

ПРОЕКТУВАННЯ РЕЗОНАНСНОЇ СИСТЕМИ МАГНЕТРОНІВ

Прилади надвисоких частот (НВЧ) мають широке розповсюдження, зокрема завдяки великому к.к.д. та високій вихідній потужності. Дослідження цих приладів тривають, оскільки з'являються нові прилади та нові галузі їх застосування. Для отримання надійних результатів необхідно використовувати високопродуктивну техніку, провадити детальне проектування таких приладів, їх виготовлення та накопичення результатів експериментів. Удосконалення технічних прийомів проектування приладів НВЧ з допомогою ЕОМ дозволяє різко скоротити витрати на виробництво [1].

Магнетрон є діодом, який розташований в магнітному полі, котре паралельне до його осі. Конструктивно магнетрон складається з катода, анодного блока та магнітної системи.

Багато досліджень присвячено вивченню резонансних структур приладів НВЧ взагалі та резонансної системи магнетронів зокрема [2 — 5].

Сукупність анодного блока, вихідного контуру, кінцевих об'ємів та інших частин магнетрона, які визначають його високочастотні властивості, називається резонансною системою. Вона є найважливішою складовою магнетрона, бо зумовлює його робочу частоту та відіграє важливу роль у його електронних процесах. Об'єднання всієї коливальної системи ускладнює задачу його розрахунку, проектування та користування.

Функція резонансної системи полягає в забезпеченні взаємодії просторового заряду з високочастотним полем потрібної частоти, відповідної форми та рівня з метою генерування високочастотної потужності з великим к.к.д. та передавання енергії в зовнішнє навантаження. Резонансна система здійснює це, запасавши частину енергії для створення високочастотних полів та виділяючи у той же час решту енергії в зовнішнє навантаження.

Якісна резонаторна система повинна мати параметри, що забезпечують стабільну роботу магнетрона під час значних порівняно плавних змін частоти, а також в умовах її дискретних стрибків. Ця задача є основною під час проектування та конструювання магнетронів.

Уся резонансна система дуже складна для якісного аналізу, і звичайно обмежуються припущенням, що робота магнетрона визначається тільки анодним блоком та вихідним контуром. Хоч це припущення не завжди виправдовується, тому що інші частини магнетрона суттєво впливають на

його роботу, звичайно все ж вдається ці впливи виділити, розглядаючи їх дію як окрему задачу.

Найбільш розповсюджено системи, котрі складаються з порожнистих резонаторів, які розташовано по колу анода. Системи, у свою чергу, можна поділити на п'ять форм.

1. Системи однакових резонаторів з в'язками (в'язочні).
2. Різномрезонаторні системи («висхідне сонце»):
 - а) відкритого типу;
 - б) закритого типу.
3. Системи зі складним розподілом резонаторів по колу анода:
 - а) в'язочні;
 - б) безв'язочні.
4. Безв'язочні системи, які об'єднано з симетричним зовнішнім резонатором:
 - а) коаксіальні;
 - б) оберненокоаксіальні.
5. Системи однакових резонаторів з аксіальною довжиною, більшою за $\lambda/2$ («довгоанодні»):
 - а) в'язочні;
 - б) безв'язочні.

Практичний досвід свідчить, що використання в'язок у магнетроні значно поліпшує його роботу: більша частина явищ нестабільності, які мають місце в магнетронах без в'язок, при цьому усувається, к.к.д також підвищується й стає можливою робота на малих потужностях.

Резонаторні системи з в'язками (перша форма) застосовуються у відносно довгохвильових магнетронах ($\lambda \geq 3$ см) у дуже широкому діапазоні потужностей (від десятків ватів до кількох мегаватів), однак принципово можливе застосування в'язочних систем і в більш короткохвильовому діапазоні при відносно невеликих потужностях. Але в цьому випадку виникають значні конструктивні та технологічні ускладнення, тому що в'язки стають дуже малими. Крім того, втрати НВЧ-енергії у в'язках збільшуються зі зменшенням довжини хвилі, що призводить до зниження к.к.д. магнетрона.

Відповідне розділення мод коливань у цих високочастотних приладах також суттєве. Так званий різноконтурний магнетрон має найбільш вдалу конструкцію анодного блока, яка дає чітке розділення мод коливань на високих частотах та не має недоліків звичайного анодного блока з в'язками.

Особливістю різноконтурної конструкції є чергування великих та малих резонаторів.

Різномодальні системи (друга форма) застосовуються в основному в магнетронах, які працюють у діапазоні хвиль, коротших за 10 см. Застосування таких систем у більш довгохвильових магнетронах викликає значне збільшення їх маси та габаритних розмірів.

Резонаторні системи зі складним розподілом (випадкова послідовність або спеціально запрограмована) резонаторів (третя форма) не знайшли ще промислового втілення, хоч вони принципово здатні забезпечити потрібну дисперсійну характеристику, яка дозволяє здійснити стабільну роботу магнетрона точно на заданій моді коливань. Головною перешкодою для розповсюдження таких систем є конструктивна та технологічна складність виготовлення резонаторів та в'язок.

Резонаторні системи, які об'єднано з симетричним зовнішнім контуром (четверта форма), здобули останніми роками дуже широке розповсюдження в короткохвильовій частині сантиметрового діапазону ($\lambda \leq 5$ см). Ці системи дозволяють досягти високої стабільності роботи приладу в широкому діапазоні перестроювання. Незважаючи на деяке ускладнення конструкції, такі системи втілено у промислових типах магнетронів, що отримали назву коаксіальних та оберненокоаксіальних (головним чином у міліметровому діапазоні хвиль).

«Довгоанодні» резонаторні системи (п'ята форма) застосовуються для магнетронів, які характеризуються дуже високими рівнями імпульсної та середньої потужності й відносно великими тривалостями імпульсів, особливо в десятисантиметровому діапазоні на фіксованій довжині хвилі.

Резонаторні системи першої, другої та четвертої форм легко можуть бути використані для магнетронів, які перестроюються. У системах третьої, а особливо п'ятої форми керування дисперсійною характеристикою в діапазоні перестроювання й сама розробка вузла перестроювання супроводжуються серйозними ускладненнями як принципового, так і технічного характеру.

В усіх формах систем, що перелічено, суттєву роль відіграють кількість, форма та розміри резонаторів. Ці параметри визначають довжину хвилі та діапазон перестроювання, к.к.д., сталість роботи магнетрона, а також впливають на розподіл температур в анодному блоці й довговічність приладу в цілому.

Найбільш розповсюджені резонаторні системи, які відповідно до форми резонаторів розподіляються на три типи:

- а) «щілина — дірка»;
- б) лопатковий;
- в) «щілина».

Застосовуються також системи з резонаторами краплеподібної форми, можуть бути використані резонатори еліптичної форми.

Порівнюючи резонатори різних форм, дуже зручно оперувати спеціальним параметром, котрий називається характеристичним опором. У цьому аспекті під час вибору виходять з міркувань, які наведено нижче.

У резонаторної системи типу «щілина» (за однакових умов з іншими типами систем) дуже низький характеристичний опір, що дозволяє дещо підвищити стійкість роботи магнетрона на робочій моді коливань, але призводить до зниження властивої добротності та к.к.д. контуру.

Порівняно більша ефективна ємність такої системи зменшує швидкість наростання коливань НВЧ, однак ускладнює роботу магнетрона за великої крутизни переднього фронту модулюючого імпульсу.

Система типу «щілина» має відносно великі масу й габаритні розміри. Остання обставина стає позитивною, коли передбачається використання міліметрового діапазону хвиль, оскільки дещо полегшується виготовлення системи. Крім того, система дозволяє отримати добрий тепловідвід від кінців анодних сегментів, отже, може бути використана, якщо магнетрон розраховано на відносно високі середні потужності, а також в оберненокоаксіальних магнетронах. Система може бути легко виготовлена методами штампування або електроерозії.

Резонаторна система лопаткового типу має дуже високий характеристичний опір, тобто більш високі властиву добротність та к.к.д. Ця обставина робить лопаткову систему переважаною серед короткохвильових магнетронів.

У системи відносно невеликі маса й габаритні розміри, що є суттєвою перевагою для довгохвильових магнетронів і в усіх випадках, коли завданням обмежено ці параметри. Система є технологічно простою, може бути виготовлена штампуванням, а також упакуванням лопатей (ламель) в циліндричне тіло анода.

Резонаторна система типу «щілина—дірка» щодо характеристичного опору являє собою проміжний тип і дозволяє, варіюючи співвідношення між розмірами щілини та дірки при збереженні резонансної довжини хвилі, змінювати характеристичний опір у широких межах. Виготовлення такої системи дещо складніше, ніж систем лопаткової й «щілина».

Система з краплеподібною формою резонаторів має більш високі характеристичний опір та властиву добротність у порівнянні з лопатковою. Вона дуже зручна для впровадження широкодіапазонного перестроювання магнетрона. Технологічно ця система дещо складніша за лопаткову.

Система з еліптичними резонаторами, хоч і відзначається найбільш високим характеристичним опором та значним розділенням частот сусід-

ніх мод коливань, а також високими властивою добротностю і к.к.д. контуру, через складність виготовлення є малоконкурентноспроможною й у реальних магнетронах не застосовується.

У різнорезонаторних магнетронах можна використовувати будь-які комбінації згаданих типів систем. Усі перелічені типи систем можуть використовуватися: як для імпульсних приладів, так і для магнетронів безперервного генерування; як для магнетронів з фіксованою частотою, так і для тих, що перестроюються [5].

Резонаторні системи НВЧ в електронних приладах призначені для того, щоб створити умови найінтенсивнішої взаємодії електромагнітної хвилі з електронним потоком.

Експериментально виявлено, що найкращі умови взаємодії з полем створюються в тих випадках, коли швидкість електронів та фазова швидкість хвилі близькі між собою [6].

Основна роль резонаторної системи полягає в накопичуванні високочастотної енергії та фіксуванні частоти коливань. Резонаторна система може виконувати функції фільтра з вузькою смугою пропускання, котрий з усіх частот, що зумовлені електронним потоком, виділяє одну визначену [7].

Найважливішою характеристикою резонансної системи є її дисперсійна характеристика, тобто залежність фазової швидкості електромагнітної хвилі, яка поширюється вздовж цієї системи, від частоти.

За дисперсійною характеристикою можна оцінювати: частотне розділення коливань між модами; ширину смуги лінійного настроювання магнетрона; парціальний вплив конструктивних параметрів системи на розділення мод за частотою (та за навантаженням збудження) й на діапазон настроювання, де очікується стабільна робота магнетрона.

Для розрахунків характеристик сповільнюючих (резонаторних) систем магнетронів використовуються:

1. Методи, які базуються на теорії поля. Їх побудовано на розв'язанні рівнянь Максвелла для замкненого об'єму складної форми, котрий є анодним блоком магнетрона. При цьому розраховуються спектр резонансних частот та складові електромагнітного поля в просторі взаємодії магнетрона.

2. Метод еквівалентних схем, згідно з яким передбачено розв'язання рівнянь Кірхгофа для замкненого ланцюжка резонаторів [3].

Метод еквівалентних схем не дозволяє розраховувати провідності, отже, й резонансні частоти з високим ступенем точності. Він дає тільки якісне уявлення про частину спектра, а саме про основну (першу) групу резонансів [7]. Тому розрахунки дисперсійної характеристики будемо проводити з допомогою методу теорії поля.

Для лопаткової анодної системи магнетрона, загальний вигляд якої відображено на рис. 1, резонансне рівняння може бути записане таким чином:

$$Y_n + Y_r + Y_p = 0, \quad (1)$$

де Y_n — провідність простору взаємодії, Y_r — провідність лопаткового резонатора, Y_p — провідність в'язок.

Корені рівняння (1) для різних чисел пар сегментів визначають дисперсійну характеристику резонаторної системи магнетрона. Кожний доданок рівняння (1) визначається геометричними розмірами резонаторної системи. Розглянемо ці доданки окремо.

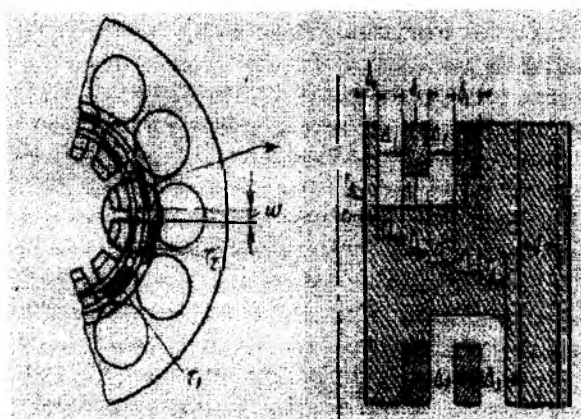


Рис. 1

Провідність простору взаємодії магнетрона [7]

$$Y_n = \frac{Nh}{2\pi r_a} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left(\frac{\sin \gamma \theta}{\gamma \theta} \right)^2 \frac{Z_\gamma(kr_a)}{Z'_\gamma(kr_a)}. \quad (2)$$

Тут N — кількість резонаторів резонаторної системи; h — висота анодного блока; r_a — радіус анода магнетрона; m — ціле число; γ — номер моди коливань, $\gamma = n + mN$, де n — номер основної моди коливань; θ — половина центрального кута, який припадає на одну щілину,

$$\theta = \frac{\pi}{N} - \frac{\tau}{2r_a},$$

де τ — товщина ламелі; Z_γ — функція,

$$Z_\gamma(kr) = J_\gamma(kr) - \frac{J'_\gamma(kr_k)}{N'_\gamma(kr_k)} N_\gamma(kr),$$

де k — хвильове число, яке й є коренем рівняння (1); r — змінна координата; $J_\gamma, N_\gamma, J'_\gamma, N'_\gamma$ — функції Бесселя та Неймана порядку γ та їхні похідні; r_k — радіус катода магнетрона; Z'_γ — функція, що визначається виразом [7]

$$Z'_\gamma(kr) = J'_\gamma(kr) - \frac{J'_\gamma(kr_k)}{N'_\gamma(kr_k)} N'_\gamma(kr).$$

Провідність лопаткового резонатора

$$Y_r = \frac{h}{\psi a} \frac{J_0(ka)N_1(kb) - J_1(kb)N_0(ka)}{J_1(ka)N_1(kb) - J_1(kb)N_1(ka)}. \quad (3)$$

Тут ψ — центральний кут лопаткового резонатора, $\psi = \pi/N$;

$$a = r_a - \frac{\tau}{2 \sin \frac{\psi}{2}}; \quad b = r_l - \frac{\tau}{2 \sin \frac{\psi}{2}},$$

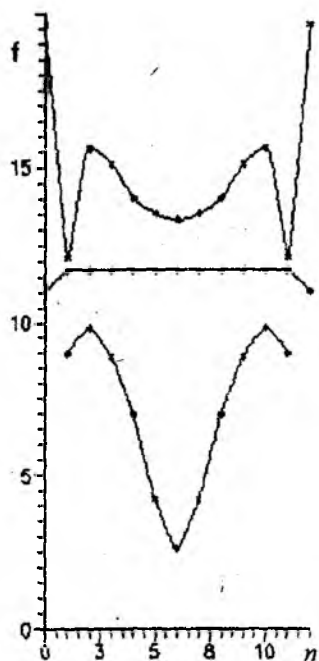
де r_l — радіус ламелі.

Провідність в'язок резонаторної системи в приладах М-типу [8]

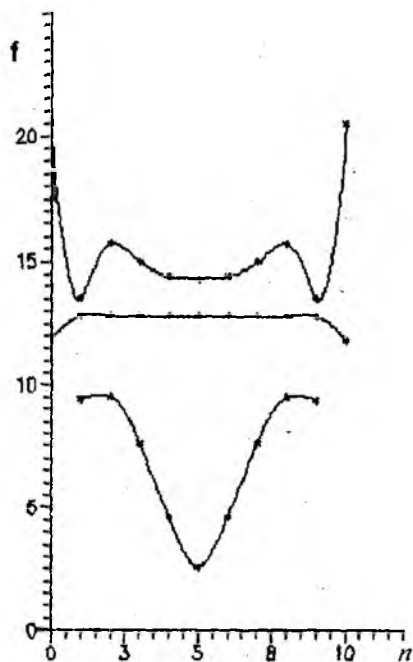
$$Y_p = -2Y_0 \frac{\cos \frac{2\pi n}{N} + \cos \frac{2\pi k r_p}{N}}{\sin \frac{2\pi k r_p}{N}}, \quad (4)$$

де Y_0 — характеристична провідність [9]; r_p — середній радіус в'язок.

Дисперсійні характеристики, що розраховано за рівнянням (1) для 12 та 10 резонаторних магнетронів, наведено на рис. 2, а та рис. 2, б.



a



б

Рис. 2

Порівняння розрахунків з результатами експериментів дає розбіжність не більшу за 8 %. Розрахунки дисперсійних характеристик методом теорії поля вигідно відрізняються від розв'язань, що отримано з використанням методів скінченних елементів, які описано в [10]. Результати зіставлено в таблиці.

Порівнювані показники	Значення показників, одержаних за методом			
	скінченних елементів		на базі теорії поля	експериментальним
	Е	Н		
Частота, ГГц	2478	2482	2501	2493
Час обчислень, с	374	377	7	—

Однак програми, за якими обчислюються дисперсійні характеристики магнетронів, дуже громіздкі й незручні для користувачів-непрограмістів. Щоб надати останнім можливість роботи з такими програмами, розроблено систему, яка дозволяє в діалоговому режимі розраховувати дисперсійні характеристики магнетронів для мікрохвильових печей.

Система складається з двох незалежних підсистем:

— діалогової, яка визначає бажані геометричні розміри магнетрона та електричні й магнітні параметри. Підсистема функціонує під керуванням операційних систем VM/SP, OS/2, PC DOS (MS DOS);

— розрахункової, яка за попередньо визначеними параметрами магнетрона вибирає з бібліотеки об'єктних програм модулі, котрі необхідні для розрахунків.

Систему реалізовано на мові процедур REXX (діалогова підсистема) та на алгоритмічній мові Фортран з використанням бібліотек об'єктних модулів (розрахункова підсистема).

Таким чином, використання наведених результатів дозволяє розраховувати дисперсійні характеристики анодних блоків магнетронів, проектувати ці блоки із заздалегідь визначеними параметрами, а також вивчати вплив конструктивних параметрів на дисперсійні характеристики.

Список літератури: 1. Morishita Y. CAD of microwave tubes // Теребідзьон гаккай ші. 1978. Vol. 32, N 3. С. 182 — 188. Яп. 2. Силин Р.А., Сазонов В.П. Замедляющие системы. М.: Совет. радио, 1966. 632 с. 3. Самсонов Д.Е. Основы расчета и проектирования многорезонаторных магнетронов. М.: Совет. радио, 1966. 234 с. 4. Григорьев А.Д., Янкевич В.Г. Резонаторы и резонаторные системы СВЧ: Численные методы расчета и проектирования. М.: Радио и связь, 1984. 248 с. 5. Шлифер Э.Д. Расчет многорезонаторных магнетронов. М.: Изд-во Моск. энергет. ин-та, 1966. 143 с. 6. Советов Н.М. Техника сверхвысоких частот. М.: Высш. шк., 1976. 184 с. 7. Магнетроны сантиметрового диапазона: В 2 т. / Пер. с англ. под ред. С.А. Зусмановского. М.: Совет. радио, 1950. Т. 1. 420 с. 8. Wolnik J. Magnetrony. Warszawa: Wydaw. Nauk.-techn., 1969. 230 s. 9. Ганстон М.Р.А. Справочник по волновым сопротивлениям фидерных линий СВЧ / Пер. с англ. под ред. А.З. Фрадина. М.: Связь, 1976. 152 с. 10. Sakayama K., Kotera H., Ahagon A. Analysis of magnetron cavity resonator by three-dimensional electromagnetic eigenvalue calculation technique based on finite element method // Денки гаккай ромбунши А. 1990. N 9. С. 584 — 590. Яп.

Харківський державний технічний
університет радіоелектроніки

Надійшла до редколегії 16.03.99