

# ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДВУХКАСКАДНОГО МАГНЕТРОННОГО АВТОГЕНЕРАТОРА

Г.И. ФРОЛОВА, Г.И. ЧУРЮМОВ

В настоящей работе представлены результаты математического моделирования выходных характеристик и режимов работы двухкаскадного магнетрона. Исследования проводятся методом крупных частиц (PIC-метод) в многопериодном, одновидовом и нерелятивистском приближениях. Показано, что применение новой конструкции прибора со скрещенными полями (двухкаскадный магнетронный автогенератор) позволяет получить более высокие эксплуатационные параметры по сравнению с классическими конструкциями магнетронов.

In this paper the outcomes of computer modeling of the output characteristics and operating modes of a two-stage magnetron are presented. The investigations carried out by a PIC-method in multi-periodic, single-wave and non-relativistic approximations. It is shown, that the application of a new construction of the crossed field tube (the two-stage magnetron) allows to obtain higher operation parameters in comparison with classical constructions of magnetrons.

## 1. Введение

Создание современных радиоэлектронных систем априори предполагает постоянное совершенствование существующей активной элементной базы, в том числе и в СВЧ диапазоне. В этом плане традиционными задачами проектирования приборов СВЧ (генераторов и усилителей) с улучшенными выходными параметрами являются: увеличение выходной мощности (как импульсной, так и непрерывной), повышение КПД и коэффициента усиления, увеличение рабочей частоты и расширение полосы частот, снижение питающих напряжений и уровня шумов, увеличение диапазона перестройки частоты, а также уменьшение массы и габаритных размеров, увеличение срока службы и повышение надежности работы [1, 2]. В большинстве случаев такие требования, как показывают проведенные исследования [3], противоречивы, что не позволяет реализовать их практически, используя известные (традиционные) конструкции приборов. Поэтому актуальной становится задача нахождения новых конструктивных решений, которые позволили бы создавать приборы с улучшенными выходными параметрами и режимами работы.

В работах [3, 4] показано, что среди перспективных путей улучшения выходных параметров приборов магнетронного типа следует выделить направление, связанное с созданием двухкаскадных приборов, основу работы которых составляет взаимодействие двух электронных потоков с ВЧ волной замедляющей системы.

Целью данной работы является изучение особенностей нелинейного взаимодействия двух замкнутых электронных потоков с ВЧ полем резонансной замедляющей системой (РЗС), изучение динамики электронно-волновых процессов и определение оптимальных режимов работы двухкаскадного магнетронного автогенератора, а также определение его функциональных возможностей и областей практического применения.

Для решения вышеперечисленных задач предлагается использовать математическую модель двухкаскад-

ного магнетронного автогенератора, основу которой составляет метод крупных частиц, который хорошо себя зарекомендовал как метод математического моделирования сложных нелинейных процессов электронно-волнового взаимодействия в приборах магнетронного типа [5]. Математическая модель двухкаскадного магнетронного автогенератора рассматривается как многопериодная трехмерная математическая модель, полученная с учетом одновидового ( $\pi$ -вид), одночастотного и нерелятивистского приближений. Также предполагается, что реализованы условия идеального согласования РЗС и внешней нагрузки прибора.

## 2. Постановка задачи

Как было отмечено в работе [6], двухкаскадный магнетронный автогенератор сочетает в себе две разновидности азимутально-симметричных электронно-волновых систем: обычную (внутренний каскад) и обращенную (внешний каскад). Схематично пространства взаимодействия двухкаскадного магнетронного автогенератора представлено на рис. 1. Теоретическое исследование в области взаимодействия электронов внешнего и внутреннего каскадов с электромагнитной волной РЗС позволяет рассмотреть различные режимы работы, как отдельных каскадов (например, внутреннего), так и двухкаскадного магнетрона в целом, выявляя положительные и отрицательные моменты такого взаимодействия. Математическое моделирование проводится для двух конструкций двухкаскадного магнетрона. Первая конструкция представляет собой внутренний каскад, как аналог магнетрона МИ29 с параметрами:  $f = 2,83$  ГГц;  $r_{P3C}^I = 0,010$  м;  $r_K^I = 0,00565$  м;  $N = 12$ ;  $B = 0,25$  Тл, а внешний каскад — аналог обращенного магнетрона [7]:  $r_{P3C}^{II} = 0,0127$  м;  $r_K^{II} = 0,01468$  м;  $N = 36$ ;  $B = 0,127$  Тл. Во второй конструкции внутренний каскад представляет собой аналог магнетрона М156 с параметрами:  $f = 2,45$  ГГц;  $r_{P3C}^I = 0,00445$  м;  $r_K^I = 0,0023$  м;  $N = 10$ ;  $B = 0,157$  Тл, а геометрия внеш-

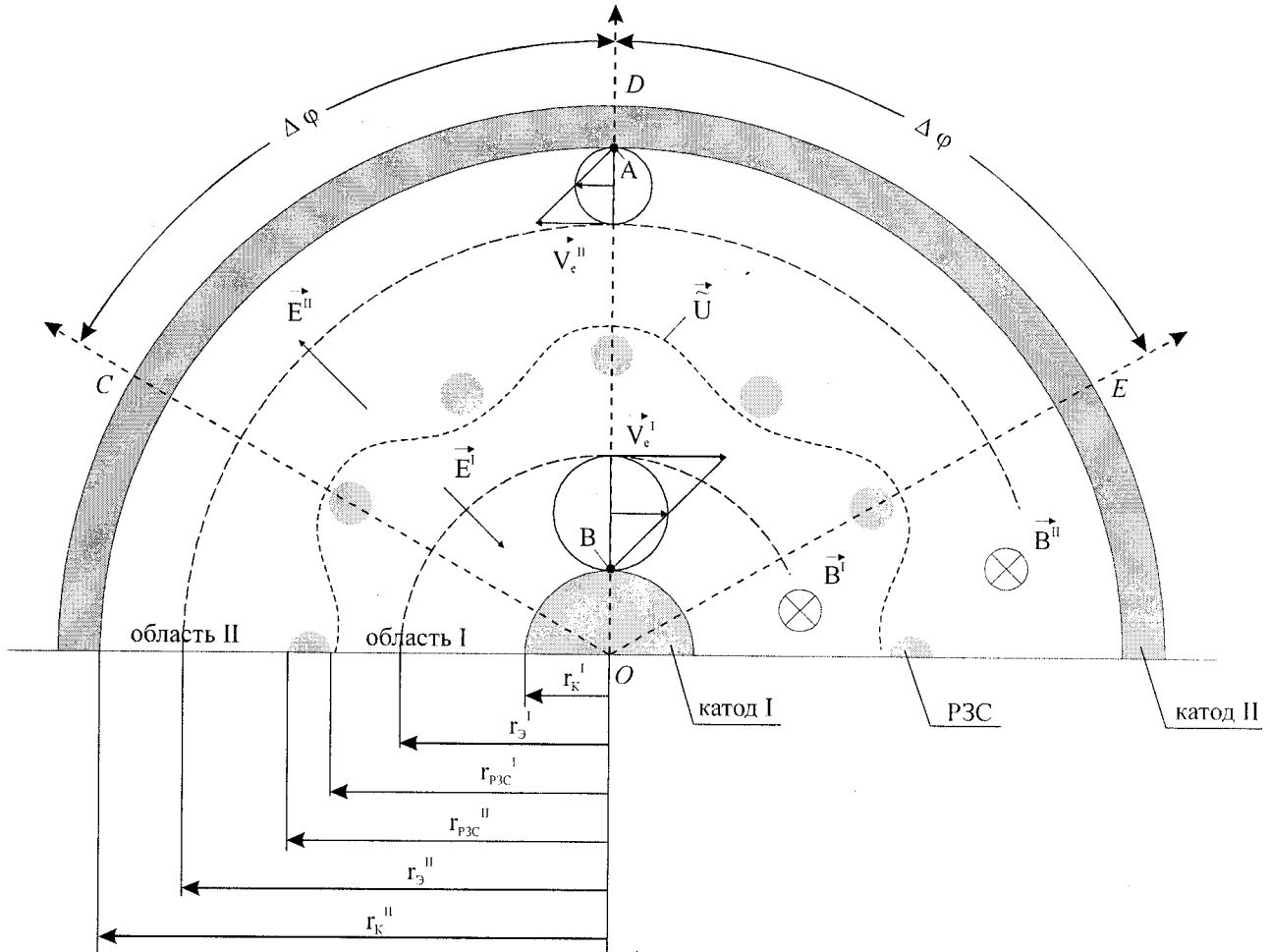


Рис.1. Пространства взаимодействия двухкаскадного магнетронного автогенератора

ного каскада аналогична первой конструкции [7], только при  $N = 30$ .

В качестве магнитно-фокусирующей системы двухкаскадного магнетрона используется стандартная магнитно-фокусирующая система классической конструкции магнетрона, экспериментальное распределение аксиальной составляющей индукции магнитного поля в которой приведено в работе [6].

### 3. Выбор электрического режима работы

Как следует из рис. 1, под действием скрещенных статических электрического и магнитного полей в пространствах взаимодействиях (внутреннем I и внешнем II) формируются электронные втулки пространственного заряда (области I и II). Высота электронных втулок зависит от величин приложенных анодных напряжений  $U_a^I$  и  $U_a^{II}$  при условии фиксированного значения индукции магнитного поля во внутреннем  $B_0^I$  и внешнем  $B_0^{II}$  каскадах. Для примера схематично представлены статические траектории электронов А и В в подвижной системе координат и репер невозмущенных их скоростей дрейфа  $\vec{V}_e^I$  и  $\vec{V}_e^{II}$ . Как видно, направления вращения замкнутых электронных потоков во внутреннем и внешнем каскадах противоположны, что обусловлено особенностью выбора направления для векто-

ров напряженности электрического поля во внутреннем и внешнем каскадах (рис. 1).

Азимутальное движение электронов А и В должно быть синхронизировано с изменением фазы электромагнитного поля в соседних резонаторах РЗС (в плоскостях  $OC$  и  $OE$  на рис. 1). Данные плоскости проходят через центры соседних резонаторов и удалены от плоскости  $OD$  на расстояние, равное азимутальному периоду РЗС  $\Delta\varphi = \frac{4\pi}{N}$ , где  $N$  — число резонаторов. Как

видно из рис. 1, электроны А и В не только перемещаются, но и вращаются вокруг центров орбит, соответственно. Учитывая, что скорость зарядов на вершине циклоиды будет вдвое больше, чем скорость центров электронных орбит, то средняя скорость движения электронов во внутреннем и внешнем каскадах, в общем случае, выбирается равной  $V_e^{I,II} = U_a^{I,II} / (|r_{РЗС}^{I,II} - r_k^{I,II}| B_0^{I,II})$ . Расстояние, проходимое электронами, выбирается на уровне среднего радиуса каждого каскада и равно для внутреннего  $\Delta l^I = \Delta\varphi r_{cp}^I$  и внешнего  $\Delta l^{II} = \Delta\varphi r_{cp}^{II}$  каскадов, где  $r_{cp}^I = \frac{r_{РЗС}^I - r_k^I}{2}$  — средний радиус внутреннего каскада,  $r_{cp}^{II} = \frac{r_{РЗС}^{II} - r_k^{II}}{2}$  — средний радиус внешнего каскада. Окончательно, для выбора анодного напря-

жения, удовлетворяющего условию синхронного движения электронов, воспользуемся следующими выражениями:

$$U_a^I = \frac{\omega}{N} \left[ (r_{PЗС}^I)^2 - (r_k^I)^2 \right] B_0^I, \quad (1)$$

$$U_a^{II} = \frac{\omega}{N} \left[ (r_k^{II})^2 - (r_{PЗС}^{II})^2 \right] B_0^{II}. \quad (2)$$

На рис. 2 представлены зависимости анодного напряжения от индукции магнитного поля для заданных геометрических размеров пространств взаимодействия внутреннего и внешнего каскадов. Как видно, значения анодного напряжения, согласно (1) и (2), практически совпадают со значениями пороговых напряжений, вычисленных в работе [8]. Изменение геометрии пространств взаимодействия (например, за счет выбора высоты РЗС, длина ламелей которой превышает  $\lambda/4$ ) приводит к изменению хода кривых для критического и порогового напряжений. Из анализа данных зависимостей следует, что практически возможны два рабочих режима работы двухкаскадного магнетрона, удовлетворяющих условию синхронизма. В первом случае мы имеем вариант, когда  $U_a^I \neq U_a^{II}$  при условии, что  $B_0^I = B_0^{II} = const$  (случай двух модуляторов или источников питания), а во втором –  $U_a^I = U_a^{II}$  и  $B_0^I \neq B_0^{II}$  (случай одного модулятора или одного источника питания) (рис. 3). Последний случай является предпочтительным, т. к. позволяет использовать один общий модулятор (или источник питания), что упрощает практическую схему генератора, делая ее более экономичной.

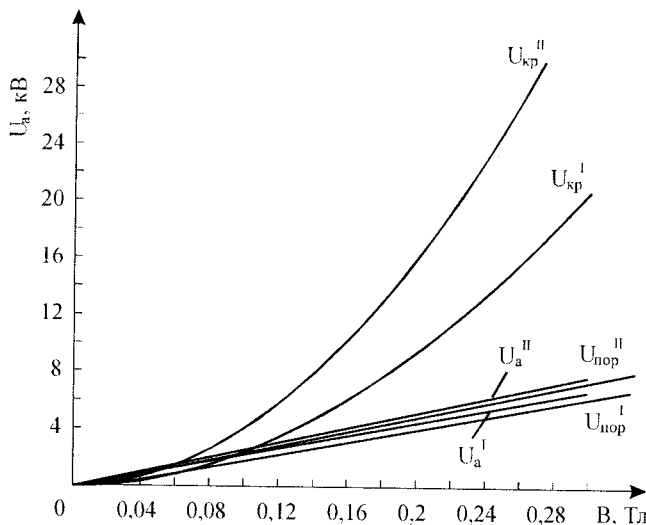


Рис. 2. Рабочие участки анодных напряжений:

- $U_{кр}^I$  и  $U_{кр}^{II}$  – параболы критического режима в I и II каскадах;
- $U_{пор}^I$  и  $U_{пор}^{II}$  – пороговые прямые  $\pi$ -вида колебаний в I и II каскадах;
- $U_a^I$  и  $U_a^{II}$  – рабочие напряжения в I и II каскадах

Тем не менее, для окончательного выбора режима работы и его оптимизации требуется проведение более строгого анализа электронно-волнового взаимодействия на основе самосогласованной модели двухкаскадного магнетрона.

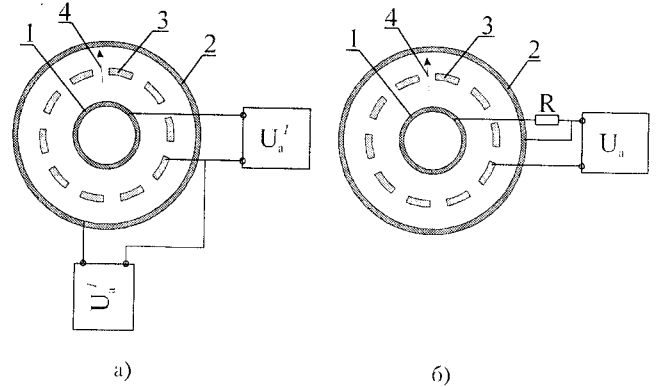


Рис. 3. Схемы подключения двухкаскадного магнетрона:

- 1 – внутренний катод; 2 – внешний катод;
- 3 – анодная замедляющая система; 4 – выход

#### 4. Математическая модель двухкаскадного магнетрона

Для математического моделирования физических процессов в двухкаскадном магнетроне необходима математическая модель, учитывающая взаимодействие двух замкнутых электронных потоков (внутреннего и внешнего) с электромагнитной волной РЗС. Для описания движения электронных потоков в пространствах I и II использованы уравнения движения, нормированный вид которых приведен в работе [6]. Там же рассматривается методология моделирования поля пространственного заряда, основанная на решении уравнения Пуассона при соответствующих граничных условиях.

Для вычисления суммарного ВЧ поля, возбуждаемого в РЗС двумя электронными потоками, воспользуемся принципом суперпозиции, разделив электромагнитное поле на вихревую и потенциальную компоненты. В этом случае для определения ВЧ поля в пространствах взаимодействия (I) и (II) на основе теории возбуждения, предложенной Л.А. Вайнштейном в [9], рассмотрим интегрирование неоднородной системы уравнений Максвелла при соответствующих начальных и граничных условиях. Используя данный подход получаем решение для электрической компоненты электромагнитного поля в следующем виде: для внутреннего каскада

$$\vec{E}^I(\vec{r}, t) = \sum_s \left( C_{+s}^I \vec{E}_{+s} + C_{-s}^I \vec{E}_{-s} \right) - grad \Phi^I \quad (3)$$

и для внешнего каскада

$$\vec{E}^{II}(\vec{r}, t) = \sum_s \left( C_{+s}^{II} \vec{E}_{+s} + C_{-s}^{II} \vec{E}_{-s} \right) - grad \Phi^{II}, \quad (4)$$

где  $C_{+s}^{I,II} = |C_{+s}^{I,II}| e^{j\theta_{+s}^{I,II}}$ ,  $C_{-s}^{I,II} = |C_{-s}^{I,II}| e^{j\theta_{-s}^{I,II}}$  – комплексные коэффициенты разложения, представляющие собой

медленно меняющиеся функции времени;  $|C_{+s}^{I,II}|$  и  $|C_{-s}^{I,II}|$  – амплитуды волн;  $\vartheta_{+s}^{I,II}$  и  $\vartheta_{-s}^{I,II}$  – фазы «горячих» волны  $+s$  и  $-s$  в каскадах I и II;  $grad \Phi^{I,II}$  – квазистатическое электрическое поле пространственного заряда, причем потенциалы  $\Phi^{I,II}$  удовлетворяют уравнению Пуассона. Необходимо отметить, что знаки перед индексом “s” в выражениях (3) и (4) характеризуют ВЧ волны, распространяющиеся в противоположных направлениях. Учитывая, что исследования проводятся в предположении идеального согласования и отсутствия ВЧ волн, отраженных от нагрузки, полагаем, что во внутреннем каскаде  $C_{-s}^I = 0$ , а во внешнем –  $C_{+s}^{II} = 0$ .

Окончательно, выражение для суммарного электромагнитного поля в РЗС можно записать в следующем виде:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}^I(\vec{r}, t) + \vec{E}^{II}(\vec{r}, t) = \sum_s (C_{+s}^I \vec{E}_{+s}^I + C_{-s}^{II} \vec{E}_{-s}^{II}) - grad \Phi^I - grad \Phi^{II}, \quad (5)$$

где

$$C_{+s}^I = -\frac{1}{T} \frac{i}{2(\omega - \omega_{+s})} \frac{1}{N_{+s}} \int_0^T \int_V \vec{J}_1 \vec{E}_{+s}^I dV dt, \quad (6)$$

$$C_{-s}^{II} = -\frac{1}{T} \frac{i}{2(\omega + \omega_{-s})} \frac{1}{N_{-s}} \int_0^T \int_V \vec{J}_2 \vec{E}_{-s}^{II} dV dt, \quad (7)$$

$\vec{E}_{+s} = E_{+s}^r \vec{i} + E_{+s}^\phi \vec{j} + E_{+s}^z \vec{k}$ ,  $\vec{E}_{-s} = E_{-s}^r \vec{i} + E_{-s}^\phi \vec{j} + E_{-s}^z \vec{k}$  – векторы собственного электромагнитного поля РЗС

[10];  $N_{+s} = N_{-s} = \frac{1}{4\pi} \int_V \vec{E}_s^2 dV$  – норма колебания;

$\omega_{-s} = -\omega_{+s}$  – собственная частота РЗС;  $\omega$  – частота возбуждения;  $\vec{J}_1$  и  $\vec{J}_2$  – плотности конвекционных токов во внутреннем и внешнем каскадах.

Таким образом, выражение (5) позволяет находить суммарную компоненту электрического поля, а выражения (6) и (7) определяют с течением времени комплексные амплитуды ВЧ волн в каскадах I и II и являются по сути уравнениями возбуждения.

Суммарная мощность двухкаскадного магнетронного автогенератора определяется как

$$P_{\text{вых}} = \frac{\omega C_r |A_s^{I,II}|^2}{2Q_n}, \quad (8)$$

где  $C_r$  – эквивалентная емкость РЗС;  $|A_s^{I,II}| = |C_{+s}^I E_{+s}^I + C_{-s}^{II} E_{-s}^{II}|$  – модуль амплитуды суммарного ВЧ поля РЗС на рабочем виде;  $Q_n$  – нагруженная добротность РЗС на рабочем виде колебаний.

Анодный ток определяется через количество частиц, вылетающих на РЗС и равен

$$I_a = \sum_i \frac{N_{\Delta t}^i Q_e}{\Delta t}, \quad (9)$$

где  $N_{\Delta t}^i$  – количество частиц;  $Q_e$  – заряд «крупной» частицы;  $\Delta t$  – шаг решения уравнений движения. Сум-

мирование проводится по количеству шагов решения уравнений движения.

Механизм электронно-волнового взаимодействия в конструкциях классических магнетронов достаточно хорошо изучен [см., напр., 8,10-12]. Аналогичные исследования применительно к двухкаскадному магнетрону отсутствуют. Поэтому необходим подробный теоретический анализ энергетических и частотных характеристик данного прибора, соответственно, для внутреннего и внешнего каскадов. Этот анализ целесообразно начать с рассмотрения особенностей физических процессов, протекающих при взаимодействии замкнутых электронных потоков с ВЧ волной РЗС на примере классических магнетронов обычной и обратной конструкции.

### 5. Исследование процессов во внутреннем пространстве взаимодействия

Для исследования процессов во внутреннем пространстве взаимодействия были взяты магнетроны двух типов. Это импульсный магнетрон МИ29 и непрерывный магнетрон М156, применяемый в бытовых СВЧ печах. Конструктивные и электрические параметры этих магнетронов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры магнетрона	МИ29	М156
1. Количество резонаторов	12	10
2. Радиус катода, мм	5,65	2,3
3. Радиус анода, мм	10	4,45
4. Высота катода, мм	24	10
5. Магнитное поле, Тл	0,25	0,157
6. Анодное напряжение, кВ	27	3,9

Главная цель изучения процессов в классических конструкциях магнетрона состоит в том, чтобы понять и сравнить их с известными результатами исследований физических процессов в данных приборах. С другой стороны сравнение результатов, полученных при компьютерном моделировании с экспериментальными данными, позволяет проверить и улучшить алгоритм математической модели.

Результаты компьютерного моделирования электронно-волнового взаимодействия в классических магнетронах представлены на рис. 4–6.

На рис. 4 показаны результаты группировки электронов в пространстве взаимодействия импульсного МИ29 и непрерывного М156 магнетронов. Типичное распределение заряда в пространстве взаимодействия классических магнетронов МИ29 и М156 приведено, соответственно, для случаев, когда напряжение анода равно  $U_a = 27$  кВ, а ток –  $I_a = 42,4$  А, и когда – анодное напряжение равно  $U_a = 3,9$  кВ и ток –  $I_a = 5,8$  А.

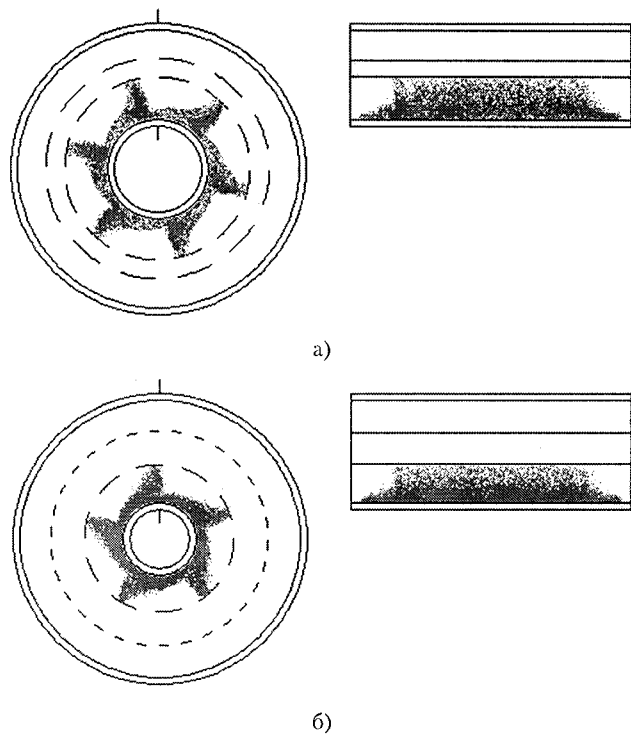
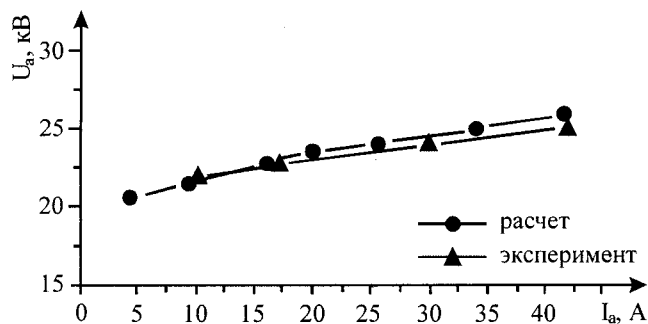


Рис.4. Азимутальное и аксиальное распределения пространственного заряда в классических магнетронах: а) импульсный магнетрон МИ29; б) непрерывный магнетрон М156

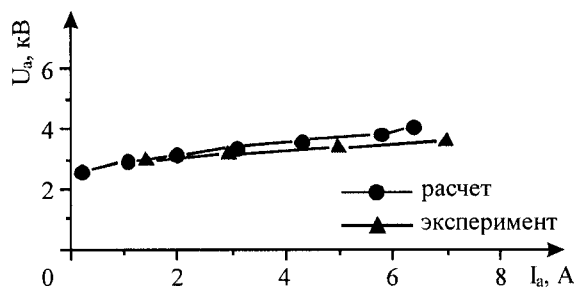
Сравнение теоретических вольтамперных характеристик (ВАХ) МИ29 и М156 с экспериментальными приведено на рис. 5. Расчеты компьютера находятся в соответствии с экспериментальными данными в широком диапазоне анодного напряжения (от 21 кВ до 27 кВ – для МИ29 и от 3 кВ до 4,7 кВ – для М156). Различие между расчетными и экспериментальными данными не превышает 3–5 процентов. Максимальная выходная мощность соответствует высоковольтной рабочей области ВАХ и, соответственно, равнялась 710 кВт и 14,5 кВт, а КПД – 63% и 67%. Попытка расширения зоны рабочих токов за счет увеличения анодного напряжения приводит к срыву колебаний магнетрона на рабочем виде и возбуждения высоковольтного вида колебаний. Данное явление получило название «перескока» частоты. В процессе «перескока» имеет место конкуренция видов колебаний (рабочего  $\frac{N}{2}$  и высоковольтного  $\frac{N}{2} + 1$ ), заканчивающаяся доминированием одного из видов. Это явление исследовалось в работе [13]. Так как в этой работе численная модель является одновидовой ( $\pi$ -вид), то мы наблюдаем лишь разрушение спиц. Подробные исследования явления конкуренции видов приведено в работе [14].

Для изучения частотных свойств двухкаскадного магнетрона необходимо рассмотреть явление электронного смещения частоты (ЭСЧ). Изменение частоты магнетрона связано с увеличением анодного тока, при повышении анодного напряжения. При этом угловая скорость вращения спиц пространственного заряда увеличивается, что приводит к изменению их фазового положения относительно максимума тормозящей

фазы ВЧ поля и, как следствие, к изменению частоты генерируемых ВЧ колебаний и появлению ЭСЧ.



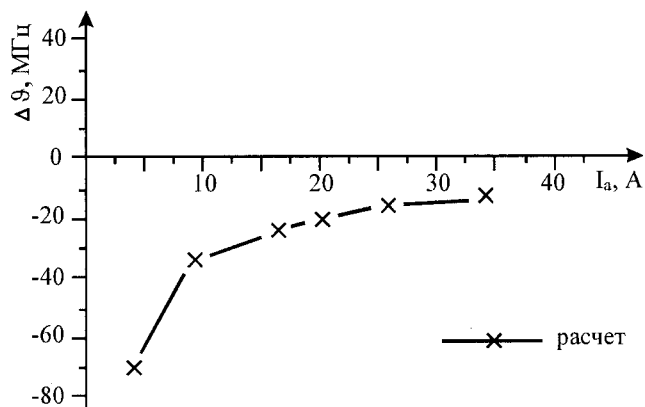
а)



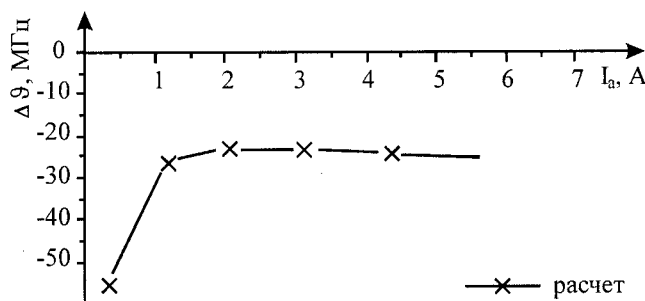
б)

Рис. 5. Вольтамперные характеристики магнетронов (а) МИ29 и (б) М156

Кривые ЭСЧ, характеризующие изменение частоты генерации для разных конструкций магнетронов, представлены на рис. 6.



а)



б)

Рис. 6. Кривые электронного смещения частоты магнетронов (а) МИ29 и (б) М156

Как видно, качественно поведение кривых ЭСЧ повторяет аналогичные кривые, известные из работ [10, 12]. При постоянной магнитной индукции в области малых анодных токов наблюдается резкое изменение частоты магнетрона. С дальнейшим ростом анодного тока изменение частоты уменьшается, происходит ее стабилизация в высоковольтной части ВАХ. Наличие в магнетроне ЭСЧ необходимо учитывать, особенно, в приборах с импульсным режимом работы, т. к. в этом случае возможна значительная паразитная частотная модуляция.

Из кривых ЭСЧ на рис. 6 видно, что для получения минимального изменения частоты при изменении анодного тока следует выбирать рабочий режим по анодному току в высоковольтной части ВАХ. Полученные результаты моделирования ЭСЧ позволяют установить влияние на частотные характеристики магнетрона не только режима, но и параметров его колебательной системы, например, добротности и т. п.

### 6. Исследование процессов во внешнем пространстве взаимодействия

После того, как магнетрон стал применяться в радиолокации в качестве мощного генератора возникла идея о возможности создания магнетрона с катодом, окружающим РЗС (обращенная конструкция) [7]. Главное преимущество такой конструкции заключалось в увеличении эмитирующей поверхности катода, а также увеличении поверхности РЗС, что позволило провести исследование в случае, когда кривизна пространства взаимодействия приближалась к плоскопараллельному случаю (планотрон [15]).

Для исследования был выбран обращенный магнетрон, описанный в работе Хэлла [7]. Результаты моделирования представлены на рис. 7–9.

На рис. 7 показано азимутальное и аксиальное распределения пространственного заряда в одноконтурном обращенном магнетроне.

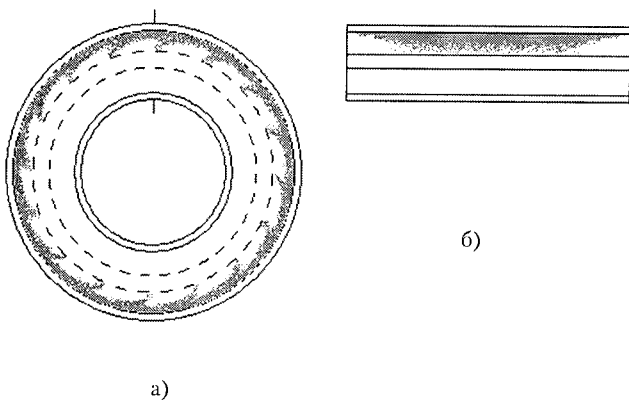


Рис. 7. Азимутальное (а) и аксиальное (б) распределения пространственного заряда в одноконтурном обращенном магнетроне

Полученные вольтамперные и частотные характеристики магнетрона изображены на рис. 8, 9. Выходная мощность составила 1650 Вт на частоте 2500 МГц при КПД 50,34 % в точке на ВАХ при  $U_a = 3100$  В и

$I_a = 1,054$  А. Данные результаты расчета показали хорошее соответствие в сравнении с экспериментальными данными.

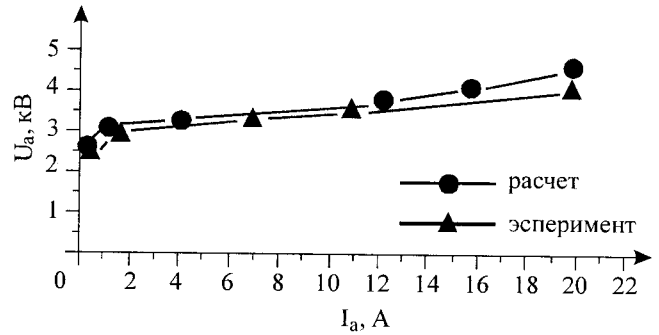


Рис. 8. Вольтамперные характеристики одноконтурного обращенного магнетрона

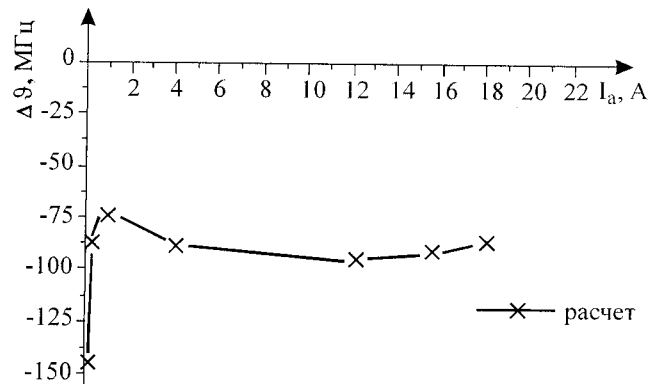


Рис. 9. Кривая электронного смещения частоты одноконтурного обращенного магнетрона

### 7. Анализ режимов работы двухкаскадного магнетронного автогенератора

Исследуемый автогенератор представляет собой двухкаскадный прибор, имеющий два электронных потока (внутренний и внешний) и общую РЗС (рис. 1). Такая конструкция прибора расширяет функциональные возможности магнетрона классической конструкции, позволяя реализовать не только обычные режимы работы: импульсный и/или непрерывный, но и рассмотреть возможность использования специальных режимов работы, связанные с модуляцией и синхронизацией колебаний.

При анализе режимов работы двухкаскадного магнетронного автогенератора рассмотрим два случая: первый, когда имеется два источника питания и второй, когда – один источник питания. При этом для второго случая геометрия внешнего прибора выбиралась с помощью исследования хода кривых для критического и порогового напряжений, таким образом, чтобы возможно было реализовать режимы работы, когда  $B'_0 = B''_0 = const$  и  $B'_0 \neq B''_0$ . Для выбора того или иного режима работы использовали экспериментальное распределение аксиальной составляющей индукции магнитного поля вдоль радиуса в разных сечениях аксиальной длины прибора, которое приведено в работе [6]. Так как поле является линейно неоднородным по радиусу, то изменяя радиус внешней РЗС можно

исследовать различные режимы работы двухкаскадного магнетронного автогенератора.

Азимутальное и аксиальное распределения пространственного заряда в двухкаскадном магнетроне с внутренним каскадом в виде импульсного магнетрона МИ29, а внешнего – обращенного магнетрона [7], представлено на рис. 10.

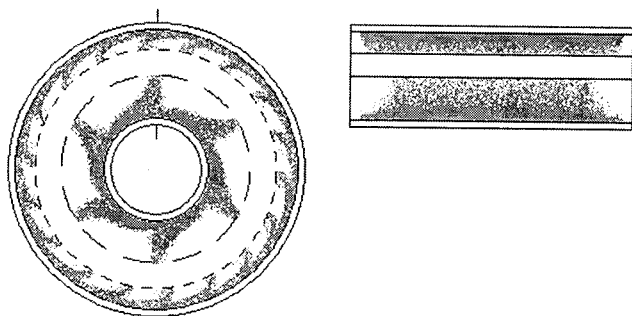


Рис. 10. Распределение пространственного заряда в двухкаскадном магнетроне с геометрией для внутреннего каскада – импульсного магнетрона МИ29 и внешнего – обращенного магнетрона

ВАХ и ЭСЧ для двухкаскадного магнетрона приведено на рис. 11 и 12. Там для сравнения показаны характеристики МИ29 и обращенного магнетронов без внешнего каскада. Максимальный уровень выходной мощности при  $f=2,83$  ГГц,  $U_a^I=27$  кВ и  $U_a^{II}=3,3$  кВ составил  $P_{вых}=654,7$  кВт, что на 5,5% меньше, чем для классической конструкции МИ29. КПД при этом равен 56%.

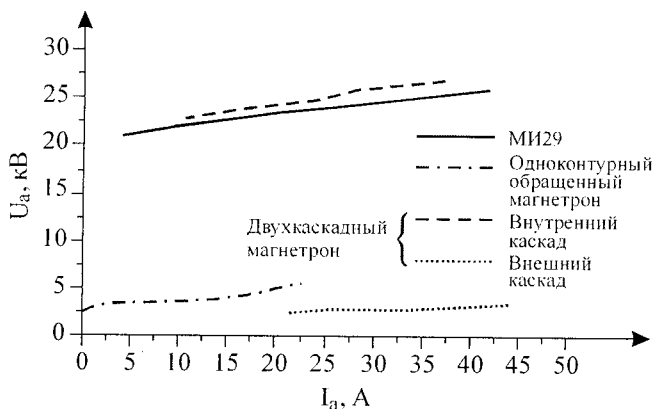


Рис. 11. Вольтамперные характеристики двухкаскадного магнетронного автогенератора (МИ29+обращенный магнетрон)

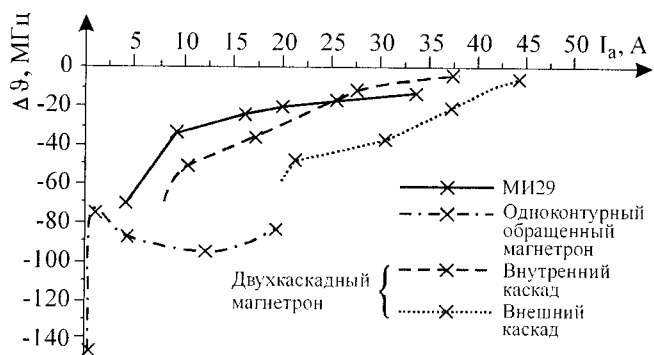


Рис. 12. Кривые электронного смещения частоты двухкаскадного магнетронного автогенератора (МИ29+обращенный магнетрон)

Азимутальное и аксиальное распределения пространственного заряда в двухкаскадном магнетроне с внутренним каскадом в виде непрерывного магнетрона М156, а внешнего – обращенного магнетрона [7], представлено на рис. 13.

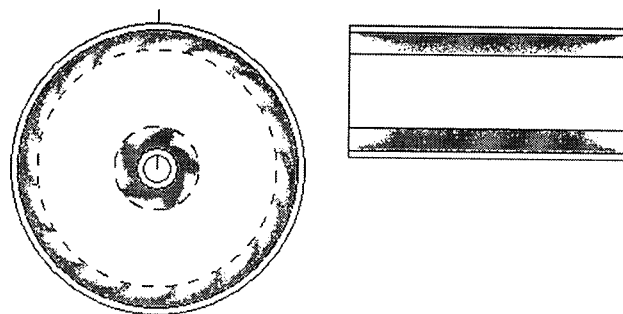


Рис. 13. Распределение пространственного заряда в двухкаскадном магнетроне с геометрией в виде внутреннего каскада – непрерывного магнетрона М156, а внешнего – обращенного магнетрона

ВАХ и ЭСЧ для двухкаскадного магнетрона приведено на рис. 14 и 15. Там для сравнения показаны характеристики М156 и обращенного магнетронов без внешнего каскада. Максимальный уровень выходной мощности при  $f=2,45$  ГГц и  $U_a^I=U_a^{II}=4$  кВ составил  $P_{вых}=40,4$  кВт, что в 3 раза превышает выходную мощность классической конструкции М156. Однако в этом случае имеет место некоторое уменьшение КПД до 48,3%.

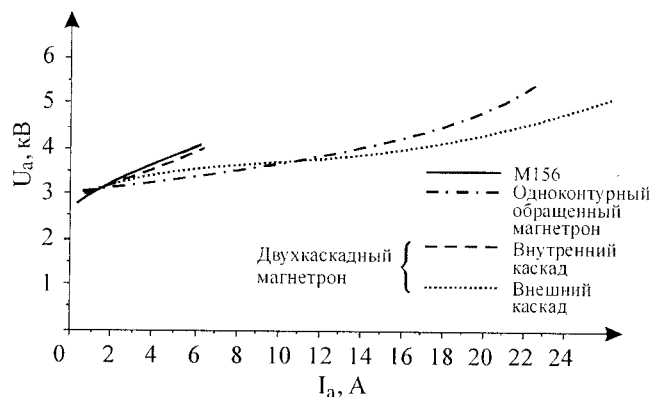


Рис. 14. Вольтамперные характеристики двухкаскадного магнетронного автогенератора (М156+обращенный магнетрон)



Рис. 15. Кривые электронного смещения частоты двухкаскадного магнетронного автогенератора (М156+обращенный магнетрон)

Если взять геометрию двухкаскадного магнетронного автогенератора с внутренним каскадом в виде импульсного магнетрона МИ29 и внешним, имеющим геометрию пространства взаимодействия, определенной методом подбора высоты РЗС и внешнего катода, для случая совмещения кривых критического и порогового напряжений с целью реализации режима работы при одном источнике питания  $U_a^I = U_a^{II}$  и  $B_0^I = B_0^{II} = const$ . Полученные характеристики для данного случая приведены на рис. 16 и 17. При этом режиме было замечено, что максимальный уровень выходной мощности увеличился в 1,8 раз по сравнению с прибором МИ29, а КПД — уменьшился на 10%.

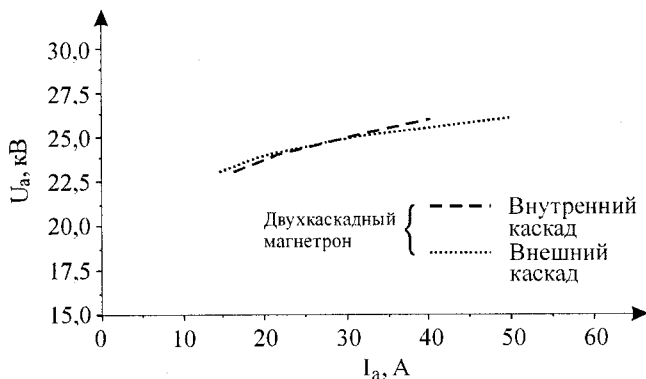


Рис. 16. Вольт-амперные характеристики двухкаскадного магнетронного автогенератора

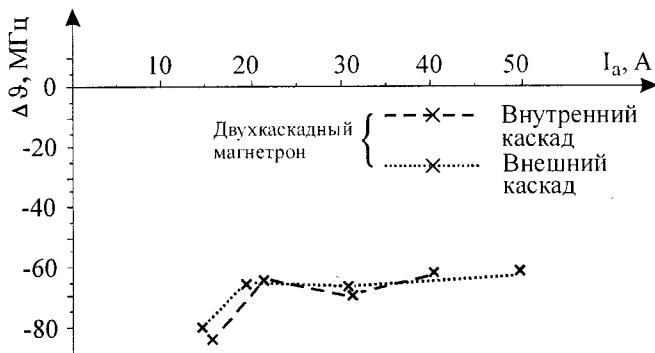


Рис. 17. Кривые электронного смещения частоты двухкаскадного магнетронного автогенератора

### Выводы

Рассмотрено математическое моделирование двухкаскадного магнетронного автогенератора — нового СВЧ прибора, обладающего более высокими эксплуатационными параметрами по сравнению с классическими приборами (обычной и обращенной конструкции) и возможностью применения дополнительных перспективных режимов работы (режима модуляции и синхронизации).

Показано, что в двухкаскадном магнетронном генераторе удалось дополнительно увеличить выходную мощность прибора в два и более число раз, а также

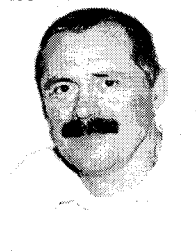
расширить зону рабочих токов в 1,2...1,4 раза. Установлено, что результаты моделирования зависят от геометрических размеров пространств взаимодействий.

**Литература.** 1. Гельвич Э.А., Лопин М.И. СВЧ усилители средней и большой мощности нового поколения // Радиотехника. Вып. 4. 1999. — 18–31 с. 2. Макаров В.Н., Тебекин А.В. Развитие мощных СВЧ-приборов и устройств на их основе // Радиотехника. — 2002. — № 8. С. 30–41. 3. Чурюмов Г.И. Пути и методы повышения эффективности взаимодействия электронного потока с замедленными электромагнитными волнами в системах со скрещенными полями: Дис. док. физ.-мат. наук: 01.04.04. — Харьков, 1997. — С. 254. 4. Герасимов В.П., Грицунов А.В., Загорин В.А., Чурюмов Г.И. Перспективы применения вычислительного эксперимента в теории и практике приборов со скрещенными полями // Радиотехника. 1999. Вып. 111. — С. 17–25. 5. Кураев А.А., Байбурун В.Б., Ильин Е.М. Математические модели и методы оптимального проектирования СВЧ-приборов. — Мн.: Наука и техника, 1990. — 392 с. 6. Чурюмов Г.И., Фролова Т.И. Математическое моделирование нелинейных электронно-волновых процессов в нетрадиционном магнетронном генераторе // Радиотехника: Всеукр. Межвед. научн.-техн. сб. — 2001. — Вып.117. — С. 92–95. 7. Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями: Пер. с англ. / Под ред. М.К. Федорова. — М.: Изд. Иностран. лит.-ры. Т. 2, 1961. — 472 с. 8. Коваленко В.Ф. Введение в электронику сверхвысоких частот. Изд-во «Советское радио», Москва, 1955, 344 с. 9. Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: Сов. радио, 1973. С. 398. 10. Магнетроны сантиметрового диапазона: Пер. с англ. // Под ред. С.А. Зусмановского. — М.: «Сов. радио», 1950. — Т. 1. — 420 с. 11. Магнетроны сантиметрового диапазона: Пер. с англ. // Под ред. С.А. Зусмановского. — М.: «Сов. радио», 1951. — Т. 2. — 472 с. 12. Бычков С.И. Вопросы теории и практического применения приборов магнетронного типа. М.: Сов. радио. 1967. — 216 с. 13. Байбурун В.Б., Еремин В.П., Сысуйев А.В., Терентьев А.А. Численное моделирование магнетронных генераторов с учетом конкуренции видов колебаний. Письма в ЖТФ. 2000. Том 26. Вып. 4. — С. 37–46. 14. Churyumov G.I., Frolova T.I., Gritsunov A.V., Nikitenko O.M., Prokopchik V.A. Analysis of mode competition in magnetrons, IVEC 2004 (в печати). 15. Каница П.Л. Электроника больших мощностей, Изд-во Академии Наук СССР, Москва, 1962, с. 196.

Поступила в редколлегию 15.01.04 г.



**Фролова Татьяна Ивановна**, ассистент каф. ФОЭТХНУРЭ. Область научных интересов: компьютерное моделирование нелинейных процессов в приборах со скрещенными полями, СВЧ электроника.



**Чурюмов Геннадий Иванович**, доктор физ.-мат. наук, профессор каф. ФОЭТХНУРЭ. Область научных интересов: методы математического моделирования нелинейных процессов, СВЧ электроника и электродинамика, электронные и оптоэлектронные приборы.