

УДК 621.385.6

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ В МАГНЕТРОНЕ С ДВУМЯ ВЫВОДАМИ ЭНЕРГИИ (МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ)

*Г. И. ЧУРЮМОВ, А. И. ЭКЕЗЛИ, К. М. БАСРАВИ, Е. Б. ИСАЕВА*

---

В настоящей статье получил дальнейшее развитие метод эквивалентных схем применительно к исследованию магнетронного генератора 3-сантиметрового диапазона с двумя выводами энергии. Представлены теоретические и экспериментальные результаты перестройки частоты в магнетроне в зависимости от изменения реактивной составляющей нагрузки во втором выводе энергии. Показано экспериментально, что диапазон перестройки частоты составил 250 МГц в линейной части частотной характеристики. Теоретически рассчитанная характеристика перестройки частоты магнетрона хорошо согласуется с результатами экспериментов. Показана возможность расширения диапазона перестройки частоты до 800 МГц.

*Ключевые слова:* магнетрон, электродинамическая система, метод эквивалентных схем, математическая модель, вывод энергии.

### ВВЕДЕНИЕ

В качестве метода математического моделирования сложных нелинейных процессов электронно-волнового взаимодействия в вакуумных приборах СВЧ (генераторах и усилителях) широкое применение получил метод крупных частиц (Particle-in-Cell (PIC) Method). С помощью данного метода реализуются наиболее точные и адекватные математические модели задач взаимодействия частиц с электромагнитным взаимодействием. Существуют разные подходы к созданию подобных моделей, отличающиеся вводимыми начальными приближениями для адекватного описания электронного потока (например, одномерное (для приборов типа O) или двумерное (для магнетронных приборов) приближения). Наиболее общим подходом к решению задачи взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем является численное решение трехмерных уравнений Максвелла для электромагнитного поля и уравнения движения электронного потока при соответствующих граничных и начальных условиях. Созданы и используются различные пакеты прикладных программ (например, MAGIC, CST и др.), которые реализуют указанный подход в удобной для пользователей форме представления физических результатов, включая пространственно-временные распределения объемной плотности заряда, направление и распределение силовых линий электромагнитного поля, расчет и определение основных параметров приборов (частоты генерации, выходной мощности, анодного тока, амплитудно-частотной характеристики и т.п.). С другой стороны, следует отметить недостатки, присущие численному подходу к решению задачи нелинейного взаимодействия электромагнитного поля с потоком заряженных частиц. В первую очередь, это касается погрешности вы-

числений (или «вычислительного шума» [1]), а также, в ряде случаев, сложностей, связанных с пониманием полученных результатов численных расчетов и объяснением физики изучаемых процессов. Наличие данных сложностей в значительной степени объясняется невозможностью в рамках используемых сеточных методов осуществить «разделение» электрической составляющей электромагнитного поля и электронного тока на потенциальные и вихревые составляющие, а также оценить отдельное их влияние (например, поля пространственного заряда (ПЗ) или неоднородностей электростатического и магнитостатического полей) на динамику электронного потока и его фазовую группировку. Реализация же такой возможности в условиях самосогласованного решения задачи позволит выделить и исследовать различные факторы, влияющие на механизм нелинейного взаимодействия. Необходимо отметить, что такая постановка задачи требует проведения предварительного определения параметров и характеристик электродинамической системы прибора для последующего их использования при самосогласованном решении системы нелинейных уравнений возбуждения электромагнитного поля, представленного в виде отдельного рабочего вида колебания (например,  $\pi$ -вида) или синхронной пространственной гармоника, уравнения Пуассона для расчета поля ПЗ и уравнения движения электронного потока [2].

Тем не менее, следует сказать, что применение вышеуказанных подходов и строгих самосогласованных математических моделей является важным этапом процесса проектирования современных вакуумных СВЧ приборов, особенно, на конечном этапе расчетов, который предшествует этапу макетирования прибора и связанный с теоретическим определением комплекса его рабочих характеристик и параметров.

Следует отметить, что по сравнению с применением методов теории электромагнитного поля для моделирования физических процессов в приборах СВЧ значительно более простыми и наглядными являются методы теории цепей и, в частности, хорошо известный и зарекомендовавший себя метод эквивалентных схем (МЭС). Математические модели приборов, созданные на его основе, позволяют проводить расчеты конструктивных параметров приборов, а также в рамках выбранных приближений исследовать их энергетические, частотные и шумовые характеристики [3].

В настоящей статье детально рассматривается создание математической модели магнетрона 3-см диапазона с двумя выводами энергии для решения задачи перестройки частоты методом эквивалентных схем, а также проводятся исследования влияния параметров электродинамической системы на величину такой перестройки.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Общий вид магнетрона с двумя выводами энергии схематично представлен на рис. 1. Как видно, данная конструкция магнетрона имеет два вывода энергии, один из которых является активным (3) и согласован с активной нагрузкой магнетрона, а ко второму, определяемому как реактивный вывод (4), подключается реактивная нагрузка. Каждый вывод энергии имеет разную степень связи с резонаторной системой (РС) магнетрона и выполняет различные функциональные задачи. Через активный вывод энергии осуществляется вывод полезного сигнала в нагрузку. Изменение нагрузки реактивного вывода энергии влияет на величину полного комплексного сопротивления анодного блока и, как следствие, вызывает изменение его резонансной частоты.

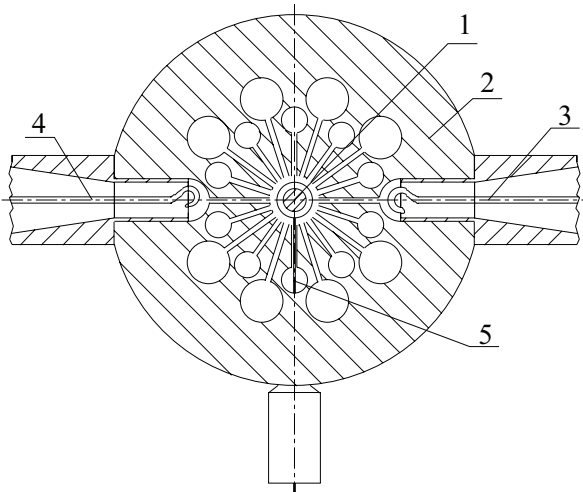


Рис. 1. Схематическое изображение магнетрона с двумя выводами: 1 – катод; 2 – анодный блок; 3 – активный вывод энергии; 4 – реактивный вывод энергии; 5 – катодные ножки

Анодный блок магнетрона представляет собой разнорезонаторную электродинамическую систему типа «щель – отверстие» с общим коли-

чеством резонаторов, равным  $N = 20$ . Основные геометрические размеры пространства взаимодействия РС магнетрона были равны: радиус катода  $r_c = 0,000975$  м; радиус анода  $r_a = 0,00155$  м и высота РС  $h = 0,0041$  м. В магнетроне используется оксидный катод с реальной достижимой плотностью тока, определяемой по следующей эмпирической формуле [3]:

$$J_{эм} \approx 3 \cdot 10^{-3} \cdot f, \text{ А/см}^2,$$

где  $f = \omega/2\pi$  – рабочая частота магнетрона в мегагерцах.

Для исследований выбирался электрический режим работы магнетрона, соответствующий анодному напряжению  $U_a = 590$  В и магнитному полю  $B_0 = 0,25$  Тл.

### 2. РАСЧЕТ «ХОЛОДНОЙ» РЕЗОНАТОРНОЙ СИСТЕМЫ

На рис. 2 схематично представлены «холодный» анодный блок магнетрона, представляющий собой разнорезонаторную электродинамическую систему типа «щель – отверстие» (а) и ее эквивалентная схема при условии возбуждения  $\pi$ -вида колебания в пространстве взаимодействия анодного блока (б).

Изменение реактивной составляющей нагрузки  $Z_{нр} = jX_{нр}$  (в плоскости 22') приводит к изменению реактивной составляющей входного комплексного сопротивления относительно активного вывода (плоскость 11')  $Z_{вх}^{11'} = R_{вх}^{11'} + jX_{вх}^{11'}$ . В этом случае резонансная частота «холодной» РС магнетрона определяется из условия, что

$$X_{вх}^{11'}(\omega) = 0. \quad (1)$$

Как видно, изменение реактивной нагрузки  $X_{нр}$  приводит к изменению реактивной составляющей входного комплексного сопротивления РС  $X_{вх}^{11'}$  и, как следствие, изменяется резонансная частота «холодной» РС магнетрона.

Для исследования резонансных свойств «холодной» РС магнетрона с двумя выводами энергии к реактивному выходу магнетрона подключается реактивная нагрузка  $Z_{нр}$ , в качестве которой использовался короткозамкнутый отрезок линии передач произвольной длины  $L$  и входным сопротивлением, равным  $Z_{вх} = Z_{нр}$  и определяемым как

$$Z_{вх} = jZ_c \cdot \text{tg} \frac{2\pi L}{\lambda_B}, \quad (2)$$

где  $Z_c$  – характеристическое сопротивление линии передач;  $\lambda_B$  – длина волны в линии передач. Как видно из (2), входное сопротивление короткозамкнутого отрезка представляет собой реактивную нагрузку, значение которой зависит от его длины  $L$ . Изменение длины короткозамкнутого отрезка в диапазоне значений  $0 \leq L \leq \lambda_B$  приводит к изменению входного реактивного сопротивления РС магнетрона  $X_{вх}^{11'}$  и ее частоты, согласно (1).

Для определения входного комплексного сопротивления РС магнетрона воспользуемся методом единичной эдс. Для этого в выходном контуре эквивалентной схемы, которая представлена на рис. 2, б, вместо нагрузки  $Z_H^a$  подключается эквивалентный генератор единичной эдс. В результате комплексное входное сопротивление РС в плоскости 11' может быть записано как

$$\dot{Z}_{вх}^{11'}(\omega) = R_{вх}^{11'}(\omega) + jX_{вх}^{11'}(\omega) = \frac{1}{\dot{I}_{K1}(\omega)}, \quad (3)$$

где  $\dot{I}_{K1}(\omega)$  – комплексное значение тока в выходном контуре РС.

С учетом (1) получаем, что уравнение для определения резонансной частоты имеет следующий вид:

$$Jm\left[\frac{1}{\dot{I}_{K1}(\omega)}\right] = 0. \quad (4)$$

Для расчета токов  $I_K$  в контурах РС воспользуемся методом контурных токов. Полагаем, что количество резонаторов РС магнетрона равно  $N = 20$ . В этом случае мы имеем 42 независимых контуров, для которых система алгебраических уравнений в матричной форме имеет вид

$$\dot{A} \cdot \dot{I}_K = E, \quad (5)$$

где  $\dot{A} = \begin{pmatrix} \dot{A}_{11} & \dot{A}_{12} & \dot{A}_{13} & \dots & \dot{A}_{1,42} \\ \dot{A}_{21} & \dot{A}_{22} & \dot{A}_{23} & \dots & \dot{A}_{2,42} \\ \dot{A}_{31} & \dot{A}_{32} & \dot{A}_{33} & \dots & \dot{A}_{3,42} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \dot{A}_{42,1} & \dot{A}_{42,2} & \dot{A}_{42,3} & \dots & \dot{A}_{42,42} \end{pmatrix}$  – матрица

комплексных сопротивлений контуров, выражения для которых вынесены в Приложение;

$$\dot{I}_K = \begin{pmatrix} \dot{I}_{K1} \\ \dot{I}_{K2} \\ \dot{I}_{K3} \\ \vdots \\ \dot{I}_{K42} \end{pmatrix} \text{ – матрица комплексных значений}$$

$$\text{контурных токов; } E = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \text{ – матрица контурных}$$

эдс.

Для расчета значений сосредоточенных элементов эквивалентной цепи воспользуемся методами, которые описаны в [4]. В результате численного решения системы алгебраических уравнений (5) определяется наведенный ток в выходном контуре  $\dot{I}_{K1}$ . После подстановки  $\dot{I}_{K1}$  в (4) для разных значений реактивной нагрузки  $Z_H^p$  определяется кривая перестройки РС магнетрона.

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАГНЕТРОНА

Наличие сгруппированного электронного облака (конвекционного тока) в пространстве взаимодействия магнетрона изменяет его эквивалентную схему, представленную на рис. 2, б. Связано это с дополнительным появлением в эквивалентной схеме  $\gamma = N/2$  генераторов тока, которые представляют собой источники энергии для возбуждения связанных колебательных контуров и поддержания в них электромагнитных колебаний. Полная эквивалентная схема магнетрона с двумя выводами энергии с учетом наличия электронного потока показана на рис. 3.

Для определения тока, наведенного в РС магнетрона, рассмотрим и проанализируем со-

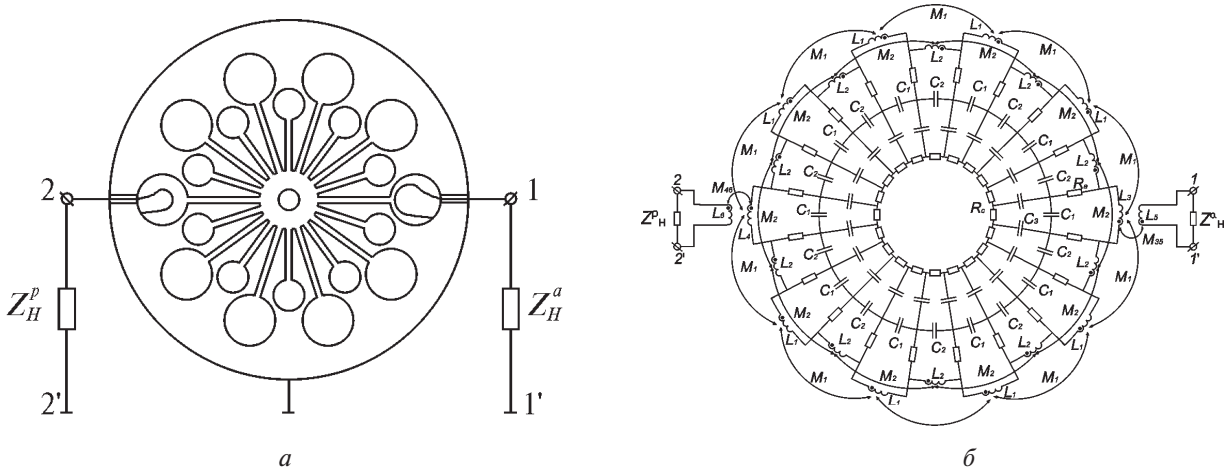


Рис. 2. Схематическое изображение разнорезонаторного анодного блока магнетрона типа «шель-отверстие» (а) и эквивалентная схема «холодной» РС магнетрона, где  $L_1$  и  $L_2$  – индуктивности больших и малых резонаторов;  $L_3$  и  $L_4$  – индуктивности резонаторов с активным и реактивным выводом энергии;  $L_5$  и  $L_6$  – индуктивности активного и реактивного выводов энергии;  $C_1$  и  $C_2$  – емкости больших и малых резонаторов;  $C_3$  – емкость пространства катод-анод;  $R_a$  и  $R_c$  – потери на аноде и катоде;  $M_1$  и  $M_2$  – коэффициенты индуктивной связи больших и малых резонаторов;  $M_{35}$  и  $M_{46}$  – коэффициенты индуктивной связи с активным и реактивным выводами энергии;  $Z_H^a$  и  $Z_H^p$  – комплексные сопротивления активного и реактивного выводов энергии (б)

стояние конвекционного тока в установившемся режиме магнетрона. Как показывают результаты численного моделирования методом крупных частиц [см., напр., 2, 4], в магнетроне на рабочем виде колебания ( $\pi$ -вид) сгруппированный электронный поток представляет собой замкнутую электронную втулку (область  $r_c < r < r_{\text{вТ}}$ , где  $r_{\text{вТ}}$  – радиус электронной втулки) и  $\gamma = N/2$  вращающихся электронных спиц, где  $N$  – количество резонаторов РС. В электронной втулке осуществляется фазовая сортировка электронов, из которых одни (так называемые «благоприятные» электроны) находятся в тормозящих фазах ВЧ поля и поступают в электронные спицы, а другие («неблагоприятные» электроны) находятся в ускоряющих фазах ВЧ поля и возвращаются обратно на катод, вызывая вторичную электронную эмиссию.

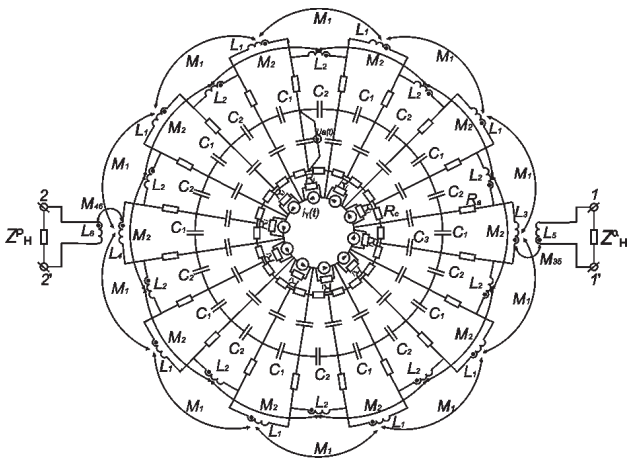


Рис. 3. Эквивалентная схема магнетрона при наличии электронного потока

Сгруппировавшиеся электроны образуют электронные спицы (сгруппированный конвекционный ток), которые вращаются синхронно с ВЧ полем рабочего вида колебания ( $\pi$ -вида) с угловой скоростью  $\Omega_e = \omega/\gamma$  и наводят в резонаторах РС импульсы наведенного тока. Необходимо отметить, что данная последовательность импульсов наведенного тока обладает периодичностью с периодом  $T_e = 2\pi/\Omega_e$  и может быть представлена в виде ряда Фурье

$$i_H(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_k e^{jk\Omega_e t}, \quad (6)$$

где  $I_0$  – постоянная составляющая наведенного тока.

Из бесконечного ряда гармоник наведенного тока в (6) рассмотрим синхронную гармонику, выражение для амплитуды которой может быть записано как

$$I_\gamma = \frac{1}{T_e} \cdot \int_0^{T_e} i_H(t) \cdot e^{-j\gamma\Omega_e t} dt. \quad (7)$$

В случае наличия в пространстве взаимодействия магнетрона электронного потока эквивалентная схема магнетрона имеет более слож-

ный вид и включает в себя источники эдс и тока (рис. 3). В общем виде выражение для источника эдс с учетом нестабильности анодного напряжения можно представить в виде

$$U_a(t) = U_a + \Delta\tilde{U}(t), \quad (8)$$

где  $U_a$  – анодное напряжение;  $\Delta\tilde{U}(t)$  – переменная составляющая анодного напряжения, определяющая его нестабильность.

В качестве источника тока используется двухполюсник с внутренним сопротивлением  $r_i \cdot (r_i \rightarrow \infty)$  и создающий ток

$$I_\gamma = I_{\gamma m} \cdot \cos(\omega t + \psi_\gamma), \quad (9)$$

где  $I_{\gamma m}$  – максимальное значение синхронной гармоники тока;  $\psi_\gamma$  – начальная фаза синхронной гармоники тока.

Расчет эквивалентной цепи «горячего» магнетрона, представленной на рис. 3, проводится методом узловых потенциалов. Определение потенциалов в узлах эквивалентной электрической цепи позволяет рассчитать токи во всех ее звеньях, т.е. для тока, протекающего в цепи нагрузки магнетрона, можно записать

$$I_\gamma = \frac{\Phi_1 - \Phi_{1'}}{Z_H^a}. \quad (10)$$

Мощность, которая выделяется в активной нагрузке магнетрона, определяется как

$$P_{\text{вых}} = \text{Re} \left\{ \frac{I_\gamma^2 \cdot Z_H^a}{2} \right\}. \quad (11)$$

Применение полной эквивалентной схемы «горячего» магнетрона в виде, показанном на рис. 3, позволяет проводить исследования с учетом разброса геометрических размеров пространства взаимодействия и электродинамической системы анодного блока от ячейки к ячейке, т.е. учитывать радиальную и азимутальную неоднородности электродинамической системы и оценить их влияние на выходные параметры.

#### 4. РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТ

На рис. 4 показаны теоретические (кривые 1, 2 и 3) экспериментальная (кривая 4) зависимости перестройки частоты «холодной» РС для разных значений емкости больших резонаторов  $C_1$ . При этом значение емкости  $C_1$  выбиралось на основе расчета, проведенного по методике работы [5] (кривая 1). Как видно из представленных результатов, увеличение емкости  $C_1$  «холодной» РС, соответственно в 1,1 (кривая 2) и 1,15 раз (кривая 3) вызывает сдвиг кривой перестройки в сторону увеличения частоты и рост диапазона ее перестройки. Теоретически рассчитанный диапазон перестройки частоты «холодной» РС магнетрона составляет (380 – 830) МГц для разных значений емкости больших резонаторов  $C_1$ .

Наличие электронного облака в пространстве взаимодействия магнетрона (например, в областях между катодом и анодом, а также между



ламельями РС) изменяет ход кривых перестройки частоты. Связано это с изменением межэлектродных емкостей  $C_1$  и  $C_3$ , выражения для которых можно представить в виде

$$C_1^e = \frac{\varepsilon_e^{l-l} \cdot S_r}{4\pi d_r}, \quad (12)$$

$$C_3^e = \frac{\varepsilon_e^{a-c} \cdot S_{a-c}}{4\pi d_{a-c}}, \quad (13)$$

где  $\varepsilon_e^{l-l}$  – среднее значение диэлектрической проницаемости пространства между ламелями при наличии электронного облака ( $\varepsilon_e^{l-l} < 1$ );  $d_r = \frac{\pi \cdot r_a}{N}$ ,  $\varepsilon_e^{a-c}$  – среднее значение диэлектрической проницаемости пространства между анодом и катодом при наличии электронного облака ( $\varepsilon_e^{a-c} < 1$ );  $S_r$  и  $S_{a-c}$  – площади щели резонаторов РС и поперечного сечения ламелей;  $d_{a-c} = r_a - r_c$ .

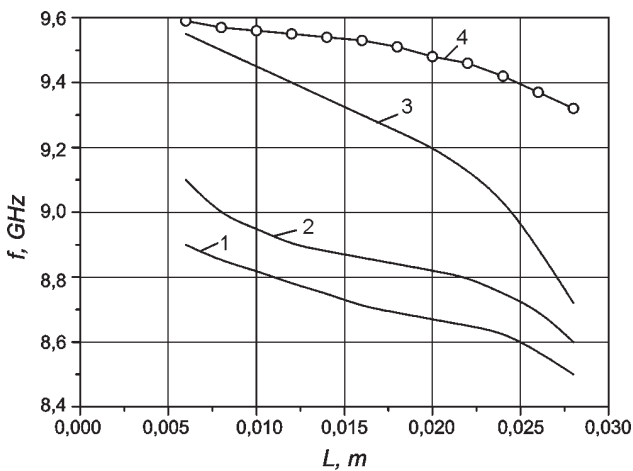
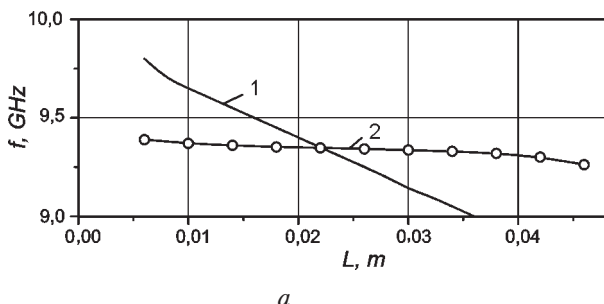


Рис. 4. Кривые перестройки частоты для разных значений емкости больших резонаторов: 1,2 и 3 – теория; 4 – эксперимент

Для определения диэлектрических проницаемостей  $\varepsilon_e^{l-l}$  и  $\varepsilon_e^{a-c}$  воспользуемся уравнением Линдхарда [6]. В первом приближении для вещественной части диэлектрической проницаемости можно записать

$$\varepsilon_e = 1 - \omega_p^2 / \omega^2, \quad (14)$$



где  $\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi e^2}{m} n_e} = 5,65 \cdot 10^{-4} \sqrt{n_e}$  – плазменная частота;  $e$  и  $m$  – заряд и масса электрона,  $n_e$  – концентрация электронов в облаке.

Указанные поправки вычисления межэлектродных емкостей  $C_1$  и  $C_3$  с учетом наличия электронного потока необходимо учитывать при проведении расчетов выходных параметров магнетрона.

На рис. 5 приведены экспериментальные и теоретические зависимости перестройки частоты (а) и относительного уровня выходной мощности магнетрона от значения реактивной нагрузки  $Z_H^p$  (б). Анализ представленных зависимостей указывает на хорошее качественное совпадение теоретических и экспериментальных зависимостей.

Использование импульсного режима работы магнетрона с двумя выводами энергии позволяет реализовать режим перестройки частоты от импульса к импульсу с помощью устройства, более подробно описанного в [7]. В этом случае, как следует из результатов эксперимента [8], возможный диапазон перестройки частоты в магнетроне с двумя выводами превышает 200 МГц.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение метода эквивалентных схем для исследования процессов в магнетроне с двумя выводами энергии позволило провести исследование частотных характеристик магнетрона. Расчетным путем установлено, что изменение реактивной нагрузки во втором (реактивном) выводе магнетрона приводит к изменению частоты генерации. Показано, что максимальный диапазон перестройки частоты магнетрона зависит от величины межэлектродной емкости больших резонаторов разнорезонаторной системы типа «щель – отверстие» и составляет 380 – 830 МГц.

Экспериментально полученный диапазон перестройки частоты в магнетроне 3-см диапазона с двумя выводами составил 250 МГц.

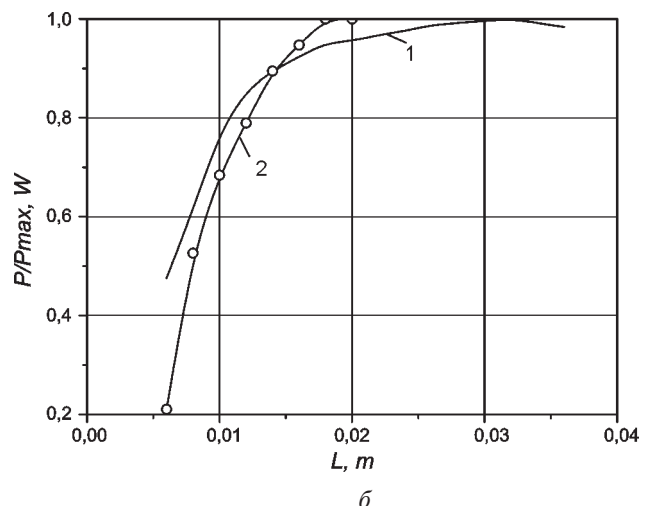


Рис. 5. Теоретические (1) и экспериментальные (2) кривые перестройки частоты (а) и изменения относительных значений уровня выходной мощности магнетрона с двумя выводами (б)

Полученные результаты могут быть полезными и представлять практический интерес для применения в РЭС различного назначения.

**ПРИЛОЖЕНИЕ**

Выражения для комплексных сопротивлений контуров эквивалентной схемы магнетрона:

$$A_{11} = j\omega L_5, \tag{П.1}$$

$$A_{4242} = Z_H^p + j\omega L_6, \tag{П.2}$$

$$A_{21} = A_{12} = j\omega M_{35}, \tag{П.3}$$

$$\begin{aligned} A_{23} = A_{221} = A_{32} = A_{34} = A_{43} = A_{45} = A_{54} = A_{56} = \\ = A_{65} = A_{67} = A_{76} = A_{78} = A_{87} = A_{89} = A_{98} = A_{910} = \\ = A_{109} = A_{1011} = A_{1110} = A_{1112} = A_{1211} = A_{1213} = \\ = A_{1312} = A_{1314} = A_{1413} = A_{1415} = A_{1514} = A_{1516} = \\ = A_{1615} = A_{1617} = A_{1716} = A_{1718} = A_{1817} = A_{1819} = \\ = A_{1918} = A_{1920} = A_{2019} = A_{2021} = A_{2120} = A_{212} = \\ = j\omega M_{12} - R_a \end{aligned} \tag{П.4}$$

$$\begin{aligned} A_{323} = A_{525} = A_{727} = A_{929} = A_{1131} = A_{1333} = A_{1535} = \\ = A_{1737} = A_{1939} = A_{2141} = A_{233} = A_{255} = A_{277} = A_{299} = \\ = A_{3111} = A_{3313} = A_{3515} = A_{3717} = A_{3919} = A_{4121} = 1 / j\omega C_2 \end{aligned} \tag{П.5}$$

$$\begin{aligned} A_{222} = A_{424} = A_{626} = A_{828} = A_{1030} = A_{1232} = A_{1434} = \\ = A_{1636} = A_{1838} = A_{2040} = A_{244} = A_{266} = A_{288} = A_{3010} = \\ = A_{3212} = A_{3414} = A_{3616} = A_{3818} = A_{4020} = 1 / j\omega C_1 \end{aligned} \tag{П.6}$$

$$\begin{aligned} A_{2223} = A_{2241} = A_{2322} = A_{2324} = A_{2423} = A_{2425} = A_{2524} = \\ = A_{2526} = A_{2625} = A_{2726} = A_{2627} = A_{2728} = A_{2827} = \\ = A_{2829} = A_{2928} = A_{2930} = A_{3029} = A_{3031} = A_{3130} = \\ = A_{3132} = A_{3231} = A_{3233} = A_{3332} = A_{3334} = A_{3433} = \\ = A_{3435} = A_{3534} = A_{3536} = A_{3635} = A_{3637} = A_{3736} = \\ = A_{3738} = A_{3837} = A_{3839} = A_{3938} = A_{3940} = A_{4039} = \\ = A_{4041} = A_{4140} = A_{4122} = 1 / j\omega C_3 \end{aligned} \tag{П.7}$$

$$A_{13} = A_{121} = j\omega(M_{35} \cdot M_{12}), \tag{П.8}$$

$$A_{14} = A_{120} = j\omega(M_{35} \cdot M_1), \tag{П.9}$$

$$Z_H^p = jZ_c \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\lambda_B}\right), \tag{П.10}$$

$$\begin{aligned} A_{35} = A_{321} = A_{57} = A_{53} = A_{79} = A_{75} = A_{911} = A_{97} = \\ = A_{1113} = A_{119} = A_{1315} = A_{1311} = A_{1517} = A_{1513} = A_{1719} = \\ = A_{1715} = A_{1921} = A_{1917} = A_{213} = A_{2119} = j\omega M_2 \end{aligned} \tag{П.11}$$

$$\begin{aligned} A_{220} = A_{24} = A_{46} = A_{42} = A_{68} = A_{64} = A_{810} = A_{86} = \\ = A_{1012} = A_{108} = A_{1214} = A_{1210} = A_{1416} = A_{1412} = \\ = A_{1618} = A_{1614} = A_{1820} = A_{1816} = A_{202} = A_{2018} = j\omega M_1 \end{aligned} \tag{П.12}$$

$$\begin{aligned} A_{33} = A_{55} = A_{77} = A_{99} = A_{1111} = A_{1313} = A_{1515} = \\ = A_{1717} = A_{1919} = A_{2121} = 2 \cdot R_a + (1 / j\omega C_2) + j\omega L_2 \end{aligned} \tag{П.13}$$

$$\begin{aligned} A_{1212} = A_{22} = A_{44} = A_{66} = A_{88} = A_{1010} = A_{1414} = \\ = A_{1616} = A_{1818} = A_{2020} = 2 \cdot R_a + (1 / j\omega C_1) + j\omega L_1 \end{aligned} \tag{П.14}$$

$$\begin{aligned} A_{2222} = A_{2424} = A_{2626} = A_{2828} = A_{3030} = A_{3232} = \\ = A_{3434} = A_{3636} = A_{3838} = A_{4040} = \\ = R_c + (1 / j\omega C_1) + (1 / j\omega C_3) \end{aligned} \tag{П.15}$$

$$\begin{aligned} A_{2323} = A_{2525} = A_{2727} = A_{2929} = A_{3131} = A_{3333} = \\ = A_{3535} = A_{3737} = A_{3939} = A_{4141} = \\ = R_c + (1 / j\omega C_2) + (1 / j\omega C_3). \end{aligned} \tag{П.16}$$

**Литература**

- [1] *Поттер Д.* Вычислительные методы в физике. – М.: «Мир», 1974. – 345 с.
- [2] *Чурюмов Г.И., Басрави К.М., Сивоконь К.В.* Многопериодная математическая модель магнетрона. Радиоэлектроника и информатика, № 2 (33), 2006. – С. 15 – 27.
- [3] *Шлифер Э.Д.* Расчет многорезонаторных магнетронов (2-е издание). – М.: МЭИ, 1966. – 141 с.
- [4] *Churyumov G.I., Gritsunov A.V., Ekezy A.I.* Computer Simulation of Noise Generation in Magnetron. Applied Radio Electronics. – 2013, # 1, v. 12. – P. 58 – 63.
- [5] *Сазонов Д.Е.* Основы расчета и конструирования магнетронов. – М.: Сов. радио, 1974. – 327 с.
- [6] Пат. 98574 Украина, МПК Н 01 J 25/00. Магнетронный генератор с перестройкой частоты от импульса к импульсу. Авторы: Чурюмов Г. И., Экезлы А. И., Сивоконь К.В. – Опубл. 25.05.12, Бюл. № 10.
- [7] *Маделунг О.* Теория твердого тела. – М.: Наука, 1980. – 414 с.
- [8] *Чурюмов Г.И., Экезлы А.И.* Исследование режима перестройки частоты в импульсном магнетроне с двумя выводами энергии. Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ, вып. 2, 2014 (в печати).

Поступила в редколлегию 18.02.2014



**Чурюмов Геннадий Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор. Научные интересы: математическое моделирование вакуумных приборов СВЧ; теория и техника СВЧ, применение СВЧ технологий.



**Экезлы Андрей Игоревич**, аспирант кафедры ФЭТ ХНУРЭ. Научные интересы: микроволновые приборы и техника.



**Камал Басрави Махмуд**, Dr. Physics and Mathematics Sciences, Omar Al-Mukhtar National University, Libya



**Исаева Елена Борисовна**, младший научный сотрудник кафедры ФОЭТ ХНУРЭ. Научные интересы: математическое моделирование вакуумных приборов СВЧ.

УДК 621.385.6

**Математичне моделювання перебудови частоти в магнетроні з двома выводами енергії (метод еквівалентних схем) / Г. І. Чурюмов, А. І. Екезлі, К. М. Басраві, О. Б. Ісаєва // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2014. — Том 13. — № 1. — С. 51-57.**

У цій статті набув подальшого розвитку метод еквівалентних схем стосовно дослідження магнетронного генератора 3-сантиметрового діапазону з двома выводами енергії. Наведено теоретичні та експериментальні результати перебудови частоти в магнетроні залежно від зміни реактивної складової навантаження в другому виведенні енергії. Показано експериментально, що діапазон перебудови частоти склав 250 МГц у лінійній частині частотної характеристики. Теоретично розрахована характеристика перебудови частоти магнетрона добре узгоджується з результатами експериментів. Показана можливість розширення діапазону перебудови частоти до 800 МГц.

*Ключові слова:* магнетрон, електродинамічна система, метод еквівалентних схем, математична модель, вивід енергії.

Л.: 05. Бібліогр.: 8 найм.

UDC 621.385.6

**Mathematical modelling of frequency tuning in a magnetron with two power outputs (equivalent circuit method) / G. I. Churyumov, A. I. Ekezi, K. Basravi, O. B. Isaeva / Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2014. — Vol. 13. — № 1. — P. 51-57.**

This paper further develops the method of equivalent circuits as applied to the study of a 3centimeter range magnetron oscillator with twopower outputs. Theoretical and experimental results of frequency tuning in the magnetron depending on changes in the reactive component of the load in the second power output derivation. It is shown experimentally that the adjustment range of the frequency in the linear frequency response has constituted 250 MHz. The theoretically calculated characteristic of the magnetron frequency tuning is in good agreement with experimental results. A possibility of expanding the frequency tuning range of up to 800 MHz is shown.

*Keywords:* magnetron, electrodynamic system, equivalent circuits method, mathematical model, the output energy.

Fig.: 05. Ref.: 8 items.