

05

Влияние азимутально-неоднородного магнитного поля на шумы в многорезонаторном магнетроне

© В.Б. Байбурин, К.В. Каминский

Саратовский государственный технический университет
E-mail: kaminskykv@gmail.com

Поступило в Редакцию 16 января 2009 г.

Рассмотрена математическая модель многорезонаторного магнетрона с азимутально-неоднородным магнитным полем. Показано, что применение магнитного поля указанного вида приводит к уменьшению времени пребывания заряда в пространстве взаимодействия и к уменьшению уровня шумов в магнетроне.

PACS: 05.45.Pq, 11.40.-q, 41.20.Jb, 84.40.Fe

Известно, что генераторам и усилителям магнетронного типа свойствен более высокий уровень шумов по сравнению с другими типами приборов СВЧ. Ведутся поиски различных способов уменьшения этого „аномального“ шума [1,2]. В работе [3] на основе методов нелинейной динамики предложен способ оценки уровня шума. В работе [2] предложен и реализован экспериментально метод уменьшения шума в выходном сигнале магнетрона с помощью азимутально меняющегося магнитного поля. Представляет интерес рассмотреть электронные траектории при законе азимутального изменения магнитного поля и проанализировать возможные причины и механизмы, приводящие к уменьшению уровня шумов.

Рассмотрим схему цилиндрического магнетрона с азимутально меняющимся магнитным полем и сравним результаты расчетов с магнетроном с постоянным полем.

Согласно [3], уравнения движения зарядов в многорезонаторном магнетроне в двумерном случае в полярной системе координат (r, φ)

можно записать в виде

$$\begin{cases} dr/dt = v_r, \\ d\varphi/dt = v_\varphi, \\ dv_r/dt = rv_\varphi^2 + E_r - \Omega rv_\varphi, \\ dv_\varphi/dt = \frac{1}{r}\Omega v_r + \frac{1}{r^2}E_\varphi - 2\frac{1}{r}v_r v_\varphi, \end{cases} \quad (1)$$

где E_r и E_φ — компоненты электрического поля в радиальном и азимутальном направлении соответственно, Ω — циклотронная частота.

Для определенности рассмотрим восьмirezонаторный магнетрон, работающий в режиме π -вида колебаний. Тогда для компонент поля можно записать следующие уравнения:

$$\begin{cases} E_r = E_d + E_q + E_0 e^r \cos(\beta\varphi) \sin(\omega t), \\ E_\varphi = -E_0 e^r \sin(\beta\varphi) \sin(\omega t), \end{cases} \quad (2)$$

где β — постоянная распространения, ω — частота высокочастотного поля, E_0 — амплитуда высокочастотного поля, E_d — постоянное электрическое поле в магнетроне, E_q — постоянное электрическое поле в магнетроне.

Для E_d можно записать

$$E_d(r) = U_0/r, \quad (3)$$

где $U_0 = U_a / \ln(r_a/r_c)$, U_a — анодное напряжение.

Для поля пространственного заряда можно записать простые аналитические выражения в следующем виде:

$$E_q(r) = \begin{cases} -E_d(r_c) + 2E_d(r_c) \frac{(r - r_c)}{r_0 - r_c}, & \text{при } r_c \leq r < r_0, \\ \frac{U_0}{r - (r_0 - r_c)}, & \text{при } r_0 \leq r \leq r_a, \end{cases} \quad (4)$$

где r_c — радиус катода, r_a — радиус анода, r_0 — радиус верхней границы „втулки“ пространственного заряда [3].

В работе [2] азимутальное изменение магнитного поля реализовано с помощью постоянных магнитов, которые крепятся сбоку на противоположные стороны постоянного магнита. Зададим закон изменения

циклотронной частоты (а следовательно, и индукции магнитного поля) следующим образом:

$$\Omega(\varphi) = \Omega_0 + \Delta \sin(k\varphi), \quad (5)$$

где Ω_0 — некоторая постоянная величина, Δ — величина вариации циклотронной частоты в пространстве, k — число равноудаленных возмущающих магнитов.

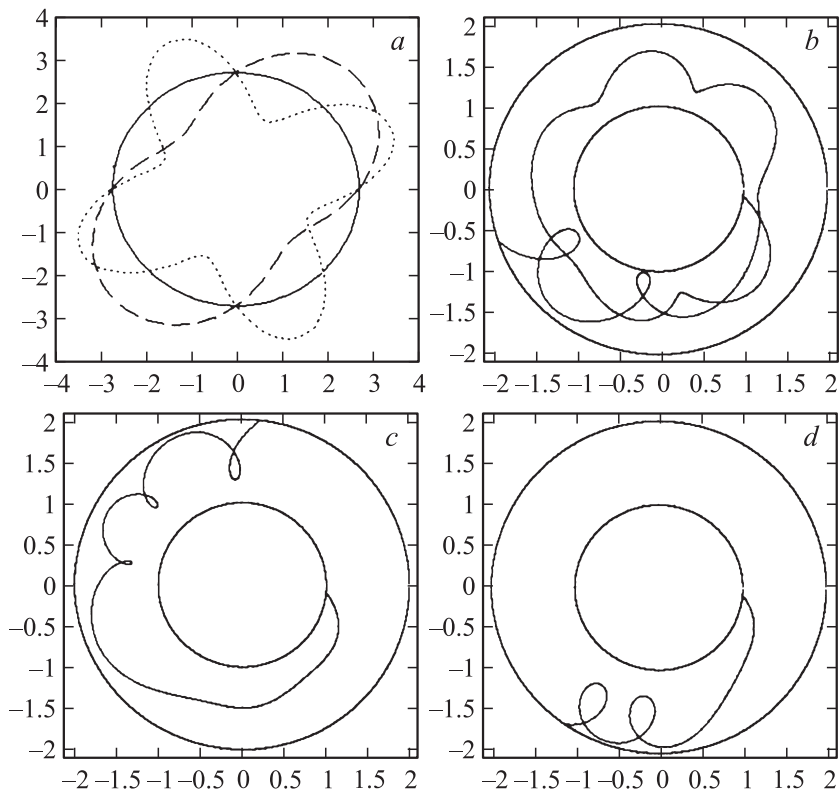
Аналогом условий работы [2] будет случай с $k = 2$, однако представляет интерес рассмотрение увеличения числа возмущающих магнитов, поэтому целесообразно рассмотреть еще и случай с $k = 4$ и сравнить результаты со схемой магнетрона с постоянным магнитным полем.

В расчетах значения безразмерных параметров в уравнениях (1)–(5) были заданы соответствующими стационарным номинальным режимам работы многорезонаторного магнетрона. При имитационном моделировании использовались 1000 крупных частиц. Уравнения движения решались методом Рунге–Кутты 4-го порядка точности с шагом интегрирования по времени 0.005 (это соответствует 1/500–1/1000 циклотронного периода) для каждой крупной частицы.

На рисунке, *a* графически показана зависимость изменения циклотронной частоты (а следовательно, и индукции) магнитного поля от азимутальной координаты. Сплошная линия на рисунке, *a* соответствует постоянному полю, пунктирная линия соответствует (5) при $k = 2$, линия, показанная точками, соответствует (5) при $k = 4$.

В работе рассматривается модель магнетрона, работающего в режиме ограничения эмиссии пространственным зарядом. На рисунке, *b* представлена траектория заряда в номинальном режиме работы магнетрона с постоянным магнитным полем. Видно, что заряд длительное время (6–8 циклотронных периодов) находится в пространстве взаимодействия, причем большую часть этого времени он пребывает в малоскоростной прикатодной области.

На рисунке, *c* и *d* представлены траектории заряда в магнетроне с магнитным полем, циклотронная частота которого меняется по закону (5) при $k = 2$ и $k = 4$ соответственно. Из сравнения с рисунком, *b* видно, что заряд быстро покидает малоскоростную прикатодную область, основной энергообмен происходит вблизи анода, где высокочастотное поле достигает больших значений и скорость заряда имеет значительную величину. Причем для траектории на рисунке, *d* этот эффект выражен более ярко.



Конфигурация магнитного поля, меняющегося по азимуту (*a*). Траектория заряда в магнетроне с постоянным полем (*b*). Траектория заряда при азимутальном изменении магнитного поля ($k = 2$) (*c*); ($k = 4$) (*d*).

В работе [3] предложен метод для оценки уровня шума в магнетроне, учитывающий наведенный ток, создаваемый каждой крупной частицей, и показано, что чем меньше время пролета крупной частицы вдоль траектории от катода к аноду, тем меньше шум.

Проведенные по методике работы [3] расчеты показали, что в сравнении с режимом с постоянным магнитным полем режим с полем, циклотронная частота которого меняется по закону (5), обладает более

низким уровнем шума: если в (5) $k = 2$, то уровень шумов уменьшается на 25–28 dB, а если $k = 4$, то уровень шумов снижается до 27–30 dB.

Азимутально-неоднородное магнитное поле способствует быстрому покиданию зарядом прикатодной области, уменьшению времени пролета катод–анод и, следовательно, уменьшению уровня шумов.

Таким образом, проведенный численный анализ объясняет, как представляется, экспериментальные данные, полученные в [2], и показывает, что азимутально меняющееся магнитное поле оказывает существенное влияние на изменение уровня шумов в магнетроне и приводит к их уменьшению. Из проведенных расчетов также следует возможность некоторого уменьшения шумов при большем, чем в работе [2] числе равноотстоящих магнитов. В частности, целесообразна экспериментальная проверка случая использования азимутально-неоднородного поля с $k = 4$ в соотношении (5), т.е. с меньшим периодом изменения магнитного поля по азимуту.

Список литературы

- [1] Каржавин И.А., Гундобин Г.С., Вислов В.И. // Актуальные проблемы электронного приборостроения: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. Саратов: СГТУ, 2002. С. 149–152.
- [2] Neculaes V.B., Gilgenbach R.M., Lau Y.Y. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. N 10.
- [3] Байбурин В.Б., Каминский К.В. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2007. Т. 15. № 6.