

УДК 631.371

*О.Г. АВРУНИН, д-р техн. наук, В.В. СЕМЕНЕЦЬ, д-р техн. наук,
Н.Г. КОСУЛИНА, д-р техн. наук, В.С. ПОПРЯДУХИН, канд. техн. наук,
С.В. КУСКОВА, канд. екон. наук*

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРЯМОКУТНОГО ХВИЛЕВОДУ ДЛЯ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ЕНЕРГІЇ В ПРИЗМАТИЧНИЙ РЕЗОНАТОР З ВОВНОЮ

Вступ

Традиційно із-за багатьох своїх якостей вовна є незамінним волокном для виробництва текстильних виробів. Здатність утримувати тепло і вологу, висока міцність, еластичність та пружність, легкість та добра здатність до прядіння вигідно відрізняють вовну від льону та синтетичних волокон. Вовна незамінна при виготовленні верхнього одягу та трикотажу, що є особливо важливим для населення з різко континентальним кліматом [1].

Збереження конкурентоспроможних позицій вовни на ринку текстильних матеріалів в багатьом визначається її якістю. Якість вовняного волокна залежить від її первинної обробки. Однією з первинних задач при обробці вовни є її дезінфекція в технологічному процесі класування та сортування. Встановлено, що в 1 г вовни налічується від 400 до 700 мільйонів бактерій [2].

Аналіз технологічного процесу та обладнання, що використовується на підприємстві з переробки вовни, виявив їх істотні недоліки [1 – 5]:

- в процесі класування та сортування руйнуються природні властивості вовни, стандарту відповідає лише 10 % вовни;

- застосування пари та розчинів формалінів та фенолу для дезінфекції призводить до зменшення розривного навантаження та міцності вовни до 20 %.

Але застосування хімічних дезінфікуючих препаратів для знищення патогенних мікроорганізмів у вовні пов'язане зі значними затратами праці, часу, впливом їх на якість волокна, на організм людини та оточуюче середовище [6 – 9].

Все зазначене потребує розробки нової технології для обробки вовни в кіпах на принципово новій основі [11].

Проведений аналіз показує, що для знищення патогенних мікроорганізмів у вовні, збереження якості волокон вовни та екології навколишнього середовища необхідно застосовувати електромагнітні (ЕМ) методи мм діапазону [12 – 14].

Оскільки кіпи з вовною мають великі габаритні розміри, то виникає проблема з ефективності передачі електромагнітної енергії від джерела в резонатор з вовною.

Літературний огляд

В літературному джерелі [15] розглянута резонансна система для вимірювання хемілюмінесценції біологічних матеріалів. Матеріали для вимірювання розташовувались в циліндричному резонаторі, а для збудження коливань в резонаторі не проводились дослідження щодо ефективності передачі енергії в резонатор.

В роботі [16] для покращення спектральних та енергетичних характеристик генераторів застосовані резонатори з гладкими сферичними та плоскими дзеркалами. Питання ефективності збудження коливань в таких резонаторах не розглядалися.

Для сушки вовни в роботі [17] запропоновано застосовувати пірамідальний рупорний випромінювач електромагнітної енергії. Ефективність роботи випромінювача залежить від його геометричних параметрів, які в роботі не визначені ні теоретично, ні експериментально.

В роботах [18, 19] розглянуто збудження коливань в резонаторних системах міліметрового діапазону, які використовувались для вимірювання електрофізичних параметрів матеріалів та речовин.

Аналіз показує, що резонаторні системи використовувались для вимірювання діелектричних параметрів біологічних речовин та не вимагали досліджень щодо ефективності передачі в резонатор електромагнітної енергії.

Об'єкт, мета і завдання дослідження

Об'єкт дослідження. Процес обробки вовни в об'ємному резонаторі електромагнітною енергією мм діапазону.

Мета роботи – визначення параметрів хвилеводної системи для ефективної передачі електромагнітної енергії в резонатор з вовною в міліметровому діапазоні довжин хвиль.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішувати наступні питання:

1. Розв'язати задачу про збудження призматичного резонатора за допомогою прямокутного хвилеводу.
2. Визначити параметри рупорних випромінювачів та потужність дифракційних генераторів для обробки вовни в кіпах.

Визначення параметрів прямокутного хвилеводу для ефективного передавання електромагнітної енергії в призматичний резонатор

Розглянемо задачу про збудження призматичного резонатора за допомогою прямокутного хвилеводу. Переріз хвилеводу $a \times b$ і будемо вважати, що в ньому розповсюджується тільки одна хвиля H_{20} . Збудження призматичного резонатора за допомогою прямокутного хвилеводу на хвилі H_{20} дозволяє виконати умови по потужності для розігріву та дезінфекції вовни в кіпах та застосувати два дифракційних генератора з потужністю 250 Вт [12]. Розміри самого резонатора дорівнюють: ширина $x_0 = 800$ мм; висота $y_0 = 600$ мм; довжина $z_0 = 900$ мм (рис. 1). Довжина хвилі $\lambda = 8,333$ мм ($f = 36$ ГГц).

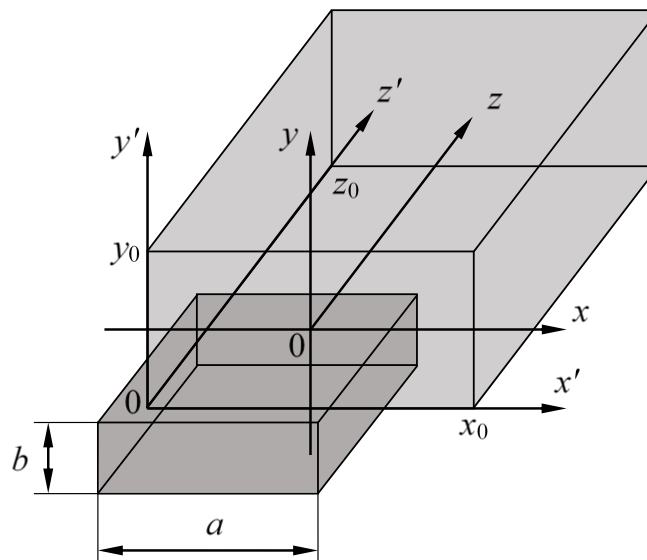


Рис. 1. Призматичний резонатор, що збуджується прямокутним хвилеводом

В загальному випадку для коливання H_{mq} призматичного резонатора в декартовій системі координат розподіл електричного поля має вигляд [12].

$$\begin{cases} \dot{E}_{x'} = A \cos\left(\frac{m\pi x'}{x_0}\right) \sin\left(\frac{n\pi y'}{y_0}\right) \sin\left(\frac{q\pi z'}{z_0}\right), \\ \dot{E}_{y'} = B \sin\left(\frac{m\pi x'}{x_0}\right) \cos\left(\frac{n\pi y'}{y_0}\right) \sin\left(\frac{q\pi z'}{z_0}\right), \\ \dot{E}_{z'} = C \sin\left(\frac{m\pi x'}{x_0}\right) \sin\left(\frac{n\pi y'}{y_0}\right) \cos\left(\frac{q\pi z'}{z_0}\right), \end{cases} \quad (1)$$

а компоненти магнітного поля можна представити як

$$\begin{cases} \dot{H}_{x'} = \frac{\pi}{jk} \left(\frac{n}{y_0} C - \frac{q}{z_0} B \right) \sin\left(\frac{m\pi x'}{x_0}\right) \cos\left(\frac{n\pi y'}{y_0}\right) \cos\left(\frac{q\pi z'}{z_0}\right), \\ \dot{H}_{y'} = \frac{\pi}{jk} \left(\frac{q}{z_0} A - \frac{m}{x_0} C \right) \cos\left(\frac{m\pi x'}{x_0}\right) \sin\left(\frac{n\pi y'}{y_0}\right) \cos\left(\frac{q\pi z'}{z_0}\right), \\ \dot{H}_{z'} = \frac{\pi}{jk} \left(\frac{m}{x_0} B - \frac{n}{y_0} A \right) \cos\left(\frac{m\pi x'}{x_0}\right) \cos\left(\frac{n\pi y'}{y_0}\right) \sin\left(\frac{q\pi z'}{z_0}\right), \end{cases} \quad (2)$$

Тут A, B, C – комплексні амплітудні коефіцієнти; m, n та q – кількість просторових варіацій поля по координатам x', y' та z' , відповідно; $k = \pi \sqrt{(m/x_0)^2 + (n/y_0)^2 + (q/z_0)^2}$ – хвильове число. В усіх випадках пропущений множник $\exp(-j\beta z')$, який при $t = \text{const}$ враховує зміну компонент поля вздовж осі z' . Будемо розглядати збудження коливання H_{20q} , структура якого в поперечному перетині резонатора, що розглядається, найбільш близька до структури електричної компоненти хвилі H_{20} в підвідному хвилеводі. Вираз для цієї компоненти, яку в подальшому будемо називати збуджуючим полем, запишеться як [19]

$$\dot{E}_{y'0} = D \sin \frac{2\pi x'}{a}, \quad (3)$$

де D – комплексний амплітудний коефіцієнт.

Тут, як і попередю, опущено множник $\exp(-j\beta z')$, який описує зміну $\dot{E}_{y'0}$ вздовж осі z' . Якщо тепер перенесемо початок координат в центр поперечного перетину призматичного резонатора (рис. 1), то тоді $x' = x + (x_0/2)$, $y' = y + (y_0/2)$ – для резонатора, $x' = x + (a/2)$, $y' = y + (b/2)$ – для збуджуючого хвилеводу, а $z' = z$. Після підстановки значень x', y' та z' в вирази (1), (2) та враховуючи, що $m = 2$, $n = 0$, отримаємо в кінцевому вигляді вираз для складових поля в призматичному резонаторі:

$$\begin{cases} \dot{E}_x = \dot{E}_z = 0, \\ \dot{E}_y = -B \sin\left(\frac{2\pi x}{x_0}\right) \sin\left(\frac{q\pi z}{z_0}\right), \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{H}_x = A_1 \sin\left(\frac{2\pi x}{x_0}\right) \cos\left(\frac{q\pi z}{z_0}\right), \\ \dot{H}_y = 0, \\ \dot{H}_z = C_1 \cos\left(\frac{2\pi x}{x_0}\right) \sin\left(\frac{q\pi z}{z_0}\right), \end{cases} \quad (5)$$

тут $A_1 = \frac{\pi}{jk} \frac{q}{z_0} B$, $C_1 = \frac{\pi}{jk} \frac{2}{x_0} B$. Компоненту електричного поля \dot{E}_y позначимо як \dot{E}_{yp} . Рівняння (3) при переносі початку координат приймає вигляд

$$\dot{E}_{yp} = -D \sin \frac{2\pi x}{a}. \quad (6)$$

Для знаходження ефективності збудження коливання H_{20q} в призматичному резонаторі за допомогою прямокутного хвилеводу, в якому розповсюджується хвиля H_{20} , скористаємося функціоналом, який застосовується в антенній техніці для визначення коефіцієнта використання поверхні [20]:

$$\eta = \frac{\left| \int_{\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} E_{y\phi}(x, y) E_{yp}^*(x, y) dx dy \right|^2}{\|E_{y\phi}(x, y)\| \|E_{yp}(x, y)\|}, \quad (7)$$

де $\|E_{y\phi}(x, y)\|$ та $\|E_{yp}(x, y)\|$ – норми функції, які в даному випадку визначаються як:

$$\|E_{y\phi}(x, y)\| = \int_{\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} E_{y\phi}(x, y) E_{y\phi}^*(x, y) dx dy, \quad (8)$$

$$\|E_{yp}(x, y)\| = \int_{\frac{-x_0}{2}}^{\frac{x_0}{2}} \int_{\frac{-y_0}{2}}^{\frac{y_0}{2}} E_{yp}(x, y) E_{yp}^*(x, y) dx dy, \quad (9)$$

Знак * позначає комплексно спряжену функцію. Функціонал (7), тобто показує, яка доля збуджуючої хвилі переходить в робоче коливання призматичного резонатора.

Після підстановки значення $\dot{E}_{y\phi}$, що визначається виразом (6), в рівняння (8), отримаємо

$$\|E_{y\phi}(x, y)\| = D^2 \int_{\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \sin^2\left(\frac{2\pi x}{a}\right) dx dy. \quad (10)$$

Опускаючи проміжні викладки, запишемо в кінцевому вигляді норму функції, що визначає збуджуюче поле:

$$\|E_{y\phi}(x, y)\| = D^2 \frac{ab}{2}. \quad (11)$$

Аналогічно попередньому випадку, після підстановки значення E_{yp} , яке визначається рівнянням (4), в вираз (9), отримаємо:

$$\|E_{yp}(x, y)\| \left(B \sin\left(\frac{q\pi z}{z_0}\right) \right)^2 \int_{\frac{-x_0}{2}}^{\frac{x_0}{2}} \int_{\frac{-y_0}{2}}^{\frac{y_0}{2}} \sin^2\left(\frac{2\pi x}{x_0}\right) dx dy. \quad (12)$$

Тепер запишемо в кінцевому вигляді, опускаючи проміжні викладки, норму функції, яка визначає робоче коливання призматичного резонатора,

$$\|E_{yp}(x, y)\| = \left(B \sin\left(\frac{q\pi z}{z_0}\right) \right)^2 \frac{x_0 y_0}{2}. \quad (13)$$

В якості наступного кроку розглянемо інтеграл, що стоїть в чисельнику виразу (7):

$$H(x, y) = (-D) \left(-B \sin\left(\frac{q\pi}{z_0} z\right) \right) \int_{\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \int_{\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \sin\left(\frac{2\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{2\pi x}{x_0}\right) dx dy, \quad (14)$$

З урахуванням того, що [4]:

$$\sin\left(\frac{2\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{2\pi x}{x_0}\right) = \frac{1}{2} \left[\cos\left(2\pi x \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{x_0}\right)\right) - \cos\left(2\pi x \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{x_0}\right)\right) \right],$$

запишемо вираз (14) в кінцевому вигляді:

$$H(x, y) = D \left(B \sin\left(\frac{q\pi}{z_0} z\right) \right) \frac{ab}{\pi} \sin\left(\frac{\pi a}{x_0}\right) \frac{1}{(1 - (a/x_0)^2)}. \quad (15)$$

Після підстановки виразів (11), (13) та (15) в співвідношення (7) отримуємо рівняння, що визначає ефективність збудження коливання H_{20q} в призматичному резонаторі за допомогою хвилі H_{20} прямокутного хвильоводу:

$$\eta = \frac{4\tilde{a}\tilde{b} \sin^2(\pi\tilde{a})}{\pi^2 (1 - \tilde{a}^2)^2}. \quad (16)$$

Тут зроблені позначення: $\tilde{a} = a/x_0$; $\tilde{b} = b/y_0$. Результати розрахунку за формулою (16) представлено на рис. 2.

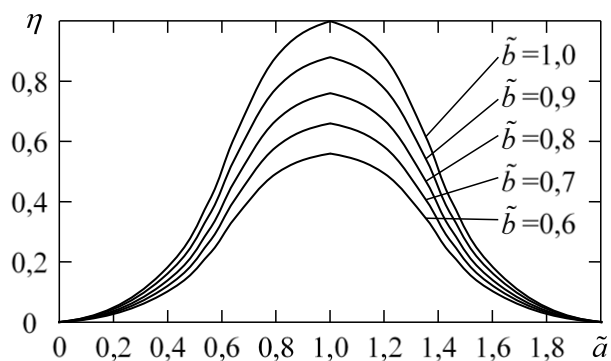


Рис. 2. Залежність ефективності збудження η коливань H_{20q} в призматичному резонаторі від розмірів живлячого хвильоводу

Як видно з рис. 2, максимальна ефективність збудження коливання H_{20q} в резонаторі незалежно від висоти хвильоводу \tilde{b} буде мати місце при $\tilde{a} = 1$, тобто коли ширина хвильоводу a дорівнює ширині резонатора x_0 . Водночас, якщо висота хвильоводу b буде дорівнювати висоті резонатора y_0 при $\tilde{a} = 1$, тоді ефективність збудження коливання, що розглядається, в резонаторі за допомогою хвилі H_{20} буде максимальною і дорівнюватиме одиниці. Таким чином, на підставі проведених дослідів можна зробити декілька важливих практичних висновків. По-перше, для отримання максимальної величини η поперечні розміри резонатора та живлячого хвильоводу повинні бути рівні, а, по-друге, структури електричних полів в по-

перечному перетині резонатора та хвилеводу в площині аналізу повинні бути максимально подібні. Враховуючи, що поперечний перетин хвилеводу восьмиміліметрового діапазону 7,2x3,4 мм, а поперечні розміри резонатора 800x600 мм, живлячий хвилевід буде являти собою пірамідальний рупор.

При збудженні призматичного резонатора рупорними випромінювачами основне значення набуває розподіл фази в розкриві такого рупора, оскільки фазовий фронт має максимально наближатися до плоского. Для зменшення розкриву рупорів розглянемо збудження резонатора за допомогою двох хвилеводів, в кожному з яких розповсюджується хвиля H_{20} .

В цьому випадку кожний живлячий хвилевід являтиме собою пірамідальний рупор, розміри розкриву якого будуть 400x600 мм. Ефективність збудження коливання, що розглядається, при цьому не зміниться.

Необхідно зазначити, що одним з недоліків рупорного випромінювача є швидке зростання його довжини при збільшенні розмірів розкриву рупора. Хоча нам і вдалося зменшити поперечний переріз рупорного випромінювача завдяки застосуванню двох збуджуючих елементів, але не дозволило вирішити проблему. Оскільки довжина кожного рупорного випромінювача L_H або L_E зростає пропорційно $(x_0/2)^2$ або y_0^2 , то для отримання синфазного розподілу поля в розкриві при поперечних розмірах 400x600 мм величина L стає надзвичайно великою [21]:

$$\theta_{\max} = \frac{\pi(x_0/2)^2}{4\lambda L_H}, \quad (17)$$

$$\theta_{\max} = \frac{\pi y_0^2}{4\lambda L_E}. \quad (18)$$

де L_H і L_E – відстань від розкриву до точки, в якій збігаються ребра пірамідального рупора в площинах векторів \vec{H} і \vec{E} відповідно.

Зменшити довжину рупора при заданих поперечних розмірах можливо, розташувавши у розкриві діелектричну лінзу, виготовлену з матеріалу з малими втратами і що має коефіцієнт переломлення $n = \sqrt{\epsilon'}$. На рис. 3 показаний переріз пірамідального рупора в площині вектору \vec{E} з діелектричною лінзою в розкриві.

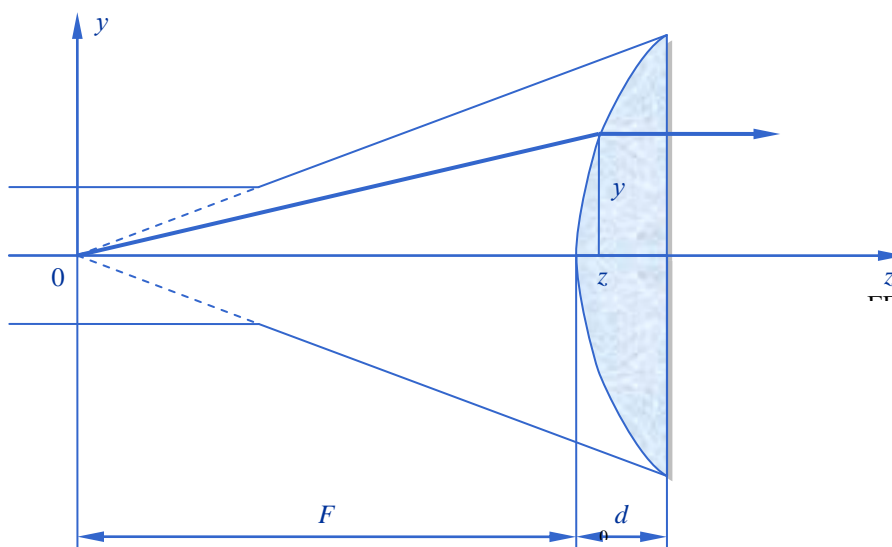


Рис. 3. Переріз пірамідального рупора з діелектричною лінзою

Для випадку $n > 1$ [22]

$$\frac{F}{c} + \frac{z}{V_{\text{фаз}}} = \frac{\sqrt{(F+z)^2 + y^2}}{c}, \quad (19)$$

де c – швидкість ЕМ хвилі у вільному середовищі; $V_{\text{фаз}}$ – швидкість ЕМ хвилі в діелектрику; F – фокусна відстань лінзи; $V_{\text{фаз}} = c/n = c/\sqrt{\varepsilon'}$; $F + d = L_0$.

Помноживши обидві частини рівняння (19) на c , замінивши $c/V_{\text{фаз}}$ через коефіцієнт переломлення n і звільнившись від радикалу, отримуємо:

$$z^2(n^2 - 1) + 2Fz(n - 1) - y^2 = 0. \quad (20)$$

Вираз (20) є рівнянням гіперболи. Знаючи розміри розкриву лінзи $x_0/2 = 400$ мм та $y_0 = 600$ мм, можна знайти її товщину, яка в середній частині дорівнює [23]

$$d = \sqrt{\left(\frac{L_0 - d}{n + 1}\right)^2 + \frac{(D/2)^2}{n^2 - 1}} - \frac{(L_0 - d)}{n + 1}, \quad (21)$$

де $D = \sqrt{(x_0/2)^2 + y_0^2}$.

Враховуючи розміри розкриву пірамідального рупора, що розглядається, задаємо $L_0 = 1000$ мм. В якості матеріалу для виготовлення лінзи застосуємо фторопласт, для якого в міліметровому діапазоні довжин хвиль $\varepsilon' = 2,08$, $\text{tg}\delta = 3 \cdot 10^{-4}$ [24]. Рівняння (21) розв'язуємо графічно. Результати розв'язання запропоновано на рис. 4, на якому наведено дві залежності:

$$y_1(d) = \sqrt{\left(\frac{1000 - d}{\sqrt{2,08} + 1}\right)^2 + \frac{(D/2)^2}{2,08 - 1}} - \frac{(1000 - d)}{\sqrt{2,08} + 1},$$

де $D = \sqrt{(400)^2 + (600)^2}$, (крива 1) и $y_2(d) = d$ (крива 2).

Як видно з рисунка, рівняння (21) має розв'язок при $d = 142,5$ мм. На виході пірамідального рупора з лінзою отримуємо плоский фазовий фронт, що як раз необхідно для збудження з максимальною ефективністю коливання H_{20q} в призматичному резонаторі.

Оскільки в хвилеводі розповсюджується хвиля H_{20} , то для збудження коливання H_{20q} в резонаторі з вовною повинні застосовуватися два генератори.

Як показали чисельні розрахунки, для створення двох пірамідальних випромінювачів з розмірами 400×600 мм і фокусною відстанню $F = 857,5$ мм на частоті 36 ГГц, необхідно в розкриві пірамідальних рупорів розміщувати діелектричні лінзи з фторопласту с $\varepsilon' = 2,08$, $\text{tg}\delta = 3 \cdot 10^{-4}$ і товщиною $\alpha = 142,5$ мм (див. рис. 3).

З аналізу джерел випромінювання в міліметровому діапазоні довжин хвиль випливає, що для забезпечення потужності 500 Вт в резонаторі з вовною слід застосовувати два генератори дифракційного випромінювання з вихідною потужністю 250 Вт кожний.

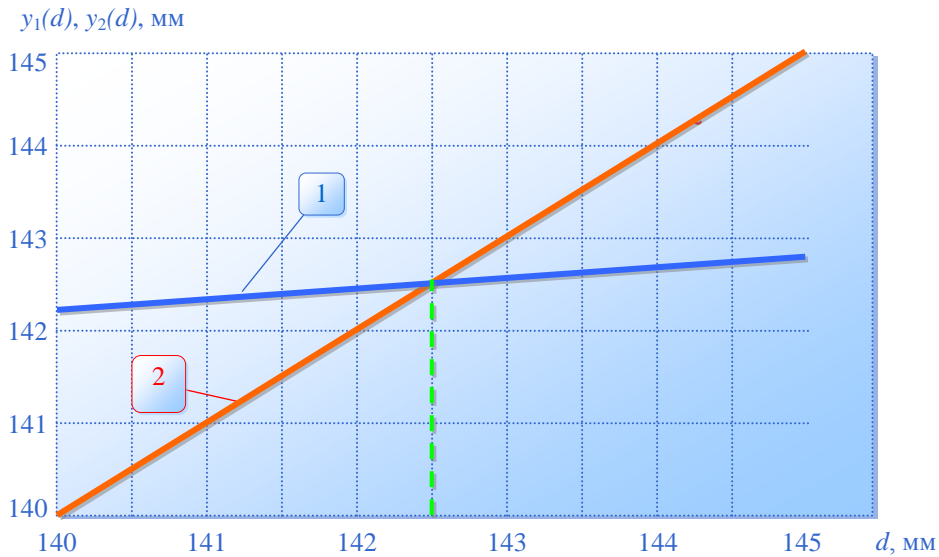


Рис. 4. Розв'язання трансцендентного рівняння (21)

Застосування двох пірамідальних випромінювачів ЕМ енергії в міліметровому діапазоні довжин хвиль з діелектричними лінзами розв'язує задачу зменшення габаритних розмірів випромінювачів, але не вирішує задачу узгодження джерел енергії з навантаженням. Задача узгодження джерел енергії з навантаженням реалізується опромінювачами з \vec{E} -поляризованою дифракційною решіткою з періодом 2,4 мм и діаметром провідників 0,2 мм.

Структурна схема розробленої електронної системи представлена на рис. 5. На схемі (рис. 5) показано генератори дифракційного випромінювання Г1 та Г2 з блоками живлення БЖ. Для розв'язки з резонатором застосовано феритові вентиля 1 та 2. В тракти обох генераторів включені подвійні спрямовуючі відгалужувачі 7 та 8, завдяки яким ми контролюємо рівні падаючої потужності обох генераторів за допомогою вимірювачів потужності ВП.

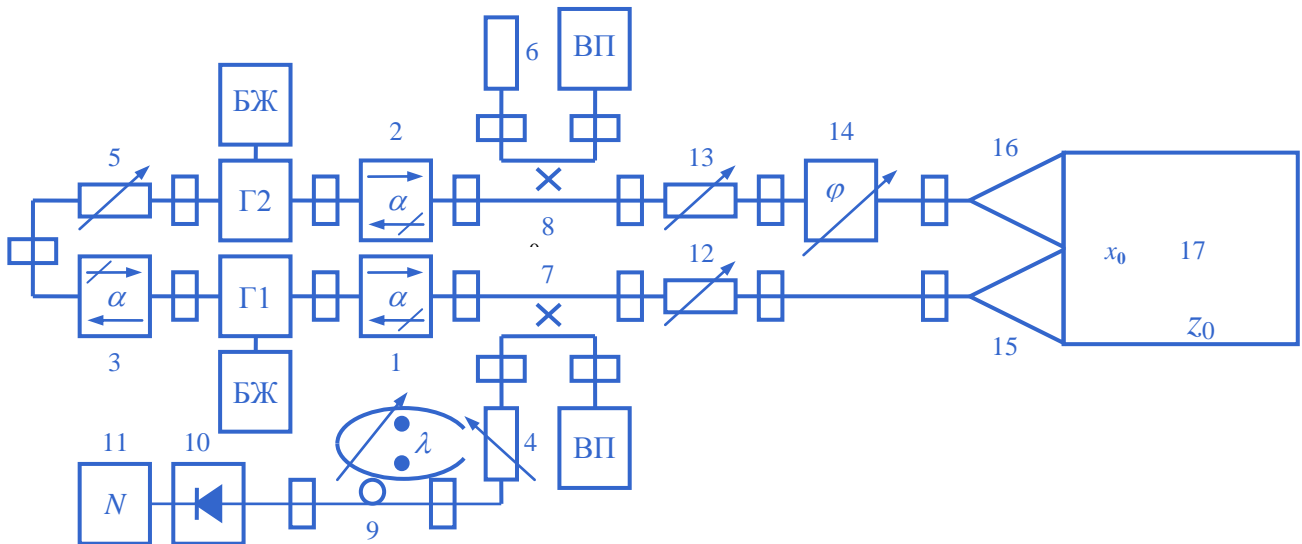


Рис. 5. Схема збудження коливання H_{20q} в призматичному резонаторі

Для контролю частоти генератора Г1 передбачено додатковий тракт, який містить в собі атенюатор 4, хвилемір 9, детектор 10 та осцилограф 11. В тракці генератора Г2 в

аналогічному каналі напрямленого відгалужувача 8 розміщене узгоджене навантаження 6. Для збудження резонатора 17 використовуються два рупора 15, 16.

Кожний рупор виготовляється з листової латуні товщиною 3 мм за допомогою пайки. Розмір розкриття обох рупорів дорівнює 397×600 мм (с урахуванням товщини матеріалу). При цьому довжина конусної частини дорівнює ~ 1000 мм. Кожний рупор виводиться на стандартний переріз хвилеводу $7,2 \times 3,4$ мм, по якому підводиться потужність до резонатора від генератора дифракційного випромінювання (ГДВ). Зовнішній вигляд живлячого рупора (лівого) показано на рис. 6.

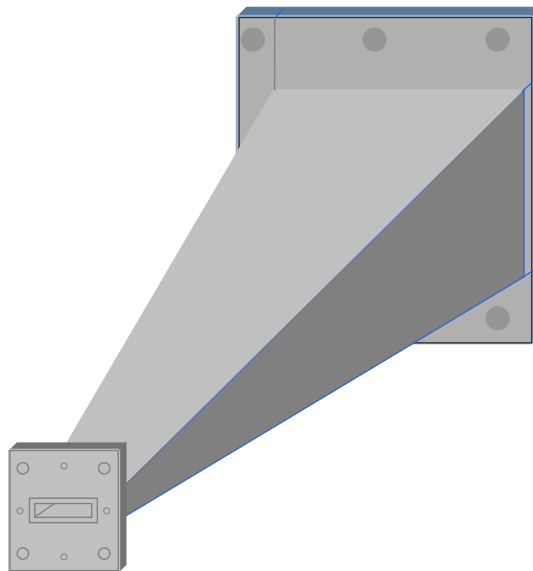


Рис. 6. Зовнішній вигляд рупора

Другий рупор (правий) є дзеркальним відбиттям першого.

При такому живленні резонатора фази збуджуючих полів у розкриттях обох рупорів мають бути зсунуті на 180° . Цього легко домогтися за допомогою фазообертача 14, включеного в тракт генератора Г2. Але тут виникає технічна складність, а саме: частоти обох генераторів при такому способі збудження повинні бути рівні. Оскільки в якості джерел застосовуються ГДВ, вихідна потужність кожного з яких близько 250 Вт, то це питання вирішуване. На периферії сферичних дзеркал у обох генераторів виконані додаткові елементи зв'язку, які слабо збуджують робоче коливання в електродинамічній системі ГДВ. Завдяки цьому вдалося організувати режим зовнішньої синхронізації генератора Г2 за допомогою генератора Г1. В коло зв'язку обох генераторів входять феритовий вентиль 3 та атенуатор 5. Перевага такого способу збудження полягає в тому, що як мінімум в два рази збільшується потужність, що поступає в резонатор, за рахунок використання двох генераторів НВЧ Г1 та Г2.

Завдяки такому способу живлення нам вдалося розділити функції узгодження по полю і по зв'язку. За рахунок вибору поперечних розмірів рупорних випромінювачів, які в сумі дорівнюють поперечному перетину призматичного резонатора, вдалося узгодити в площині аналізу $z = 0$ структури полів хвиль H_{20} і коливання резонатора H_{20q} .

Висновки

1. Для збудження призматичного резонатора з розмірами $800 \times 600 \times 900$ мм джерелом ЕМ коливань з довжиною хвилі 8,333 мм необхідно застосовувати два рупорних випромінювачі з розмірами 400×600 мм і фокусною відстанню $F = 857,5$ мм, в розкритті яких розміщені діелектричні лінзи з фторопласту з $\varepsilon' = 2,08$, $\text{tg} \delta = 3 \cdot 10^{-4}$.

2. Потужність, необхідну для пригнічення патогенних мікроорганізмів у вовні та її розігріві, можна отримати, використовуючи два дифракційні генератори з вихідною потужністю 250 Вт кожний і настроювання частоти в діапазоні 35,3 – 36,3 ГГц.

Список літератури:

1. Купрашевич В. И. Общая технология шерстяного производства. Москва : Легпромбытиздат, 1988. 172 с.
2. Grove C. C. The Influence of Temperature on the Scouring of Raw Wool // Amer. Dyestuff Rep. 2008. P. 13-16.
3. Simson W. S. Wool chemistry // Wool. Science and Technology. 2007. P. 130-159.
4. Hearle J. W. Physical properties of wool // Wool. Science and Technology. 2007. P. 80-129.
5. Denning R. Enhancing wool product using nanotechnology // Advanced in Wool Technology. 2009. P. 248-264.
6. Roche J. The production of wool // The international wool trade. 2005. P. 17-38.
7. Ismail H.F., Osman E., AL-Omari A.K. Avrunin, O.G. The Role of Paranasal Sinuses in the Aerodynamics of the Nasal Cavities // International Journal of Life Science and Medical Research. 2012. №2, 3. P. 52-55, doi:10.5963/LSMR0203004.
8. H.F. Ismail Saied, A.K. Al_Omari, and O.G. Avrunin. An Attempt of the Determination of Aerodynamic Characteristics of Nasal Airways // Image Processing & Communications, challenges 3, AISC 102. P. 303-310. Springer Verlag Berlin Heidelberg. 2011. P. 311-322.
9. Nosova Y. Біотехнічна система для комплексної ольфактометричної діагностики / Y. Nosova, O. Avrunin, V. Semenets // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 2017. №. 1 (1). P. 64-68. doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.064
10. Avrunin O., Shushlyapina N., Nosova Y., Bogdan O. Olfactometry diagnostic at the modern stage // Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies, NTU "KhPI". Kharkiv, 2016. No. 12 (1184). P. 95-100, DOI: 10.20998/2413- 4295.2016.12.13
11. Cotlee D. J. World sheep and wool production // International Sheep and Wool Handbook. 2013. P. 1-48.
12. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. Москва : Наука, 1989. 544 с.
13. Семенец В.В. Технология межсоединений электронной аппаратуры : учеб. для вузов / В.В. Семенец, Джон Кратц, И.Ш. Невлюдов, В.А. Палагин. Харьков : СМІТ, 2005. 432 с.
14. Wang H. The Wool Shrink-Proof Technology of Sericin Bonding Wool // Advanced Materials Research. 2013. P. 1310-1313.
15. Черенков А. Д. Исследование открытой резонансной системы с отрезками круглого волновода / А. Д. Черенков, Н. П. Кунденко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. № 3/5 (57). С. 11-13.
16. Черенков А. Д. Анализ методов построения источников СВЧ излучения с высокой стабильностью частоты / А. Д. Черенков, Н. П. Кунденко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. №2/8 (36). С. 18-22.
17. Kosulina N. Determining parameters of electromagnetic radiation for energoinformational disinfection of wool in its pretreatment / N. Kosulina, A. Cherenkov, E. Pirotti, S. Moroz, M. Chorna // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2017. № 2/5 (86). С. 52-59.
18. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны. Москва : Радио и связь, 1988. 440 с.
19. Вольман В.И. Техническая электродинамика / В.И. Вольман, Ю.В. Пименов. Москва : Связь, 1971. 488 с.
20. Сканирующие антенные системы СВЧ ; пер. с англ. под ред. Г. Е. Маркова и А. Ф. Чаплина. Москва : Сов. радио, 1996. 536 с.
21. Антенны и устройства СВЧ ; под ред. Д.И.Воскресенского. Москва : Сов. радио, 1972. 320 с.
22. Фрадин А. З. Антенны сверхвысоких частот. Москва : Сов. радио, 1957. 648 с.
23. Дрягин Ю. А. Измерение параметров твердых диэлектриков в коротковолновой части миллиметрового диапазона резонансным методом / Ю. А. Дрягин, А. Н. Чухвачев // Изв. вузов. Радиофизика. 1969. Т. 12, № 8. С. 1245-1248.
24. Егоров В. Н. Резонансные методы исследования диэлектриков на СВЧ // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 2. С. 5-38.

*Харківський національний
університет радіоелектроніки;
Харківський національний технічний університет
сільського господарства імені Петра Василенка;
Таврійський державний
агротехнологічний університет*

Надійшла до редколегії 23.05.2019