

УДК 685.31-83

О.Г. МЕДВІДЬ, В.В. ОЛІЙНИКОВА, П.М. ГОНДАРЧУК
(Київський національний університет технологій та дизайну)

Ааналіз генераторів НВЧ-енергії

Проведен подробний анализ работы, принципа действия и видов СВЧ-генераторов, даны схемы магнетронов, рассмотрены электромагнитные волны в волноводах, коаксиальных и полосковых линиях, объемные резонаторы, замедляющие системы.

Ключевые слова: температурный градиент, волноводы, частота колебаний, теплопроводность, излучение, резонаторные камеры, поля, колебания, амплитуда, возбуждение, электромагнитные колебания, анодный блок, нагреватель, магнитное поле, магнетрон, коаксиальный кабель, резонаторы.

In the article the work principle and types of microwave – generators, the scheme of magnetrons were considered. The electromagnetic waves were considered in waveguides, coaxial and strip lines. Cavity resonators, the slow down systems were investigated in the article.

Keywords: temperature gradient, waveguides, frequency, thermal conductivity, radiation, resonator chamber, field oscillation amplitude, excitation, waveguide, electromagnetic waves, the anode block heater, magnetic field, the magnetron, coaxial cable, resonators.

Техніка надвисоких частот – галузь науки і техніки, пов'язана з вивченням й використанням властивостей електромагнітних коливань та хвиль в діапазоні частот від 300 МГц до 300 ГГц. В цьому діапазоні довжина хвилі стає співрозмірною з розмірами елементів ланцюгів, провідників, ламп тощо. Виникають деякі неконтрольовані зв'язки між елементами і різко зростають втрати на випромінювання у навколишнє середовище. Зі збільшенням частоти ускладнюються використання елементів радіотехнічних схем зі сконцентрованими параметрами: конденсаторів, резисторів, котушок індуктивності.

Тому в діапазоні НВЧ конструкції елементів схем і електронних пристроїв змінюються так, аби їхні електромагнітні поля перебували всередині замкнених металевих об'ємів.

Теорія електромагнітного поля НВЧ ґрунтується на загальних законах електродинаміки, відповідно до яких складові електромагнітного поля (вектори електричного і магнітного полів E і H), залежні від координат і часу, й характеристики джерел, що утворюють це поле (щільність заряду і щільність повного струму), пов'язані між собою системою рівнянь Лоренца – Максвелла.

Вводячи поняття хвильового опору середовища $r = E/H$, можна перейти до так званих телеграфних рівнянь, які встановлюють зв'язок між напругою і струмами у НВЧ пристроях (залежно від координат та часу), з одного боку, й електричними параметрами пристроїв – з іншого.

Види НВЧ-генераторів

Для генерації НВЧ-енергії застосовують лампи, принцип роботи яких засновано на модуляції електронного пучка за швидкістю. Основним функціональним елементом є високовольтний випрямляч, що управляється. Він перетворює напругу в мережі (зазвичай – трифазну, 380 В) в напругу постійного струму 4-15 кВ.

Найпродуктивнішим генератором НВЧ-енергії є магнетрон безперервної дії, завдяки невисокій вартості та простоті у використанні. Магнетрон перетворює постійний струм в НВЧ-енергію.

Резонансний магнетрон складається з анодного блоку, який являє собою, як правило, товстостінний металевий циліндр з прорізами в стінках порожнинами, що виконують роль об'ємних резонаторів. Резонатори утворюють кільцеву коливальну систему. До анодного блоку прикріплюють циліндричний катод. Усередині катода закріплено підігрівач. Магнітне поле, паралельне осі приладу, створюється зовнішніми магнітами або електромагнітом.

Для виведення НВЧ-енергії використовують дротяну петлю, що закріплена в одному з резонаторів, або отвір з резонатора назовні циліндра.

Резонатори магнетрона є сповільнюючою системою, в них відбувається взаємодія пучка електронів і електромагнітної хвилі.

Окремі моделі магнетронів можуть мати різну конструкцію. Так, резонаторна система виконується у вигляді резонаторів кількох типів: щілина – отвір, лопаткових, щілинних тощо.

Схема роботи магнетрона

Електрони мігрують з катода в простір взаємодії, де на них впливає постійне електричне поле анод-катод, постійне магнітне поле і поле електромагнітної хвилі. Якби не було поля електромагнітної хвилі, електрони рухалися б в схрещених електричному та магнітному полях за порівняно простими кривими: епіциклоїдах (крива, яку описує точка на колі, що котиться по зовнішній поверхні кола більшого діаметра, у конкретному випадку – по зовнішній поверхні катода). За досить високого магнітного поля (паралельного осі магнетрона) електрон, що рухається по цій кривій, не може досягти анода (внаслідок дії на нього з боку даного магнітного поля сили Лоренца), при цьому мовлять, що сталося магнітне замикання діода. У режимі магнітного замикання деяка частина електронів рухається по епіциклоїдах в просторі анод-катод. Під дією власного поля електронів, а також статистичних ефектів (дробовий шум) в цій електронній хмарі виникають нестійкості, які призводять до генерації електромагнітних коливань (ці коливання посилюються резонаторами).

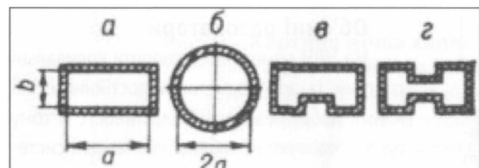


Рис. 1 – Структура поперечного перетину деяких металевих хвильоводів

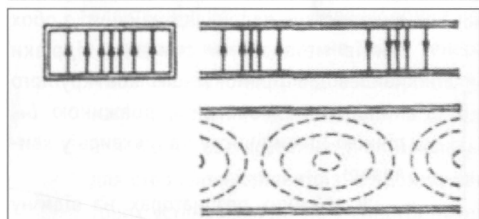


Рис. 2 – Структура поля хвилі TE10 в прямокутному хвильоводі: суцільні лінії – силові лінії електричного поля, пунктирні – магнітного поля

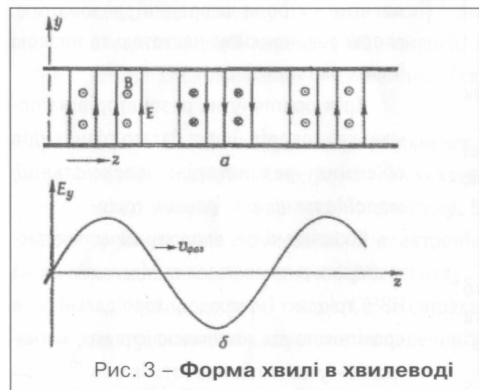


Рис. 3 – Форма хвилі в хвильоводі

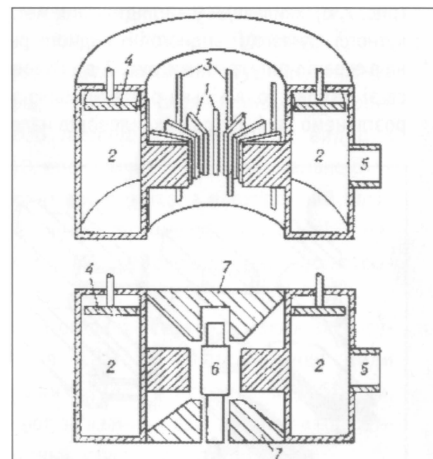


Рис. 4 – Схема коаксіального магнетрона:

- a – вид системи резонаторів,
- б – вигляд у поперечному перерізі;
- 1 – резонатори анодного блоку;
- 2 – коаксиальний резонатор;
- 3 – щілини, що з'єднують резонатори анодного блоку з коаксиальним резонатором;
- 4 – поршень коаксиального резонатора для перебудови частоти;
- 5 – вікно для виведення потужності коливань НВЧ;
- 6 – катод;
- 7 – полюсні наконечники магніту [1]

Електричне поле електромагнітної хвилі може уповільнювати або прискорювати електрони. Якщо електрон прискорюється полем хвилі, то радіус його циклотронного руху зменшується і він відхиляється у напрямку катода. При цьому енергія передається від хвилі до електрона. Якщо ж електрон гальмується полем хвилі, то його енергія передається хвилі, а циклотронний радіус електрона збільшується і він має можливість досягти анода. Оскільки електричне поле анод-катод здійснює позитивну роботу тільки коли електрон досягає анода, енергія завжди передається в основному від електронів до електромагнітної хвилі.

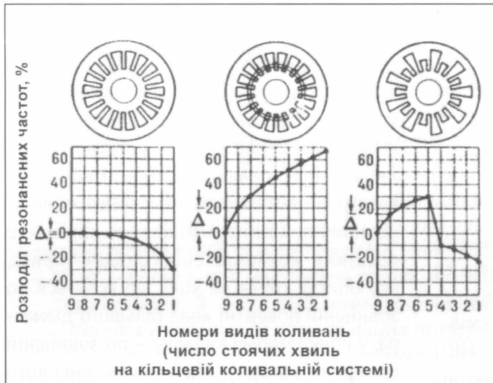


Рис. 5 – Види резонаторних систем магнетрона:

- а – рівнорезонаторна без зв'язків,
- б – рівнорезонаторна зі зв'язками,
- в – різнорезонаторна і графіки розподілу їхніх резонансних частот

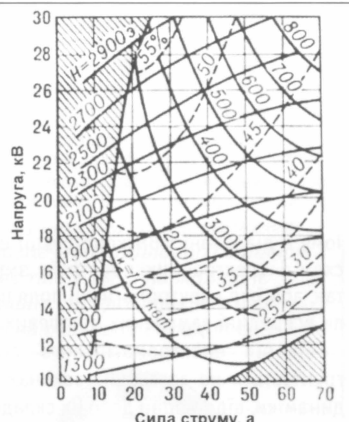


Рис. 6 – Типова робоча характеристика імпульсного магнетрона

Заштрихованими ділянками позначені зони відсутності генерації, суцільними лініями – імпульсна вихідна потужність P_i й напруженість постійного магнітного поля H , пунктирними лініями – ККД (без урахування потужності підігріву катода) [3]

Електромагнітні хвилі у хвилеводах, коаксіальних і полоскових лініях

До широкого класу радіохвилеводів належать різні пристрої, навколо яких можуть розповсюджуватися електромагнітні хвилі. Це відкриті двопровідні лінії (рис. 7, а), коаксіальні кабелі (рис. 7, б), хвилеводи у вигляді полів металевих труб різного поперечного перетину (прямокутного, круглого, П-видного і Н-видного, рис. 7, в) і сповільнюючі системи (наприклад, спіральна в екрані і типу гребінки, рис. 7, д). Вздовж останніх електромагнітні хвилі розповсюджуються зі швидкістю, в кілька разів меншою за швидкість світла. Сповільнюючі системи окремо розглянемо далі. До радіохвилеводів належать також діелектричні хвилеводи (рис. 7, г).

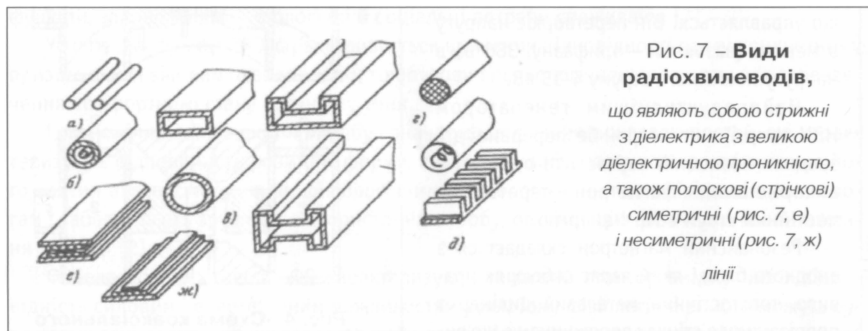


Рис. 7 – Види радіохвилеводів,

що являють собою стрижні з діелектрика з великою діелектричною проникністю, а також полоскові (стрічкові) симетричні (рис. 7, е) і несиметричні (рис. 7, ж) лінії

Коаксіальний кабель, будучи екранованою лінією, широко застосовується як у УВЧ, так і в НВЧ діапазонах.

Тепер також широко застосовують інший тип передаючих ліній – так звані полоскові або стрічкові лінії. Як показано на рис. 7, е, ж, вони складаються з металевих стрічок, простір між якими може бути заповнений твердим діелектриком чи повітрям.

Типи хвиль в передаючих лініях

Найпростішим типом електромагнітної хвилі є плоска поперечна хвиля, яку прийнято позначати TEM; в поперечній електромагнітній хвилі силові лінії електричного та магнітного полів розміщені в поперечних площинах, перпендикулярних до напрямку розповсюдження хвилі.

Хвиля TEM (рис.8) розповсюджується у вільному просторі далеко від передаючої антени, а також уздовж відкритої двопровідної лінії та між провідниками коаксіальної лінії, якщо вважати, що провідники ідеально проводять.

Типи хвиль, які можуть розповсюджуватися у хвилеводі, можна поділити на два великих класи.

До першого належать Н-хвилі, у яких вектор напруженості магнітного поля H разом з поперечними має і поздовжню складову, а вектор електричного поля розміщений повністю у площині поперечного перетину хвилевода, тобто має тільки поперечні складові.

Другий клас хвиль складається з Е-хвиль. У цих хвиль лише вектор E має поздовжню складову H_z , а вектор H повністю розміщений у площині поперечного перетину хвилевода. На відміну від TEM-хвилі, Н- і Е- хвилі можуть розповсюджуватися тільки за умови, коли поперечні розміри хвилевода перевищують деяке критичне значення.

На рис. 9 показані структури полів найпростіших типів хвиль в круглому хвилеводі.

Об'ємні резонатори

На НВЧ неможливо створити коливальні системи із зосередженими постійними, які мають добрі резонансні властивості, й тому тут застосовують особливі коливальні системи, які називають об'ємними або порожнистими резонаторами.

Як об'ємні резонатори можуть бути використані, наприклад, замкнуті з обох кінців металевими стінками відрізки хвилеводів прямокутного або круглого поперечних перетинів, довжиною l_{res} , рівною цілому числу на півхвиль у хвилеводі.

В об'ємних резонаторах, на відміну від звичайних радіотехнічних резонансних контурів, може бути збуджено безліч видів коливань, кожне з яких характеризується своїм розподілом електромагнітного поля всередині резонатора, своєю резонансною частотою та низкою інших параметрів.

Крім розглянутих резонаторів на основі хвилеводів, існує багато різновидів об'ємних резонаторів: коаксіальний, тороїдальний, радіальний тощо.

Коаксіальні резонатори найчастіше застосовують в генераторах та підсилювачах на НВЧ тріодах і тетродах, тороїдальні – в пролітних та відбиваючих клістронах; магнетронні – у магнетронах.



Рис. 8 – Структура електричного та магнітного полів біжучої хвилі типу TEM в коаксіальній лінії:
1 – розподіл напруженості електричного поля вздовж лінії для фіксованого моменту часу t

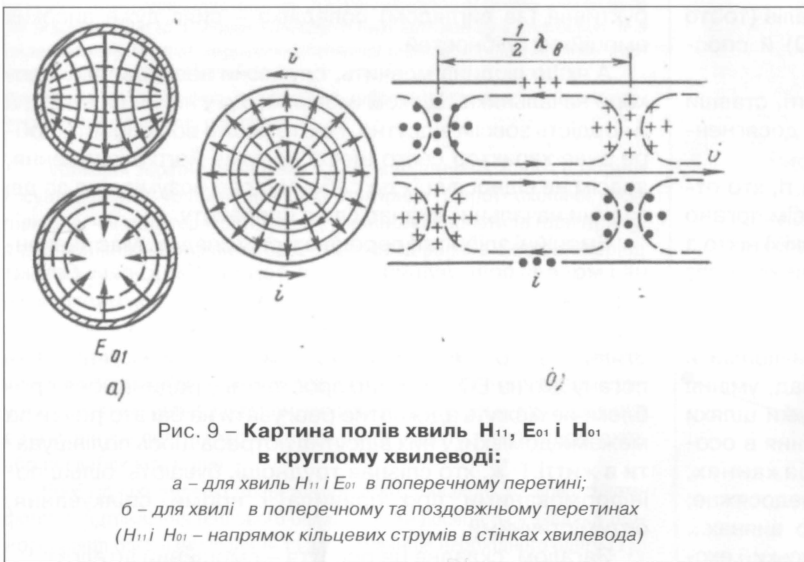


Рис. 9 – Картина полів хвиль H_{11} , E_{01} і H_{01} в круглому хвилеводі:
а – для хвиль H_{11} і E_{01} в поперечному перетині;
б – для хвилі в поперечному та поздовжньому перетинах (H_{11} і H_{01} – напрямки кільцевих струмів в стінках хвилевода)

Застосування резонаторів у радіотехніці та електроніці НВЧ дуже широке; вони є невід’ємними частинами конструкції не лише генераторів, а й металокерамічних тріодах, клістронів, магнетронів, напів-провідникових генераторів та підсилювачів, а й мають застосування у вимірювальній техніці для створення хвилемірів, в промислових та побутових установках, де НВЧ-енергія перетворюється в теплову тощо [3].

Сповільнюючі системи

В низці типів електронних НВЧ приладів (наприклад, в лампах біжучої хвилі) застосовують спеціальні лінії передачі НВЧ-енергії, які називаються сповільнюючими системами (скорочено – СС).

В СС забезпечується сповільнення швидкості розповсюдження електромагнітних хвиль приблизно до швидкості електронного потоку. В свою чергу, синхронний рух хвилі та електронів дає змогу мати посилення вхідного НВЧ-сигналу.

Найпростішим типом СС є спіраль, навита з дроту зазвичай круглого поперечного перетину або зі стрічки.

Важливою особливістю спіральної СС є слабка залежність сповільнення від частоти (тобто слабка дисперсія), а відповідно, і мала відмінність в значеннях фазової та групової швидкостей $V_{ф}$ і $V_{г}$.

Зазвичай електронний потік, з яким взаємодіє електромагнітна хвиля, пропускають всередині спіралі. При цьому необхідно забезпечити не тільки сповільнення хвилі до швидкості, близької до швидкості електронів у пучку, а й достатню напруженість електричного поля в будь-якій точці поперечного перетину всередині спіралі.

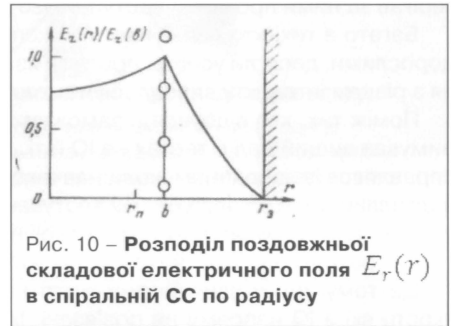


Рис. 10 – Розподіл поздовжньої складової електричного поля $E_r(r)$ в спіральній СС по радіусу

На рис. 10 показано розподіл по поперечному перетину спіралі поздовжньої складової напруженості електричного поля, з якою взаємодіють електрони потоку ($r_{г}$ – радіус межі електронного потоку; $r_{э}$ – радіус металевого екрану, що оточує спіраль; b – радіус спіралі по центру поперечного перетину дроту). Як видно з рис.10, електричне поле максимальне біля поверхні провідника, а електронний потік займає лише частину області, в якій розповсюджується сповільнена електромагнітна хвиля.

Крім спіралі, існують і мають застосування в НВЧ приладах й інші види сповільнюючих систем: «гребінка», «ланцюг зв’язаних резонаторів», «кільце – стрижень», «зустрічні штирі» та ін.

Всі вони є періодичними СС.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *The Magnetron*. Bournemouth University (1995-2009).
2. Ю.Н. Пчельников, В.Т. Свиридов «Электроника сверхвысоких частот», М.: «Радио и связь», 1981
3. <http://bse.sci-lib.com/article100145.html>

Одержано 04.07.2012