

АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХКАСКАДНОГО МАГНЕТРОННОГО АВТОГЕНЕРАТОРА

Г.И. Чурюмов, д-р физ.-мат.наук, Т.И. Фролова, А.В. Грицунов, канд.техн.наук, Е.Б. Исаева
Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Изучение частотных свойств магнетронных автогенераторов имеет огромную практическую значимость [1]. Особый интерес вызывает изучение явления изменения частоты магнетрона при изменении анодного тока, которое получило название электронного смещения частоты (ЭСЧ). В зависимости от режима работы магнетрона явление ЭСЧ приводит к появлению амплитудной (для непрерывных магнетронов) или частотной (для импульсных магнетронов) модуляциям и отрицательно сказывается на работе радиоэлектронных систем. Качественное рассмотрение и понимание физики процессов, сопровождающих явление ЭСЧ в магнетронах классической конструкции (обычной и обращенной) проводилось в работах [2-5]. Строгое рассмотрение нелинейного процесса, сопровождающего ЭСЧ в магнетронах, стало возможным только с появлением самосогласованных математических моделей магнетронов [6]. Это позволило количественно объяснить зависимость частотных характеристик от параметров и режима работы прибора, и, в частности, оценить влияние конструктивных параметров и электрического режима работы.

В данной статье рассмотрены характеристики ЭСЧ для классических магнетронов (обычной и обращенной конструкций) при различных режимах работы (непрерывном и импульсном), а также приводятся результаты моделирования особенностей ЭСЧ применительно к двухкаскадному магнетронному автогенератору. Для исследования применяется метод крупных частиц и трехмерная математическая модель двухкаскадного магнетрона, описанная в работе [7].

Как известно [см., напр., 2-4], отклонение частоты генерируемых колебаний от резонансной частоты «холодной» колебательной системы связано с влиянием поля пространственного заряда и появлением реактивной составляющей наведенного тока рабочего вида колебаний. Учет влияния электронного потока на характер распределения ВЧ поля рабочего вида колебаний позволяет ввести так называемое «горячее» распределение ВЧ поля, которое устанавливается в пространстве взаимодействия при наличии электронного потока. В этом случае ЭСЧ можно рассматривать как фазовое смещение спицы пространственного заряда относительно максимума тормозящей фазы «горячего» ВЧ поля. Динамика режима работы (например, изменение анодного напряжения) приводит к нарушению условия синхронизма, что проявляется в появлении реактивной составляющей мощности и смещении спиц пространственного заряда относительно максимума тормозящей фазы ВЧ поля на угол $\vartheta = \Delta\omega t$, где $\Delta\omega = \omega_2 - \omega$ – сдвиг частоты генерации относительно «холодной» (собственной) частоты колебательной системы, ω – «холодная» частота колебательной системы. Для классических магнетронных генераторов при заданных электрических и геометрических параметрах колебательной системы, анализ ЭСЧ сводится к определению угла рассогласования ϑ из решения системы уравнений возбуждения [7]. Данное значение подставляется в выражения для радиальной и азимутальной составляющих собственного поля колебательной системы магнетрона, определяя таким образом распределение «горячего» ВЧ поля в виде

$$\begin{aligned}\varepsilon_r &= -A_m F_r(\gamma, r) \sin(\Phi + \vartheta); \\ \varepsilon_\varphi &= A_m F_\varphi(\gamma, r) \cos(\Phi + \vartheta),\end{aligned}\tag{1}$$

где $A_m = \frac{\tilde{U}_m}{U_a} \frac{\ln(r_a/r_c)}{\pi} N \frac{\sin(\gamma\beta)}{\gamma\beta}$ – нормированная амплитуда ВЧ поля; $F_r(\gamma, r)$ и $F_\varphi(\gamma, r)$ – структурные функции составляющих ВЧ поля [3]; $\Phi = \gamma\varphi - \omega t$ – фаза электрона в подвижной системе координат; $\gamma = \frac{N}{2}$ – постоянная распространения рабочего вида колебания (π -вида); N – количество резонаторов. Остальные обозначения соответствуют обозначениям, приведенным в работе [7]. Как видно из (1), учет изменения угла фазового рассогласования ϑ «горячей» ВЧ волны изменяет общее распределение ВЧ поля относительно спиц пространственного заряда.

Для анализа был отобран ряд магнетронов классической конструкции: М156 – непрерывный маломощный магнетрон обычной конструкции, одноконтурный обращенный маломощный магнетрон [5], МИ29 – импульсный мощный магнетрон обычной конструкции. Конструктивные и геометрические параметры этих магнетронов приведены в работе [7].

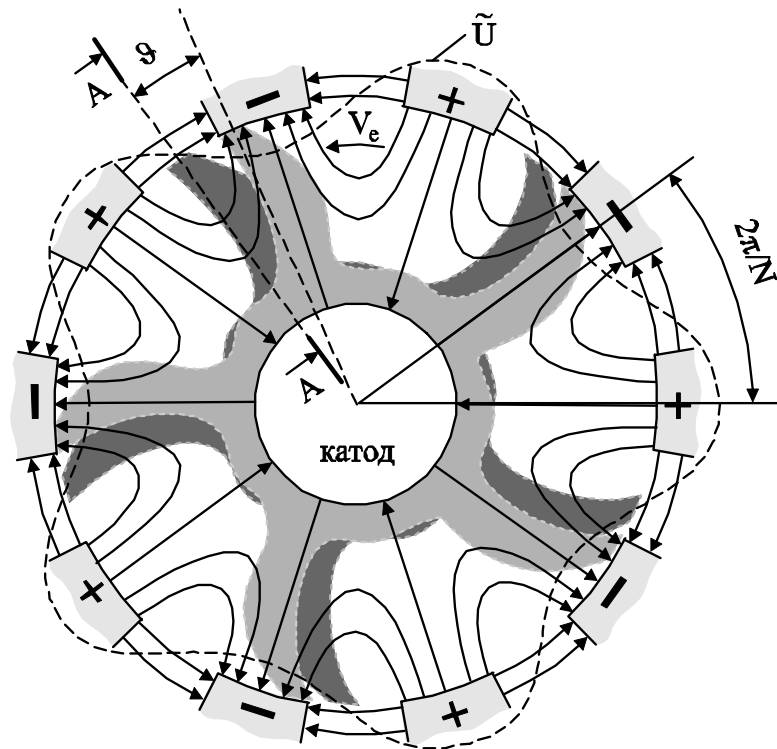


Рисунок 1 - Фазовое положение спиц пространственного заряда для разных значений анодного напряжения

Фазовое положение спиц пространственного заряда относительно тормозящей фазы ВЧ поля для разных значений анодного напряжения U_a схематично представлено на рис. 1.

На рис. 2 представлены кривые ЭСЧ для непрерывных магнетронов: М 156 и одноконтурного обращенного магнетрона, а также мощного импульсного магнетрона МИ 29. Анализ электронно-волнового взаимодействия показывает, что изменение анодного напряжения вызывает изменение скорости вращения электронных спиц пространственного заряда, делая ее отличной от скорости вращения электромагнитной волны рабочего вида колебаний и равной $\Omega = \omega/\gamma$. Как результат спица пространственного заряда смещается относительно максимума тормозящей фазы и величина этого смещения равна ϑ . Необходимо отметить, что качественно поведение кривых ЭСЧ повторяет аналогичные зависимости, известные из работ [1,3,4].

Изменение частоты магнетрона связано с изменением анодного тока при повышении анодного напряжения. При постоянной магнитной индукции в области малых анодных токов наблюдается резкое изменение частоты магнетрона, а с дальнейшим ростом анодного тока изменение частоты уменьшается и происходит ее стабилизация в высоковольтной части ВАХ. Поэтому для получения минимального сдвига частоты при изменении анодного тока следует выбирать рабочий режим по анодному току в высоковольтной области ВАХ. Полученные результаты моделирования ЭСЧ позволяют установить влияние на частотные характеристики магнетрона не только режима работы, например, при импульсном режиме работы перепад частот составил порядка 30-40 МГц, а при непрерывном – не превышал 9-12 МГц, но и параметров его колебательной системы, например, добротности и т.п. Особо следует отметить поведение зависимости ЭСЧ одноконтурного обращенного магнетрона, что выражается в более высокой частотной стабильности такой конструкции, которая реализуется в более широком диапазоне рабочих анодных токов с перепадом частот не более 5 МГц.



Рисунок 2 - Кривые ЭСЧ для разных типов классических магнетронов

Для рассмотрения ЭСЧ двухкаскадного магнетрона, физические принципы работы которого описаны в [7], необходимо проанализировать выражения, описывающие суммарное ВЧ поле во внутреннем и внешнем каскадах. Необходимо отметить, что в такой комбинированной системе предполагается возможным наличие двух волн, соответственно, для внутреннего и внешнего каскадов, в которых электронные потоки вращаются противоположно друг другу, и каждый в свою очередь взаимодействует с синхронной ВЧ волной. Поэтому в общей колебательной системе одновременно существует две волны, характеризующиеся различными амплитудами \tilde{U}_m^I и \tilde{U}_m^{II} , и, соответственно, углами сдвига фаз ϑ^I и ϑ^{II} “горячих” ВЧ волн, распространяющихся во внутреннем и внешнем каскадах двухкаскадного магнетронного автогенератора. Суммарное ВЧ поле, возбуждаемое в колебательной системе, может быть представлено в виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= -(A_m^I F^I(\gamma, r) \cos(\Phi^I + \vartheta^I) + A_m^{II} F^{II}(\gamma, r) \cos(\Phi^{II} + \vartheta^{II})); \\ \varepsilon_\varphi &= A_m^I F^I(\gamma, r) \sin(\Phi^I + \vartheta^I) + A_m^{II} F^{II}(\gamma, r) \sin(\Phi^{II} + \vartheta^{II}). \end{aligned} \quad (2)$$

В выражениях (2) индексы I и II , соответственно, относятся к внутреннему и внешнему каскадам двухкаскадного магнетрона. Полагая, что на уровне анода структурные функции близки по значению, т.е. $F^I(\gamma, r_a) \approx F^{II}(\gamma, r_a) \approx 1$, компоненты суммарного ВЧ поля можно представить в виде

$$\begin{aligned} \varepsilon_r^a &= -(A_m^I \sin \bar{\Phi}^I + A_m^{II} \sin \bar{\Phi}^{II}); \\ \varepsilon_\varphi^a &= A_m^I \cos \bar{\Phi}^I + A_m^{II} \cos \bar{\Phi}^{II}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\bar{\Phi}^I = \gamma\varphi - (\omega - \Delta\omega^I)t$ и $\bar{\Phi}^{II} = \gamma\varphi - (\omega - \Delta\omega^{II})t$.

В частном случае равенства амплитуд ВЧ волн, распространяющихся во внутреннем и внешнем каскадах, т.е. когда $A_m^I \approx A_m^{II} \approx A_m^{cp}$, получаем для суммарного ВЧ поля следующие выражения для его составляющих

$$\begin{aligned} \varepsilon_r^a &= -2A_m^{cp} \cos\left(\frac{\Delta\omega^I - \Delta\omega^{II}}{2}t\right) \sin\left(\gamma\varphi - \left(\omega - \frac{\Delta\omega^I + \Delta\omega^{II}}{2}\right)t\right); \\ \varepsilon_\varphi^a &= A_m^{cp} \cos\left(\frac{\Delta\omega^I - \Delta\omega^{II}}{2}t\right) \cos\left(\gamma\varphi - \left(\omega - \frac{\Delta\omega^I + \Delta\omega^{II}}{2}\right)t\right). \end{aligned} \quad (4)$$

Как видно, полученные выражения показывают на возможность управления амплитудой и фазой (частотой) суммарного ВЧ поля за счет изменения режимов работы одного из каскадов.

На рис. 4 представлены результаты моделирования ЭСЧ классического импульсного магнетрона МИ 29 и двухкаскадного магнетрона. Видно, в случае двухкаскадного магнетрона имеет место значительное расширение зоны рабочих токов (более, чем в 2,2 раза), а перепад частоты не превышает 10-13 МГц в области рабочих анодных токов по сравнению с 20-25 МГц в магнетроне классической конструкции.

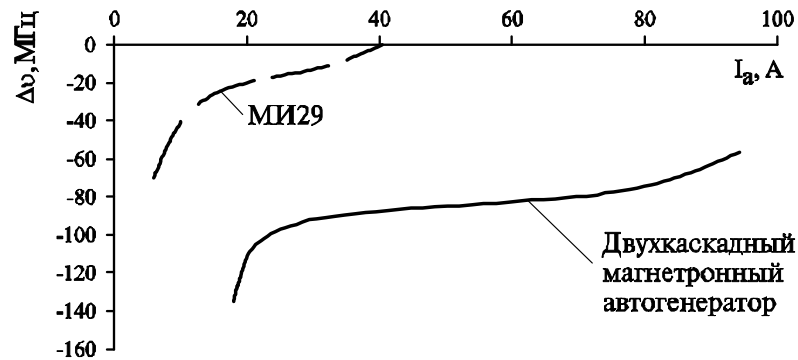


Рисунок 4 - ЭСЧ двухкаскадного магнетронного автогенератора (внутренний каскад с параметрами магнетрона МИ29 + внешний каскад)

На рис. 5 представлены зависимости ЭСЧ двухкаскадного магнетрона для разных магнитных полей. Видно, что в увеличение магнитной индукции при фиксированном значении анодного тока I_a приводит к уменьшению ЭСЧ и увеличению энергетических параметров магнетрона (повышается его КПД и выходная мощность).

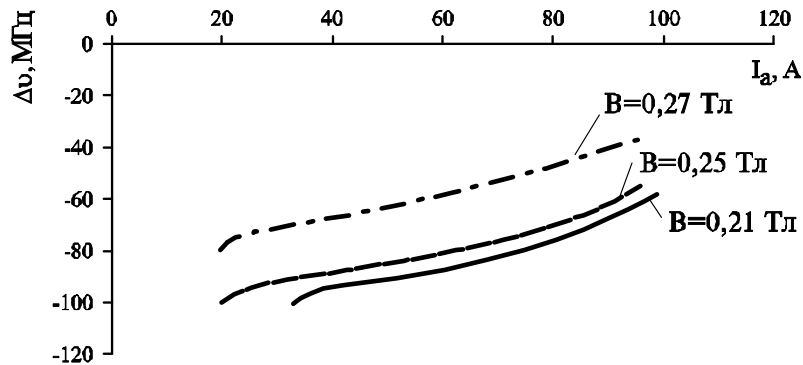


Рисунок 5 - ЭСЧ двухкаскадного магнетрона при разных значений магнитного поля

Таким образом, проведенные исследования показали, что в двухкаскадном магнетроне изменением режима работы внешнего каскада удастся управлять амплитудой и фазой (частотой) сигнала. При этом увеличивается зона рабочий токов (более, чем в 2,2 раза) при более стабильной частоте генерации (перепад частоты изменяется от 25 МГц – для МИ29 до 10-13 МГц – для двухкаскадного магнетрона) в диапазоне рабочих токов.

SUMMARY

In this paper the frequency pushing in classical magnetrons and a two-stage magnetron oscillator by a particle-in-cell (PIC) method is discussed. The physics of the frequency shift vs. an anode voltage is shown as well as quantitative comparison of the frequency pushing in different designs of the magnetrons vs. operating modes (changing anode voltage and value of magnetic field).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы использования магнетронов. Под ред. Ю.Н. Хлопова. Изд-во «Советское радио». – М. -1967.- 333 с.
2. Welch H. PIRE, 1953, v. 41, # 11.
3. Бычков С.И. Вопросы теории и практического применения приборов магнетронного типа. Изд-во «Советское радио». – М. -1967.- 214 с.
4. Иццоки Я.С. Нелинейная радиотехника. Изд-во «Советское радио», Москва. – 1955. – 508 с.
5. Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями /Пер. с англ. под ред. М.К.Федорова. – М.: Изд. Иностран. лит-ры. Т.2, 1961. – с. 472.
6. Yu S.P., Kooyers G.P., Buneman O. Time-depend computer analysis of electron-wave interaction in crossed fields. - J. of Appl. Physics, 1965, vol.36, 8, p.2550-2559.
7. Фролова Т.И., Чурюмов Г.И. Особенности режимов работы двухкаскадного магнетронного автогенератора // Прикладная радиоэлектроника. – 2004. Том 3. – № 1. – С. 57-64.

Поступила в редакцию 15 декабря 2004 г.