

лізовуючи двополюсник M (рис. 1) з $|\Gamma_M| \approx 0,25$, можна добитися нерівномірності АЧХ в межах ± 3 дБ.

Висновки

При розрахунку ГШЛПД доцільно застосовувати як аналітичні так і чисельні методи. Чисельні методи застосовуються для розрахунку пасивної частини генератора, а аналітичні – для розрахунку напівпровідникової структури і АЧХ генератора в цілому. При моделюванні використовуються довідкові дані діода та шестиполюсник, в одне плече якого, що є входом радіальної лінії, включений діод, а в інше, перетин прямокутного хвилеводу, що має, – двополюсник із змінним коефіцієнтом відбиття Γ_M . При ладнанні змінюється положення діода в хвилеводі або двополюсник M в одному з плеч шестиполюсник (кращі результати - при $\Gamma_M < 1$).

Література

1. Алмазов-Долженко К.И. Коэффициент шума и его использование на СВЧ. – М.: „Научный мир”, 2000.– 240 с.
2. Ситько С.П., Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф. Аппаратное обеспечение современных технологий квантовой медицины. – Киев: „ФАДА ЛТД”, 1999.– 200 с.
3. Давыдова Н.С., Данюшевский Ю.В. Диодные генераторы и усилители СВЧ. – М:Радио и связь. 1986. – 184 с.
4. Касаткин Л. В., Чайка В. Е. Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн. – Севастополь: „Вебер”, 2006. – 319 с.
5. Marcuvitz N. Waveguide Handbook.– „Peter Peregrinus Ltd.”, 1986. – 425 с.
6. Буторин В.М. Двойная диско-штыревая структура в прямоугольном волноводе // Радиотехника и электроника. – 1987. – № 12. – С. 2490-2496.
7. Банков С.Е., Курушин А.А., Разевиг В.Д. Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ-структур с помощью HFSS. – М.: „СОЛОН-Пресс”, 2004. – 208 с.
8. High Frequency Structure Simulator v.9.2. User’s Guide. Pittsburgh: Ansoft Co. 2004.
9. Алексеев Ю.И., Демьяненко А.В. Расчет импеданса лавинно-пролетного диода в малосигнальном режиме//Известия вузов. Электроника. – 2005. – №1. – С. 25-28.
10. Силаев М.А., Брянцев С.Ф. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств. – М: Сов. радио, 1968. – 248 с.
11. Полупроводниковые приборы. Сверхвысокочастотные диоды. Справочник / Под ред. Наливайко Б.А. Томск: МГП „РАСКО”, 1992. – 224 с.
12. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 1 – М.: „Мир”, 1984. – 455 с.

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Перегудов С.Н. Численно-аналитическое моделирование генератора шума миллиметрового диапазона на корпусных лавинно-пролетных диодах Рассмотрена численно-аналитическая модель генератора шума миллиметрового диапазона на лавинно-пролетных диодах. Характеристики генератора рассчитываются, используя численно-аналитический подход.</p> | <p>Peregudov S.N. Numeral-analytical design of noise generator of millimeter range on corps IMPATT diodes The numeral-analytical model of noise generator of millimeter range on IMPATT diodes is considered. It is shown; that it is possible to calculate parameters of generator, applying numeral approach at the design of passive part of generator and analytical approach at the design of its active part.</p> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

УДК 621.396.6.019 : 621.391.827

**ПОКРАЩЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
 МІКРОХВИЛЬОВОЇ ПЕЧІ**

Гребеньков І.М., Рена Ф.М.,

Проведено дослідження затрактюваних випромінювань магнетронного генератора побутової печі. Для покращення електричних характеристик та задоволення вимог за

стандартами ЕМС запропоновано використання фільтру на граничному хвилеводі.

Вступ

Жорсткі вимоги до рівня випромінювання (не більше 57 дБпВт [1]) побутових мікрохвильових (НВЧ) печей на частоті 5-ї гармоніки (близько 12,25 ГГц - канали супутникового телебачення [2] та частоти локальних мереж [3]) обумовлюють зростаючий інтерес до рівнів випромінювання бічних (БК) та засмугових (ЗК) коливань генераторів випромінювання НВЧ магнетронів – складових побутових печей. Крім цього, на даний час саме параметри рівнів БК стримують комерційні перспективи вітчизняних магнетронів за кордоном. Дослідження магнетронів і порівняння їх із закордонними аналогами утруднено тією обставиною, що рекомендовані Спеціальним міжнародним комітетом з радіозавад (CISPR) норми і методики відносяться до НВЧ печей, не виділяючи вимог до їх генераторів.

Магнетрони, які використовують в установках НВЧ нагріву випромінюють шуми і гармоніки основного сигналу в широкому діапазоні радіочастот – до 7-ї гармоніки і вище. У зв'язку з цим в різних країнах введені обмеження на рівень випромінювання від діючих установок НВЧ. Так, наприклад, у роботі [2] наведено порівняння міжнародних стандартів на електромагнітні завади в США, ФРН, Японії, а також CISPR (стандарт IEC 802.11), які обмежують рівень шумового випромінювання для НВЧ печей на частотах вище за 1 ГГц, що обумовило визначені утруднення випромінюючих пристроїв, в тому числі для вітчизняних НВЧ печей.

Постановка задачі

Як видно, задача дослідження потужності ЗК і "затрагових" випромінювань (ЗТВ) магнетрона М105, який широко застосовується в НВЧ установках різного призначення є актуальною. Причому, згаданий прилад з потужністю 760 Вт при наявності належного водяного охолодження, може слугувати основою для створення більш потужного 1,5 кВт приладу [4].

Методика та засоби експериментального дослідження

Теоретичні дослідження в рамках модуляційної моделі дозволили розрахувати можливі частоти та амплітуди спектру коливань магнетронного генератора М105 [5].

Експериментальні дослідження здійснювалися методом селективного заміщення неперервним сигналом. Відповідно до методики визначення відносного рівня ЗК і ЗТВ, рівень досліджуваного сигналу генератора порівнюється з рівнем сигналу тієї ж, що заміщується, частоти з постійною в усіх випадках потужністю. При вимірюваннях як індикатор використано аналізатор спектру АІТЕС707 з параметрами: ширина огляду до 700 МГц, діапазон робочих частот 0,01 ÷ 12,5 ГГц, мінімальна чутливість – 70 дБВт. При цьому оцінка рівня потужності ЗК до 5-ї гармоніки здійснювалася за допомогою шестиканального напрямленого відгалужувача багатомодової потужності [6]. Похибка вимірювання відносних рівнів ЗК за цією методи-

кою не перевищує ± 5 дБ. Вимірювання відносного рівня ЗТВ здійснюється в максимумах діаграми спрямованості (ДС) випромінювання з катодного виводу магнетрона, що розміщений в безеховій камері, перед вікном якої розташована вимірювальна антена. Об'ємна ДС досліджувалася шляхом зміни положення магнетрона (за азимутом та кутом місця) при збереженні просторового місця розташування центра випромінювання і при зафіксованій у дальній зоні вимірювальній антені. При визначенні максимуму ДС аналізатор спектру є індикатором зміни напруженості поля.

Результати вимірювань відносних рівнів ЗК магнетрону М105 та його модифікацій наведені в табл. 1 для двох випадків: у першому - вимірювання спектру ЗТВ генератора проводилися через катод-*LC*-фільтр приладу, в другому – ті самі вимірювання проводилися за відсутністю кожуха та *LC*-фільтра генератора.

Таблиця 1

| Тип та номер магнетрона | Сумарна багатохвильова потужність | | Превищення дозвolenої норми <i>CISPR</i> (57) дБ/пВт) | Розподіл за типами (модами) хвиль | |
|-------------------------|-----------------------------------|--------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------|
| | мкВт | дБ/пВт | | | |
| М105 | 51,3 | 77,1 | + 20,1 | H ₁₀ | 23,9% |
| | | | | H ₀₁ | 21,3% |
| | | | | H ₂₀ | 19,0% |
| | | | | H ₀₂ | 12,5% |
| | | | | H ₁₁ | 23,3% |
| Модифікований М105-1 | 4,02 | 66,0 | + 9 | H ₁₀ | 14,9% |
| | | | | H ₀₁ | 13,4% |
| | | | | H ₂₀ | 17,9% |
| | | | | H ₀₂ | 15,9% |
| | | | | H ₁₁ | 37,8% |
| “Виток” | 0,77 | 58,9 | +1,9 | H ₁₀ | 22,1% |
| | | | | H ₀₁ | 11,7% |
| | | | | H ₂₀ | 32,5% |
| | | | | H ₀₂ | 13,0% |
| | | | | H ₁₁ | 20,8% |

Експериментально виявлено, що найбільш інтенсивними ЗТВ є випромінювання на робочій частоті. Відносний рівень ЗТВ, визначений у максимумі ДС на робочій частоті для першого і другого випадків обумовлений рівнем ослаблення в захисному пристрої (кожуха і *LC*-фільтра). Дія *LC*-фільтра, який встановлений у катодний вивід вищезгаданого генератора, полягає у значному подавленні рівнів потужності випромінювання на гармоніках 1, 4 і 5. Дещо меншим є послаблення на гармоніках 2 та 3. Захисний пристрій – кожух і катодний *LC*-фільтр – послаблюють випромінювання "через катод" на основній частоті на 16...20 дБ.

Таким чином, рівні випромінювання 5-ї гармоніки магнетронів типу М105-1 перевищують дозволenu норму на 9 ÷ 20дБ. Для широкого їх вико-

ристання в установках НВЧ нагрівання потрібне ретельне екранування магнетронних генераторів та додаткове подавлення небажаного випромінювання, яке "просочується" і через камеру печі.

Подавлювач небажаного випромінювання в камеру

Найбільш економічним подавлювачем недозволеного випромінювання вищих гармонік в камеру є фільтр на граничних хвильоводах (ФГХ), який замінює трансформатор імпедансу у хвилевідному тракті перед виходом випромінювання в камеру печі. Використання фериткомпозиційних поглиначів у дверцях печі, через нестабільність їх параметрів, високу вартість та швидке старіння недоцільне [7].

ФГХ з металевими штирями (рис. 1,а) мають великі розв'язки, термо-стабільні, в широкому діапазоні частот (практично до $6f_0$) не мають небажаних смуг пропускання, а за своїми розмірами у 5 ÷ 10 разів менші за традиційні хвилеводні [8]. Не жорсткий допуск на виготовлення елементів фільтра повністю задовольняє виробника.

Розрахунок фільтра – преселектора із поперечними металевими штирями – здійснюється з використанням розробленої нами методики аналізу [9] та синтезу на задану прохідну потужність ФГХ [10].

За цією методикою, складний об'єм, що являє собою з'єднання N ($N = 9$) відрізків хвилеводів з перерізами S_i , обраними за умовну границю, розбиваємо на ряд від 1 до N простих об'ємів.

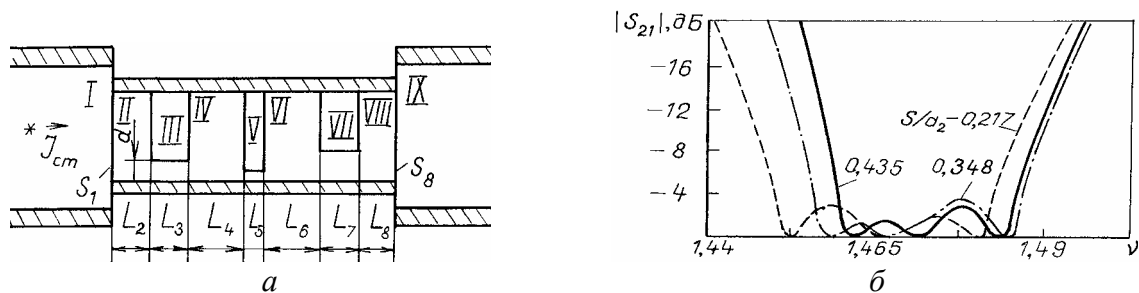


Рис. 1. Трьохштирьовий фільтр на граничному хвилеводі (а) та його частотні характеристики (б)

У рамках припущень, сформульованих у роботі [11], систему інтегральних рівнянь, одержану в результаті зшивання полів на границях з'єднання $S_1 ÷ S_8$, методом Гальоркіна зводимо до системи лінійних алгебраїчних рівнянь Q -го порядку для амплітуд дотичного електричного поля e_{iq} на границях S_i

$$\begin{cases} \sum_{q=1}^Q e_{1q} (Y_{pq11}^I + Y_{pq11}^{II}) + e_{1q} Y_{pq12}^{II} = h_q^I \\ \sum_{q=1}^Q e_{1q} Y_{pq21}^{II} + e_{2q} (Y_{pq22}^{II} + Y_{pq22}^{III}) + e_{3q} Y_{pq23}^{III} = 0 \\ \vdots \\ \sum_{q=1}^Q e_{Nq} Y_{pqN,N+1}^{III} + e_{N+1q} (Y_{pqN+1,N+1}^N + Y_{pqN+1,N+1}^{N+I}) = 0. \end{cases}$$

У випадку використання (переміжних) відрізків прямокутного і П-подібного хвилеводу, що складає математичну модель трьохштирьового

ФГХ, вирази для власних провідностей Y_{pqll}^N наведені в роботі [11]. Часткова взаємна провідність Y_{pqkl}^N , що враховує взаємодію між сусідніми штирями, має вигляд $Y_{pq m+1 m+2} = \sum_{(a)} Y_a^{2m+1} n_{pq}^m n_{pq}^{m+1} / sh(K_a^{2m+1} L_{2m+1})$, $n_{pq}^{m+1} = \oint_{S_n} (grad \phi_0^{2m+1} grad \phi_{II}^{m,m+1}) dS_{II}$, де N – номер штиря, S_{II} – площа поперечного перетину Π -подібного хвилеводу, ϕ_0 і ϕ_{II} – скалярні власні функції прямокутного і Π -подібного хвилеводів, K_a^{2m+1} – постійна поширення a -го типу хвилі у відповідному хвилеводі, n_{pq} – коефіцієнт трансформації, $m = 1 \dots 3$ [12].

Алгоритм аналізу фільтруючої структури реалізовано у вигляді комп'ютерної програми розрахунку частотної залежності хвильової матриці розсіювання – коефіцієнтів передачі (S_{21}) та відбиття (S_{11}) для довільного числа відрізків, що з'єднуються: Π -подібного, граничного та напівнескінченного прямокутних хвилеводів $S_{11} = \sum_{p=1}^Q n_{1p} e_{1p} - 1$, $S_{21} = \sum_{p=1}^Q n_{8p} e_{8p}$.

Як приклад, на рис. 1б наведені результати розрахунку трьохштирьової моделі, де на осі абсцис відкладені нормовані значення приведеної довжини хвилі $v = \lambda / 2a$, а на осі ординат – модуль комплексного коефіцієнта передачі ($|S_{21}|$) згаданого з'єднання восьми відрізків хвилеводів. Геометричні розміри фільтра для печі: перетин ФГХ $a \times b = 30 \times 34 \cdot 10^{-3}$ м, $l_2 = l_8 = l_3 = l_5 = l_7 = 5 \cdot 10^{-3}$ м, $l_4 = l_6 = 12,4 \cdot 10^{-3}$ м. Штирі квадратні замінені на круглі, діаметром $5,6 \cdot 10^{-3}$ м. Для зменшення поздовжніх розмірів ФГХ можливе застосування діафрагм ємнісного або індуктивного типів, що дає можливість у широких межах маніпулювати його електричними параметрами та габаритами [11]. Згідно розрахунків величина розв'язки на частоті 5-ї гармоніки магнетрона збільшилася на 26 дБ (експериментально - 24 дБ). Для двохштирьової моделі з ємнісною діафрагмою експериментальне значення розв'язки при довжині $37,4 \cdot 10^{-3}$ м - 25 дБ. Додаткові втрати на основній частоті випромінюваної потужності в камеру складають біля 0,6 дБ.

Висновок

Використання запропонованого простого та економічного фільтра на граничному хвилеводі дозволяє покращити електричні параметри мікрохвильової печі та задовольнити вимогам Директиви ЄС з ЕМС №99/336 на частотах до п'ятої гармоніки, перевищивши норми на 5–7 дБ.

Література

1. Бадалов В.С. Нормы на параметры ЭМС. Справочник.–М. Радио и связь, 1987–267 с.
2. Narada A. Reduction of 5 harmonic electromagnetic interference from magnetrons and microwave ovens//Journal of Microwave power and EM energy. 1987. V.22. №1. P.3–11.
3. ЭМС систем беспроводного доступа//Технологии ЭМС.– 2006.– №1.– С. 27–33.

4. Балюк В.С., Тузов Д.М., Дзюба В.П., и др. Опыт разработки приборов СВЧ энергии народнохозяйственного назначения // Микроволновые технологии в народном хозяйстве/ Под ред. Калинина Л. Г. – Одесса: из-во ОКФА, 1996. – С. 46–52.
5. Кураев А.А. Мощные приборы СВЧ. – М.: Радио и связь, 1986. – 208 с.
6. Гейвандов Л.Н., Барит Н.С., Батущенко В. Н. и др. К вопросу о метрологическом обеспечении трактовых методов определения уровней побочных колебаний ЭВП СВЧ // Н-т. сб. “Методы и средства измерений в области электромагнитной совместимости”. – 1991. – Т. 2. – С. 120–122.
7. Беляев А.В., Карпов В.Н. Подавление колебаний на гармониках магнетрона микроволновой печи “Электроника” композиционным гироманнитным материалом // Н-т. сб. “Методы и средства измерений в области электромагнитной совместимости”. – 1991. – Т. 2. – С. 209–211.
8. Левдикова Т.Л. Трансформирующие цепи на запердельных волноводах // Тр. Сиб. Физ.-техн. ин-та. – 1974. – Вып. 54. – С. 112–117.
9. Павлов О.И., Репа Ф.М. Частотные характеристики трехштыревых систем на основе запердельного волновода // Вестник Киевского политехнического института. Радиотехника. – 1992. – № 29. – С. 36–39.
10. Колесник С.Н., Репа Ф.М. Синтез запердельных резонаторов со штырем прямоугольной формы//Вестник Киев. политехн. ин-та. Радиотехника. 1988. №29. С. 33–36.
11. Репа Ф.М. Прямоугольный поперечный штырь в отрезке запердельного волновода // Радиотехника. – 1988. – Т.31. – №8. – С.78–80 (Изв. высш. учебн. заведений).
12. Кабаков Л.Т., Репа Ф.М. Диафрагмы в запердельном волноводе // Радиотехника. – 1978. – Т. 21. – № 8. – С. 81–87 (Изв. высш. учебн. заведений).

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Гребеньков И.Н., Репа Ф.М. Улучшение электрических параметров микроволновой печи Проведено исследование внутрактовых излучений генератора бытовой микроволновой печи. Использование фильтра на запердельных волноводах позволило улучшить электрические характеристики печи и удовлетворить требованиям ЭМС.</p> | <p>Grebenkov I.N., Repa F.M. Improvement electrical characteristics of the microwave oven The research of band-off emitting of magnetron generator of microwave oven was carried out. Applying of cutoff waveguide abled to satisfy the requirements of manufacturer and norms of EMC.</p> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|