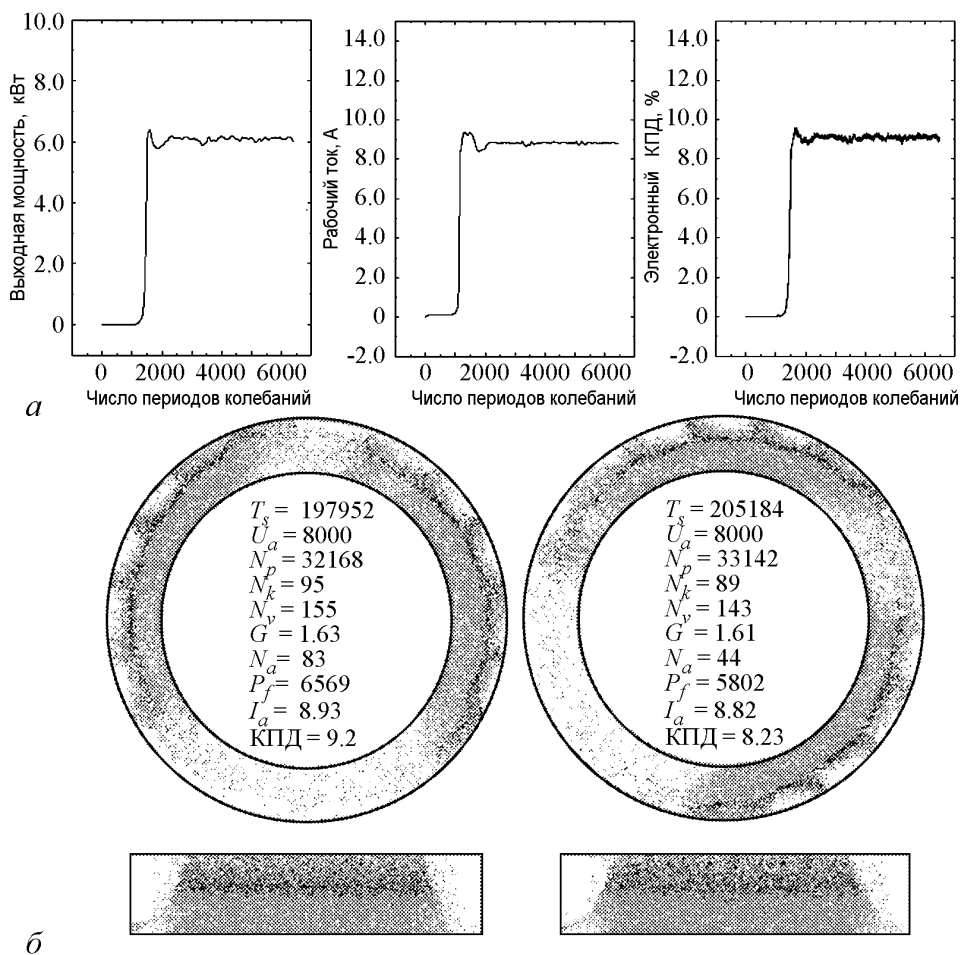


Рис. 7. *а* – Зависимость рабочего тока, КПД и выходной мощности магнетрона с холодным катодом от длительности процесса моделирования (на (+1)-й пространственной гармонике); *б* – 3D-моделирование распределения электронов в пространстве взаимодействия генерирующего на (+1)-й пространственной гармонике магнетрона (черные точки – синхронные электроны)

ной гармонике колебаний  $\pi$ -вида в нетрадиционном магнетроне миллиметрового диапазона обеспечивает более высокие выходную мощность и КПД, чем режим взаимодействия на  $(-1)$ -й пространственной гармонике колебаний  $\pi/2$ -вида. Вероятно, это обусловлено тем, что амплитуда электромагнитного поля вблизи поверхности 12-резонаторной периодической структуры анодного блока больше.

### Заключение

Применение представленной нелинейной аналитической модели электронно-волнового взаимодействия в процессе проектирования нетрадиционного импульсного магнетрона миллиметрового диапазона с холодным вторично-эмиссионным катодом позволяет получить данные о геометрии его пространства взаимодействия и ориентировочные приемлемые параметры рабочего магнитного поля, а также анодного напряжения. Рассчитанные с учётом дрейфово-орбитальных резонансов параметры служат исходными данными при осуществлении 3D-моделирования численными методами.

При этом уже на уровне аналитических расчётов, можно сделать выводы о преимуществах того или иного распределения ВЧ-поля в магнетроне и выбрать оптимальное для этой картины поля число резонаторов. А при последующем численном моделировании – приблизительно оценить мощность и эффективность прибора.

### Библиографический список

1. Грицаенко С.В., Ерёмка В.Д., Копоть М.А., Кулагин О.П. и др. Многорезонаторные магнетроны с холодным вторично-эмиссионным катодом: Достижения, проблемы и перспективы // Радиофизика и электроника. Сборник научных трудов ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины. 2004. Т. 10, спец. вып. С. 499.
2. Шлифер Э.Д. Расчет многорезонаторных магнетронов. М.: МЭИ, 1966. 143 с.
3. Бабенко М. И., Вигдорчик И. М., Половин Р. В., Яновский М.С. Магнетрон с боковым катодом. Препринт № 31. Харьков: Изд. ИРЭ АН УССР, 1974. 47 с.
4. Kulagin O.P., Yeryomka V.D. Optimal conditions for drift-orbital resonance in M-type devices // IEEE Trans. Plasma Science. June, 2004. Vol. 32, № 3. P. 1181.
5. Кулагин О.П., Ерёмка В.Д. Дрейфово-орбитальные режимы в магнетронных генераторах миллиметровых волн // Радиофизика и электроника. Харьков: Институт радиофизики и электроники НАН Украины. 2003. Т. 8, № 3. С. 81.
6. Avtomonov N.I., Sosnytskiy S.V., Vavriv D.M. Dependence of magnetron characteristics on the secondary-emission yield of cold cathode // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения (5). 2006. № 5. С. 225.
7. Красников М.Ю. О резонансном взаимодействии в цилиндрическом магнетроне // Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т. XXIII, № 1. С. 113.
8. Капица П.Л. Электроника больших мощностей. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 195 с.
9. Вайнштейн Л.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике / Л.А. Вайнштейн, В.А. Солнцев. М.: Сов. Радио, 1973. 400 с.: ил.
10. Yeryomka V.D., Kopot' M.A., Kulagin O.P., Tishchenko A.S., Naumenko V.D.,



Suvorov A.N., Jung-II Kim. Simulation and experimental breadboarding of 35 GHz spatial harmonic magnetrons with cold cathode // 20-я Международная Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2010), Украина, 2010, Труды конф. Т. 1. С. 310.

11. Rodney J., Vaughan M. A new formula for secondary emission yield// IEEE Transaction on electron devices. September 1989. Vol. 36, № 9. P. 1963.
12. Rodney J., Vaughan M. Secondary emission formulas// IEEE Transaction on electron devices. April 1993. Vol. 40, № 4. P. 830.

Поступила в редакцию 5.05.2014  
После доработки 29.05.2014

### 32 GHZ COLD CATHODE MAGNETRON WITH SPACE HARMONICS – NONLINEAR ANALYTICAL CALCULATION AND 3D-SIMULATION

V.D. Yeryomka<sup>1</sup>, M.A. Kopot'<sup>2</sup>, O.P. Kulagin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> A.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine

<sup>2</sup> Kharkiv National University of Radio Electronics

The analytical estimation of the optimal parameters fulfilled for pulsed magnetrons with cold secondary-emission cathodes, operating at a frequency of 32 GHz with anode voltage of 8 kV and with magnetic field of about 0.4 Tesla. As shown, the geometry of the magnetron interaction space can ensure an interaction between electrons and the high-frequency field as for the  $(-1)$ -th space harmonic of  $\pi/2$ -oscillations, so for  $(+1)$ -th space harmonic  $\pi$ -oscillations in the drift-orbit resonance mode. Three-dimensional numerical experiments show that both modifications of the tube can provide the required power characteristics. The possibility to use the chosen non-linear analytical model for preliminary calculations of the operating parameters of the non-classical M-type spatial-harmonics tubes is confirmed.

*Keywords:* Drift-orbital resonance, spatial harmonics magnetrons, three-dimensional numerical model, non-linear analytical model.

*Ерёмка Виктор Данилович* – родился в Донецкой обл.(1938), окончил Киевский политехнический институт (1961). После окончания КПИ работает в ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в ХГУ (1974) в области физической электроники. Руководил Лабораторией вакуумной СВЧ электроники и микроэлектроники (1982–1996), Отделом вакуумной электроники (1996–2001). С 2001 года по настоящее время – старший научный сотрудник того же отдела. Соавтор монографий «Электрорадиотехнические приборы диапазона миллиметровых волн» (2007) и «Физические основы и радиоэлектронные средства контроля надводной обстановки и судоходства» (2012). Опубликовал 130 научных статей по направлениям физической электроники и радиофизики. Автор 70 изобретений в области электроники СВЧ. Член редколлегии журнала «Техника и приборы СВЧ», член Украинского физического общества, Senior Member IEEE.



Украина 61085, г. Харьков, ул. Академика Проскуры, 12  
Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины

E-mail: v.yeryomka@gmail.com



*Копоть Михаил Андреевич* – родился в Орловской области РФ (1965). Окончил Харьковский институт радиоэлектроники (1987). Работал на различных должностях в Харьковском национальном университете радиоэлектроники, в данный момент – заведующий лабораторией кафедры «Программная инженерия». Область интересов – нелинейная динамика заряженных частиц, электродинамика. Опубликовал более 30 научных статей, более 10 патентов по данной тематике.

Украина 61166, г. Харьков, пр. Ленина, 14  
Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
E-mail: miko\_ua@list.ru



*Кулагин Олег Павлович* – окончил физико-технический факультет Харьковского политехнического института (ХПИ) в 1994 году. После окончания ХПИ работает в Институте радиофизики и электроники имени А.Я. Усикова Национальной Академии Наук Украины (ИРЭ НАНУ) в отделе вакуумной электроники, в настоящее время занимает должность научного сотрудника. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в ИРЭ НАНУ (2013) в области физической электроники, область интересов – электровакуумные приборы М-типа, нелинейная динамика электронных потоков в скрещенных полях. Опубликовал более 70 статей, патентов и докладов на международных конференциях по указанным выше направлениям.

Украина 61085, г. Харьков, ул. Академика Проскуры, 12  
Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины  
E-mail: kulagin2008@mail.ru