

А.А.Шматько*, Е.Н.Одаренко*

АННОТАЦИЯ

Исследуется влияние пространственного распределения силовых линий фокусирующего поля на эффективность взаимодействия в резонансном генераторе О-типа с длительным взаимодействием (генератор дифракционного излучения (ГДИ), оротрон, ладертрон, резонансная ЛОВ и др.). Анализ проводится в рамках двумерной модели пространства взаимодействия с учетом оседаний электронов на замедляющую систему (ЗС). Рассматриваются две конфигурации магнитного поля: наклонное к плоскости ЗС и локально-неоднородное. Определены области значений параметров фокусирующего поля, где возможно увеличение эффективности взаимодействия. Наибольший электронный КПД реализуется при частичном или полном оседании электронного потока на ЗС. Найдены условия, при которых эффективность энергообмена исследуемой системы может быть увеличена по сравнению со случаем обычной фокусировки и расположения электронного потока вплотную к ЗС.

ВВЕДЕНИЕ

Профилирование магнитостатического поля (МП) является одним из способов улучшения эксплуатационных характеристик приборов СВЧ [1, 2]. Повышение эффективности энергообмена обусловлено факторами, непосредственно определяемыми типом прибора. В генераторах и усилителях М-типа изменение пространственного распределения МП позволяет управлять условиями формирования электронных уплотнений и их положением в поле волны электродинамической системы. Подобно этому в приборах на циклотронном резонансе неоднородное магнитное поле может обеспечивать улучшение фазировки электронов пучка. В приборах О-типа изменение индукции МП вдоль пространства взаимодействия обычно используется для уменьшения токооседания на ЗС. Однако, в [3] приведены экспериментальные данные для прибора типа оротрон-ГДИ, где повышение эффективности электронно-волнового взаимодействия наблюдается в случае оседания всего электронного потока на ЗС в области неоднородного фокусирующего МП. Поскольку фокусирующее поле не оказывает прямого воздействия на фазовые соотношения между электронами и медленной волной ЗС, то представляет интерес выяснение физических причин, приводящих к изменению характеристик таких приборов в зависимости от конфигурации силовых линий МП.

В данной работе теоретически исследуется режим установившихся колебаний генератора для двух вариантов пространственного распределения фокусирующего МП: наклонного к

*Харьковский государственный университет, 310077, Харьков, пл. Свободы, 4

плоскости ЗС и МП с локальной магнитной неоднородностью (ЛМН). Анализ проводится на основе решения самосогласованной системы уравнений генератора при условии движения электронов в двухкомпонентном двумерном высокочастотном (ВЧ) электрическом и статическом магнитном полях.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Схема резонансного генератора 0-типа с выбранной системой координат представлена на рис. 1. Вектор индукции в общем случае неоднородного фокусирующего МП \vec{B} имеет две компоненты: $B_y(y, z)$ и $B_z(y, z)$.

Исходную самосогласованную систему уравнений резонансного генератора в стационарном режиме с учетом трехмерного движения электронов в заданном ВЧ поле представим в обобщенном виде:

$$m\ddot{r} = -e \operatorname{Re}(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B});$$

$$GS_1(F) = I; \quad \delta\omega = -GS_2(F); \quad \eta = S_1(F)F^2; \quad (1)$$

$$S(F) = \frac{I}{2\pi a F} \int_0^L f(y) \int_{z_1}^{z_2} \Psi(z) \int_0^{2\pi} (I - i \frac{dz}{dy}) \exp[i(\omega t - \beta y + \gamma)] d(\omega t) dz dy$$

где \vec{r} и \vec{v} — радиус-вектор и вектор скорости электрона; \vec{E} — двухкомпонентное ВЧ поле замедленной волны: $E_y = c f(y) \Psi(z) \exp[i(\beta y - \omega t)]$ и $E_z = i E_y$; e и m — заряд и масса электрона; $f(y)$ и $\Psi(z)$ — продольное и поперечное амплитудные распределения поля волны ЗС; $\beta = \omega/v_\varphi$; ω — частота автоколебаний; v_φ — фазовая скорость волны ЗС; $c = E_0 F \exp(-i\gamma)$ — медленно изменяющаяся во времени комплексная амплитуда колебаний (F — модуль, γ — фаза); E_0 — ускоряющее электроны поле; G — параметр эффективности взаимодействия [4]; $\delta\omega$ — электронное смещение частоты; η — электронный КПД; $S(F) = S_1(F) + i S_2(F)$ — комплексная крутизна колебательной характеристики; a — толщина пучка. Начальные условия для системы (1) можно записать в виде:

$$t = t_0; \quad y = 0; \quad z = z_0; \quad v_y = v_0; \quad v_z = 0 \quad (2)$$

Система уравнений (1) решалась численно для двух законов пространственного распределения силовых линий фокусирующего МП: наклонного и ЛМН. Условия самовозбуждения колебаний ($F \rightarrow 0$) в генераторах с различной структурой ВЧ поля в резонаторе при наличии двухкомпонентного МП проанализированы в [5, 6].

1. Наклонное к плоскости ЗС фокусирующее поле. В этом случае нормированные на значение индукции фокусирующего поля координатные компоненты вектора \vec{B} выражаются через угол наклона χ :

$$B_y = \cos \chi; \quad B_z = \sin \chi \quad (3)$$

2. ЛМН. Координатная зависимость продольной компоненты вектора \vec{B} считается гауссовской. Поперечная компонента

находится из условия соленоидальности $\text{MI} \quad (\text{div } \vec{B} = 0)$:

$$B_y = I + A_n \mathcal{U}_n(\sqrt{2} (y - y_n) / w_n) ;$$

$$B_z = A_n (z - z_n) \mathcal{U}_1(\sqrt{2} (y - y_n) / w_n) / (w_n \sqrt{2}) ; \quad (4)$$

где $\mathcal{U}_n(x) = H_n(x) \exp(-x^2/2)$ - функция Гаусса-Эрмита n -го порядка; $H_n(x)$ - полиномы Эрмита n -го порядка; z_n - константа, характеризующая поперечную координатную зависимость B_z .

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Численные расчеты проводились для гауссовского, косинусоидального и однородного продольных амплитудных распределений поля ЗС. Поскольку основные закономерности процессов в генераторе качественно совпадают для перечисленных распределений, то в дальнейшем ограничимся рассмотрением структуры поля с гауссовской огибающей, характерной для приборов типа оротрон-ГДИ. Постоянное фокусирующее поле выбиралось достаточно сильным, чтобы можно было не учитывать пульсации границ электронного потока.

На рис. 1 представлены угловые зависимости максимального по зоне генерации электронного КЦД $\hat{\eta}$ и оптимального по КЦД значения параметра рассинхронизма начальной скорости электронов и фазовой скорости волны ЗС $\Phi_0 = \omega L(v_e - V_0) / (v_e V_0)$ (штриховые кривые). Графики построены при фиксированном отношении рабочего тока к пусковому для трех значений высоты встраля пучка в пространство взаимодействия (между пучком и ЗС имеется зазор). Для каждого значения высоты встраля диапазон изменения χ выбирался из условия, чтобы пусковой ток был меньше, чем при $\chi = 0$. При увеличении наклона электронного потока относительно плоскости ЗС эффективность энергообмена растет. Важно отметить, что при этом рабочий ток меньше, чем в случае $\chi = 0$. Очевидно, что увеличение КЦД связано со смещением оптимального значения Φ_0 в сторону больших значений, поскольку в этом случае увеличивается кинетическая энергия электронов в системе отсчета волны ЗС. Расчеты показывают, что отмеченное увеличение происходит при токооседании на ЗС. Действительно, при наклонном движении пучка наибольшее количество электронов оседает в конце пространства взаимодействия, где в режиме максимального КЦД электроны отбирают энергию волны. Это иллюстрируется на рис. 2, где показаны зависимости модуля и фазы комплексной амплитуды первой гармоники конвекционного тока пучка от продольной координаты. Штриховыми линиями обозначены границы тормозящей фазы ВЧ поля. Все кривые построены для максимального по зоне генерации КЦД (кривые 1 - $\chi = 0, A_n = 0$; 2 - $A_n = -0,25, w_n/L = 0,4, y_n/L = 0,9$; 3 - $\chi = -42^\circ$). Из графиков следует, что при наличии токооседания происходит селекция электронов, т.е. преимущественное удаление из пространства взаимодействия ускоряемых полей частиц. Плотность электронов в густке, находящейся в тормозящей фазе, уменьшается незначительно. Легко понять, что при существенном уменьшении количества ускоряемых полей электронов реализуется возможность генера-

ции при больших значениях V_0 , т.е. больших по модулю Φ_0 . Отмеченные особенности микропроцессов в генераторе характерны как для наклонного фокусирующего поля, так и для случая ЛМН (кривые 2 и 3).

Следует отметить, что обусловленное токооседанием уменьшение доли ускоренных электронов в пространстве взаимодействия может приводить к более слабой, чем при обычной фокусировке ($\chi = 0$, $A_n = 0$) зависимости КПД в области своего максимума от Φ_0 . В этом случае изменение V_0 в некотором диапазоне значений не нарушает существенно количественного соотношения между тормозящимися и ускоряющимися электронами из-за оседания последних. Пример проявления данного эффекта при наклонном МП представлен на рис. 3а (кривая 1 - $\chi = 0$; 2 - (-34°) ; 3 - (-42°)). При $\chi = -42^\circ$ существует область значений Φ_0 , в пределах которой можно осуществлять электронную перестройку частоты без изменения уровня выходной мощности.

Одной из характерных особенностей нелинейной стадии развития автоколебаний является гистерезис по ускоряющему напряжению. При использовании наклонного МП и поля с ЛМН наблюдается также гистерезис по углу наклона и по u_n (рис. 3б, в). Графики построены при фиксированном рабочем токе и $\Phi_0 = -(10/3)\pi$ (на рис. 3в $A_n = -0,15$; $w_n/L = 0,2$). Стрелками отмечено направление изменения параметров системы. Заметим, что при данных наборах параметров гистерезис двухсторонний, т.е. состояние системы зависит от предыстории процесса при изменении χ (или u_n) с любого края зоны генерации. В случае ЛМН имеется еще два параметра w_n и A_n , по которым также возможно существование гистерезиса.

Три параметра, характеризующие ЛМН (A_n , w_n , u_n), в той или иной степени влияют на эффективность электронно-волнового взаимодействия. На рис. 4а представлены зависимости η (u_n) для $A_n = -0,25$ и различных значений w_n (кривая 1 - $w_n/L = 0,2$; 2 - 0,4; 3 - 0,6). Графики построены при постоянном рабочем токе, чтобы избежать повышения эффективности энергообмена за счет увеличения мощности пучка. Штрих-пунктирная линия соответствует значению η при $A_n = 0$. При увеличении w_n происходит сглаживание зависимостей, обусловленное изменением траекторий электронов. Общим для всех кривых на рис. 4а является вывод о целесообразности размещения центра ЛМН в конце пространства взаимодействия вблизи коллектора. Причем максимальное значение η реализуется при оседании всех электронов на ЗС. Причины этого явления выяснены при анализе графиков на рис. 2. Наличие максимума у кривых 2 и 3 в начале пространства взаимодействия обусловлено тем, что при данных u_n реализуется минимальный пусковой ток, т.е. увеличение КПД в данном случае связано с изменением отношения рабочего тока к пусковому.

На рис. 4б представлены зависимости η от параметра G (G пропорционален току пучка). Штриховая кривая построена для случая пропуска электронного потока вплотную к ЗС; кривая 1 - $\chi = -34^\circ$, кривая 2 - $A_n = -0,25$; $w_n/L = 0,4$; $u_n/L = 0,9$. Из графиков видно, что для данных параметров фокусирующего поля существуют определенные значения рабочего тока пучка, при превышении которых электронный КПД больше, чем в случае, соответствующем штриховой кривой. Данный эффект также проявляется только при наличии токо-

осаждения, причем при $\chi = 0$ на длине пространства взаимодействия формируется три сгустка электронов. Таким образом, наиболее выгодно оказывается использовать МП с рассмотренными конфигурациями силовых линий при больших рабочих токах, что представляет практический интерес в плане повышения эффективности импульсных приборов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретическое исследование процессов в резонансном генераторе 0-типа показало возможность увеличения эффективности взаимодействия при использовании фокусирующего МП с различными законами пространственного распределения. Повышение электронного КПД обусловлено селекцией ускоренных и замедленных электронов пучка за счет токоосаждения в конце пространства взаимодействия. Обнаружен двухсторонний гистерезис в зонах генерации по углу наклона МП и по координате центра ЛМН. При использовании фокусирующего МП с ЛМН наибольшая эффективность взаимодействия достигается при полном токоосаждении на ЗС. Центр ЛМН при этом следует располагать в конце пространства взаимодействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глуценко В.Н., Кошечая С.В. Повышение КПД гиротрона на основном гирорезонансе путем коррекции распределения магнитостатического поля // Изв. вузов. Радиоэлектроника. - 1970. - Т. 13. - № 1. - С. 12 - 17.
2. Васильев С.В., Васянович А.В. Использование неоднородного статического магнитного поля для улучшения основных характеристик магнетронного генератора // Радиотехника и электроника. - 1988. - Т. 33. - № 11. - С. 2434 - 2437.
3. Балаклицкий И.М., Воробьев Г.С., Цвик А.И., Шестопалов В.П. Увеличение эффективности работы генераторов дифракционного излучения с магнитной фокусировкой // Изв. вузов. Радиоэлектроника. - 1977. - Т. 20. - № 10. - С. 93 - 96.
4. Ваврив Д.М., Третьяков О.А., Шматько А.А. Теория резонансных генераторов с длительным взаимодействием. - Харьков, 1978. - 60 с. (Препринт. ФТИНТ АН УССР).
5. Одаренко Е.Н., Шматько А.А. Самовозбуждение колебаний в резонансных генераторах 0-типа с длительным взаимодействием при наклонном магнитостатическом поле // Радиотехника и электроника. - 1992. - Т. 37. - № 2. - С. 303 - 310.
6. Одаренко Е.Н., Шматько А.А. Влияние магнитостатической локальной неоднородности на пусковые характеристики резонансных генераторов 0-типа // Радиотехника и электроника. - 1992. - Т. 37. - № 5. - С. 901 - 909.

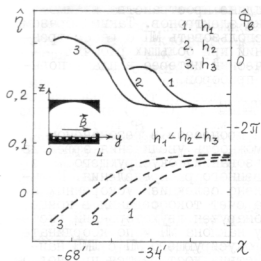


Рис.1. Угловые зависимости электронного КПД и оптимального рассинхронизма Φ_0 .

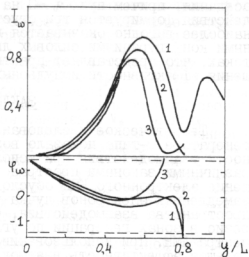


Рис.2. Пространственное распределение модуля и фазы ВЧ тока.

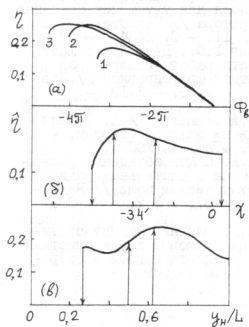


Рис.3. Зоны генерации.

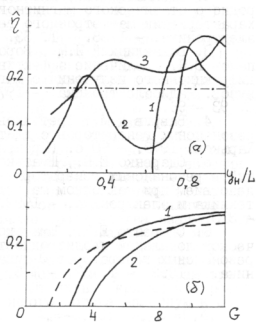


Рис.4. Зависимости КПД от координаты центра ЛМН и параметра эффективности взаимодействия.