

УДК 621.385.6

Ю. С. Кравченко, к. ф.-м. н, доц.;

О. М. Мельничук, студ.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПУЧКОВО-ПЛАЗМОВОГО ВІРКАТОРА

Показано можливість реалізації електровакуумного приладу віркаторного типу, принцип дії якого базується на взаємодії електронного пучка з плазмою. Розроблено математичну модель пучково-плазмового віркатора, на основі якої розраховано основні вихідні характеристики та потужність приладу. Отримано графічні залежності потужності пучково-плазмового віркатора від концентрації частинок плазми та від частоти генерації для різних тисків робочого газу. Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що зі збільшенням тиску робочого газу відбувається збільшення потужності до 90 ГВт та суттєве розширення робочої смуги частот приладу.

Вступ

Сучасна НВЧ електроніка знаходить щораз більше застосування у військовій сфері діяльності і розвивається переважно у двох напрямках. По-перше, це мікроелектроніка, на основі якої будуються всі системи наведення, прицілювання та комутації. Оскільки таким пристроям притаманна мініатюризація, то і їх потужність становить тисячні долі ватт [1]. По-друге, швидко розвивається силова НВЧ електроніка, в якій електромагнітні поля сягають потужності в мільярди ватт. В такій електроніці важливе місце займають генератори пучково-плазмового типу [2]. Основна їх перевага полягає в можливості плавного електронного керування спектром генерації за допомогою зміни концентрації частинок або геометрії плазми, що дозволяє покращити основні параметри та вихідні характеристики таких генераторів [3].

В той же час, оптимізація вихідних параметрів неможлива за відсутності адекватної математичної моделі пучково-плазмового віркатора.

Метою роботи є розробка математичної моделі плазмово-пучкового віркатора та оптимізація на її основі його вихідних параметрів та характеристик.

Розробка математичної моделі та аналіз її адекватності

Пучково-плазмовий віркатор — це НВЧ-генератор з коаксіальною системою «катод-анод-коллектор», в якій поєднано плазмову електродинамічну структуру з надграничним струмом пучка. Це дозволяє забезпечити в даному приладі можливість широкого електронного управління спектром генерації вихідної потужності і одночасно забезпечити максимально можливий ККД [2—4].

В пучково-плазмовому віркаторі модуляція електронного пучка підсилюється за рахунок віртуального катода, який, як правило, знаходиться в відносній рівновазі, здійснюючи лише незначні коливання навколо точки рівноваги. Оптимальним технологічним рішенням є представлення в ролі стінок резонатора — плазмового хвилеводу, в якому проходить поздовжня хвиля [5]. Катод віркатора, як правило, виготовляється з гексабориду лантану. Він емітує трубчастий електронний пучок діаметром до 2 см і товщиною трубки струму до 0,5 см [3]. Типова геометрія такого віркатора наведена на рис. 1.

В цій конструкції анодний електрод — це коаксіальний трубчастий електрод, який складається з двох ділянок: діодної (діаметром до 3 см) і дрейфу (діаметром 14 см). На стику ділянок ано-

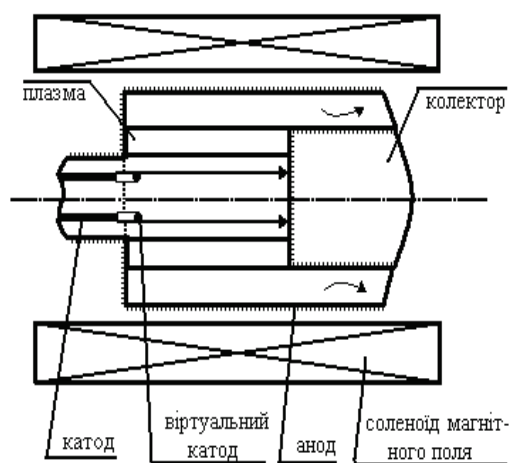


Рис. 1. Геометрія плазмово-пучкового віркатора:
 — напрям руху електронів пучка;
 — виведене випромінювання

дного електроду розташовується прозора для електронів анодна сітка, віддалена від кромки катода на відстань 0,5 см. У вихідній частині генератора розташовується колектор діаметром 10 см, який утворює з анодом вивідний коаксіальний фідер з хвильовим опором 20 Ом. Вважається, що на всю область накладене сильне подовжнє магнітне поле. На ділянці дрейфу електронний пучок охоплюється заздалегідь створеною електрон-іонною плазмою [4]. На катод подається прямокутний імпульс високої напруги амплітудою 1000 кВ і тривалістю 10 нс, а анод і колектор підтримується під нульовим потенціалом. Струм електронного пучка складає при цьому величину порядку 100 кА [2]. Для створення постійного магнітного поля використовуються соленоїди, які містять систему юстирування приладу відносно вісі магнітного поля [6].

Розробка математичної моделі плазмово-пучкового віркатора базується на розв'язанні рівнянь Максвелла-Власова [7]. В загальному вигляді рівняння моделі записуються в такому вигляді з відповідними заданими початковими і граничними умовами [8]:

$$\nabla \times E = -\frac{1}{c} \frac{\partial H}{\partial t}; \quad \nabla \times H = \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} j; \quad (1)$$

$$\nabla \cdot E = 4\pi\rho; \quad \nabla \cdot H = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \frac{\partial f}{\partial r} + q \left(E + \frac{1}{c} [v, H] \right) \frac{\partial f}{\partial p} = 0; \quad (3)$$

$$\rho = q \int f dp; \quad j = q \int v f dp, \quad (4)$$

де ∇ — оператор набла, який в декартовій системі координат має вигляд $\nabla = e_x \frac{\partial}{\partial x} + e_y \frac{\partial}{\partial y} + e_z \frac{\partial}{\partial z}$; e_i — орт вздовж i -ї координатної осі ($i = x, y, z$); E та H — напруженості електричного та магнітного полів; $f = f(r, p, t)$ — функція розподілу електронів; ρ і j — густина заряду та густина струму; v та p — швидкість та імпульс електронів. Для обчислення рівнянь (1)—(4) застосовують метод великих частинок, для кожної з яких обчислюється релятивістське рівняння руху:

$$\frac{dp}{dt} = E + \frac{[p, B]}{\gamma} \frac{dr}{dt}, \quad (5)$$

де $\gamma = \frac{\eta^{(2)}}{\delta}$ — фактор взаємодії частинок в просторі утворення віртуального катода; B — індукція магнітного поля; η — ККД віркатора; δ — настройка частоти.

Вираз для гранично допустимого рівня потужності віркатора можна подати у вигляді

$$P = 2\pi\alpha \frac{S}{\lambda^2} W_a - \gamma, \quad (6)$$

де S — площа перетину плазмового хвилеводу; λ — довжина повздовжньої хвилі, яка проходить через хвилевод; $W_a = Q \sqrt{\frac{N}{\epsilon m}}$ — коефіцієнт, який враховує підсилення пучка за рахунок плазмового хвилеводу; Q — добротність; N — концентрація частинок плазми; m — маса частинок плазми; ϵ — діелектрична проникність плазми; $\alpha = \frac{\int [EH] dS'}{ES}$ — деякий безрозмірний коефіцієнт, що залежить від конструкції віркатора, виду коливань, що збуджуються в ньому, місця розташування та форми отвору для виводу енергії.

Врахувавши напругу, яка подається на катод, $U = \alpha q E$, де E — амплітуда наведеного електричного поля, а q — заряд, визначаємо густина струму $j = \frac{32\pi A^2 L I}{\omega}$, де ω — товщина плазмової трубки; I — струм електронного пучка; A — площа віртуального катода; L — зовнішній діаметр трубчастого плазмового стовпа.

Враховавши вищенаведені вирази в формулі (6) та провівши відповідні перетворення, отримуємо залежність вихідної потужності приладу від концентрації частинок плазми:

$$P = \frac{q^2 Q \omega}{64 \pi A^2 L} U I \sqrt{\frac{N}{\epsilon m}} - \frac{\eta^{(2)}}{\delta}. \quad (7)$$

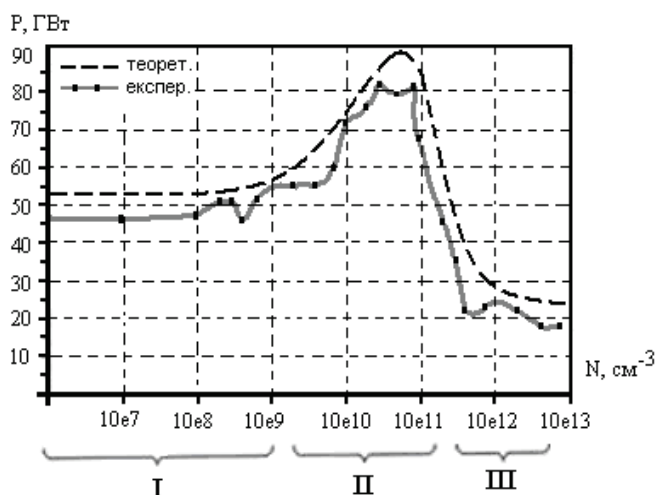


Рис. 2. Залежність середньої вихідної потужності від концентрації частинок плазми:

- I — режим вакуумного віркатора;
- II — режим пучково-плазмового віркатора;
- III — режим відсічення (плазма екранує ВК)

Оскільки вихідні параметри віркатора залежать від частоти генерації, то, враховавши рух частинки в змінних полях в формулі (7), отримуємо залежність потужності віркатора від частоти генерації, яка буде мати вигляд:

$$P = \frac{Q \omega}{64 \pi A^2 L} \frac{U p_{\text{зал}} f}{C(\phi) p} I \sqrt{\frac{N}{\epsilon m}} - \frac{\eta^{(2)}}{\delta}. \quad (8)$$

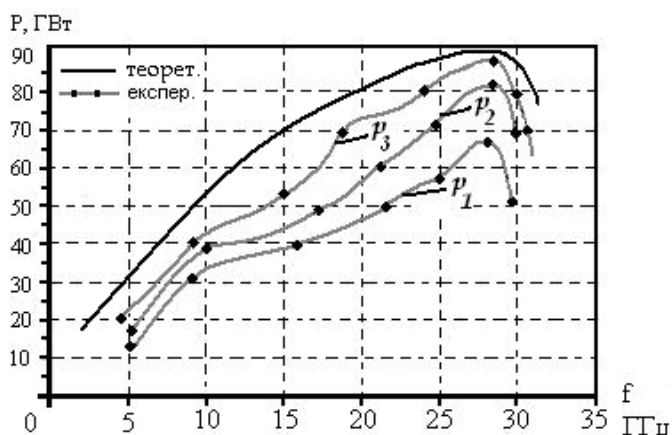


Рис. 3. Залежність вихідної потужності від частоти генерації при певних значеннях тиску робочого газу (водень)

Для порівняння пучково-плазмового віркатора із звичайним вакуумними віркатом були проведені розрахунки залежності середньої величини вихідної потужності від концентрації частинок плазми в діапазоні від 0 до 10^{13} см^{-3} . При розрахунках був використаний спеціалізований програмний пакет для електромагнітного моделювання Microwave Studio 5.0. Результати таких розрахунків наведені на рис. 2.

Рух частинки в змінних полях, які змінюються з частотою f , можна описати за допомогою потенціалу $U = \alpha \xi \frac{qE}{f}$, де

$$\xi = \frac{C(\phi) p}{p_{\text{зал}}} \text{ — безрозмірний параметр, що}$$

характеризує робочий газ; p — тиск робочого газу (водень); $p_{\text{зал}}$ — тиск залишкових газів; $C(\phi)$ — параметр Пірса.

На рис. 3 показані теоретична та експериментальні [8] залежності потужності пучково-плазмового віркатора від частоти генерації при різних тисках робочого газу в просторі взаємодії.

Зі збільшенням тиску робочого газу від 10^{-4} до $8 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$ ($p_1 < p_2 < p_3$) і густини плазми відповідно, відбувається не лише збільшення вихідної потужності, але й розширення смуги робочих частот приладу. Вплив плазми на ефективність взаємодії найбільш відчутний в надвисокочастотній частині діапазону, де вихідна потужність може зростати на порядок.

Як видно з графіків, теоретичні та експериментальні залежності мають суттєвий збіг, в результаті чого адекватність математичної моделі вважається коректною [2, 8].

Висновки

З аналізу розробленої математичної моделі випливає, що формування на ділянці дрейфу пучка

в вірваторі з трубчастим плазмовим хвилеводом дає можливість плавного електронного управління спектром генерації за допомогою зміни концентрації частинок плазми та сприяє істотному збільшенню (до 90 ГВт) величини вихідної потужності, що підтверджує розрахована залежність вихідної потужності від концентрації плазми. Сімейство залежностей вихідної потужності від частоти генерації показує, що зі збільшенням тиску робочого газу відбувається збільшення вихідної потужності та суттєве розширення робочої смуги частот приладу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Копп К. Электромагнитное СВЧ генераторы / К. Копп. — М.: Энергоатомиздат, 2002. — 20 с.
2. Дубинов А. Е. Генератор в режиме генерации тормозного рентгеновского излучения / [А. Е. Дубинов, И. А. Ефимова, К. Е. Михеев и др.] // Физика плазмы. — 2004. — Т. 30, № 6. — С. 541 — 562.
3. Пат. 2288519 Российская федерация, МПК Н 01 J 25/68. Генератор шумоподобного широкополосного СВЧ-сигнала на виртуальном катоде / Ю. А. Калинин, А. Е. Храмов, Е. Н. Егоров.; заявитель и патентообладатель Саратовский гос. ун-т им. Н. Г. Чернышевского. — № 2005109524/09; заявл. 5.04.05; опубл. 27.11.06, Бюл.№ 33(II ч.).
4. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ / И. В. Лебедев. — М.: Высшая школа, 1972. — 376 с.
5. Левитский С. М. Вакуумная и твердотельная электроника СВЧ / С. М. Левитский. — К.: Высшая школа, 1986. — 272 с.
6. Березин В. М. Электронные приборы СВЧ / В. М. Березин. — М.: Высшая школа, 1974. — 376 с.
7. Пат. 2175155 Российская федерация, МПК Н 01 J 25/00. Способ генерации импульсов СВЧ излучения в приборе с виртуальным катодом и виркатор для его реализации / Столетов К. А., Храмов А. Е.; заявитель и патентообладатель Российский федеральный ядерный центр. — № 2001106316/09; заявл. 18.01.01; опубл. 20.07.02, Бюл.№ 20 (II ч.).
8. Митин Л. А. Теоретическое и экспериментальное исследование взаимодействия электронных пучков с плазмой / Л. А. Митин. — М.: Мир, 1994. — 52 с.

Рекомендована кафедрою електроніки

Надійшла до редакції 4.04.08
Рекомендована до друку 23.04.08

Кравченко Юрій Степанович — доцент кафедри електроніки; **Мельничук Олена Михайлівна** — студентка Інституту автоматики, електроніки та комп'ютерних систем управління.

Вінницький національний технічний університет