

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

ЕКЕЗЛІ АНДРІЙ ІГОРОВИЧ

УДК 621.385.6.029.6

**ЕЛЕКТРОННЕ КЕРУВАННЯ ЧАСТОТОЮ МАГНЕТРОННИХ
ГЕНЕРАТОРІВ ТА РОЗШИРЕННЯ ЇХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ
МОЖЛИВОСТЕЙ**

Спеціальність 01.04.01 – фізика приладів, елементів та систем

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Чурюмов Геннадій Іванович,
Харківський національний університет радіоелектроніки
Міністерства освіти і науки України, професор кафедри
фізичних основ електронної техніки.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Лукін Костянтин Олександрович,
Інститут радіофізики і електроніки ім. О.Я. Усикова НАН
України, завідувач відділу нелінійної динаміки електронних
систем;

доктор фізико-математичних наук, професор
Шматько Олександр Олександрович,
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
професор кафедри фізики НВЧ.

Захист відбудеться _____ 2015 р. о _____ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.04 при Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, просп. Леніна, 14.

Автореферат розісланий _____ 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради _____

О.Г. Пащенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з важливих задач сучасної вакуумної електроніки НВЧ є створення ефективних, надійних, довговічних і відносно простих у виготовленні генераторів НВЧ коливань. Як показує практика, значною мірою цим умовам відповідають магнетронні генератори (магнетрони). Слід зазначити, що становлення і розвиток магнетронного напрямку і, зокрема, магнетронних генераторів проводилося протягом багатьох років завдяки роботам А.В. Hull, А. Zacek, Е. Habann, А.О. Слудкін і Д.С. Штейнберг, А. Okabe, Е.С.С. Megaw, К. Posthumus, С.Я. Брауде, М.Ф. Алексеева, Д.С. Малярова та ін. Створення існуючих конструкцій магнетронів стало можливим завдяки теоретичним та експериментальним дослідженням L. Brillouin, Н.В. Welch, О. Buneman, Р.А. Lindsay, R. Vaughan, М.Д. Девяткова, В.Ф. Коваленко, С.І. Бичкова, Л.А. Вайнштейна, Р.А. Сіліна, В.П. Сазонова, Е.Д. Шліфера, О.Г. Шеїна, Д.В. Соколова, Я.О. Старца, В.П. Єрьоміна, В.Б. Байбурина, І.Д. Трутеня, Г.Я. Левіна, І.М. Вигдорчика, В.Д. Науменко, М.Ф. Копилова, О.О. Гурко, О.М. Каргіна та ін.

Досягнення високих показників енергетичних параметрів магнетронів (ККД, вихідної потужності) стало результатом багаторічних досліджень, які проводилися в дослідницьких центрах і провідними світовими виробниками ЕВП НВЧ у різних країнах, включаючи США (фірми «Raytheon», «Varian», «Litton», «Hughes»), Росію (НВО «Істок», «ОКБ Тантал-Наука», НП ВАТ «Фаза», АТ «Плутон» та ін.), Великобританію (фірма «Valves»), Францію (фірма «Thomson-CSF»), Нідерланди (фірма «Philips»), Японію (фірма «Sharp»), Південну Корею (фірми «Samsung» і «LG»), Україну (ВО «Генератор», ДП НДІ «Оріон», Інститут радіофізики та електроніки НАНУ, Радіоастрономічний інститут НАНУ) і т.д.

Зразки магнетронів, створені на сьогоднішній день, перебивають діапазон частот від 300 МГц до 300 ГГц при електронному ККД від 80 до 1%, відповідно. Вихідна потужність серійних магнетронів безперервної дії становить від долей вата до декількох десятків кіловат, а імпульсної дії – від 10 Вт до 20 МВт. Магнетрони як імпульсної, так і безперервної дії ось вже більше 70 років знаходять широке застосування в різних наземних та бортових радіотехнічних системах (РТС), промислових і побутових системах НВЧ нагріву, фізичному експерименті для нагріву плазми тощо. Також, проводяться небезуспішні дослідження, спрямовані на використання магнетронів у прискорювачах частот, у фазованих антенних решітках і космічних системах перетворення сонячної енергії в енергію постійного струму (системи бездротової передачі енергії на Землю).

Область застосування магнетронів продовжує постійно розширюватися, що, в першу чергу, обумовлено такими їх перевагами як високий ККД, відносно низькі напруги живлення (зокрема, анодна напруга), високе відношення рівня вихідної потужності до маси приладу, компактність конструкції, простота виготовлення і порівняно низька вартість. Водночас недостатньо високі значення частотних параметрів і характеристик магнетронів потребують додаткових досліджень частотних властивостей магнетронів. З іншого боку, поліпшення частотних характеристик магнетронів передбачає реалізацію режиму електричного перестроювання (в тому числі швидкого перестроювання) (підстроювання) частоти магнетронів та її застосування в РТС різного функціонального призначення.

Останнім часом розширюються функціональні можливості РТС. Зокрема, підвищується актуальність застосування багаточастотних РЛС у різних частотних діапазонах для моніторингу хмар та опадів (метеорологічні РЛС) або в припортових службах спостереження за акваторією і рухом суден. Там, де потрібні такі РЛС, існує маса заважаю-

чих (побічних) факторів і багаточастотні системи є вирішенням цих проблем. Для забезпечення роботи таких РЛС потрібна нова функціональна елементна база (вакуумні прилади), здатні функціонально просто вирішувати задачу багаточастотної генерації з високими експлуатаційними характеристиками.

Таким чином, на сьогоднішній день не викликає сумнівів факт затребуваності магнетронів у багатьох областях. Також існує маса завдань, вирішення яких відкриває нові напрямки у використанні цих приладів. Результати, наведені в даній роботі, дозволяють по-новому подивитися на використання магнетронів і розширення області їх застосування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження та розробки цієї роботи проводились у рамках держбюджетних «Дослідження частотно-потужних та часових факторів електромагнітного поля на фізичні, фізико-хімічні та біологічні властивості середовищ та об'єктів» (№ ДР 0106U003174, 2006 р.), «Розроблення комп'ютеризованого комплексу для вимірювання електромагнітних параметрів в сантиметровому та міліметровому діапазонах» (№ ДР 0107U007283, 2007 р.), «Пошук та дослідження шляхів створення та застосування енергоефективних екологічних джерел енергії» (№ ДР 0109U002572, 2009 р.), «Розроблення інноваційних енергозберігаючих технологій освітлення» (№ ДР 0109U005974, 2009 р.), «Фізичні моделі та інструментарій для 3-D візуалізації взаємодії низькоінтенсивного електромагнітного поля з мікро- та нанооб'єктами різної фізичної природи та біосередовищами (кров)» (№ ДР 0112U000208, 2012 р.) та госпдоговірної «Создание магнетрона с подстройкой частоты через второй вывод энергии» (№ ДР 0114U001311, 2014 р.) науково-дослідних робіт, виконавцем за сумісництвом яких був здобувач.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є фізичні особливості електронно-хвильової взаємодії в магнетронах з двома виводами енергії, розуміння і поліпшення їх частотних властивостей, а також подальший розвиток і вдосконалення методів управління частотою магнетронів, що забезпечують широкий діапазон її перестроювання як в безперервному, так і імпульсному режимах роботи.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

1. Розробити математичну модель «холодної» електродинамічної системи (анодно-го блоку) магнетрона з двома виводами енергії в одновидовому наближенні (π -вид), засновану на методі еквівалентних схем.

2. Розробити математичні моделі «гарячого» магнетрону з двома виводами енергії (метод великих часток і метод еквівалентних схем).

3. Провести аналіз факторів, що впливають на стабільність частоти магнетронів, методів і способів її перестроювання (підстроювання). Провести дослідження робочих і частотних характеристик магнетрона з двома виводами енергії в імпульсному і безперервному режимах роботи.

4. Запропонувати феноменологічну модель процесу руху заряджених часток (електронів та іонів) у двоелектродній системі (діоді), що є конструктивною основою магнетрона і провести експериментальне дослідження проходження струму в такій двоелектродній системі.

5. Розробити пристрій, що включає магнетрон з двома виводами енергії і комутатор, для дискретного електричного перестроювання частоти. Експериментально дослідити багаточастотний режим роботи магнетрона з двома виводами енергії в імпульсному режимі роботи.

Об'єктом дослідження є процес взаємодії замкнутого електронного потоку з електромагнітним полем кільцевої анодної системи резонатора з урахуванням додаткового виводу енергії.

Предметом дослідження є режими стабілізації і перестроювання (підстроювання) частоти.

Методи дослідження. Для теоретичного вирішення поставлених у роботі завдань застосовувалися метод великих часток (для електронного потоку) і кінцево-різницевий метод (для вирішення рівняння Пуассона), а також метод еквівалентних схем стосовно дослідження характеристик перестроювання частоти «холодного» анодного блоку магнетрона і вихідних характеристик і процесів у магнетроні з двома виводами енергії. Як експериментальні методи застосовувалися методи вимірювання робочих характеристик, стабільності частоти і її перестроювання у 2-х та 3-х см діапазонах, а також вихідного спектра.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Набула подальшого розвитку математична модель «холодної» електродинамічної системи (анодного блоку) магнетрона з урахуванням наявності другого виводу енергії та математичні моделі «гарячого» магнетронного генератора з двома виводами енергії на основі методів великих часток і еквівалентних схем для вивчення його частотних властивостей.

2. Отримано теоретичні (методом еквівалентних схем) і експериментальні робочі і частотні характеристики магнетронного генератора з двома виводами енергії у 2-х та 3-х см діапазонах довжин хвиль.

3. Вперше експериментально виявлена нестійкість (аномальне зростання) анодного струму в двоелектродній структурі (діоді) в режимі насичення анодного струму. Запропоновано феноменологічну модель, що описує реальні статичні характеристики діода.

4. Запропоновано схеми на основі магнетронних генераторів з двома виводами енергії у 2-х та 3-х см діапазонах довжин хвиль, які дозволяють реалізувати електронне перестроювання (підстроювання) частоти в діапазоні сотень МГц.

5. Вперше реалізований багаточастотний режим роботи імпульсного магнетрона з двома виводами енергії з електричним перестроюванням частоти від імпульсу до імпульсу в діапазоні більш 200 МГц.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані теоретичні та експериментальні результати доцільно використовувати при розробці магнетронних генераторів з двома виводами енергії і практичної реалізації режиму електричного перестроювання частоти як в неперервному, так і імпульсному (в тому числі від імпульсу до імпульсу) режимі роботи магнетрона в діапазоні 200 ... 300 МГц в різних радіоелектронних системах.

Отримані теоретичні та експериментальні результати (в тому числі схемні та конструктивні рішення) стосовно конструкції магнетрона з двома виводами енергії застосовні для визначення електронного перестроювання частоти в діапазоні сотен МГц та автоматичного підстроювання частоти магнетронів у діапазоні десятків МГц. Це дозволить забезпечити стійку та стабільну генерацію магнетрона і підвищити надійність роботи всієї радіоелектронної системи в цілому.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень частково знайшли застосування у навчальному процесі Харківського національного університету радіоелектроніки для студентів за спеціальністю електронні прилади та пристрої.

Особистий внесок здобувача. Результати у роботах, опублікованих у співавторстві, полягають в його безпосередній участі в розробці методів дослідження [4, 21 – 24],

виборі методик вимірювань [6, 17, 19 – 20, 25], створенні, налаштуванні і проведенні експериментів на вимірювальних установках [2, 15 – 16, 18], в аналізі отриманих теоретичних і експериментальних результатів та їх фізичному поясненні [1, 7, 14], у постановці та виконанні чисельних експериментів за допомогою розробленої математичної моделі [3, 5, 12 – 13], постановці і вирішенні прикладних задач, пов'язаних із застосуванням магнетронів [8 – 11].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались на 14 українських і міжнародних конференціях та форумах: Міжнародна Кримська конференція “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” КрыМиКо (2006, 2007, 2009, 2010, 2011, Севастополь, Україна), 1-а Міжнародна наукова конференція “Глобальные информационные системы. Проблемы и тенденции развития” (2006, Туапсе, Росія), VI-та Харківська конференція молодих вчених “Радиофизика и электроника” (2006, Харків, Україна), 11-й Міжнародний молодіжний форум “Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке” (2 доклади, Харків, 2007), 1-ша Міжнародна конференція «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития» (2 доклади, Судак, 2008), III-тя Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми світлотехніки», (Харків, 2009), II-га Міжнародна конференція «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития», (Кацивселі, 2009), Науково-технічна конференція, присвячена 70-річчю ФДУП «НПП Исток» «СВЧ-электроника. 70 лет развития» (Росія, Фрязіно, 2013).

Публікації. Результати дисертаційного дослідження опубліковано у 25 наукових роботах: 7 робіт опубліковано у фахових науково-технічних виданнях, з них дві включено до наукометричної бази даних SCOPUS; 4 патенти; 14 – у матеріалах міжнародних та національних науково-технічних конференцій, з них 5 включено до наукометричної бази даних SCOPUS.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку літературних джерел, який включає 207 джерел, 3 додатки, в яких наведено параметри досліджуваних магнетронів та електричні схеми розроблених джерела постійної напруги і модулятора. Основний зміст дисертації викладено на 140 сторінках тексту, містить 66 рисунків і дві таблиці.

ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми роботи, показано зв'язок з науковими програмами, планами, темами, визначено мету і завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про особистий внесок автора, апробацію результатів та їх публікацію.

У **першому розділі** дисертаційної роботи аналізуються причини погіршення частотних характеристик магнетронних генераторів. Проведено порівняльний аналіз методів стабілізації частоти, які поділяються на декілька груп та показано, що той чи інший метод використовується в залежності від вимог до стабілізації частоти і може бути як менш ефективним – звичайне відключення напруги живлення розжарення, так і найдієвішим на сьогоднішній день – комбінованим, поєднуючи схему автоматичного підстроювання частоти з зовнішньою синхронізацією. Також, розглядаються способи боротьби з шумами, що є однією з причин погіршення вихідних характеристик магнетронів.

Проведений аналіз видів і способів перестроювання частоти магнетронів, а саме, обертальне перестроювання, перестроювання за допомогою переміщення аксіального

елементу, використання п'єзоелектричних матеріалів та зовнішніх реактивних елементів, дозволяє виділити їх, як ті, що використовуються сьогодні.

Наведені області застосування магнетронів, а також, перспективні напрями використання та розвитку, дають чітке розуміння затребуваності та майбутнього цих приладів.

У другому розділі дисертації розглядається математичне моделювання частотних характеристик магнетрона з двома виводами енергії. Як базові конструкції магнетронів з двома виводами енергії для досліджень були обрані низьковольтні магнетрони, що працюють у 2-х та 3-х см діапазонах у безперервному режимі роботи. Анодні блоки даних магнетронів є різнорезонаторними кільцевими (замкнутими) уповільнюючими системами типу «щілина - отвір».

В якості методів аналізу використовувався метод великих часток (PIC-метод) та метод еквівалентних схем. PIC-метод ґрунтується на самопогодженій системі рівнянь руху для швидкостей $\vec{v} = \vec{v}(r, \phi')$ та координат $\vec{r} = \vec{r}(r, \phi')$ електронів

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\eta(\vec{E}_0 - \text{grad}U + \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}), \quad (1)$$

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}, \quad (2)$$

рівняння Пуассона для розрахунку потенціалу просторового заряду (ПЗ) U_{m3} :

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(r \cdot \frac{\partial U_{m3}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 U_{m3}}{\partial \phi'^2} = -\frac{\rho(r, \phi')}{\epsilon_0} \quad (3)$$

і рівняння збудження

$$-\frac{dC_\gamma}{dt} + j(\omega - \omega_\gamma)C_\gamma = \frac{1}{2N_\gamma} \int_V \vec{J}(t) \vec{E}_\gamma dV, \quad (4)$$

де $N_\gamma = \frac{1}{2} \int_V \epsilon' \epsilon_0 \vec{E}_\gamma^2 dV = -\frac{1}{2} \int_V \mu' \mu_0 \vec{H}_\gamma^2 dV$ – норма власного виду коливань резонансної

коливальної системи, \vec{E}_γ і \vec{H}_γ – власне ВЧ поле γ - виду коливань «холодної» резонан-

сної системи, $\omega_\gamma = \omega'_\gamma - j\omega''_\gamma$ – комплексні частоти власних видів коливань; ω'_γ – кругова «холодна» частота власного виду; ω''_γ – коефіцієнт затухання. Вважаємо, що

$C_\gamma = |C_\gamma| e^{j\vartheta_\gamma}$, де $|C_\gamma|$ і $\vartheta_\gamma = (\omega - \omega'_\gamma)t = \Delta\omega t$ – модуль амплітуди і фаза "гарячої" ВЧ хвилі.

Для вивчення резонансних властивостей магнетрона з двома виводами енергії розглянемо «холодний» анодний блок такого магнетрона та його еквівалентну схему для випадку збудження π -виду.

На рис. 1 схематично наведено «холодний» анодний блок магнетрона з двома виводами енергії, один з яких є активним і узгоджений з активним навантаженням магнетрона $Z_n^a = R_n^a$, а до другого виводу, що називається реактивним, підключається реактивне навантаження $Z_n^p = jX_n^p$. Як таке навантаження застосовувався короткозамкнений від-

різок лінії передач (короткозамикаючий поршень) довільної довжини L і з вхідним опором, що дорівнює $Z_{ex} = Z_n^p$ і визначеним як

$$Z_{ex} = jZ_c \cdot \operatorname{tg} \frac{2\pi L}{\lambda_g}, \quad (5)$$

де Z_c – характеристичний опір лінії передач; λ_g – довжина хвилі в лінії передач. Як видно з (5), вхідний реактивний опір короткозамкненого відрізка залежить від його довжини L , зміна якої в діапазоні значень $0 \leq L \leq \lambda_g$ призводить до зміни реактивної складової навантаження $Z_n^p = jX_n^p$ (в площині реактивного виведення 22') і, також, призводить до зміни реактивної складової вхідного комплексного опору щодо активного виведення (площина 11') $Z_{ex}^{11'} = R_{ex}^{11'} + jX_{ex}^{11'}$. У цьому випадку резонансна частота «холодного» анодного блоку магнетрона визначається з умови, що

$$X_{ex}^{11'}(\omega) = 0. \quad (6)$$

Як видно, зміна реактивного навантаження X_n^p призводить до зміни реактивної складової вхідного комплексного опору $X_{ex}^{11'}$ і, як наслідок, змінюється резонансна частота «холодної» системи резонатора магнетрона.

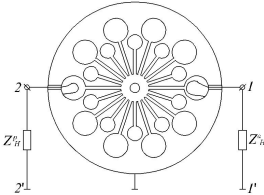


Рис. 1. Схематичне зображення «холодного» анодного блоку магнетрона з двома виводами енергії

Особливістю активного і реактивного виводів енергії є різна їх ступінь зв'язку з анодним блоком магнетрона. Це досягається за рахунок вибору різних значень добротності Q_{out} , що вноситься кожним виводом енергії.

Модельовання електродинамічної системи магнетрона з двома виводами проводиться для реального різнорезонаторного анодного блоку з кількістю резонаторів $N = 20$ і в припущенні, що робочий вид коливання в магнетроні розглядається як π -вид.

Для визначення вхідного комплексного опору анодного блоку магнетрона (з боку активного виводу) скористаємося методом одиничної ерс. Для цього у вихідному контурі еквівалентної схеми анодного блоку замість навантаження Z_n^a підключається еквівалентний генератор з ерс, яка дорівнює 1 В. У результаті комплексний вхідний опір у площині 11' може бути записано як

$$\dot{Z}_{ex}^{11'}(\omega) = R_{ex}^{11'}(\omega) + jX_{ex}^{11'}(\omega) = \frac{1}{\dot{I}_{K1}(\omega)}, \quad (5)$$

де $\dot{I}_{K1}(\omega)$ – комплексне значення струму у вихідному контурі РС.

З урахуванням (5) отримуємо, що рівняння для визначення резонансної частоти має такий вигляд

$$\operatorname{Im} \left[\frac{1}{\dot{I}_{K1}(\omega)} \right] = 0. \quad (6)$$

Для розрахунку струмів I_K у контурах еквівалентної схеми анодного блоку магнетрона скористаємося методом контурних струмів і для M незалежних контурів маємо таку систему алгебраїчних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{11}I_{K1} + A_{12}I_{K2} + A_{13}I_{K3} + \dots + A_{1(M-1)}I_{K(M-1)} + A_{1n}I_{KM} = E_{K1}; \\ A_{21}I_{K1} + A_{22}I_{K2} + A_{23}I_{K3} + \dots + A_{2(M-1)}I_{K(M-1)} + A_{2n}I_{KM} = E_{K2}; \\ A_{31}I_{K1} + A_{32}I_{K2} + A_{33}I_{K3} + \dots + A_{3(M-1)}I_{K(M-1)} + A_{3M}I_{KM} = E_{K3}; \\ \vdots + \vdots + \vdots + \dots + \vdots + \vdots = \vdots; \\ \cdot + \cdot + \cdot + \dots + \cdot + \cdot = \cdot; \\ A_{(M-1)1}I_{K1} + A_{(M-1)2}I_{K2} + A_{(M-1)3}I_{K3} + \dots + A_{(M-1)(M-1)}I_{K(M-1)} + A_{(M-1)M}I_{KM} = E_{K(M-1)}; \\ A_{M1}I_{K1} + A_{M2}I_{K2} + A_{M3}I_{K3} + \dots + A_{M(M-1)}I_{K(M-1)} + A_{MM}I_{KM} = E_{KM}. \end{array} \right. \quad (7)$$

Для випадку, коли кількість резонаторів анодного блоку магнетрона $N = 20$, ми маємо 42 незалежних контури, для яких система алгебраїчних рівнянь у матричній формі має вигляд

$$\dot{A} \cdot \dot{I}_K = \dot{E}, \quad (8)$$

$$\text{де } \dot{A} = \begin{pmatrix} \dot{A}_{11} & \dot{A}_{12} & \dot{A}_{13} & \dots & \dot{A}_{142} \\ \dot{A}_{21} & \dot{A}_{22} & \dot{A}_{23} & \dots & \dot{A}_{242} \\ \dot{A}_{31} & \dot{A}_{32} & \dot{A}_{33} & \dots & \dot{A}_{33} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \dot{A}_{421} & \dot{A}_{422} & \dot{A}_{423} & \dots & \dot{A}_{4242} \end{pmatrix} - \text{матриця комплексних опорів контурів,}$$

$$\dot{I}_K = \begin{pmatrix} \dot{I}_{K1} \\ \dot{I}_{K2} \\ \dot{I}_{K3} \\ \vdots \\ \dot{I}_{K42} \end{pmatrix} - \text{матриця комплексних значень контурних струмів, } E = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} - \text{матриця}$$

контурних ерс.

У результаті чисельного розв'язання системи алгебраїчних рівнянь (8) визначається наведений струм у вихідному контурі \dot{I}_{K1} . Після підстановки \dot{I}_{K1} в (6) для різних значень реактивного навантаження Z_n^p визначається крива перестроювання анодного блоку магнетрона.

Наявність згрупованої електронної хмари в просторі взаємодії магнетрона (конвекційного струму) змінює еквівалентну схему «холодного» анодного блоку. Це пов'язано з появою в еквівалентній схемі анодного блоку магнетрона, що працює на π -виді, $\gamma = N/2$ генераторів струму, які є джерелами енергії для збудження пов'язаних коливальних контурів і підтримки в них коливань.

Розрахунок еквівалентної схеми «гарячого» магнетрона проводиться методом вузлових потенціалів. Визначення потенціалів у вузлах еквівалентної електричної схеми дозволяє розрахувати струми у всіх її ланках і визначити потужність, що виділяється в активному навантаженні магнетрона.

Третій розділ дисертації присвячений теоретичним та експериментальним дослідженням факторів, які впливають на частотні властивості магнетронів, у тому числі, досліджується перестроювання частоти у магнетроні з двома виводами енергії у неперервному режимі роботи.

Результати математичного моделювання показали, що фазовий зсув спиць ПЗ щодо максимуму тангенціальної складової ВЧ поля і його вплив на роботу магнетрона є визначальним з точки зору частотної стабільності і стійкості роботи приладу. В першу чергу, це стосується стабільності частоти генерації (девіації частоти) в ході зміни робочого режиму роботи магнетрона (зміна анодної напруги в межах робочого π -виду коливань). Тому детальне вивчення механізму фазового зсуву спиць ПЗ за допомогою математичних моделей, заснованих на методі великих часток (PIC - метод) дозволяє зрозуміти роль процесу фазового групування та його впливу на стабільність частоти генерації магнетрона. З цією метою було розглянуто рівняння збудження магнетрона (4) і проаналізовано його праві частини, які визначають поведінку амплітуди і фази (частоти) ВЧ поля. Показано, що величина фазового набігу ВЧ хвилі \mathcal{Q}_γ за одиницю часу визначає частоту генерації магнетрона, а її флуктуації залежать від величини реактивної складової інтеграла збудження (права частина рівняння збудження (4)). Для підвищення стабільності частоти генерації необхідно, щоб у сталому режимі роботи магнетрона значення реактивної складової інтеграла збудження було б якоюсь постійною мінімальною величиною з незначними коливаннями щодо її середнього значення. У свою чергу, значення правих частин інтеграла збудження залежать від координат і швидкостей електронів у просторі взаємодії. Аналіз результатів чисельних розрахунків показує, що електрони в магнетроні рухаються до анода по циклоїдним траєкторіях. Вид і характер траєкторій їх руху змінюється в залежності від фаз вильоту з катода $-\frac{\pi}{2} < \Phi' < +\frac{\pi}{2}$.

Такий різний характер руху електронів призводить до того, що випромінювання не є суворо когерентним, тобто його енергія і частота не суворо фіксовані в часі, а розподілені в деякому енергетичному ΔW_e і частотному $\Delta \omega_e$ інтервалах. У результаті спостерігається незначне розширення спектральної лінії випромінювання з шириною, яка визначається інтервалом $\Delta \omega_e$ ($\Delta \omega_e \ll \Delta \omega_p$), де $\Delta \omega_p$ – смуга пропускання резонатора анодного блоку, в межах якої потужність випромінювання падає вдвічі в порівнянні з її значенням на центральній частоті випромінювання ω .

Таким чином, спектральні характеристики генерованих магнетроном коливань значною мірою залежать від поведінки електронної хмари в просторі взаємодії, а також характеру і регулярності руху електронів.

Експериментальні дослідження впливу на частоту генерованих магнетроном коливань температури і нестабільності напруги живлення показали, що застосування примусового повітряного охолодження в порівнянні з конвективним охолодженням дозволяє управляти процесом встановлення температури анодного блоку, зростання температури якого викликає зміну генерованої частоти. При цьому як в режимі малих амплітуд ВЧ поля при $I_a = 50$ mA (низьковольтна ділянка вольтамперної характеристики (ВАХ)), так і в режимі великих амплітуд при $I_a = 150$ mA (високовольтна ділянка ВАХ) із зростанням температури частота магнетрона зменшується, тобто спостерігається лінійне розширення внутрішнього об'єму анодного блоку і збільшення значень еквівалентних ємності $C_p(t)$ та індуктивності $L_p(t)$ анодного блоку. В цілому слід зазначити, що в силу значної інерційності теплових процесів їх вплив на процес встановлення частоти магнетронів можна розглядати як аперіодичний процес.

З іншого боку, не менш важливим фактором стабільної роботи магнетронів є вибір і використання джерел електроживлення з необхідними вихідними параметрами (анодною напругою і напругою розжарення).

Встановлено, що вихідний спектр магнетрона є складним модульованим за амплітудою і частотою вихідним сигналом з дев'ятию частоти рівною 340 кГц для обраного випадку дослідження. Дане значення девіації частоти отримано за умови, що пульсації анодної напруги не перевищують $\pm 0,1\%$ і відповідають стабільності частоти вихідного сигналу порядку $6,0 \times 10^{-5}$. Вимкнення струму розжарення після запуску магнетрона (розрив ланцюга розжарення) призводить до незначного зменшення девіації частоти до 280–300 кГц. Із зростанням пульсацій напруги джерела живлення (нестабільність за напругою більш $\pm 0,4\%$) девіація частоти збільшується і перевищує 8 МГц.

З іншого боку, експериментальні дослідження показали, що флуктуації частоти магнетрона мають періодичний характер з частотою 50 Гц. Це свідчить про можливий вплив на роботу магнетрона мережної завади та шуму від джерела живлення і вказує на необхідність застосування додаткових заходів щодо захисту (фільтрації) ланцюгів живлення магнетрона від зовнішніх і внутрішніх завад, а також екранування підведення живлення до магнетрона.

Експериментальні дослідження залежності відносної зміни частоти генерації магнетрона від амплітуди зовнішньої завади за умови, що $I_a = 100$ мА, показали, що зі зменшенням амплітуди зовнішньої завади нестабільність частоти генерації магнетрона зменшується і досягає прогнозованого мінімального значення 2×10^{-5} (рис. 2). Як показує аналіз, подальше підвищення стабільності частоти магнетрона пов'язано з типом використовуваного катода, а також можливим застосуванням різних шляхів стабілізації частоти або її програмованого перестроювання. У цьому випадку практичний інтерес викликають конструкції магнетронів із зовнішнім стабілізуючим резонатором (коаксіальний магнетрон) і магнетрон з додатковим виводом енергії (реактивний вивід).

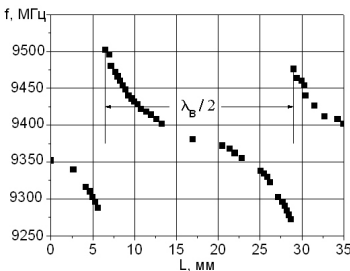


Рис. 3. Експериментальна крива перестроювання частоти «холодного» анодного блоку з двома виводами енергії

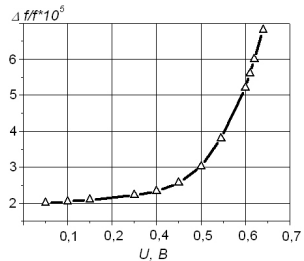


Рис. 2. Експериментальна залежність відносної зміни частоти генерації 3-х см магнетрона від амплітуди зовнішньої завади

На рис. 3 наведено експериментальну криву перестроювання частоти «холодного» анодного блоку 3-х см магнетрона з двома виводами енергії.

Як видно, зміна довжини лінії передач (хвилеводу) L в реактивному виводі енергії призводить до періодичної зміни частоти генерації магнетрона з просторовим періодом $\lambda_g / 2$. Отримана експериментальна крива перестроювання частоти «холодного» анодного блоку показує, що величина перестроювання частоти перевищує 200 МГц.

Використовуючи математичну модель магнетрона на основі методу еквівалентних схем розглянемо перестроювання частоти в «холодному» анодному блоці магнетрона з двома виводами енергії.

На рис. 4 показано теоретичні криві перестроювання частоти «холодного» анодного блоку з двома виводами енергії для різних значень ємності малих резонаторів C_2 . При цьому значення ємності C_2 для базової конструкції магнетрона розраховувалося за методикою, описаною у монографії Самсонова (крива 1). Як видно, з наведених результатів, збільшення ємності C_2 «холодного» анодного блоку, відповідно в 1,1 (крива 2) і 1,15 раз (крива 3) викликає зсув кривої перестроювання в бік збільшення частоти і зростання діапазону її перестроювання. Теоретично розрахований діапазон перестроювання частоти «холодного» анодного блоку складає (380...500) МГц для різних значень C_2 .

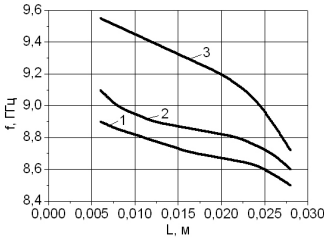


Рис. 4. Зміна частоти «холодного» анодного блоку з двома виводами енергії залежно від довжини короткозамкненого відрізка

Таким чином, зміна геометричних розмірів анодного блоку з двома виводами енергії дозволяє управляти параметрами його еквівалентної схеми (L_3 , C_3 і R_3), що, у свою чергу, робить можливим управління ходом кривої перестроювання частоти.

Розглянемо робочі характеристики і частотне перестроювання магнетронів з двома виводами енергії в безперервному режимі. Дослідження проводилися з низьковольтними безперервними магнетронами 2-х та 3-х см діапазонів з оксидними катодами непрямого розжарення.

На рис. 5 наведено експериментальні ВАХ (а), крива перестроювання частоти (б) і зміна потужності ВЧ сигналу в діапазоні перестроювання частоти (в) магнетрона з двома виводами енергії 3-х см діапазону.

Аналіз робочих характеристик магнетрона показує, що зміна реактивної компоненти в пасивному виводі енергії магнетрона практично не впливає на характер поведінки ВАХ магнетрона до величини анодного струму $I_a = 100$ мА. При $I_a > 100$ мА спостерігається значне розходження в поведінці ВАХ. Це пов'язано зі збільшенням теплового навантаження на анодний блок магнетрона і значним (до 80°C) підвищенням його температури. В результаті необхідно збільшувати відвід тепла від поверхні анодного блоку за рахунок зростання повітряного потоку (повітряне охолодження). Для досліджень режиму перестроювання частоти магнетрона вибирався електричний режим роботи, відповідний анодній напрузі $U_a = 580$ В, магнітному полю $B_0 = 0,25$ Тл і анодному струму $I_a = 0,08$ А. Діапазон перестроювання частоти магнетрона для обраної робочої точки складає більше 230 МГц при перепаді потужності магнетрона в діапазоні перестроювання в 1,6 рази.

Для стабілізації частоти генерованих коливань у магнетронах необхідно стабілізувати значення анодного струму $I_a = \text{const}$. Цього можна досягти за рахунок стабілізації як анодної напруги U_a , так і струму емісії з катода.

Для розуміння особливостей процесу емісії електронів з катода і формування електронних згустків (спиць ПЗ) у просторі взаємодії приладу з урахуванням усіх можливих видів емісії електронів (термо- і вторинно-електронної емісії) розглянемо електронні

процеси в діодній структурі (циліндричний діод) і проаналізуємо експериментально її статичні струмові характеристики.

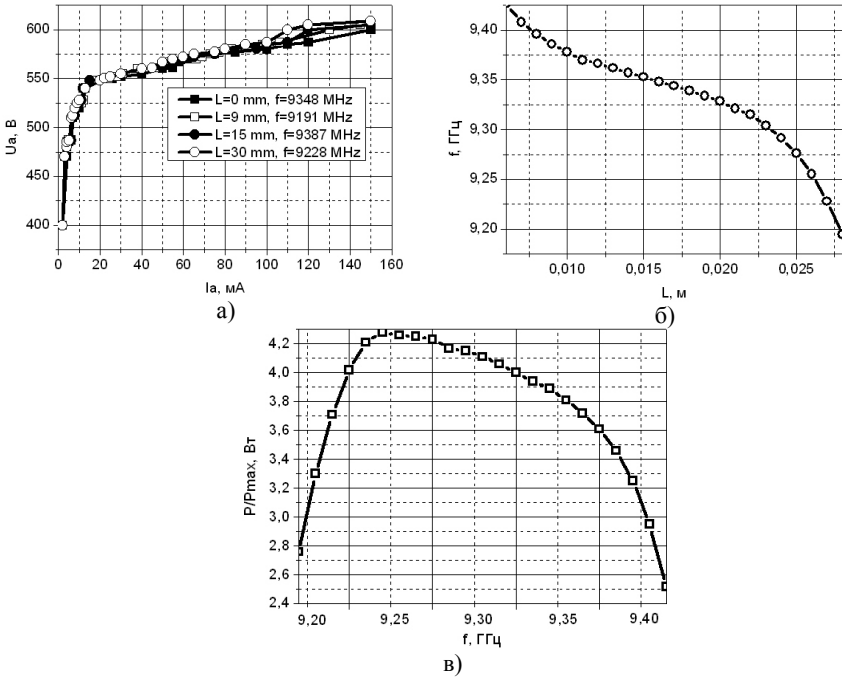


Рис. 5. Експериментальні ВАХ у залежності від довжини поршня (а), крива перестроювання «гарячої» частоти (б) і зміна потужності в діапазоні перестроювання частоти (в) 3-х см магнетрона в безперервному режимі роботи

Як діодна структура розглянемо циліндричний діод з оксидним катодом непрямого розжарення і такими геометричними параметрами: радіус катода $r_c = 0,925$ мм, радіус анода $r_a = 1,25$ мм, висота анода $h_a = 4$ мм, напруга розжарення $U_H = 6,3$ В. Як матеріал анода використовувалася вакуумна мідь. Згідно з уявленнями про фізичні процеси в діодах, розглянемо основні теоретичні залежності, що визначають роботу циліндричного вакуумного діода.

Для визначення щільності анодного струму в області ПЗ циліндричного діода скористаємося виразом

$$j = 2.33 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{S_a \cdot (U - U_m)^{\frac{3}{2}}}{((r_a - r_c) - x_m)^2} \cdot \left[1 + 2.66 \cdot \left(\frac{U_T}{U - U_m} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \cdot \gamma \quad (9)$$

В області насичення передбачається, що анодний струм або струм насичення не залежить від U_a і дорівнює струму емісії з катода. Для знаходження щільності катодного струму в області насичення з урахуванням ефекту Шоткі скористаємося виразом

$$J_H = J_0(T_c) \cdot \exp \left(\frac{e^{\frac{3}{2}}}{k \cdot T_c} \cdot \sqrt{\frac{U}{r_a - r_c}} \right) \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \quad (10)$$

На рис. 6 наведено експериментальні анодні характеристики для трьох зразків діодів (№ 1, № 2 та № 3) з оксидним катодом і залежності температури зовнішньої поверхні анодів від анодної напруги при напрузі розжарення $U_H = 4,5$ В.

Як видно, для анодних характеристик досліджуваних зразків спостерігається наявність явно виражених областей: області ПЗ та області насичення, а також появи додаткової області з аномальним зростанням анодного струму при $U_a > U_a^{\max}$. При цьому значення U_a^{\max} для кожного зразка було різним, тобто $U_a^{\max 1} = 80$ В, $U_a^{\max 2} = 110$ В і $U_a^{\max 3} = 180$ В. Різниця анодних напруг U_a^{\max} , за яких проявляється ефект аномального зростання анодного струму в досліджуваних зразках діодів, пояснюється різною емісійною здатністю катодів, використовуваних у даних зразках. Напругу U_a^{\max} для кожного зразка можна розглядати як порогову, при досягненні якої відбувається електронно-стимульована десорбція іонів з поверхні анодів. Дані іони під дією прискорюючої напруги $U_a > U_a^{\max}$ бомбардують поверхню оксидного катода, викликаючи додатковий струмовідбір з катода завдяки вторинній електронній емісії і, як наслідок, викликаючи аномальне збільшення анодного струму.

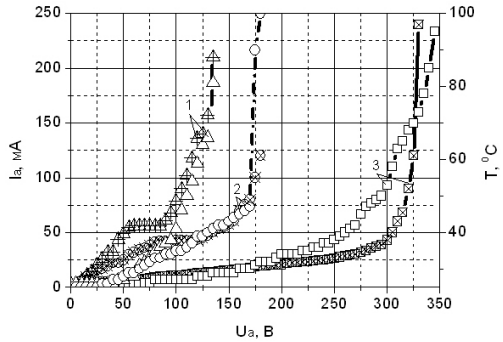


Рис. 6. Експериментальні залежності анодного струму і температури анода від анодної напруги для трьох зразків діодів (№ 1, № 2 та № 3)

На рис. 7 показано анодні характеристики діода № 2, отримані для різних значень напруг розжарення U_H оксидного катода.

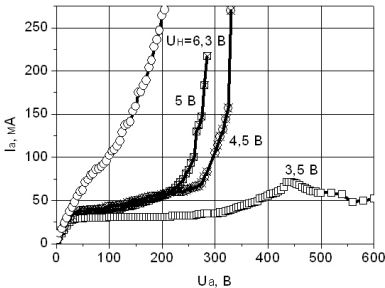


Рис. 7. Експериментальні анодні характеристики діода № 2 для різних напруг розжарення оксидного катода

Як видно, поведінка анодних характеристик залежить від величини струму емісії з катода. Так, при $U_H = 6,3$ В (випадок нормальної емісії) на анодних характеристиках діода перехід від режиму ПЗ у режим насичення пов'язаний з незначною зміною нахилу характеристики («аномальний» ефект Шоткі). Зі зменшенням напруги розжарення $U_H = 5$ В і $4,5$ В (випадок недорозжарення) на анодних характеристиках все більш явно проявляється область насичення з наступним переходом в область аномального зростання анодного струму. При значному не-

дорозжаренні, коли $U_n = 3,5$ В, більш явно проявляється на анодній характеристиці область насичення. Подальше збільшення анодної напруги, коли $U_a > 250$ В, викликає спочатку зростання анодного струму до $U_a \approx 430$ В, а потім його зрив.

На рис. 8 наведено теоретичну (крива 1) і експериментальну анодні характеристики діода (крива 2), а також експериментальну характеристику температури поверхні анодного блоку (крива 3). Теоретичну анодну характеристику отримано з використанням виразів (11) і (12), відповідно, для областей ПЗ і насичення.

Розрахунки показали, що теоретично розрахована температура катода в режимі насичення при $I_a = 40$ мА (область III) досягає 104 °С. Розбіжність кривих 1 і 2 в області II пояснюється відмінністю реальної середньої температури катода з урахуванням неоднорідності її зміни по всій поверхні катода від теоретично обраної для розрахунків. У свою чергу, розбіжність теоретичної та експериментальної ВАХ діода в області III пояснюється тим, що струм розжарення, який проходить по катоду, створює падіння потенціалу по його довжині, внаслідок чого потенціали різних точок катода неоднакові і поступово збільшуються від негативного кінця катода до позитивного. Через цю нееквівалентність поверхні катода потенціал анода щодо різних ділянок катода буде різним. Результатом цього є те, що експериментальна характеристика завжди проходить нижче теоретичної. При $U_a^{\max} > 110$ В поведінка експериментальної анодної характеристики змінюється. Це пов'язано спочатку з незначним зростанням, а потім експоненціально наростаючим анодним струмом і, як наслідок, переходом роботи діода з режиму насичення (область III) в режим аномального зростання анодного струму (область IV).

Таким чином, отримані експериментальні результати аномального збільшення анодного струму в діодній структурі можна пояснити бомбардуванням іонами поверхні катода під дією сильного електричного поля, існуючого в робочому просторі діода. Так, при переході з області III в область IV іони бомбардують поверхню катода, з енергією близько $100 - 120$ eV, що відповідає коефіцієнту вторинної емісії $\sigma > 1$. Цього достатньо для ініціювання процесу вторинно-емісійного розмноження електронів на поверхні катода. В результаті з поверхні катода емітуються додаткові вторинні електрони. З іншого боку, бомбардування іонами поверхні оксидного катода викликає зростання й температури, що, в свою чергу, викликає зростання струму термоелектронної емісії. В цілому, дані процеси призводять до збільшеної емісії електронів з катода, яка експериментально розглядається як аномальне зростання анодного струму.

Четвертий розділ присвячений проведенню експериментальних досліджень перестроювання частоти в магнетроні з двома виводами енергії для реалізації багаточастотного імпульсного режиму роботи магнетрона.

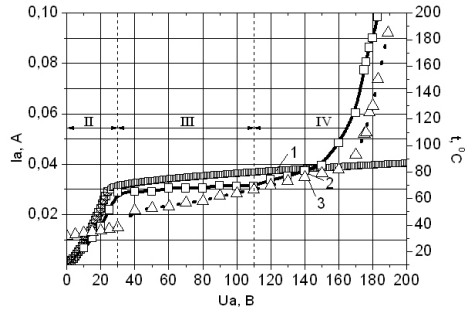


Рис. 8. Теоретична (1) і експериментальна (2) анодні характеристики діодів, відповідні області ПЗ (область II), області насичення (область III) і області аномального зростання анодного струму (область IV), а також залежність зростання температури анода від прикладеної напруги (3)

Для реалізації імпульсного режиму роботи магнетрона з двома виводами енергії застосовується модулятор, який забезпечує подачу на катод магнетрона анодного імпульсу негативної полярності $-U_k$ тривалістю $\tau_u \approx 1...20$ мкс і шпаруватістю $Q \approx 20...300$.

На рис. 9 показано структурну схему магнетрона з двома виводами енергії, що реалізує імпульсний багаточастотний режим роботи магнетрона з перестроюванням частоти від імпульсу до імпульсу. Дана схема магнетронного генератора з перестроюванням частоти від імпульсу до імпульсу містить магнетрон 1 з двома виводами енергії 2 і 3, модулятор 4, імпульсне джерело живлення перемикача 7. НВЧ енергія, генерована магнетроном, через основний (активний) вивід енергії 2 виводиться в зовнішнє навантаження 8. До реактивного виводу НВЧ енергії 3 підключається перемикач 5 на p - i - n діодах D_1 і D_2 і короткозамкнені відрізки хвилеводів 6, довжини яких вибираються з інтервалу $0 \leq l \leq \lambda_g$, що забезпечує генерацію магнетрона на двох частотах f_{01} і f_{02} .

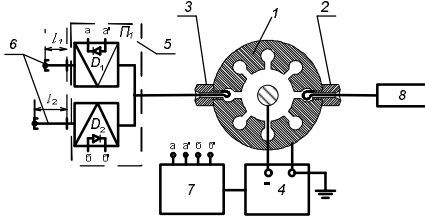


Рис. 9. Структурна схема магнетрона з двома виводами енергії з перестроюванням частоти від імпульсу до імпульсу

Від модулятора 4 й імпульсного джерела живлення перемикача 7, робота якого синхронізована з модулятором 4, на магнетрон подаються імпульси анодної напруги U_a , а на діоди перемикача D_1 і D_2 – імпульси керуючих напруг U_{a-a} і U_{b-b} . Схематично епюри даних імпульсів, а також їх експериментальні значення наведено на рис. 10.

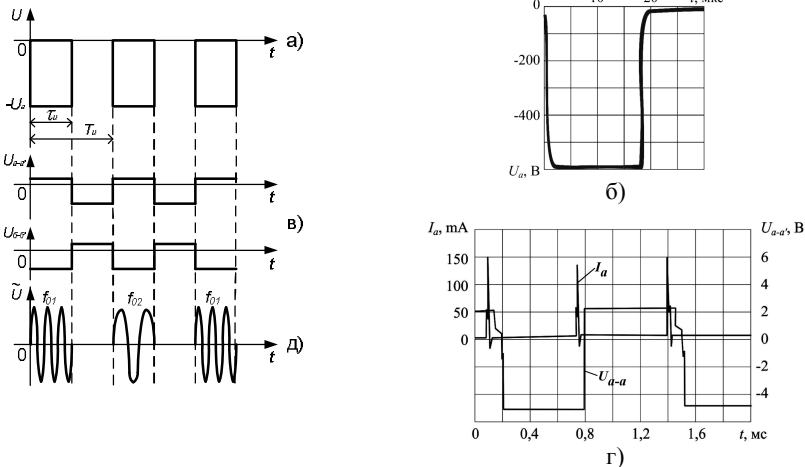


Рис. 10. Імпульси анодної напруги (а) та їх експериментальний вигляд (б), управляючі імпульси додаткового джерела живлення (в) та їх експериментальний вигляд з урахуванням імпульсів анодного струму (г), а також епюри вихідних НВЧ імпульсів магнетрона з двома виводами енергії (д)

Управляючі імпульси U_{a-a} і U_{b-b} , синхронізовані пристроєм 7 з імпульсами анодної напруги U_a , випадковим чином або за точно заданим законом управляють в паузах між імпульсами анодної напруги (або НВЧ вихідними імпульсами) режимом перемикавання зовнішнього навантаження реактивного виводу магнетрона, як які можна використовувати N - короткозамкнені відрізки лінії передач (хвилеводів) різної довжини l_1, l_2, \dots, l_N .

На рис. 11 наведено експериментально отримані криві перестроювання частоти і зміна рівня вихідної потужності 3-х см магнетрона з двома виводами енергії в діапазоні перестроювання частоти.

Як навантаження реактивного виводу енергії магнетрона використовувався відрізок хвилеводу з короткозамикаючою пластиною у вигляді рухомого поршня. Як видно з рис. 11, діапазон перестроювання частоти магнетрона для обраної робочої точки на ВАХ перевищує 230 МГц при максимальній безперервній потужності в навантаженні активного виводу енергії більше 28 Вт

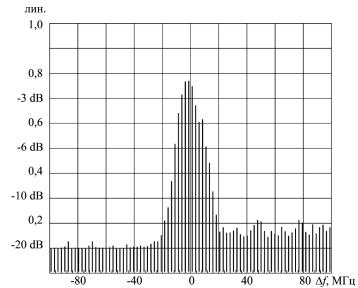
Рис. 11. Експериментальна крива перестроювання частоти і зміни рівня вихідної потужності магнетрона з двома виводами енергії

імпульсів управління роботою НВЧ перемикача. На рис. 12 показано форми спектрів коливань на виході магнетрона на частотах f_{01} і f_{02} , відповідно. Для роботи магнетрона в імпульсному режимі обиралася робоча точка на ВАХ, що відповідає $U_a = 610$ В і $I_a = 0,15$ А. Тривалість імпульсу анодної напруги складала $\tau_u = 16$ мкс, а шпаруватість – 40. Різниця за частотою між сигналами $\Delta f = f_{01} - f_{02}$ складала більше 90 МГц. Тривалість імпульсів керування роботою перемикача обиралася рівною $\tau_{cy} = 640$ мкс.

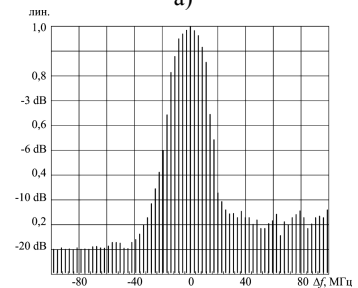
В одному варіанті, коли діод D_1 відкритий, а діод D_2 замкнений, до реактивного виводу магнетрона підключається короткозамкнений відрізок хвилеводу довжиною l_2 . При цьому частота генерації магнетрона складала $f_{01} = 9405$ МГц, а значення анодного струму – $I_a = 0,15$ А. Зміна полярності імпульсів управління, що подаються на діоди D_1 і D_2 , призводить до зміни реактивного навантаження і підключення до магнетрона коротко-

зміна рівня вихідної потужності 3-х см магнетрона з двома виводами енергії в діапазоні перестроювання частоти.

Для реалізації імпульсного режиму роботи магнетрона використовувався модулятор, робота якого була синхронізована з джерелом



а)



б)

Рис. 12. Осцилограми форм спектрів коливань на виході магнетрона з двома виводами енергії на частотах f_{01} (а) і f_{02} (б)

замкненого відрізка хвилеводу довжиною l_1 . У цьому випадку частота генерації змінюється і дорівнює $f_{02} = 9310$ МГц, а анодний струм – $I_a = 0,137$ А. Аналіз вихідних сигналів на частотах f_{01} і f_{02} показує, що відмінності у формах спектрів коливань пов'язані зі зміною величини анодного струму (більш, ніж у 1,11 разів), а також впливом на роботу магнетрона завад від джерела імпульсного живлення (модулятора) і недостатнім екрануванням ланцюгів живлення магнетрона від можливих завад.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розглянуто актуальну задачу дослідження особливостей фізики електронно-хвильових процесів у магнетронах, що обмежують поліпшення їх частотних властивостей. Для вирішення поставлених задач було запропоновано та вибрано конструкції низьковольтних магнетронів 2-х та 3-х см діапазонів з двома виводами енергії. Основні наукові та практичні результати роботи полягають у тому, що:

1. Набула подальшого розвитку чисельна багатоперіодна математична модель магнетрона з двома виводами енергії на основі методу великих часток (РІС-метод) для вивчення динаміки замкнутого електронного потоку (рівняння руху), кінцево-різницевого методу для розрахунку сил ПЗ (рівняння Пуассона) та показано можливість застосування даної моделі щодо моделювання частотних характеристик у магнетронах з двома виводами енергії.

2. Розроблено чисельно-аналітичну модель «холодного» анодного блоку магнетрона з двома виводами енергії на основі методу еквівалентних схем. На основі даної математичної моделі було розроблено модель «горячого» магнетрона з двома виводами енергії. Створено феноменологічну модель магнетрона для вивчення шумових явищ в електронній хмарі. Показано зв'язок явищ нестабільності та перестроювання частоти з електронним механізмом фазового угруповання електронного потоку.

3. Проведено аналіз теоретичних та експериментальних анодних характеристик циліндричних діодів з розрізним анодом. Показано, що в області значень анодної напруги, що перевищує деяке порогове значення, спостерігається ефект самовільного зростання анодного струму і збільшення розбіжності між теоретичними та експериментальними характеристиками діодних структур. Встановлено, що при цій напрузі спостерігається електронно-стимульована десорбція іонів з поверхні анода з подальшим їх бомбардуванням катода, що викликає вторинну електронну емісію з катода і додаткове зростання анодного струму. Даний процес супроводжується значним збільшенням температури анода, обумовленої бомбардуванням електронами його поверхні. Отримані експериментальні результати дозволяють розширити наші уявлення про класичну поведінку статичних характеристик вакуумних діодів і доповнити їх областю зростання анодного струму, поява якої пов'язана з електронним та іонним бомбардуванням електродів діода і появою додаткової термо та вторинної емісії електронів з катода.

4. Розглянуті особливості перестроювання частоти в магнетронах у безперервному режимі їх роботи показали, що можливості перестроювання частоти класичної конструкції магнетрона з одним виводом енергії обмежені як з точки зору діапазону перестроювання, так і з точки зору її швидкодії. Для вирішення задачі поліпшення частотних характеристик пропонується конструкція магнетрона з двома виводами енергії. Дана конструкція може бути використана як для вирішення задачі стабілізації частоти магнетрона, так і для перестроювання його частоти. Запропоновано функціональні схеми на основі магнетрона з двома виводами енергії для практичної реалізації стабілізації

частоти і її перестроювання (підстроювання) в безперервному режимі роботи магнетрона з двома виводами енергії.

4. Експериментально виміряно перестроювання частоти в «холодному» анодному блоці магнетрона з двома виводами енергії. Теоретично розраховані криві перестроювання частоти для «холодного» анодного блоку показали, що діапазон перестроювання можна розширити до $(450 \div 500)$ МГц за рахунок зміни параметрів резонансної системи. Експериментально виміряні перестроювання резонансної частоти і зміна потужності ВЧ сигналу в діапазоні перестроювання частоти магнетрона з двома виводами енергії в безперервному режимі роботи показали, що діапазон перестроювання частоти для обраної робочої точки складає більше 230 МГц при перепаді вихідної потужності в діапазоні перестроювання в 1,6 рази.

5. Розглянуто режим електричного перестроювання (підстроювання) частоти в 3-х см магнетроні з двома виводами енергії в безперервному режимі роботи. Для цього до реактивного виводу енергії магнетрона підключалась діодна секція, яка містить варактор 2А602А. Максимальний діапазон перестроювання частоти від напруги зсуву на варакторі не перевищив 10 МГц. Крім того, в безперервному режимі роботи магнетрона застосування варактора в діодній секції обмежується рівнем можливої потужності генерації магнетрона десятками ват.

6. Запропоновано й експериментально реалізовано на основі 3-х см магнетрона з двома виводами енергії макет пристрою, який дозволяє здійснити електронне перестроювання частоти від імпульсу до імпульсу в паузах між ВЧ імпульсами тривалістю $\tau_a \approx 1,0, \dots, 20,0$ мкс та шпаруватістю 20, \dots , 100. Для перемикання частоти в даному пристрої застосовується електронний комутатор на р-і-n діодах безкорпусної конструкції, робота якого синхронізована з роботою модулятора магнетрона.

7. Показано, що для робочої точки на ВАХ, що відповідає $U_a = 610$ В та $I_a = 0,15$ А, граничний діапазон перестроювання частоти генерації імпульсного магнетрона перевищує 230 МГц при середній потужності генерації 28 Вт, тривалості імпульсів 16 мкс і шпаруватості, що дорівнює 40. Встановлено, що різниця за частотою ВЧ сигналів сусідніх імпульсів складала більше 90 МГц, а перепад рівня вихідної потужності цих сигналів у магнетроні не перевищив 1,25 рази при незначних змінах форми спектрів коливань, викликаних, в основному, недостатньо ефективним екрануванням і застосуванням додаткових заходів щодо захисту (фільтрації) ланцюгів живлення магнетрона.

8. Експериментально показано, що перестроювання частоти від імпульсу до імпульсу можна розглядати як режим багаточастотної генерації імпульсного магнетрона з двома виводами енергії. При цьому кількість генерованих магнетроном частот залежить від кількості каналів перемикання комутатора, сполученого з реактивним виводом магнетрона.

ПЕРЕЛІК РОБІТ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Чурюмов Г.И., Экезли А.И. Эффект аномального увеличения анодного тока в диодных структурах/ Журнал нано- и электронной физики. – 2014. – Т. 6, №1. – С. 01018-1 – 01018-3.

2. Чурюмов Г.И., Экезли А.И. Исследование режима перестройки частоты в импульсном магнетроне с двумя выводами энергии/ Электронная техника, сер. 1, СВЧ-техника. – 2014. – № 2 (521). – С. 39 – 45.

3. Чурюмов Г.И., Экезли А.И., Басрави К.М., Исаева Е.Б. Математическое модели-

рование перестройки частоты в магнетроне с двумя выводами энергии (метод эквивалентных схем) / Прикладная радиоэлектроника – 2014. – №1, том 13. – С. 51 – 57.

4. G. I. Churyumov, A. V. Gritsunov and A.I. Ekezy Computer Simulation of Noise Generation in Magnetron/ Applied Radio Electronics. – 2013. – №1, vol. 12. – P. 58 – 63.

5. Чурюмов Г.И., Экезлы А.И. Моделирование частотных характеристик магнетрона с двумя выводами энергии/ Прикладная радиоэлектроника. – 2012. – №1, том 11. – С. 63 – 71.

6. Чурюмов Г.И., Одаренко Е.Н., Фролова Т.И., Старчевский Ю.Л., Герасимов В.П., Иванцов В.П., Экезлы А.И. Качественный анализ теплового режима работы безэлектродной серной лампы с СВЧ накачкой/ Прикладная радиоэлектроника. – 2010. – №2, том 9. – С. 232 – 239.

7. Мачехин Ю.П., Чурюмов Г.И., Одаренко Е.Н., Фролова Т.И., Старчевский Ю.Л., Экезлы А.И. Безэлектродная серная лампа с СВЧ-накачкой / Светотехника и электроэнергетика. – 2008. – №3. – С. 9 – 14.

8. Пат. 98574 Україна, МПК Н 01 J 25/00 Магнетронний генератор з перестроююю частоти від імпульсу до імпульсу / Чурюмов Г. І., Екезлі А. І., Сивоконь К. В., заявник і патентовласник Харківський національний університет радіоелектроніки. – а201104603, заявл. 14.04.11, опубл. 25.05.12, Бюл. №10.

9. Пат. 52440 Україна, МПК Н 01 J 25/00 Магнетронний генератор / Чурюмов Г. І., Фролова Т. І., Старчевський Ю.Л., Екезлі А. І., Сивоконь К. В., заявник і патентовласник Харківський національний університет радіоелектроніки. – u201002528, заявл. 9.03.10, опубл. 25.08.10, Бюл. №16.

10. Пат. 49243 Україна, МПК Н 01 J 25/00 Магнетронний генератор / Чурюмов Г. І., Фролова Т. І., Старчевський Ю.Л., Екезлі А. І., Сивоконь К. В., заявник і патентовласник Харківський національний університет радіоелектроніки. – u200910637, заявл. 21.10.09, опубл. 26.04.10, Бюл. №8.

11. Пат. 42293 Україна, МПК Н 01 J 25/00 Магнетронний генератор / Чурюмов Г. І., Фролова Т. І., Екезлі А. І., Сивоконь К. В., заявник і патентовласник Харківський національний університет радіоелектроніки. – u200901408, заявл. 19.02.09, опубл. 25.06.09, Бюл. №12.

12. Чурюмов Г. И., Экезлы А. И. Низковольтный магнетрон с двумя выводами энергии для многочастотной перестройки частоты от импульса к импульсу: материалы науч.-технич. конф., посвящ. 70-летию ФГУП «НПП Исток» («СВЧ-электроника. 70 лет развития»), (Россия, Фрязино, 15-16 мая 2013 г.) / Фрязино – 2013.

13. Чурюмов Г.И., Иванцов В.П., Экезлы А.И., Ольховский В.А., Малышко В.В. Магнетронный генератор с перестройкой частоты от импульса к импульсу: материалы 21-й Междунар. Крымской конф. («СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»), (Севастополь, 12-16 сентября 2011 г.) / Севастоп. нац. технич. ун-т. – 2011.

14. Чурюмов Г. И., Экезлы А. И., Являнский И. Ю. Эффект аномального увеличения анодного тока в диодных структурах: материалы 20-й Междунар. Крымской конф. («СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»), (Севастополь, 13-17 сентября 2010 г.) / Севастоп. нац. технич. ун-т. – 2010.

15. Чурюмов Г. И., Иванцов В. П., Старчевский Ю. Л., Экезлы А. И. Влияние источника питания на частотные искажения в магнетронах: материалы 19-й Междунар. Крымской конф. («СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»), (Севастополь, 14-18 сентября 2009 г.) / Севастоп. нац. технич. ун-т. – 2009.

16. Чурюмов Г.И., Одаренко Е.Н., Фролова Т.И., Старчевский Ю.Л., Васянович А.В., Иванцов В. П., Экезлы А.И., Сивоконь К.В. Пути улучшения характе-

ристик магнетронных генераторов для систем радиолокации и связи: сб. науч. трудов II Международной конф. («Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития»), (Харьков – Кацевели, 30 сентября – 3 октября 2009 г.) / Харьк. нац. ун-т. радиэлектр. – 2009.

17. Мачехин Ю.П., Чурюмов Г.И., Васянович А.В., Одаренко Е.Н., Фролова Т.И., Старчевский Ю.Л., Экезли А.И., Иванцов В.П., Галстян С.Г., Назаренко Л.А. Разработка безэлектродной серной лампы с СВЧ-накачкой: матеріали III Міжнар. наук.-техн. конф. («Сучасні проблеми світлотехніки»), (Харків, 22-23 квітня 2009 р.) / Харьк. нац. акад. міського господарства. – 2009.

18. Чурюмов Г.И., Иванцов В.П., Одаренко Е.Н., Сивоконь К.В., Старчевский Ю.Л., Фролова Т.И., Экезли А.И. Универсальный аппаратно-программный автоматизированный комплекс для исследования и испытаний микроволновой элементной базы: сб. науч. трудов I Международной конф. («Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития»), (Харьков – Судак, 30 сентября – 3 октября 2008 г., Т. 3) / Харьк. нац. ун-т. радиэлектр. – 2008.

19. Мачехин Ю.П., Чурюмов Г.И., Васянович А.В., Одаренко Е.Н., Старчевский Ю.Л., Экезли А.И., Иванцов В.П. Безэлектродная серная лампа с СВЧ-накачкой: сб. науч. трудов I Международной конф. («Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития»), (Харьков – Судак, 30 сентября – 3 октября 2008 г., Т. 3) / Харьк. нац. ун-т. радиэлектр. – 2008.

20. Чурюмов Г.И., Старчевский Ю.Л., Фролова Т.И., Басрави К.М., Экезли А.И., Сивоконь К.В. Влияние теплового режима термоэмиссионного катода на частотные характеристики магнетронов: материалы 17-й Междунар. Крымской конф. («СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»), (Севастополь, 10-14 сентября 2007 г.) / Севастоп. нац. технич. ун-т. – 2007.

21. Басрави К.М., Экезли А.И. Экспериментальное исследование распределения магнитного поля в магнетроне: материалы 11-го Междунар. молодежного форума («Радиоэлектроника и молодежь в 21 веке»), (Харьков, 10-12 апреля 2007 г.) / Харьк. нац. ун-т. радиэлектр. – 2007.

22. Экезли А.И., Басрави К.М. Разработка методики измерения нестабильности частоты магнетрона: материалы 11-го Междунар. молодежного форума («Радиоэлектроника и молодежь в 21 веке»), (Харьков, 10-12 апреля 2007 г.) / Харьк. нац. ун-т. радиэлектр. – 2007.

23. Чурюмов Г.И., Фролова Т.А., Басрави К.М., Сивоконь К.В., Экезли А.И. Проблемы и тенденции применения магнетронных генераторов в информационных системах: материалы I Междунар. науч. конф. («Глобальные информационные системы. Проблемы и тенденции развития»), (Харьков – Туапсе, 3-6 октября 2006 г.) / Харьк. нац. ун-т. радиэлектр. – 2006.

24. Чурюмов Г.И., Грицунов А.В., Старчевский Ю.Л., Фролова Т.И., Басрави К.М., Экезли А.И., Перевертайло Р.А. Теоретические и экспериментальные исследования режимов перестройки частоты и синхронизации магнетронов: материалы 16-й Междунар. Крымской конф. («СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»), (Севастополь, 11-15 сентября 2006 г.) / Севастоп. нац. технич. ун-т. – 2006.

25. Басрави К.М., Экезли А.И., Чурюмов Г.И. Экспериментальная методика расчёта параметров анодных блоков магнетронов: збірник анотацій VI Харьк. конф. молодих науковців („Радіофізика та електроніка”), (Харків, 13-14 грудня 2006 р.) / Ін-т. радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова. – 2006.

АНОТАЦІЯ

Екзєлі А.І. Електронне керування частотою магнетронних генераторів та розширення їх функціональних можливостей. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.01 – фізика приладів, елементів і систем. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2015.

Дисертація присвячена подальшому розвитку та вдосконаленню методів керування частотою магнетронних генераторів, які забезпечують широкий діапазон її перестроювання як в неперервному, так і в імпульсному режимах роботи, а також розробці чисельних математичних моделей та їх застосування для виявлення та розуміння фізичних особливостей електронно-хвильової взаємодії в магнетронах з покращеними частотними властивостями.

В роботі сформульовано шляхи вирішення задач покращення таких параметрів магнетронів як збільшення стабільності частоти, збільшення діапазону перестроювання частоти та її швидкодії тощо. Розглянуті особливості перестроювання частоти в магнетронах у неперервному режимі їх роботи показали, що можливості перестроювання частоти класичної конструкції магнетрона з одним виводом енергії обмежені як з точки зору діапазону перестроювання, так і з точки зору її швидкодії. Для вирішення ряду зазначених вище задач запропоновано новий підхід щодо їхнього вирішення, в основі якого лежить нова конструкція магнетрона з двома виводами енергії. Дана конструкція може використовуватися як для вирішення задач стабілізації частоти магнетрона, так і для перестроювання його частоти. Запропоновано функціональні схеми на основі магнетрона з двома виводами енергії для практичної реалізації стабілізації частоти та її перестроювання (підстройки) в неперервному режимі роботи магнетрона з двома виводами енергії.

Ключові слова: магнетрон з двома виводами енергії, математичне моделювання, метод еквівалентних схем, метод великих часток, перестроювання частоти, неперервний режим роботи, імпульсний режим роботи, багаточастотна генерація.

АННОТАЦІЯ

Экзєли А.И. Электронное управление частотой магнетронных генераторов и расширение их функциональных возможностей. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – физика приборов элементов и систем. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2015.

Диссертация посвящена дальнейшему развитию и совершенствованию методов управления частотой магнетронных генераторов, обеспечивающих широкий диапазон ее перестройки как в непрерывном, так и импульсном режимах работы, а также разработке численных математических моделей и их применение для выявления и понимания физических особенностей электронно-волнового взаимодействия в магнетронах с улучшенными частотными свойствами.

В работе сформулированы пути решения задач улучшения таких параметров магнетронов как повышение стабильности частоты, увеличение диапазона перестройки частоты и ее быстродействия и т.п. Рассмотренные особенности перестройки частоты в магнетронах в непрерывном режиме их работы показали, что возможности перестройки частоты классической конструкции магнетрона с одним выводом энергии ограничены

как с точки зрения диапазона перестройки, так и с точки зрения ее быстродействия. Для решения ряда указанных выше задач предложен новый подход к их решению, в основе которого лежит новая конструкция магнетрона с двумя выводами энергии. Данная конструкция может быть использована как для решения задачи стабилизации частоты магнетрона, так и для перестройки его частоты. Предложены функциональные схемы на основе магнетрона с двумя выводами энергии для практической реализации стабилизации частоты и ее перестройки (подстройки) в непрерывном режиме работы магнетрона с двумя выводами энергии.

Проведен анализ теоретических и экспериментальных анодных характеристик цилиндрических диодов. Показано, что в области значений анодного напряжения, превышающее пороговое значение, наблюдается эффект самопроизвольного роста анодного тока и увеличение расхождения между теоретическими и экспериментальными характеристиками диодных структур. Полученные экспериментальные результаты позволяют расширить наши представления о классическом поведении статических характеристик вакуумных диодов и дополнить их областью роста анодного тока.

При помощи разработанных численно-аналитических моделей проведены расчеты выходных характеристик магнетронов с двумя выводами энергии. Особое внимание при разработке и совершенствовании математических моделей магнетронов уделялось возможности моделирования их частотных свойств. Предложена математическая модель магнетрона для исследования шумовых явлений в электронном облаке и показана связь явлений нестабильности и перестройки частоты с электронным механизмом фазовой группировки электронного потока.

Экспериментально исследованы перестройка частоты в «холодном» анодном блоке магнетрона с двумя выводами энергии. При сравнении полученных данных с расчетными показана возможность значительного расширения диапазона перестройки частоты в магнетронах. Экспериментально измеренные перестройка резонансной частоты и изменение мощности ВЧ сигнала в магнетроне с двумя выводами энергии в непрерывном режиме работы показали, для выбранной рабочей точки, хорошее соответствие диапазона перестройки частоты к перепаду выходной мощности.

Предложен и экспериментально реализован на основе трехсантиметрового магнетрона с двумя выводами энергии макет устройства, которое позволяет осуществить электронную перестройку частоты от импульса к импульсу в паузах между ВЧ импульсами. Для переключения частоты в данном устройстве применяется электронный коммутатор на р-и-п диодах безкорпусной конструкции, работа которого синхронизирована с работой модулятора магнетрона. Экспериментально показано, что перестройку частоты от импульса к импульсу можно рассматривать как режим многочастотной генерации импульсного магнетрона с двумя выводами энергии. При этом количество генерируемых магнетроном частот зависит от количества каналов переключения коммутатора, соединенного с реактивным выводом магнетрона.

Ключевые слова: магнетрон с двумя выводами энергии, математическое моделирование, метод эквивалентных схем, метод крупных частиц, перестройка частоты, непрерывный режим работы, импульсный режим работы, многочастотная генерация.

ABSTRACT

Ekezli A.I. Electronic control of the magnetrons frequency and empowerment of their functionality. – Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of physical and mathematical sciences on specialty 01.04.01 - physics of devices, elements and systems. - Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, 2015.

The dissertation is devoted to the further development and improvement of control frequency magnetron generators that provide a wide range of frequency tuning in continuous and in pulsed modes, as well as the development of numerous mathematical models and their application to identify and understand the physical especially big-wave board for all types of electronic interaction in magnetrons with improved frequency properties.

We formulate solutions to the problem of improving parameters such as magnetrons increasing frequency stability, increase the frequency tuning range and speed, etc. The foregoing features of frequency tuning in magnetrons in a continuous mode of operation have shown that the possibility of frequency tuning magnetron classic design with a single energy output is limited both in terms of tuning range, and from the point of view of its performance. To address some of the above problems, a new approach to their solution, which is based on a new design of the magnetron with two output lines. This construction can be used for solving the problem of frequency stabilization magnetrons and to rebuild its frequency. Functional scheme proposed by the magnetron energy to the two terminals for the practical implementation of the frequency-stabilization and adjustment (tuning) in a continuous mode of operation of the magnetron energy to the two terminals.

Keywords: magnetron with two output lines, mathematical modeling, the method of equivalent circuits, particle in cell method, frequency tuning, continuous operation, pulse mode, multi-frequency generation.

Підп. до друку 17.04.15
Умов. друк. арк. 1,4.
Ціна договірна.

Формат 60x84 1/16.
Тираж 100 прим.

Спосіб друку – ризографія.
Зам. № 1/24

ФЛП Андреев К.В.
Харків, вул. Серпова, 4