

УДК 621.385.6

Ю. С. Кравченко, к. ф.-м. н, доц.;
О. М. Мельничук, асп.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НВЧ ПРИЛАДУ З ВІРТУАЛЬНИМ КАТОДОМ

Розроблено математичну модель віркатора, на основі якої розраховано основні вихідні характеристики приладу. Отримано графічні результати та за допомогою програмного середовища для розрахунку MatLab 6.1 показано, що при частоті генерації $f_{\text{ген}} = 18$ ГГц значення ККД становить $\eta = 9\%$, а також зі збільшенням частоти генерації, повний ККД віркатора нелінійно зменшується, що пов'язано з ускладненнями при перебудові частоти генерації з її зростанням.

Вступ

НВЧ генератор високої потужності (віркатор) вирішує проблеми, які виникли при розробці приладів силової електроніки, зокрема установок умовно спрямованої дії, оскільки його вихідна потужність може бути добре сфокусована, а також, НВЧ випромінювання добре поглинається різними типами об'єктів [1].

Основною метою статті є дослідження доцільності розробки та виготовлення НВЧ генераторів на основі віртуального катоду, а також математичний розрахунок основних параметрів та моделювання характеристик віркаторів за допомогою сучасного програмного забезпечення.

Віркатори мають ряд переваг в порівнянні з іншими НВЧ генераторами, тобто ці прилади здатні створити дуже потужний імпульс енергії, конструктивно прості, надійні, здатні працювати у відносно широкій смузі частот НВЧ діапазону, мають можливість перестройки по частоті і роботи без уповільнюючої системи та зовнішнього магнітного поля, що сильно спрощує виготовлення та конструкцію віркаторів [2].

Розробка математичної моделі та аналіз її адекватності

Фундаментальна ідея, яка лежить в основі роботи віркатора полягає в прискоренні потужного потоку електронів сітковим анодом. Як видно з рис. 1, конструкція віркатора із співвісним віртуальним катодом являє собою круглий хвилевід, який переходить в конус з діелектричним вікном на торці. Катодом служить металевий циліндричний стрижень діаметром в декілька сантиметрів, анодом — натягнута на обід металева сітка. [1, 3].

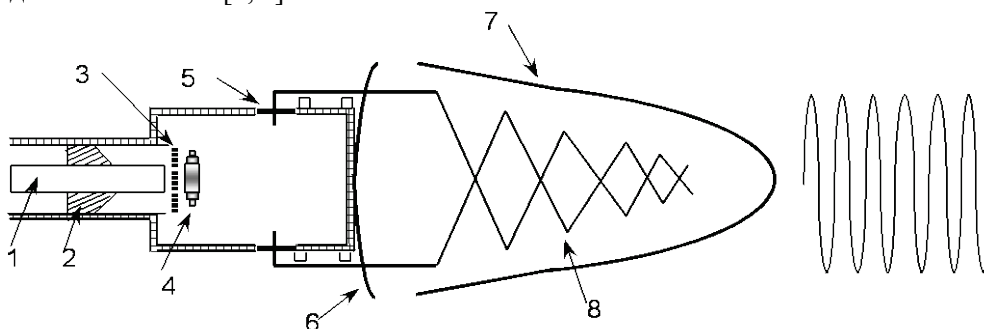


Рис. 1. НВЧ генератор з аксіальним віртуальним катодом: 1 — катод; 2 — ізолятор; 3 — сітковий анод; 4 — віртуальний катод; 5 — порти закріплення антени; 6 — відбивач; 7 — обтічник антени; 8 — антена

При подачі на анод додатного потенціалу 105...106 В з катоду, внаслідок вибухової емісії, прискорюється до аноду потік електронів і проходить через нього в простір за анодом, де сповільнюється власним «кулонівським полем». Потім він відображається назад до аноду, утворюючи тим самим віртуальний катод на відстані від аноду, рівній приблизно відстані від нього до реального катода [1, 4]. Відображені електрони проходять крізь сітку аноду і знову сповільнюються біля по-

верхні реального катода. В результаті формується область електронів, що генерує біля аноду в потенціалній ямі між віртуальним і реальним катодами. Утворене на частоті коливань електронної області НВЧ-поле випромінюється в простір через діелектричне вікно. Стартові струми в віркаторах, при яких виникає генерація, складають 1...10 кА. Віркатори найбільш прийнятні для генерації імпульсів наносекундної тривалості працюють в довгохвильовій частині сантиметрового діапазону. Експериментально від них отримані потужності від 170 кВт до 90 ГВт в сантиметровому та дециметровому діапазонах [1, 5].

Аналіз резонаторної системи віркатора зручно проводити, використовуючи метод еквівалентних схем. З техніки НВЧ відомо [6], що будь-яка коливальна система на частотах, близьких до резонансної частоти одного з видів коливань, може бути представлена еквівалентною схемою у вигляді паралельно з'єднаних активної та реактивної провідності G та B , як показано на рис. 2 [6—7]. Дію електронного потоку зручно виразити у вигляді деякої комплексної електронної провідності $Y_{ел}$

$$Y_{ел} = G_{ел} + jB_{ел}, \quad (1)$$

де $Y_{ел}$ — комплексна електронна провідність; $G_{ел}$ — активна електронна провідність; $B_{ел}$ — реактивна електронна провідність.

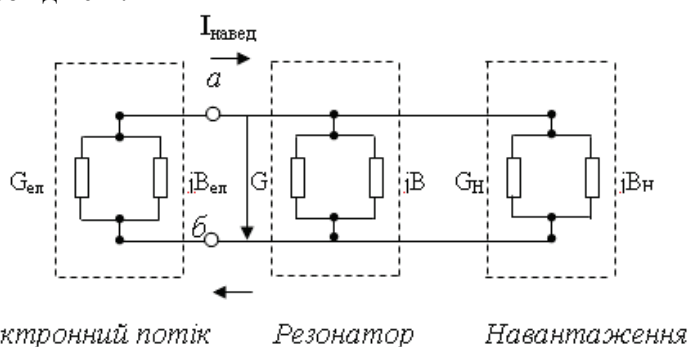


Рис. 2. Еквівалентна схема резонансної коливальної системи віркатора [6]

Розглядаючи режим генерації за відсутності зовнішнього (вхідного) НВЧ сигналу, зазначимо, якщо коливання вже виникли, то за другим законом Кірхгофа векторна сума падінь напруг справа і зліва від перерізу ab повинна дорівнювати нулю

$$\frac{I_{навед}}{G_{ел} + jB_{ел}} + \frac{I_{навед}}{G + G'_н + j(B + B'_н)} = 0$$
, де $I_{навед}$ — струм наведення; $G_{ел}$ — активна електронна провідність; $B_{ел}$ — реактивна електронна провідність; $G'_н$ — активна провідність навантаження; $B'_н$ — реактивна провідність навантаження.

Звідси маємо: $G + G'_н + G_{ел} + j(B + B'_н + B_{ел}) = 0$. Відповідно, в режимі встановлених коливань для віркатора сума активної та реактивної провідності циліндричної резонаторної системи, навантаження та електронного потоку буде:

$$G + G'_н + G_{ел} = 0; \quad (2)$$

$$B + B'_н + B_{ел} = 0. \quad (3)$$

Фізичний зміст електронної провідності і рівняння (2) можна наглядно пояснити з енергетичної точки зору. Позначимо через електричну та комплексну $P_{ел}$ та $P_к$ активні потужності, які споживаються від зазору відповідно електронним потоком та контуром, включаючи зовнішнє навантаження. За законом збереження енергії у встановленому режимі повинна виконуватись умова [6]:

$$P_{ел} + P_к = 0. \quad (4)$$

Тоді отримаємо, $P_{\text{ел}} = \frac{1}{2} U_m^2 G_{\text{ел}}$, де $P_{\text{ел}}$ — потужність, яка споживається електронним потоком; U_m — амплітуда напруги; $G_{\text{ел}}$ — активна електронна провідність. А комплексна складова $P_{\text{к}} = \frac{1}{2} U_m^2 (G + G_{\text{н}}')$.

Підставляючи ці вирази в рівняння (4), отримаємо при $U_m \neq 0$ вираз, який еквівалентний рівнянню (2) [6, 8]. У відповідності до формули (2) для будь-якого НВЧ генератора в тому числі і віратора потрібно записати:

$$G_{\text{ел}}(U_{m0}) + G_{\text{пов}} = 0, \quad (5)$$

де $G_{\text{пов}}$ — сума активних провідностей резонатора та навантаження, U_{m0} — амплітуда встановлених коливань. Амплітуду встановлених коливань можна визначити графічно по рівнянню (5). Активна провідність $G_{\text{пов}}$ являє собою суму активних провідностей резонатора та навантаження, та не залежить від амплітуди коливань U_m . Тому величина U_{m0} визначається перетином нелінійної характеристики $-G_{\text{ел}}(U_m)$ та горизонтальної прямої $G_{\text{пов}} = \text{const}$, як показано на рис. 3.

Використовуючи умову (3), відповідно до якої у встановленому режимі генерації, сума реактивних провідностей резонаторної системи та навантаження, а також реактивної електронної провідності повинна бути рівна нулю. Діючи за аналогією з [6] також припустимо, що навантаження в перерізі високочастотного зазору має чисто активний характер, тобто $B_{\text{н}}' = 0$, то рівняння (3) матиме вигляд:

$$B = -B_{\text{ел}}. \quad (6)$$

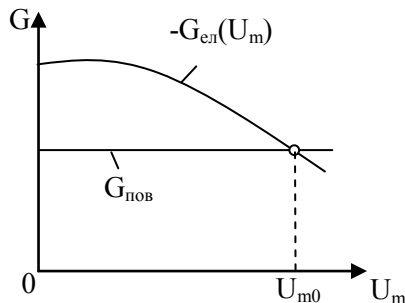


Рис. 3. Графічне визначення режиму роботи НВЧ генератора на основі ВК

Проте, з іншого боку добротність системи складає [6, 9]

$$Q_{\text{н}} = \frac{\nu_0}{2G_{\text{пов}}} \left(\frac{dB}{d\nu} \right)_{\nu \approx \nu_0} \approx \frac{\nu_0}{2(G + G_{\text{н}}')} \cdot \frac{B}{\nu - \nu_0}, \quad (7)$$

де ν — частота, при якій розглядається провідність резонатора; ν_0 — частота власних коливань резонатора.

Звідси з використанням рівняння $G_{\text{пов}} = G + G_{\text{н}}'$, маємо, що

$$B = 2Q_{\text{н}} G_{\text{пов}} \left(\frac{\nu}{\nu_0} - 1 \right), \quad (8)$$

де $Q_{\text{н}}$ — добротність генератора. Підставимо рівняння (8) в (6) та після відповідних математичних перетворень, отримаємо:

$$\nu = f_{\text{ген}}; \quad f_{\text{ген}} = \nu_0 \left(1 - \frac{B_{\text{ел}}}{2Q_{\text{н}} G_{\text{пов}}} \right), \quad (9)$$

де $f_{\text{ген}}$ — частота встановлених коливань; $B_{\text{ел}}$ — реактивна електронна провідність. Врахувавши умову стаціонарної амплітуди (2), можна замість величини $G_{\text{пов}}$ підставити в (9) взятую з протилежним знаком активну електронну провідність. В результаті отримаємо:

$$f_{\text{ген}} = \nu_0 \left(1 + \frac{1}{2Q_{\text{н}}} \cdot \frac{B_{\text{ел}}}{G_{\text{ел}}} \right). \quad (10)$$

Як відомо з фізики [6], частота сигналу, який відбивається від об'єкта, що рухається, описується рівнянням

$$v_d = f_{\text{ген}} \frac{2v_r}{c}, \quad (11)$$

де v_d — частота сигналу, який відбивається від об'єкта, що рухається; v_r — радіальна компонента швидкості об'єкта; c — швидкість світла у вільному просторі. Тоді потужність випромінювання:

$$P = kT\Delta\nu, \quad (12)$$

де k — стала Больцмана; T — абсолютна температура; $\Delta\nu$ — різниця частоти встановлених коливань і частоти сигналу, який відображається від об'єкта, що рухається ($\Delta\nu = f_{\text{ген}} - v_d$).

Визначимо ККД взаємодії електронного пучка з електромагнітним полем в віркаторі:

$$\eta = \frac{W_{\text{евх}} - W_{\text{евих}}}{W_{\text{евх}}}, \quad (13)$$

де $W_{\text{евх}}$ — енергія, що вноситься в простір взаємодії інжектованим електронним пучком; $W_{\text{евих}}$ — енергія електронів, які покидають простір взаємодії.

Аналогічно [5], врахувавши, що максимальна вихідна енергія дорівнює

$W_{\text{евих}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = \frac{mc^4 \gamma^2 (\gamma-1)^2}{2}$, де $\gamma = 10$ — фактор взаємодії частинок в просторі утворення

віртуального катоду, а енергія, що вноситься в простір взаємодії інжектованим електронним пучком дорівнює $W_{\text{евх}} = eU_0 = \frac{e^2 E_0^2}{4\pi^2 m \cdot f_{\text{ген}}^2}$, де U_0 — потенціал на вході в простір взаємодії;

$m = 9,31 \cdot 10^{-31}$ кг — маса частинки; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с — швидкість світла, $E_0 = 10^3 \div 10^4$ В/м — напруженість електричного поля, $f_{\text{ген}} = 18$ ГГц — частота встановлених коливань, то повний ККД віркатора

$$\eta_{\text{повн}} = \frac{2e^2 E_0^2 - 4\pi^2 m^2 c^4 f_{\text{ген}}^2 \gamma^2 (\gamma-1)^2}{e^2 E_0^2} \cdot 100\%.$$

Підставивши відповідні значення, отримаємо повний ККД при певній частоті генерації НВЧ-генератора віркаторного типу:

$$\eta = \frac{2(1,6 \cdot 10^{-19})^2 (10^4)^2}{(1,6 \cdot 10^{-19})^2 (10^4)^2} - \frac{4(3,14)^2 (9,31 \cdot 10^{-31})^2 (3 \cdot 10^8)^4}{(1,6 \cdot 10^{-19})^2 (10^4)^2} \times \\ \times \frac{10^2 \cdot 18 \cdot 10^9 (10-1)^2}{(1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot (10^4)^2} \cdot 100\% = 0,09 \cdot 100\% = 9\%.$$

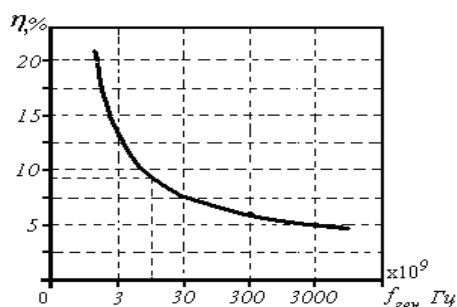


Рис. 4. Залежність ККД від частоти НВЧ-генератора на основі віртуального катода

Побудуємо графік залежності повного ККД від частоти генерації $f_{\text{ген}}$.

На рис. 4 подано залежність ККД від частоти генерації НВЧ-генератора на основі віртуального катода. Отримані результати свідчать, що при частоті $f_{\text{ген}} = 18$ ГГц значення ККД становить $\eta = 9\%$, а також ККД зменшується із збільшенням частоти внаслідок різноманітних втрат потужності, а також в зв'язку з тим, що при великій частоті генерації, досить важко контролювати та управляти системою перебування частоти.

Висновки

Таким чином, в результаті проведеного математичного розрахунку основних параметрів та побудови характеристик математичної моделі віркатора за допомогою програмного середовища MatLab 6.1, показано, що при частоті генерації $f_{\text{ген}} = 18$ ГГц значення ККД становить $\eta = 9\%$, а також із збільшення частоти генерації, повний ККД віркатора нелінійно зменшується, що пов'язано з ускладненнями при перебудові частоти генерації з її зростанням, а також суттєвим розширенням робочої смуги частот приладу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Электромагнитные СВЧ генераторы, электромагнитные бомбы — оружие летального и нелетального действия [Электронный ресурс] / К. Копп // Безопасность.— 2003. : — Режим доступа: <http://daily.sec.ru/>
2. Егоров Е. Н. Исследование хаотической динамики в электронном пучке с виртуальным катодом во внешнем магнитном поле / Е. Н. Егоров, А. Е. Храмов // Физика плазмы. — 2006. — № 8. — С. 742—754.
3. Селемир В. Д. Виркатор с баллистической фокусировкой электронного пучка / В. Д. Селемир, А. Е. Дубинов, Б. Г. Птицын // ЖТФ. — 2004. — № 5. — С. 125—129.
4. Пат. 46884 Российская Федерация, МПК⁷ Н 01 J 25/00. СВЧ генератор с виртуальным катодом / Калинин Ю. А., Храмов А. Е., Трубецков Д. И., Егоров Е. Н.; заявитель и патентообладатель Саратов. госуниверситет. — № 2000434322/09; заявл. 18.12.04; опубл. 22.05.05, Бюл. № 21.
5. Диденко А. Н. О предельно допустимых уровнях мощности импульсных релятивистских СВЧ-генераторов различных типов / А. Н. Диденко, М. С. Дмитриев // Письма в ЖТФ. — 2000. — № 10. — С. 9—12.
6. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ / И. В. Лебедев— М. : Высшая школа, Т2. — 1972. — 376 с.
7. Филатов Р. А. Влияние положительных ионов на колебательные процессы в электронном пучке с виртуальным катодом / Р. А. Филатов, Ю. А. Калинин, А. Е. Храмов, Д. И. Трубецков // Радиопизика. — 2006. — № 10. — С. 853—863.
8. Пат. 35965 Україна, МПК Н 01 J 25/00. Генератор широкопasmового НВЧ-сигналу на віртуальному катоді / Кравченко Ю. С., Мельничук О. М.; власник Вінницький національний технічний університет. — № u 2008 05826; заявл. 05.05.2008; опубл. 10.10.2008, Бюл. № 19.
9. Березин В. М. Электронные приборы СВЧ / В. М. Березин. — М. : Высшая школа, 1974. — 376 с.

Рекомендована кафедрою електроніки

Надійшла до редакції 29.01.09
Рекомендована до друку 11.03.09

Кравченко Юрій Степанович — доцент, **Мельничук Олена Михайлівна** — аспірантка.

Кафедра електроніки Вінницького національного технічного університету