

УДК 621.372.82

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ В ПРИСТРОЇ ДЛЯ
ОЗОЛЕННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

Найденко В.І., Сулима Є.А., Шумаков Д.С., Лебедев О.О.

Розраховано резонансні частоти, добротності та число типів коливань в смузї генерації магнетрона для побутових мікрохвильових печей. Досліджена зміна добротності при покритті стінок камери поглинальним матеріалом.

Вступ. Постановка задачі

При озоленні продуктів харчування та кормів під час контролю за вмістом радіонуклідів на сьогодні використовуються сушильні шафи, газові пальники та муфельні печі. Процес озолення триває декілька діб. Це призводить до затримання продуктів харчування та кормів на митниці, що зменшує їх харчові характеристики або призводить до їх псування. Це обумовлює актуальність досліджень, спрямованих на зменшення часу контролю за вмістом радіонуклідів. Один із варіантів зменшення часу озолення полягає у використанні мікрохвильових способів озолення.

Процесу озолення передує процес видалення вологи з харчового продукту. Зменшення вологи призводить до зменшення уявної частини діелектричної проникності і, як наслідок, до зменшення навантаження джерела енергії мікрохвиль. Таким джерелом, зазвичай, є побутовий магнетрон. До магнетронів такого типу при експлуатації висувається вимога мінімального КСХН навантаження. Складність геометрії об'єкту обробки і довільне його розташування в об'ємі камери суттєво ускладнюють пряме точне рішення граничної задачі. Тому використовують певні наближення, найпростішим з яких є представлення камери, матеріал стінок якої має малу провідність. Така модель камери використана в даному дослідженні.

1. Типи коливань резонатора в смузї генерації магнетрона

Для визначеності задамо: магнетрон працює на частоті 2450 МГц при допустимому відхиленні ± 25 МГц (тобто інтервал частот генерації становить від 2425 до 2475 МГц); розміри камери: довжина $a=0.59$ м, висота $b=0.57$ м, ширина $d=0.525$ м.

Розрахуємо індекси m, n, p резонансних частот, що існують в цьому інтервалі частот. Розрахунок $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$ проводимо з таких міркувань. Позначивши c -швидкість світла, визначаємо резонансну частоту камери

$f_{pmp} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2}$, або $\left(\frac{2f_{pmp}}{c}\right)^2 = \left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2$, що є рівнянням сфери де $R = \frac{2f_{pmp}}{c}$; $x = \frac{m}{a}$; $y = \frac{n}{b}$; $z = \frac{p}{d}$. Максимальне значення кожної з координат x, y, z досягається при: $x_{\max} = R$, $y_{\max} = R$, $z_{\max} = R$.

Звідси при $f = f_{\max}$: $m_{\max} = \frac{2f_{\max}a}{c}$, $n_{\max} = \frac{2f_{\max}b}{c}$, $p_{\max} = \frac{2f_{\max}d}{c}$. Межі змін

m, n, p при зміні частоти від f_{\max} до f_{\min} : $m_{\max \min} = 2 \frac{f_{\min}}{c} a$; $n_{\max \min} = 2 \frac{f_{\min}}{c} b$;

$p_{\max \min} = 2 \frac{f_{\min}}{c} d$. Оскільки $\frac{f_{\max}}{f_{\min}} = \frac{2475}{2425} = \frac{99}{97} = 1.02062$ і $m, n, p \in$ цілими числами, то можна прийняти m, n, p рівними максимальним $m_{\max}, n_{\max}, p_{\max}$.

Задаємо $0(1) \leq m \leq m_{\max}$ і знаходимо n, p ($n, p \in 0(1), 2, \dots, n_{\max}, p_{\max}$) з умови:

$$-\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{2f_{\max}}{c}\right)^2 \geq \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2 \geq \left(\frac{2f_{\min}}{c}\right)^2 - \left(\frac{m}{a}\right)^2$$

Результати наведено в табл. 1, 2 для магнітного та електричного полів відповідно. В них перший стовпчик – число m , другий стовпчик – число n , третій – число p , четвертий – відповідна резонансна частота. Видно, що в заданому інтервалі частот при відповідних розмірах камери існує 22 коливання H -типу та 20 коливань E -типу.

Таблиця 1

	0	1	2	3
0	3	6	6	2,426718*10 ⁹
1	2	5	7	2,427534*10 ⁹
2	3	1	8	2,431542*10 ⁹
3	9	0	2	2,43638*10 ⁹
4	3	9	1	2,437307*10 ⁹
5	9	2	1	2,43918*10 ⁹
6	5	8	1	2,439196*10 ⁹
7	0	9	3	2,443411*10 ⁹
8	4	8	3	2,445295*10 ⁹
9	6	7	2	2,446794*10 ⁹
10	5	2	7	2,447417*10 ⁹
11	8	2	4	2,448837*10 ⁹
12	9	1	2	2,449609*10 ⁹
13	6	3	6	2,45226*10 ⁹
14	7	3	5	2,452733*10 ⁹
15	1	9	3	2,457542*10 ⁹
16	7	6	2	2,459024*10 ⁹
17	3	83	4	2,462952*10 ⁹
18	2	6	8	2,46642*10 ⁹
19	5	7	5	2,469623*10 ⁹
20	0	2	6	2,471026*10 ⁹
21	3		8	2,471094*10 ⁹

Таблиця 2

	0	1	2	3
0	3	6	6	2,426718*10 ⁹
1	2	5	7	2,427534*10 ⁹
2	3	1	8	2,431542*10 ⁹
3	3	9	1	2,437307*10 ⁹
4	9	2	1	2,43918*10 ⁹
5	5	8	1	2,439196*10 ⁹
6	4	8	3	2,445295*10 ⁹
7	6	7	2	2,446794*10 ⁹
8	5	2	7	2,447417*10 ⁹
9	8	2	4	2,448837*10 ⁹
10	9	1	2	2,449609*10 ⁹
11	6	3	6	2,45226*10 ⁹
12	7	3	5	2,452733*10 ⁹
13	1	9	3	2,457542*10 ⁹
14	7	6	2	2,459024*10 ⁹
15	8	5	0	2,459278*10 ⁹
16	3	8	4	2,462952*10 ⁹
17	2	3	8	2,46642*10 ⁹
18	5	6	5	2,469623*10 ⁹
19	3	2	8	2,471094*10 ⁹

2. Розрахунок добротностей знайдених типів коливань

Добротність об'ємного резонатора розраховують за формулою:

$$Q = \frac{\sqrt{\omega_p \mu_a} \int_V |H|^2 dV}{\sqrt{\frac{\mu_a}{2\sigma_m}} \int_{S_1} |H_\tau|^2 dS}$$

де σ_m, μ_{a2} - електрична провідність і магнітна проникність металевої поверхні резонатору, H_τ – тангенціальна компонента магнітного поля, μ_a - магнітна проникність діелектрика, яким заповнений резонатор.

Для хвиль магнітного типу добротність визначається як:

$$Q_{Hmnp} = \frac{\alpha_4}{4} \frac{abl\omega_p^2 A\mu_a \varepsilon_a}{al\left(\left(\frac{p\pi^2 m}{la}\right) + A^2\right) + bl\left(\left(\frac{p\pi^2 a}{lb}\right) + A^2\right) + ab\left(\frac{p\pi\sqrt{A}}{l}\right)^2}$$

де $A = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2$; $\alpha_4 = \frac{\sqrt{\omega_p \mu_a}}{\sqrt{\frac{\mu_{a2}}{2\sigma_m}}}$. Зауважимо, що при цьому $p \neq 0$.

При $n=0$: $Q_{Hm0p} = \frac{\alpha_4}{2} \frac{abl\omega_p^2 \mu_a \varepsilon_a}{al\omega_p^2 \mu_a \varepsilon_a + 2bl\left(\frac{m^2 \pi^2}{a^2}\right) + 2ab\left(\frac{p\pi}{l}\right)^2}$.

При $m=0$: $Q_{H0np} = \frac{\alpha_4}{2} \frac{abl\omega_p^2 \mu_a \varepsilon_a}{bl\omega_p^2 \mu_a \varepsilon_a + 2al\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + 2ab\left(\frac{p\pi}{l}\right)^2}$.

Для хвиль електричного типу ($m, n \neq 0$):

$$Q_{Emnp} = \frac{\alpha_4}{4} \frac{\left(\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2\right)abl}{al\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + bl\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + ab\left(\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2\right)}$$

При $p=0$: $Q_{Emn0} = \frac{\alpha_4}{4} \frac{\left(\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2\right)abl}{al\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + bl\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \frac{1}{2}ab\left(\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2\right)}$.

Розраховані значення добротностей наведені в табл. 3 (для коливань електричного типу) та в табл. 4 (для коливань магнітного типу).

Таблиця 3

$Q_E \cdot 10^{-5}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	1.032	1.033	1.021	1.036	1.022	1.033	1.036	1.032	1.025	1.024	1.024	1.027	1.026	1.042	1.032	1.394	1.041	1.038	1.037	1.033

Таблиця 4

$Q_H \cdot 10^{-5}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
	1.302	1.443	1.069	1.431	1.089	1.083	1.088	1.44	1.132	1.099	1.096	1.081	1.083	1.111	1.096	1.149	1.097	1.186	1.429	1.183	1.407	1.18

Добротність, як функція частоти, наведена на рис. 1, (а – для коливань

електричного типу і б – для коливань магнітного типу).

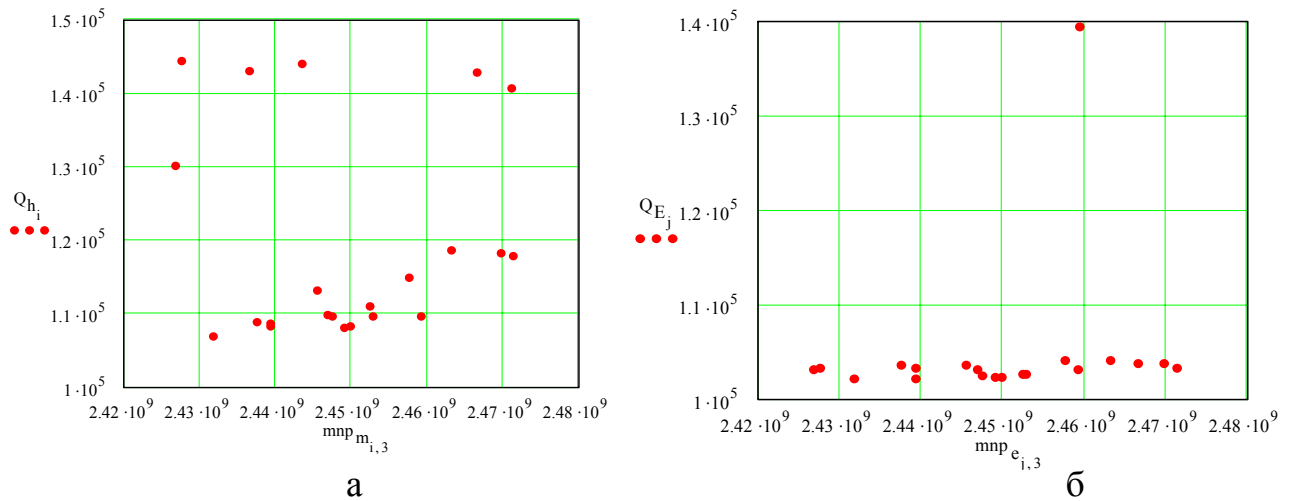


Рис. 1. Залежність добротності від частоти для коливань магнітного (а) та електричного (б) типів

Як видно, коливання магнітного типу можна поділити на дві групи – з більшою і меншою добротностями. Коливання електричного типу, за виключенням одного з них, мають близькі значення добротності, що слід враховувати при побудові системи збудження печі.

3. Збудження резонатора

На рис. 2 зображена камера і отвір, через який вона збуджується. Отвір з розмірами стандартного хвилеводу $b'=90$ мм, $a'=45$ мм розміщений в лівому нижньому куту. Задача збудження розв'язується в режимі заданого поля на отворі зв'язку і зводиться до розв'язання неоднорідних рівнянь Максвелла в комплексній формі:

$$\begin{aligned} \text{rot} \overline{H}_m &= i\omega \varepsilon_a \overline{E}_m + \overline{j}_m^{\text{ct}} \\ \text{rot} \overline{E}_m &= -i\omega \mu_a \overline{H}_m \end{aligned}$$

де $\overline{j}_m^{\text{ct}}$ - сторонні струми, \overline{H}_m і \overline{E}_m - амплітуди напруженостей магнітного і електричного полів відповідно.

Рішення задачі шукаємо, у вигляді суперпозиції всіх можливих власних коливань резонатора: $\vec{E} = \sum a_{mE} \vec{E}_m$; $\vec{H} = \sum a_{mH} \vec{H}_m$

$$E_m \text{ і } H_m \text{ ортогональні, при нормі } N_m = |\varepsilon| \int_v E_m E_m^* dV = |\mu| \int_v H_m H_m^* dV$$

Знаходимо коефіцієнти ортогональних рядів для E та H коливань в камері:

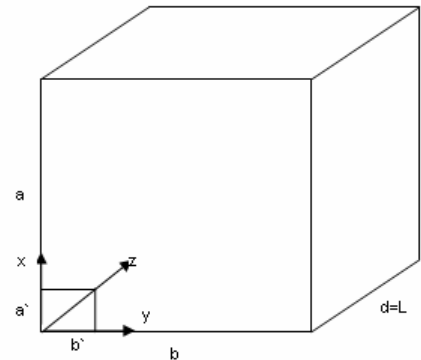


Рис. 2

$$a_{mE} = \frac{L_{mnp}}{\omega_{mnp}} i \frac{A_0}{E_{0mnp}} \frac{8a'}{abd} \frac{\eta_m \sin(\pi n \frac{b'}{b})}{\varepsilon_0 \varepsilon |\mu| \delta_p \mu_0} \quad a_{mH} = - \frac{L_{mnp} \chi_{mn}^2}{(\omega_{mnp} \mu_0 \mu)^2} \frac{A_0}{H_{0mnp}} \frac{8a' b'}{abd} \frac{\frac{p\pi}{d} \frac{m\pi}{a} \eta_m \sin c(n\pi \frac{b'}{b})}{\varepsilon_0 |\varepsilon| ((\frac{m\pi}{a})^2 \delta_n + (\frac{n\pi}{b})^2 \delta_n)}$$

де $L_{mnp} = \frac{Q_{mnp} \omega_{mnp}^*}{\omega \omega_{mnp0} \sqrt{\xi_{mnp}^2 + 1}}$, $\eta_m = \frac{1}{\pi(1 - (m \frac{a'}{a})^2)} \sin(\pi m \frac{a'}{a})$, $\xi_{mnp} = Q_{mnp} (\frac{\omega}{\omega_{mnp0}} - \frac{\omega_{mnp0}}{\omega})$,

$$\delta_p = 1 \quad \omega_{mnp0} = \omega_p \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_e^2}}, \text{ при } p \neq 0 \text{ і } 2 \text{ при } p=0.$$

Формули для повних полів:

$$E_{xE} = -A_e \sum_{k=0}^{19} \frac{\pi p}{l} \frac{\pi m}{a} \frac{1}{(\frac{m\pi}{a})^2 + (\frac{n\pi}{b})^2} T_e \cos(\frac{m\pi}{a} x) \cdot \sin(\frac{n\pi}{b} y) \cdot \sin(\frac{p\pi}{2}) \quad \text{при } p=0$$

$$E_{xE} = -A_e \sum_{k=0}^{19} \frac{\pi p}{l} \frac{1}{(\frac{m\pi}{a})^2 + (\frac{n\pi}{b})^2} T_e \cos(\frac{m\pi}{a} x) \cdot \sin(\frac{n\pi}{b} y) \cdot \sin(\frac{p\pi}{2}) \quad \text{при } p \neq 0$$

$$E_{xH} = -A_H \sum_{k=0}^{21} T_e \frac{\pi m}{a} \frac{\pi p}{l} \frac{1}{(\frac{m\pi}{a})^2 + (\frac{n\pi}{b})^2} \cos(\frac{m\pi}{a} x) \cdot \sin(\frac{n\pi}{b} y) \cdot \sin(\frac{p\pi}{2}); E_x = E_{xE} + E_{xH}$$

Результати розрахунків розподілу поля

E_x по координатам x, y при $z = \frac{d}{2}$ наведено на рис. 3 ($\sigma_m = 5.8 \cdot 10^7$ См/м), рис. 4 ($\sigma_m = 5.8 \cdot 10^3$ См/м), рис. 5 ($\sigma_m = 5.8$ См/м). Розрахунки проведені на частоті 2450 МГц.

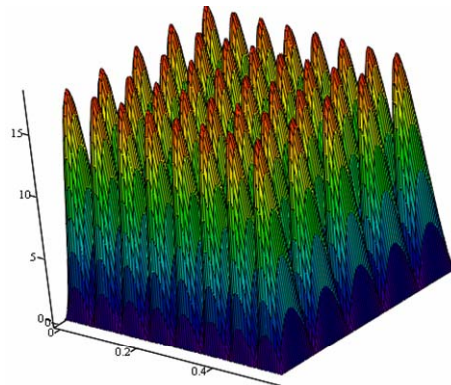


Рис. 3

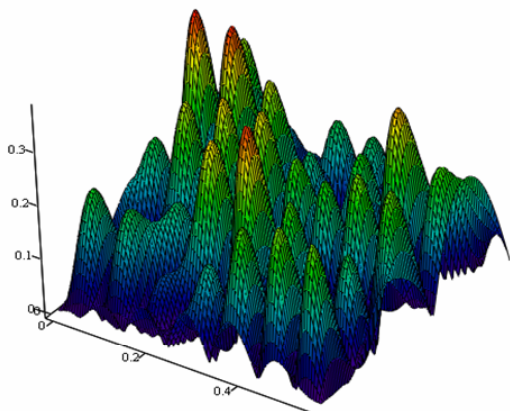


Рис. 4

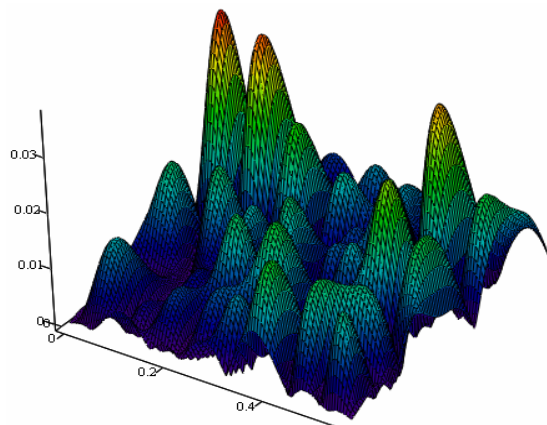


Рис. 5

Залежності добротності від провідності стінок резонатора наведені на рис. 6а, 6б для коливань електричного та магнітного типів відповідно:

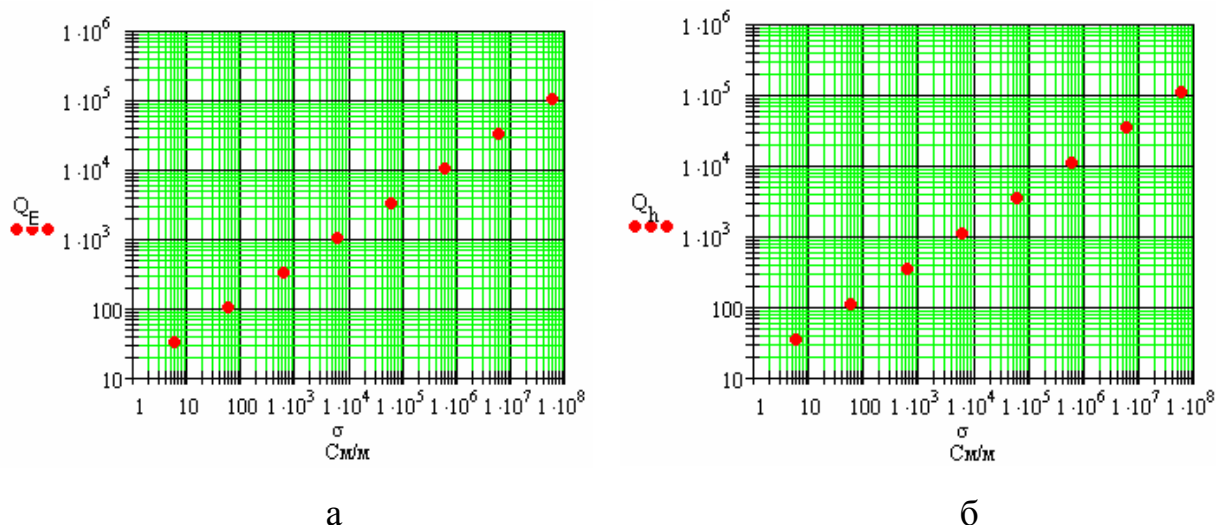


Рис. 6. Залежність добротності від провідності стінок резонатора для коливань електричного (а) та магнітного (б) типів

Наведені залежності показують яку саме провідність потрібно мати для того, щоб добротність камери печі не перевищувала заданого значення.

Висновки

При даних розмірах і провідності стінок камери, характерної для міді, поле в камері на частоті 2450 МГц характеризується стоячою хвилею. При зменшенні провідності амплітуда і неоднорідність поля в центральній частині камери зменшується. Провідність стінок повинна бути меншою за $5 \cdot 10^2$ См/м. Зі зменшенням провідності стінок спостерігаються збільшення амплітуди поля в кутках камери. Неоднорідність поля можна (в обмежених границях) зменшити збільшенням розмірів камери. Основною задачею подальших досліджень слід вважати пошук матеріалу покриття стінок і його узгодження з падаючою хвилею.

Література

1. Федоров Н.Н. Основы электродинамики. М. «Высшая школа», 1980.
2. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн, М. «Наука», 1989.
3. Найдено В.И., Дубровка Ф.Ф. Аксиально-симметрические периодические структуры и резонаторы, Киев «Высшая школа», 1985. – 244 с.

Найденко В.И., Сулима Е.А., Шумаков Д.С., Лебедев А.А.

Расчет электромагнитных полей в устройстве для золениия пищевых продуктов

Рассчитаны резонансные частоты, добротности и число типов колебаний в полосе генерации магнетрона для бытовых микроволновых печей. Исследовано изменение добротности при покрытии стенок камеры поглощающим материалом.

Najdenko V.I., Sulima E.A., Shumakov D.S., Lebedev A.A.

The calculation of the electromagnetic fields in the devises for liming of the foods

It is of the form rectangular wave conductor. Resonant frequencies, Q-qualities, the numbers of vibration types in the magnetron's band of generation for the domestic microwave have been calculated. Changes of quality were analyzed by covering camera's sides with absorbing material.