



# ПРИСТРОЇ ФОРМУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ НВЧ ДЛЯ ОПРОМІНЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ

дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
спеціальність 05.12.13 — Радіотехнічні пристрої та засоби телекомунікацій

Автор:  
Науковий керівник:  
Науковий консультант:

Туровський Анатолій Олександрович  
д.т.н., проф. Зіньковський Ю.Ф.  
Сидорук Ю.К.

Київ, 2014

- Опромінення електромагнітним полем (ЕМП) забезпечує підвищення **якості** сільськогосподарської продукції і зменшення **втрат** при виробництві та зберіганні;
- Енергія ЕМП володіє рядом переваг перед **традиційними** методами обробки зерна для передпосівної обробки, знезараження, дезінсекції, сушіння тощо;
- У більшості відомих пристроїв рівномірність опромінення сировини забезпечується виключно **механічним** засобами, а електродинамічні підходи для формування рівномірного розподілу поля практично відсутні; опромінення виконується переважно у резонаторній камері, у якій створюється режим стоячої хвилі, що викликає нерівномірну обробку;
- Практично усім відомих пристроям характерна відсутність заходів по забезпеченню **рівномірного** розподілу поля у камері обробки, а використані підходи не дають змоги ефективно підводити енергію до сировини;
- Для успішного застосування напрацювань в області застосування ЕМП НВЧ для опромінення діелектричних сипучих матеріалів (ДСМ) актуальним є **розроблення** принципів побудови робочих камер, формування розподілу електромагнітного поля у яких забезпечить **рівномірність** опромінення сировини та високу **енергоефективність**.

**Мета дослідження** полягає у розробленні принципів та складових елементів пристроїв для реалізації опромінення електромагнітним полем надвисокої частоти діелектричних сипучих матеріалів для забезпечення високої рівномірності та ефективності обробки.

**Об'єктом дослідження** є опромінення діелектричних сипучих матеріалів електромагнітним полем надвисоких частот.

**Предмет дослідження** — камери обробки для ефективного опромінення сировини електромагнітним полем.

*Вказана мета вимагає вирішення наступних **завдань**:*

1. Проаналізувати **особливості** конструкцій відомих пристроїв для опромінення діелектричних сипучих матеріалів електромагнітним полем.
2. Розробити принципи побудови пристроїв для опромінення діелектричних сипучих матеріалів, що забезпечать високу **рівномірність** та **енергоефективність** обробки сировини.
3. Розробити **моделі** робочих камер пристроїв опромінення діелектричних сипучих матеріалів, що забезпечать реалізацію запропонованих принципів.
4. Дослідити електродинамічні **характеристики** складових елементів моделей робочих камер для оцінки та оптимізації їх параметрів.
5. **Проаналізувати** розроблені моделі робочих камер та **дослідити** досяжні значення показників рівномірності опромінення діелектричної сипучої речовини та оцінити їх енергоефективність.

1. Запропоновано **нові принципи** побудови робочих камер опромінення діелектричних сипучих матеріалів, які передбачають **багаторазове проходження** енергії крізь оброблювану сировину, завдяки чому підвищується рівномірність розподілу поля у камері обробки і рівномірність обробки сипучого матеріалу при високій енергоефективності процесу.
2. Розроблені **оригінальні моделі** конструкцій робочих камер, в яких запропоновано використовувати елементи робочої камери в якості елементів **узгодження** для зниження коефіцієнта відбивання електромагнітних хвиль від камери обробки і, відповідно, підвищення ефективності пристрою;
3. Розроблено **методику** для визначення коефіцієнтів проходження і відбивання хвиль при довільному падінні на поляризаційно-вибіркову структуру, утворену поляризаційним дзеркалом робочої камери, та межу розділу двох діелектричних середовищ.
4. Запропоновано представити випромінювальні елементи (щілини) у вигляді **еквівалентних схем** теорії кіл, на основі чого розроблено **алгоритм** проектування лінійних випромінювальних хвилеводних решіток для забезпечення заданого профілю розподілу поля вздовж осі камери обробки.
5. Виконані аналітичне, чисельне та експериментальне **дослідження** елементів, що входять до складу робочих камер — поляризаційних дзеркал, трансполіризаційних відбивачів, лінійних хвилеводних випромінювачів, результати яких можуть використовуватись для побудови пристроїв опромінення ДСМ електромагнітним полем НВЧ.

За правильного вибору і дотримання **необхідних режимів** опромінення зерна забезпечується відсутність погіршення його товарних характеристик. Залежно від режиму, нагрівання зерна енергією ЕМП сприяє **підвищенню** індексу клейковини, енергії **проростання**, покращенню **хлібопекарських** властивостей тощо. Забезпечується зниження кількості крохмалю, зростання кількості цукрів, зростає амілазна активність, знижується рівень кислотності, який вказує на псування жирів у продукті внаслідок зберігання, при цьому при подальшому зберіганні підвищення цього показника відбувається удвічі—тричі повільніше.

ЕМП НВЧ також є ефективним інструментом для **дезінфекції** та **дезінсекції**, основним діючим фактором для чого є швидкість нагрівання  $v_{\text{наг}}$ , і при  $v_{\text{наг}}=0,6—0,8^{\circ}\text{C}/\text{с}$  представники мікрофлори та **шкідників** піддаються впливу теплового шоку, що призводить до їх загибелі навіть при відносно невисокій температурі.

Важливим ефектом від нагрівання насіння полем НВЧ є **підвищення проростання** та урожайності, забезпечуючи екологічну чистоту методу. Нагріваючи насіння зі швидкістю  $0,6—0,8^{\circ}\text{C}/\text{с}$  протягом 60—90 с їх урожайність зростає на 10—20%, інтенсивність захворювань знижується.

Основними перевагами ЕМП при сушінні ДСМ є **безпосередність нагріву** сировини без нагріву агента сушіння, **безінерційність** процесу, залежність інтенсивності сушіння від вологості продукту, що сприяє витисненню парів води із внутрішніх шарів зернівки назовні.



Більшість відомих засобів, призначених для оброблення ДСМ електромагнітним полем, передбачають опромінення сировини, що переміщується по **транспортеру**; функціонування частини пристроїв ґрунтується на періодичному завантаженні та розвантаженні камери, що, не сприяє продуктивній роботі таких установок. Недоліком стрічкових транспортерів є принципова складність забезпечити рівномірне опромінення сировини. Більшості пристроям характерно, що сировина розташовується на транспортері **тонким шаром**, внаслідок чого при **однократному** проходженні хвилі лише незначна частина її енергії віддається матеріалу, що підвищує розсіювання енергії на стінках, призводить до низької продуктивності.

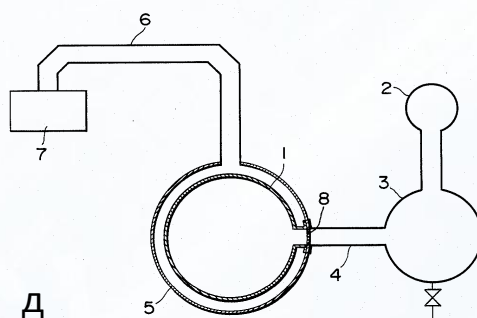
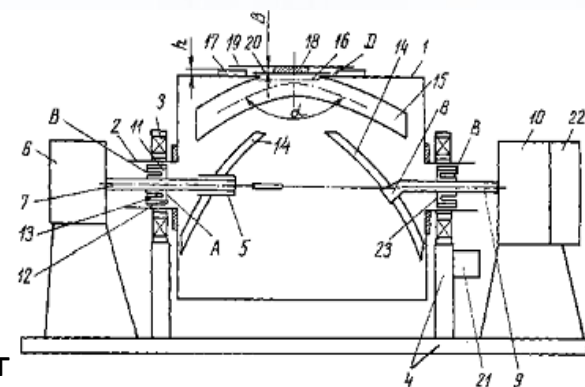
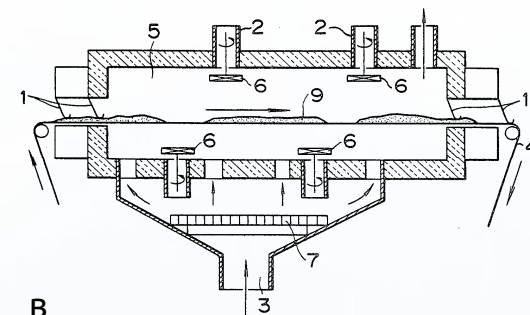
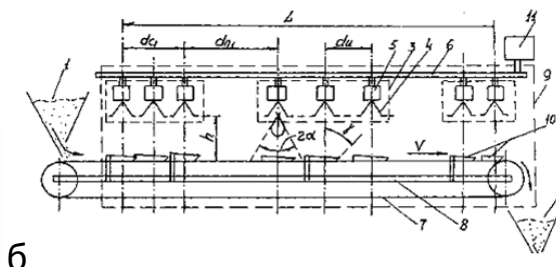
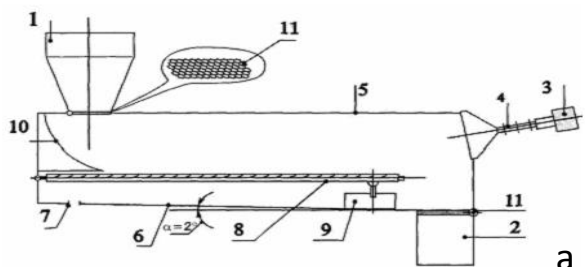
Значним недоліком, властивим більшості установок, є використання **одногогенераторного** джерела енергії, що, з однієї сторони, сприяє зниженню **рівномірності** розподілу поля у камері внаслідок утворення стоячої хвилі, і, з іншого боку, призводить до значного **зростання** вартості і зниження ресурсу пристрою.

В силу того, що практично відсутні заходи щодо підвищення рівномірності розподілу поля по перетину шару сировини, поширеними є **механічні** засоби для перемішування матеріалу, що, однак, не в силі забезпечити рівномірність поглинання енергії усіма зернівками.

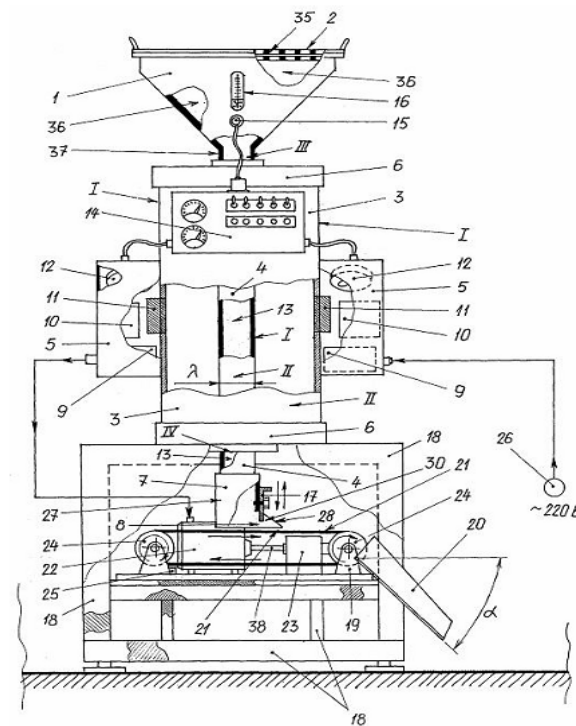
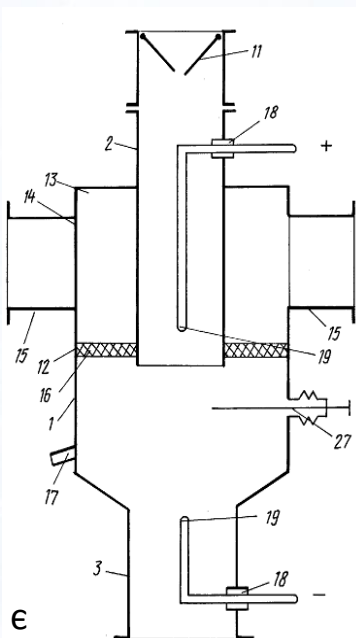
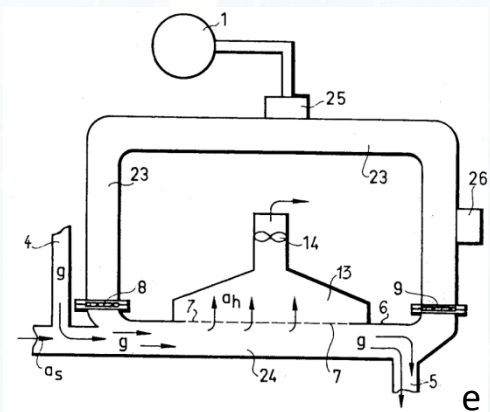
З проведеного аналізу відомих пристроїв обробки ДСМ полем НВЧ випливає висновок, що на даний час відсутня достатня **методологічна і теоретична** база для проектування установок, що забезпечать рівномірне опромінення усього матеріалу у поєднанні з високою **енергетичною ефективністю** процесу, і актуальним є розроблення принципів побудови камер обробки, формування розподілу електромагнітного поля у яких забезпечить рівномірність опромінення сировини та високу енергоефективність процесу.

# Особливості конструкцій існуючих пристроїв

7



Одногенераторне джерело  
Горизонтальний транспортер  
Механічні засоби  
Резонаторні камери

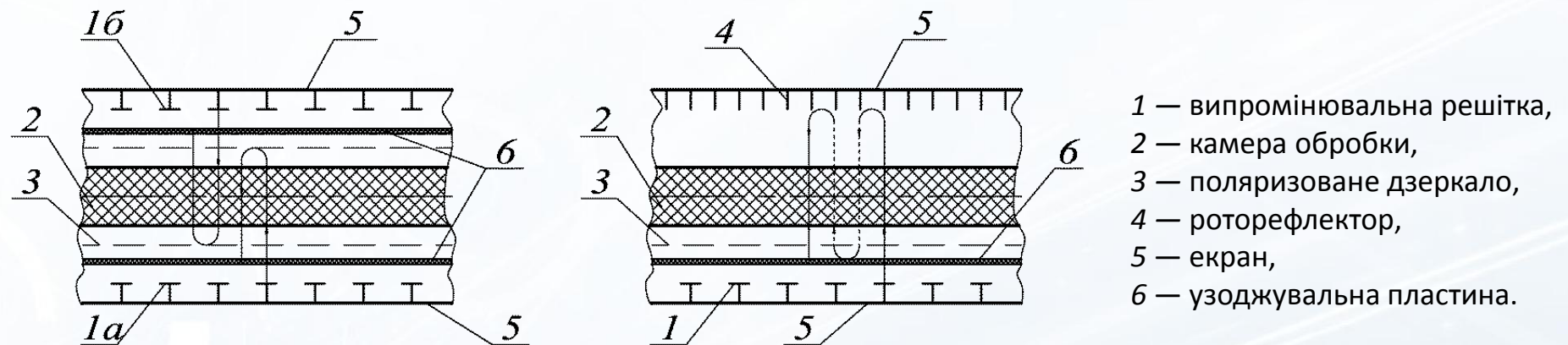


Ж

# Методи удосконалення робочих камер

8

Для забезпечення високої рівномірності розподілу поля у оброблюваній сировині запропонований метод **багаторазового проходження хвиль**, який реалізується на основі використання ефекту відбивання за допомогою зустрічнорефлекторного або роторефлекторного принципів.



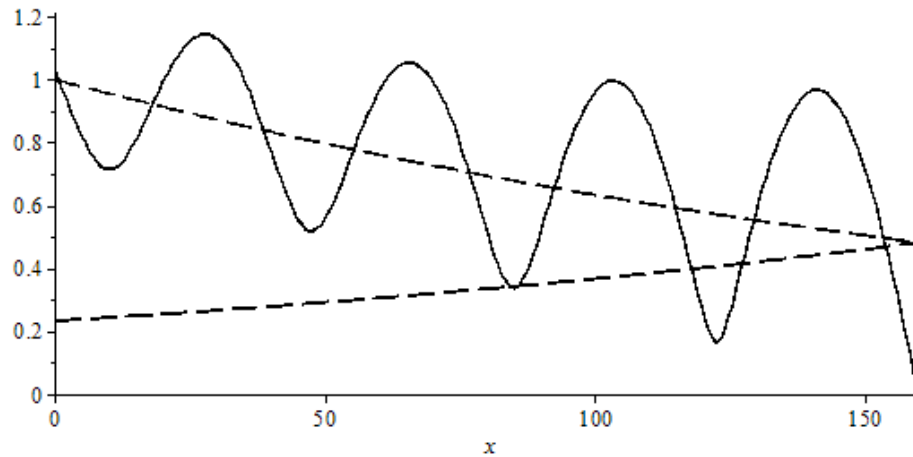
Плоскі зустрічнорефлекторна та роторефлекторна моделі робочих камер

Основна проблема плоскопаралельних камер - складність забезпечення рівномірного розподілу напруженості поля від центральної до периферійної частин внаслідок спадання напруженості електричного поля на краях камери.

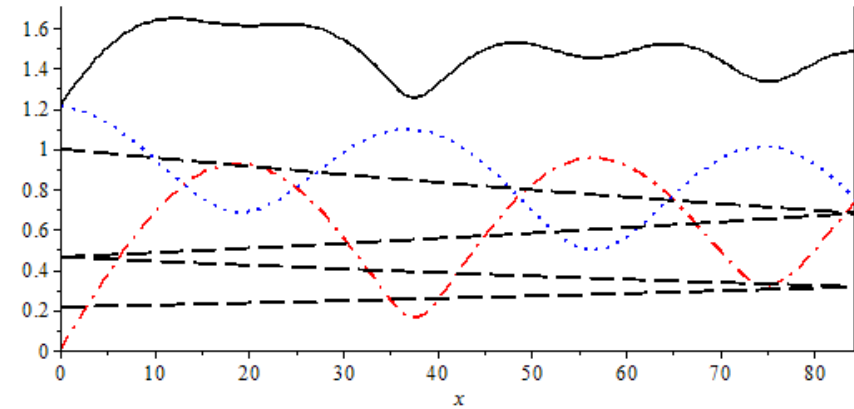


# Підвищення рівномірності поля

9

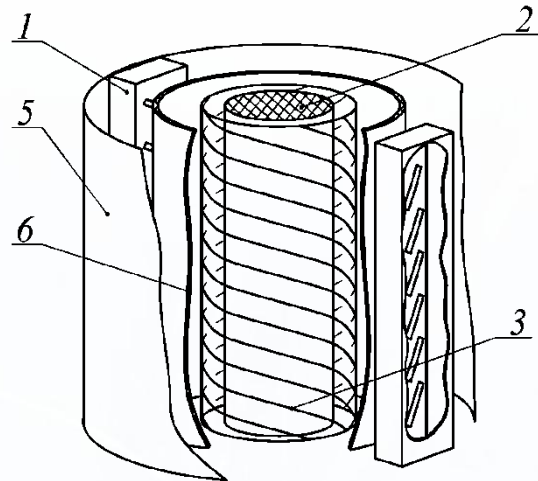


— сумарна напруженість ел. поля  
- - напруженість ел. поля складових



— сумарна напруженість ел. поля  
- - напруженість ел. поля перп. поляр. складових  
... напруженість ел. поля парал. поляр. складових  
- - напруженість ел. поля окремих хвиль

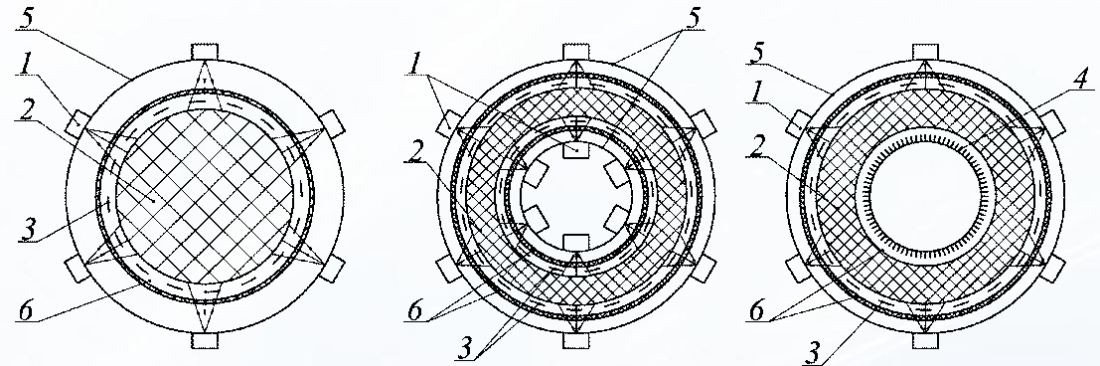
# Циліндричні моделі робочих камер



Циліндрична робоча камера

- 1 — лінійний опромінювач,
- 2 — оброблюване середовище,
- 3 — поляризоване дзеркало,
- 4 — роторефлектор,
- 5 — зовнішній екран,
- 6 — узгоджувальна стінка

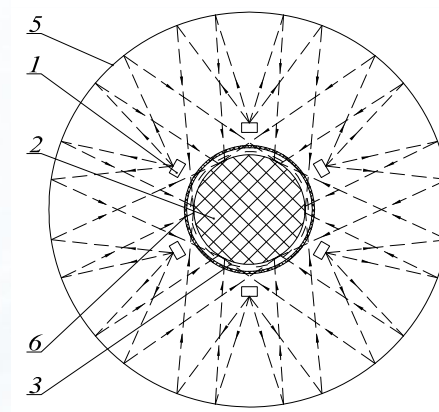
Для подолання проблеми забезпечення рівномірного розподілу поля пропонується використовувати робочі камери, виконану у формі циліндра.



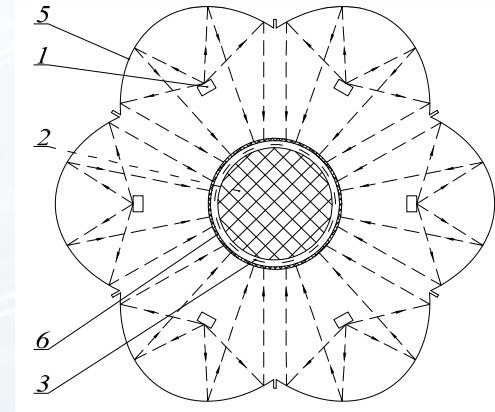
а

б

в



г



д

Циліндричні робочі камери  
а, б – зустрічнорефлекторна, в – роторефлекторна  
камера, г, д – з перевідбиванням і фокусуванням

# Падіння довільно орієнтованої хвилі

11

Для розрахунку коефіцієнтів проходження і відбивання хвиль при довільній орієнтації відносно просторових неоднорідностей, представлених поляризаційним дзеркалом і межею розділу діелектричних середовищ, хвилі доцільно представляти у вигляді суперпозиції хвиль характерних випадків

При падінні хвилі на межу розділу діелектриків

$$\dot{R}(\psi, \theta) = \sqrt{\left(\sin(\psi) \cdot |\dot{R}_H(\theta)| e^{-j\Delta\phi_{RH}}\right)^2 + \left(\cos(\psi) \cdot |\dot{R}_E(\theta)| e^{-j\Delta\phi_{RE}}\right)^2},$$

$$\dot{T}(\psi, \theta) = \sqrt{\left(\sin(\psi) \cdot |\dot{T}_H(\theta)| e^{-j\Delta\phi_{TH}}\right)^2 + \left(\cos(\psi) \cdot |\dot{T}_E(\theta)| e^{-j\Delta\phi_{TE}}\right)^2}.$$

При падінні хвилі на поляризаційно вибірку поверхню

$$\dot{T} = \frac{\bar{\dot{E}}_{E_{\perp np}} + \bar{\dot{E}}_{E_{\parallel np}} + \bar{\dot{E}}_{H_{\perp np}} + \bar{\dot{E}}_{H_{\parallel np}}}{\bar{\dot{E}}_{E_{\perp}} + \bar{\dot{E}}_{E_{\parallel}} + \bar{\dot{E}}_{H_{\perp}} + \bar{\dot{E}}_{H_{\parallel}}},$$

$$\text{де } \bar{\dot{E}}_{E_{\perp np}} = \bar{\dot{E}}_{E_{\perp}} \dot{T}_{E_{\perp}}(\theta_{E_{\perp}}), \bar{\dot{E}}_{E_{\parallel np}} = \bar{\dot{E}}_{E_{\parallel}} \dot{T}_{E_{\parallel}}(\theta_{E_{\parallel}}), \bar{\dot{E}}_{H_{\perp np}} = \bar{\dot{E}}_{H_{\perp}} \dot{T}_{H_{\perp}}(\theta_{H_{\perp}}),$$

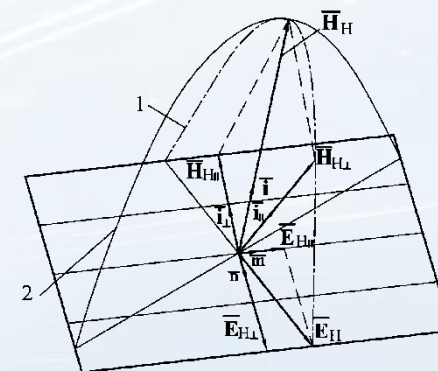
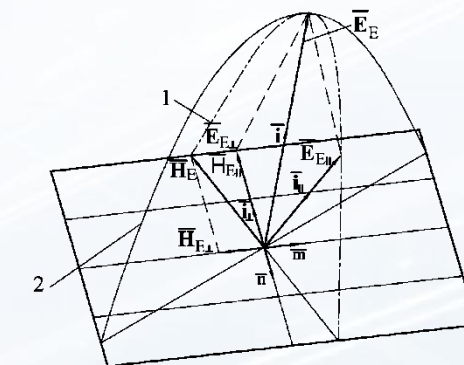
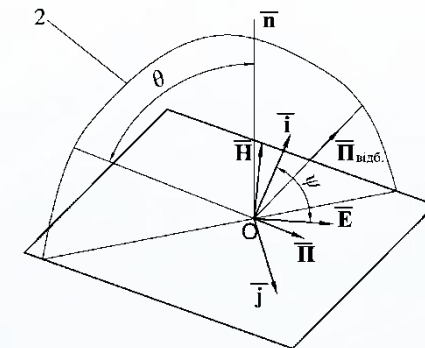
$$\bar{\dot{E}}_{H_{\parallel np}} = \bar{\dot{E}}_{H_{\parallel}} \dot{T}_{H_{\parallel}}(\theta_{H_{\parallel}}), \dot{T}(\theta) - \text{ комплексний коефіцієнт проходження}$$

для відповідної компоненти при падінні під кутом,

$$\bar{\dot{E}}_{E_{\perp}} = |\bar{\dot{E}}_E| \cos(\vartheta), \bar{\dot{E}}_{E_{\parallel}} = |\bar{\dot{E}}_E| \sin(\vartheta), \bar{\dot{E}}_{H_{\perp}} = |\bar{\dot{E}}_H| \cos(\beta), \bar{\dot{E}}_{H_{\parallel}} = |\bar{\dot{E}}_H| \sin(\beta),$$

$$\vartheta = \arccos(\cos(\theta) \sin(\beta)), \theta_{E_{\parallel}} = \theta_{H_{\perp}}, \theta_{H_{\perp}} = \arccos(\sin(\theta) \sin(\beta)), \theta_{E_{\perp}} = \theta_{H_{\parallel}},$$

$$\theta_{H_{\parallel}} = 0.$$



# Узгодження хвильових опорів

**Багатошарову** структуру робочих камер запропоновано використовувати з метою зниження відбивання енергії від зовнішньої поверхні камери обробки

Елементи камери	Еквівалентні моделі

$S_k$  – оброблюваний матеріал  
 $S_p$  – узгоджувальна пластина  
 $S_g$  – поляризоване дзеркало

Розрахунок коефіцієнта проходження

$$T = T_{S_{p1}} \cdot T_{S_{p1}-S_{p2}} \cdot T_{S_{p2}} \cdot T_{S_{p2}-S_1} \cdot T_{S_1}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & -S_{22} \\ S_{21} & S_{21} \\ S_{11} & S_{12} - \frac{S_{11} \cdot S_{22}}{S_{21}} \end{bmatrix}$$

$$S_{S_1} = \begin{bmatrix} -R_{S_1} & \tau_{S_1} \\ \tau_{S_1} & R_{S_1} \end{bmatrix}, \quad S_{S_{p1}} = \begin{bmatrix} -R_{S_{p1}} & \tau_{S_{p1}} \\ \tau_{S_{p1}} & R_{S_{p1}} \end{bmatrix}$$

$$S_{S_{p2}} = \begin{bmatrix} R_{S_{p2}} & \tau_{S_{p2}} \\ \tau_{S_{p2}} & -R_{S_{p2}} \end{bmatrix}$$

$$S_{S_{p1}-S_{p2}} = \begin{bmatrix} 0 & \exp(-jk_{\epsilon_1} t) \\ \exp(-jk_{\epsilon_1} t) & 0 \end{bmatrix}$$

$$S_{S_{p2}-S_1} = \begin{bmatrix} 0 & \exp(-jk_0 d) \\ \exp(-jk_0 d) & 0 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} \frac{T_{21}}{T_{11}} & T_{22} - \frac{T_{12} \cdot T_{21}}{T_{11}} \\ 1 & -\frac{T_{12}}{T_{11}} \end{bmatrix}$$

# Аналіз трансполяризаційних відбивачів

13

**Трансполяризаційні відбивачі** (ТПВ, роторефлектори) є елементом забезпечення рівномірного розподілу ЕМП по об'єму сировини, що реалізується завдяки повертанню площини поляризації відбитої хвилі на  $90^\circ$ , внаслідок чого не утворюється стояча хвиля.

Падаюча хвиля представляється у вигляді суперпозиції паралельно- ( $E_{\parallel}$ ) і перпендикулярно ( $E_{\perp}$ ) поляризованих хвиль

Рівняння опису руху вектора відбитої хвилі

$$\left(\frac{E_{\perp}}{E_1}\right)^2 + \left(\frac{E_{\parallel}}{E_2}\right)^2 - 2\frac{E_{\perp}}{E_1}\frac{E_{\parallel}}{E_2}\cos\varphi = \sin^2\varphi,$$

Коефіцієнт еліптичності відбитої хвилі

$$r = \operatorname{tg} \frac{\arctg \left( \sin \left[ \arctg \left( -\frac{2E_1E_2}{E_2^2 - E_1^2} \cos \Delta\varphi \right) \right] \operatorname{tg} \Delta\varphi \right)}{2},$$

$E_1, E_2$  — амплітуди  $\parallel$ - та  $\perp$ - поляризованої хвилі,  
 $\Delta\varphi = |\varphi_1 - \varphi_2|$  — різниця фаз хвиль

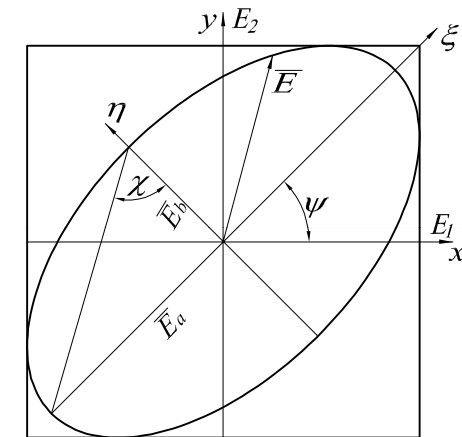
$$\begin{cases} E_{\perp} = E_1 e^{j(k_1 z + \varphi_1)}, \\ E_{\parallel} = E_2 e^{j(k_2 z + \varphi_2)}, \\ E_z = 0, \end{cases} \quad \text{— вирази відбитих від ТПВ хвиль}$$

Лінійна поляризація відбитої хвилі забезпечується при  $E_a = 0$  або  $E_b = 0$ : при  $\Delta\varphi = m\pi$ , де  $m$  — ціле число,  $E_a = 0, E_b = 0$  — осі еліпса.

Для повороту поляризації на  $90^\circ$  необхідно  $\psi = 45^\circ$ .

У роботі виконано аналіз ТПВ гофрованого та плоскорешітчастого типів

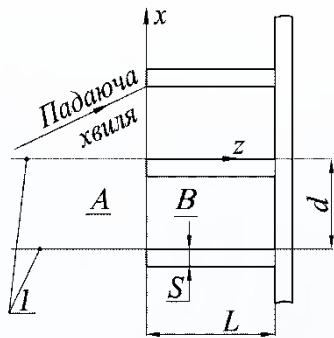
Поляризаційний еліпс ЕМ-хвилі





# ТПВ гофрованого типу

14



Для аналізу такого ТПВ розроблена ітераційна процедура, основана на розв'язку операторного рівняння

$$L_A(\psi) + L_B(\psi) = 2F^{na\partial},$$

Падіння  $\perp$ -поляризованої хвилі,  $\psi$  — невідоме електричне поле у апертурі

$$H(x) = \begin{cases} \frac{2}{d-S} \sum_{m=0}^{\infty} \int_0^{d-S} \frac{j}{\operatorname{ctg} \left( \sqrt{k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{d-S}\right)^2} L \right)} \frac{1}{\sqrt{k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{d-S}\right)^2}} \psi(x') \cos \left( \left(\frac{m\pi}{d-S}\right) x' \right) \cos \left( \left(\frac{m\pi}{d-S}\right) x \right) dx', & 0 \leq x \leq d-S \\ h(x), & d-S \leq x \leq d \end{cases}$$

$$H^{na\partial}(x) = \frac{e^{-jkx}}{\sqrt{k_0^2 - k^2}},$$

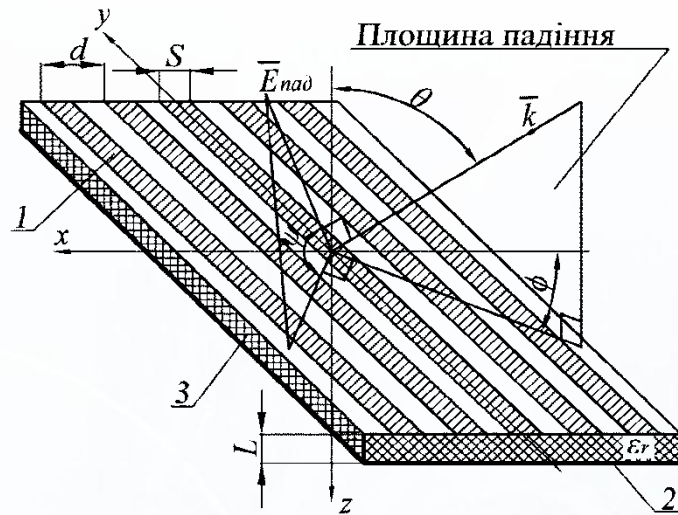
$h(x)$  — електричне поле зовні від апертури

Падіння  $\parallel$ -поляризованої хвилі

$$E(x) = \begin{cases} \frac{2}{d-S} \sum_{m=1}^{\infty} \int_0^{d-S} \frac{j \operatorname{tg} \left( \sqrt{k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{d-S}\right)^2} L \right)}{\sqrt{k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{d-S}\right)^2}} \psi(x') \sin \left( \frac{m\pi}{d-S} x' \right) \sin \left( \frac{m\pi}{d-S} x \right) dx', & 0 \leq x \leq d-S \\ 0, & d-S \leq x \leq d \end{cases}$$

$$E^{na\partial}(x) = \frac{e^{-jkx}}{\sqrt{k_0^2 - k^2}}, \quad h(x) \text{ — невідоме магнітне поле зовні від апертури.}$$

Збіжність результату визначається наближенням абсолютного значення коеф. відбивання до одиниці



$$E_y^{na\partial} = E^{na\partial} \cos \psi \sqrt{\cos^2 \theta + \sin^2 \theta \cos^2 \phi},$$

$$H_y^{na\partial} = -H^{na\partial} \frac{\sin \psi \sqrt{\cos^2 \theta + \sin^2 \theta \cos^2 \phi}}{\eta},$$

$\eta = \sqrt{\mu / \varepsilon}$  — характеристичний опір середовища  $\underline{A}$

Приймаючи до уваги **періодичність** структури, використовуючи теорему Флоке і умову **неперервності** електричного поля на межі областей, амплітуди відбитого поля:

$$B_0 = -\frac{(-a_1 b_2 + a_3 b_1 - a_5 b_1) E_y^{na\partial} + (-a_1 b_1 - 2\eta a_1 + a_4 b_1) H_y^{na\partial}}{a_1 b_2 - a_2 b_1 + a_5 b_1},$$

$$D_0 = -\frac{b_2}{b_1} B_0 - \frac{b_2}{b_1} E_y^{na\partial} - \frac{2\eta - b_1}{b_1} H_y^{na\partial},$$

де  $a_1 = \eta \tau (1 - \tau) (1 - H \cos \theta / Q) I$ ,  $a_2 = -(1 - \tau)^2 I^2 H / Q - (\tau \cos \theta + \varepsilon_r Q H) (1 + \tau)$ ,

$a_3 = -(1 - \tau)^2 I^2 H / Q + (\tau \cos \theta - \varepsilon_r Q H) (1 + \tau)$ ,  $a_4 = \eta \tau (1 - \tau) (1 + H \cos \theta / Q) I$ ,

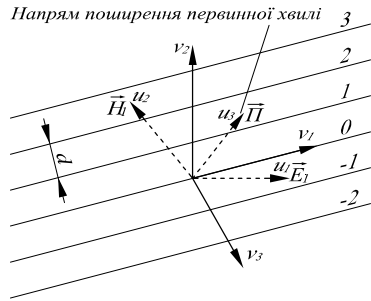
$a_5 = -j Y_1 [(\tau + \varepsilon_r) (1 + \tau) - \sin^2 \theta \sin^2 \phi (1 - \tau)^2] \lambda / d$ ,

$b_1 = [1 + H \tau \cos \theta / Q + j d / \lambda Y_2 \cos \theta (1 + \tau)] \eta$ ,  $b_2 = (1 - \tau) I (H / Q + j d / \lambda Y_2)$ ,

$Q = \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta}$ ,  $I = \sin^2 \theta \sin \phi \cos \phi$ ,  $H = -j \operatorname{ctg}(\alpha_0 L)$ .

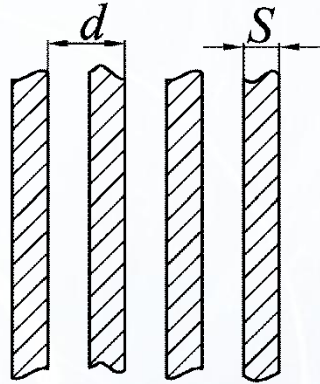
# Поляризовані дзеркала робочої камери

16



$$K_{np\parallel H} = \frac{\lambda}{\pi d \cos \theta \left[ H_0^{(2)}(kr_0 \cos \theta) + \sum_{n \neq 0} H_0^{(2)}(k \cos \theta |n|d) \right]}, \quad K_{\text{відб.}\perp} = \frac{\lambda}{\pi d} \left[ \frac{1}{j \frac{4}{\pi(k\rho)^2} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} H_0^{(2)}(knd)} + \frac{2}{j \frac{4}{\pi(k\rho)^2} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} H_0^{(2)}(knd) + \sum_{n=1}^{\infty} H_2^{(2)}(knd)} \right]$$

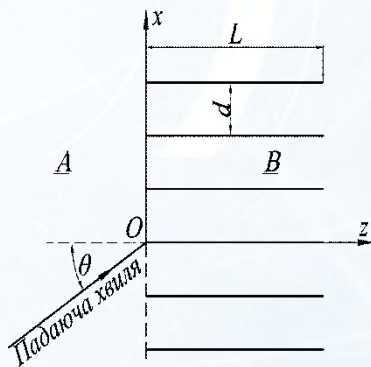
$$K_{np\parallel E} = \frac{\lambda}{\pi d \cos \theta \left[ H_0^{(2)}(kr_0) + \sum_{n \neq 0} e^{-jknd \sin \theta} H_0^{(2)}(k|n|d) \right]}$$



$$K_{np\parallel} = 1 - \frac{1 + F \cdot p}{1 + F \cdot p + 2j \frac{d}{\lambda} (1 + G \cdot p)}$$

де  $p = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{d^2}{\lambda^2}}} - 1$ ,  $F = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{J_{2k}^2(\pi S/d)}{Q_k}$ ,  $Q_k = \frac{1}{4k} + \sum_{S=2k}^{\infty} \frac{(2S-1)!^2}{2^{4S} (S+2k)! (S-2k)!} \frac{\zeta(2S)}{S} (S/d)^{2S}$ ,

$$K_{np\perp}(S/d) = K_{np\parallel}(1 - S/d), \quad G = F + \frac{J_0^2(\pi S/d)}{Q}$$

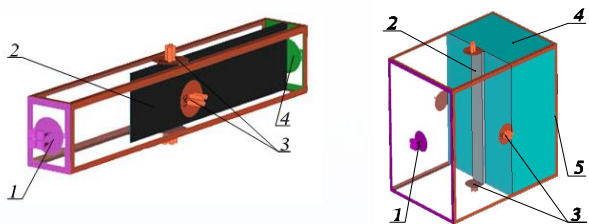


$$|K_{\text{відб.}\parallel}(\theta)| = |A_0| = \frac{\cos \theta - n_B}{\cos \theta + n_B},$$

$$\arg(K_{\text{відб.}\parallel}(\theta)) = 2 \arctg\left(\frac{\alpha_0}{\alpha_{-1}}\right) + 2\sigma_3(\alpha_0) + 2\rho(\alpha_0),$$

$$\sigma_n(x) = -\frac{dx \lg 2}{\pi} + \arctg \frac{x}{|\alpha_1|} + \sum_{m=2}^n \left( \arctg \frac{x}{|\alpha_m|} + \arctg \frac{x}{|\alpha_{-m}|} - \arctg \frac{x}{|k_m|} \right),$$

$$\rho(x) = \left(\frac{d}{\pi}\right)^3 \left( \frac{x\phi^2}{4d^2} - \frac{3}{8} xk_1^2 + \frac{x^3}{4} \right) \sum_{m=4}^{\infty} \frac{1}{m^3}, \quad \phi = kd \sin \theta.$$



Комп'ютерні моделі роторефлекторів

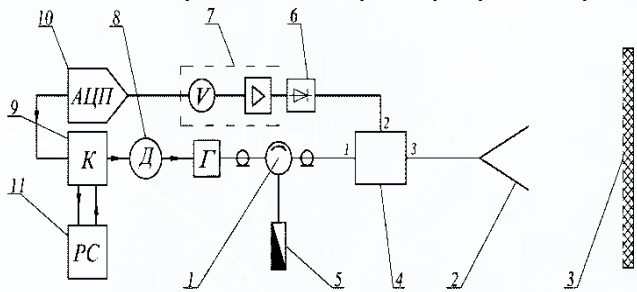
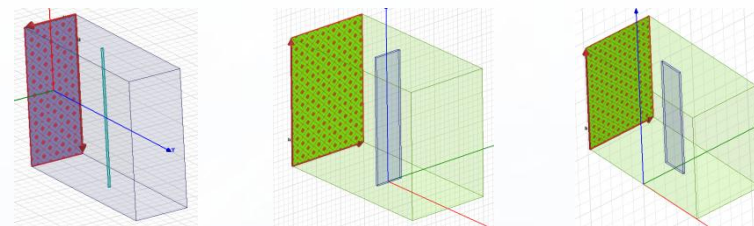
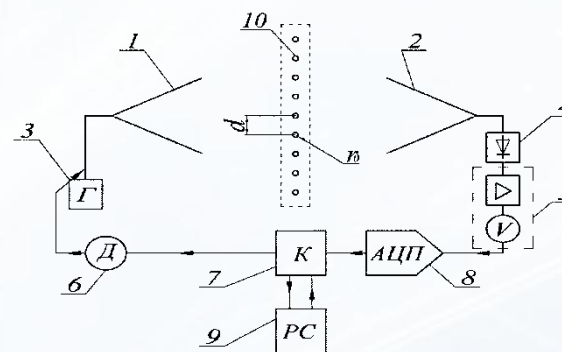


Схема вимірювального станду

- Г — генератор,
- 1 — циркулятор,
- 2 — рупор,
- 3 — роторефлектор,
- 4 — ортомодовий перетворювач,
- 5 — навантаження,
- 6 — детектор,
- 7 — вольтметр.

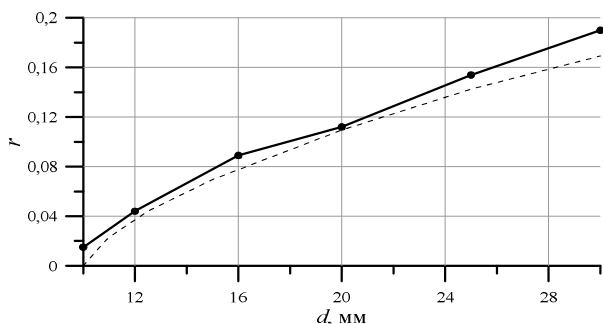
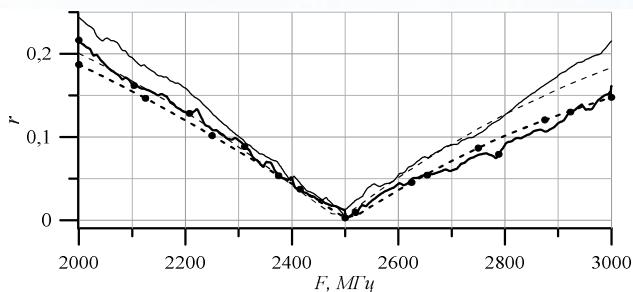


Моделі поляризаційних дзеркал

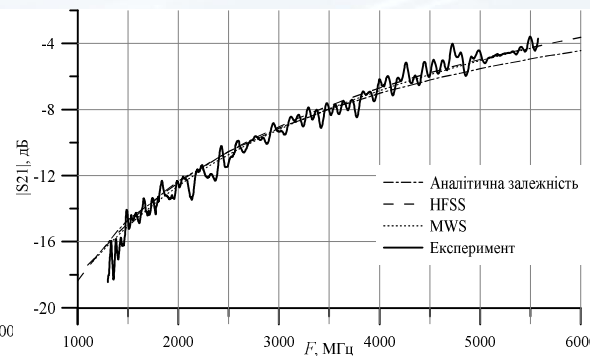
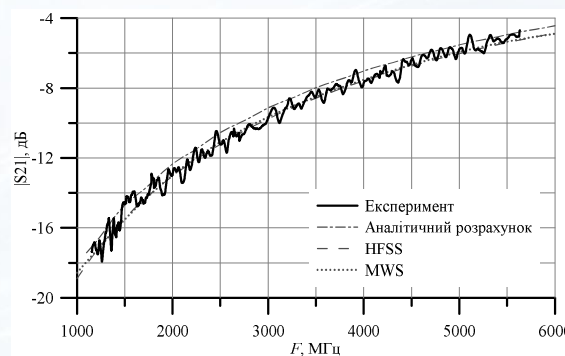


- 1 — випромінюв-й,
- 2 — прийм-ий рупор,
- 3 — генератор,
- 4 — детектор,
- 5 — вольтметр,
- 6 — кроковий двигун,
- 7 — контролер,
- 8 — АЦП,
- 9 — комп'ютер.

Схема вимірювального станду



Залежності коефіцієнта еліптичності



Модуль коефіцієнта пропускання решіткою тонких проводів (а) та плоских смужок (б)

# Дослідження режимів роботи магнетрона

Виконано експериментальне дослідження магнетрона вихідною потужністю  $P_0=900$  Вт і частотою  $F_0=2460$  МГц

Відхилення робочої частоти від номінального значення не перевищує  $\pm 20$  МГц, і в сумі із "затягування" частоти внаслідок підвищення рівня КСХ, не перевищує  $\pm 50$  МГц або 4 %

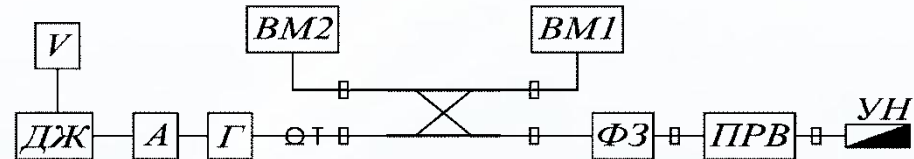
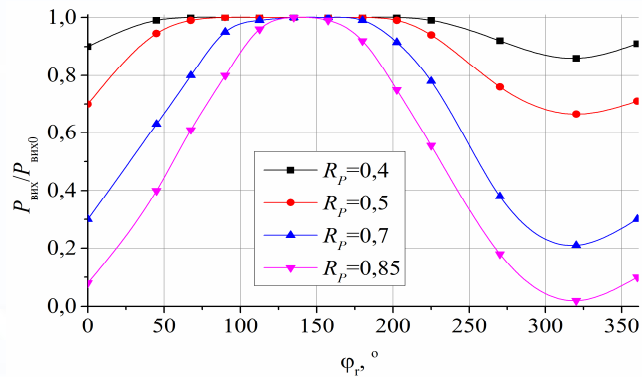
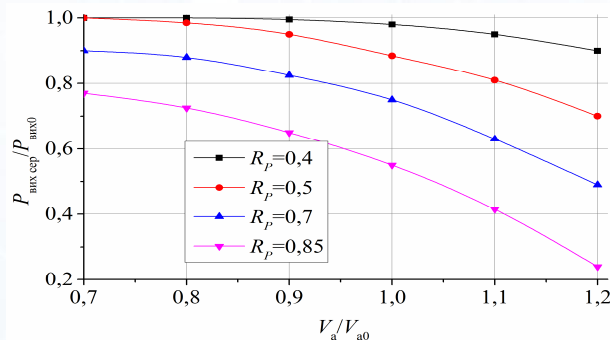


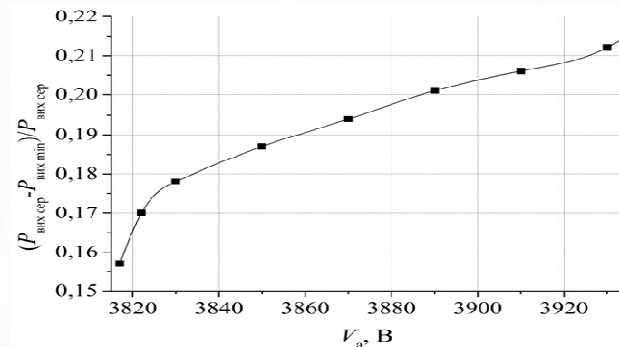
Схема досліджуваного станда



Залежність вихідної потужності від фази відбитої хвилі

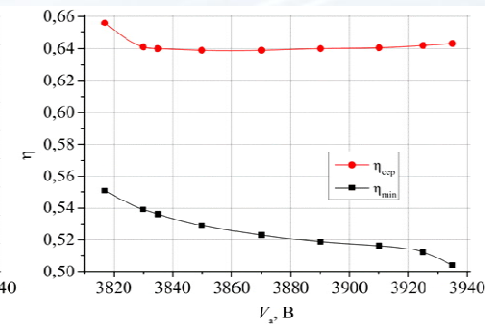
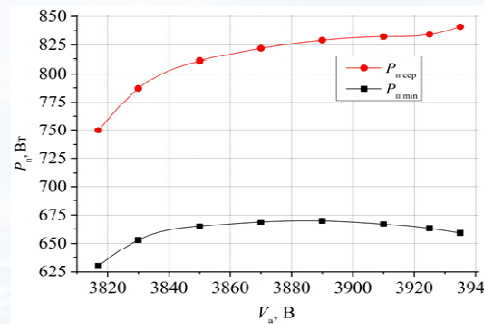


Залежність середньої нормованої вихідної потужності магнетрона від нормованої анодної напруги



Г — тестовий магнетрон,  
ДЖ — джерело живлення,  
А — датчик струму,  
V — датчик напруги,  
ВМ1 — вимірювач потужності прямої,  
ВМ2 — відбитої хвиль

Залежність відносної зміни мінімальної нормованої вихідної потужності магнетрона від анодної напруги

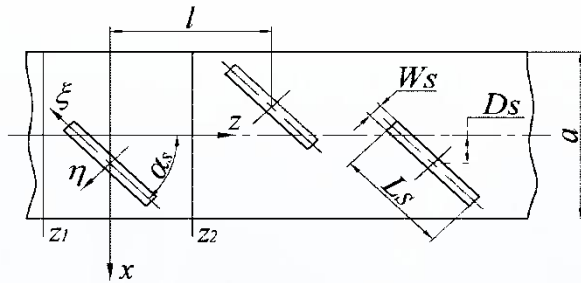


а

б

Вихідна потужність (а) та ефективність магнетрона (б) залежно від анодної напруги





Випромінювач з повернутими зміщеними щілинами

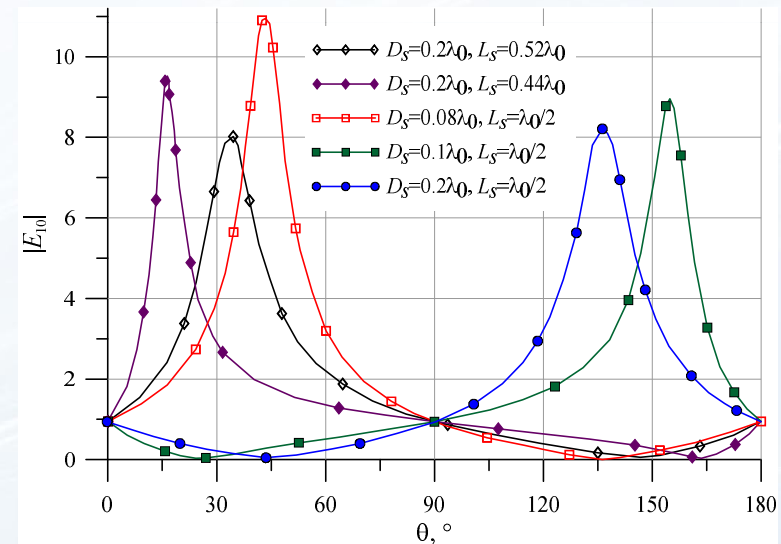
Розсіяні хвилі описуються виразами :

Відбита хвиля

$$B_{10} = \frac{(\pi/a)^2}{\omega\mu_0\beta_{10}ab} \iint_S \left[ \frac{-j\beta_{10}}{\pi/a} \sin\left(\frac{\pi}{a}\left(D + \frac{a}{2} + \xi \sin(\alpha_s) + \eta \cos(\alpha_s)\right)\right) \sin(\alpha_s) + j \cos\left(\frac{\pi}{a}\left(D + \frac{a}{2} + \xi \sin(\alpha_s) + \eta \cos(\alpha_s)\right)\right) \cos(\alpha_s) \right] \times \frac{V_0}{W_s} \cos\left(\frac{\pi}{2L_s} \xi\right) e^{-j\beta_{10}(\xi \cos(\alpha_s) - \eta \sin(\alpha_s))} ds,$$

Хвиля, що пройшла

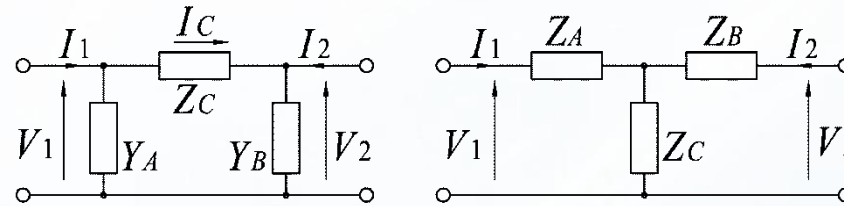
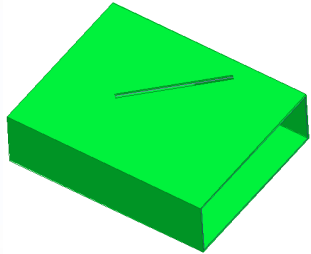
$$C_{10} = \frac{(\pi/a)^2}{\omega\mu_0\beta_{10}ab} \iint_S \left[ \frac{j\beta_{10}}{\pi/a} \sin\left(\frac{\pi}{a}\left(D + \frac{a}{2} + \xi \sin(\alpha_s) + \eta \cos(\alpha_s)\right)\right) \sin(\alpha_s) + j \cos\left(\frac{\pi}{a}\left(D + \frac{a}{2} + \xi \sin(\alpha_s) + \eta \cos(\alpha_s)\right)\right) \cos(\alpha_s) \right] \times \frac{V_0}{W_s} \cos\left(\frac{\pi}{2L_s} \xi\right) e^{j\beta_{10}(\xi \cos(\alpha_s) - \eta \sin(\alpha_s))} ds.$$



Модуль розсіювання хвиль щілиною

$E_{10} = B_{10}/C_{10}$  – коефіцієнт розсіювання хвиль щілиною

Повернуту і зміщену відносно центру широкої стінки хвилевода випромінювальну щілину представлено у вигляді Т- та П-подібних схем, за якими виконано проектування випромінювача використовуючи теорію кіл



Випромінювальний елемент

Еквівалентні схеми зміщеної повернутої щілини на широкій стінці хвилевода

Потужності, що розсіюються на елементах

$$P_L = |S_{21}|^2, P_{\text{відб}} = |S_{11}|^2, P_r = 1 - |S_{21}|^2 - |S_{11}|^2,$$

$$P_L = \frac{\text{Re}(Z_L |I_2|^2)}{2}, \text{ - потужність, що проходить у навантаження}$$

$$P_{\text{відб}} = \left| \frac{Z_G - Z_{\text{ex}}}{Z_G + Z_{\text{ex}}} \right|^2, \text{ - потужність, що відбивається назад}$$

$$P_{r,\Pi} = \text{Re} \left( \frac{|V_1 - V_2|^2}{2Z_C} \right) + \frac{\text{Re}(Y_A |V_1|^2)}{2} + \frac{\text{Re}(Y_B |V_2|^2)}{2} \text{ - потужність, що -випромінюється}$$

Матриці опорів і провідності (П-схема)

$$[Y] = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_C} + Y_A & -\frac{1}{Z_C} \\ -\frac{1}{Z_C} & \frac{1}{Z_C} + Y_B \end{bmatrix},$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} \frac{1}{Y_C} + Z_A & \frac{1}{Y_C} \\ \frac{1}{Y_C} & \frac{1}{Y_C} + Z_B \end{bmatrix},$$

$$\text{де } Z_C = -\frac{1}{Y_{12}} = -\frac{1}{Y_{21}},$$

$$Y_C = \frac{1}{Z_{12}} = \frac{1}{Z_{21}},$$

$$Y_A = \frac{1}{Z_C} - Y_{11}, Z_A = \frac{1}{Y_C} - Z_{11},$$

$$Y_B = \frac{1}{Z_C} - Y_{22}, Z_B = \frac{1}{Y_C} - Z_{22}.$$

# Алгоритм проектування випромінювальної решітки

22

Забезпечення розподілу потужності

$$|P_p^{(n)} - P_p^{(n-1)}| < \xi_p,$$

Забезпечення фази випромінювання

$$|\phi_p^{(n)} - \phi_p^{(n-1)}| < \psi_p.$$

Фізичне обмеження

$$D_s^{(n)} + \frac{L_s^{(n)}}{2} \sin(\alpha_s) + \frac{W_s^{(n)}}{2} \cos(\alpha_s) < \frac{a}{2},$$

Забезпечення КЗ частини

$$\frac{L_s^{(N)}}{2} \cos(\alpha_s) + \frac{W_s^{(N)}}{2} \sin(\alpha_s) < L_{K3},$$

Необхідний імпеданс навантаження

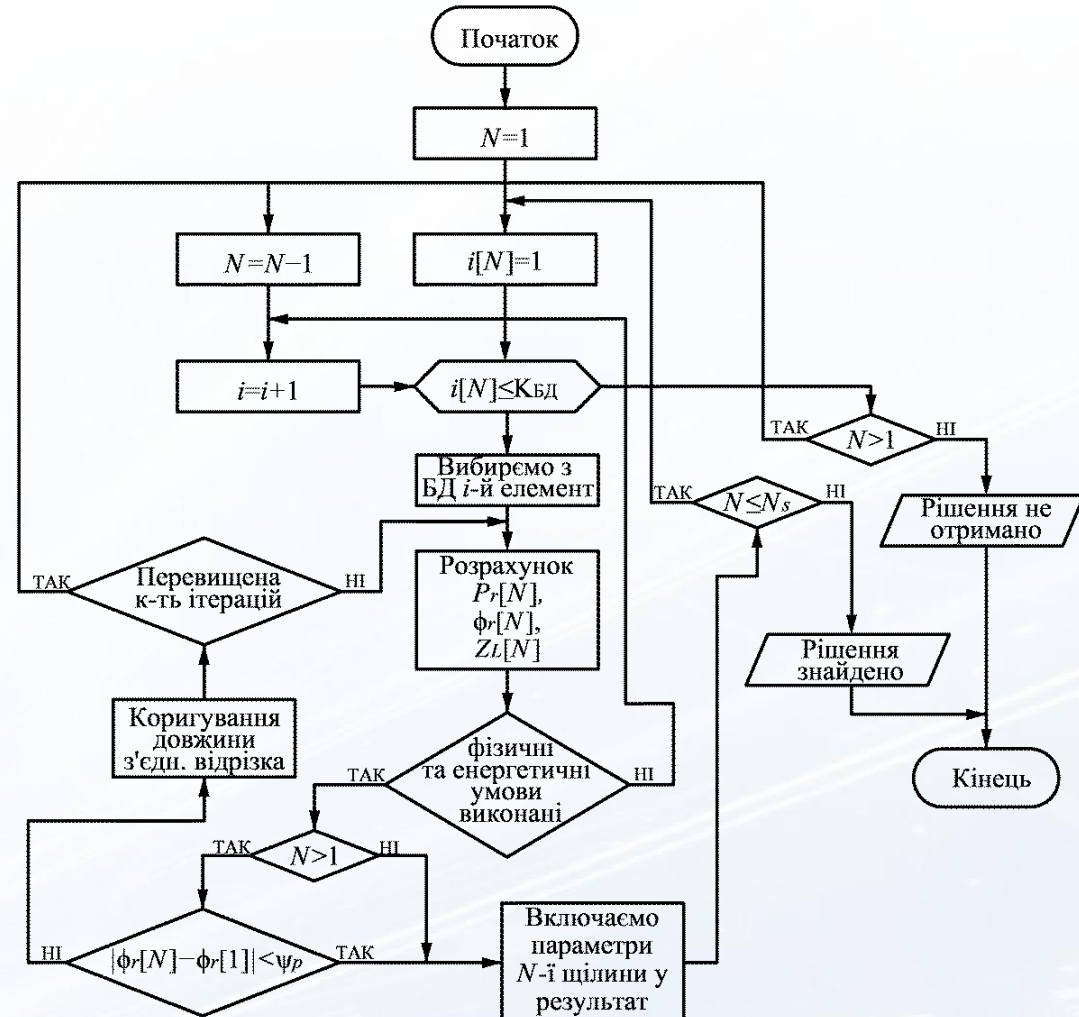
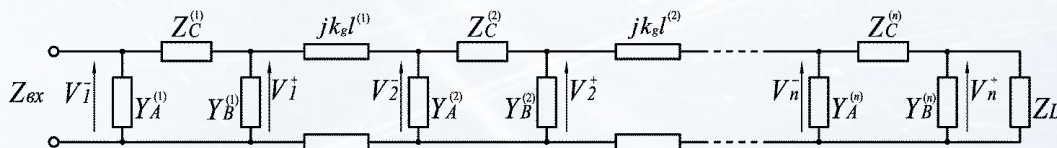
$$Z_L = \frac{Z_C + Z_{ex} + Y_A Z_C Z_{ex}}{Y_A Z_{ex} + Y_A Z_B Z_C Z_{ex} + Z_{ex} Y_B - Z_C Y_B - 1}.$$

Вхідний імпеданс

$$Z_{ex} = \frac{Z_L + Z_C + Y_B Z_C Z_L}{Y_A (Z_L + Z_C + Y_B Z_C Z_L) + Z_L Y_B + 1},$$

Каскадне з'єднання

випромінювальних секцій у решітку



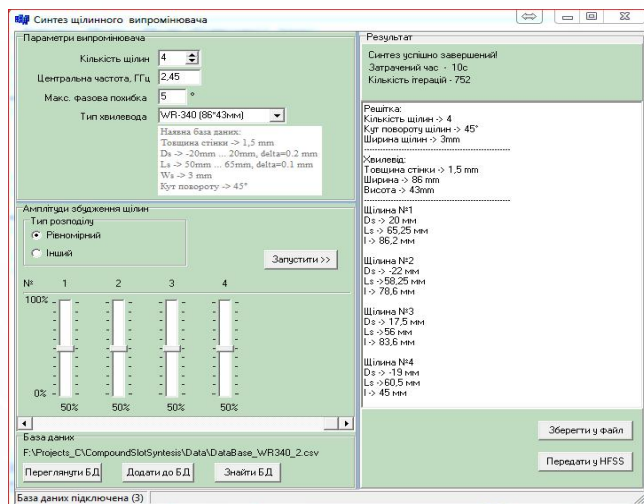
Алгоритм проектування решітки

$K_{БД}$  – кількість елементів у БД,  
 $N$  – поточний елемент решітки,  
 $N_s$  – кількість елементів решітки

# Спроектowana 4-щiлинна решiтка

23

Интерфейс розробленої програми



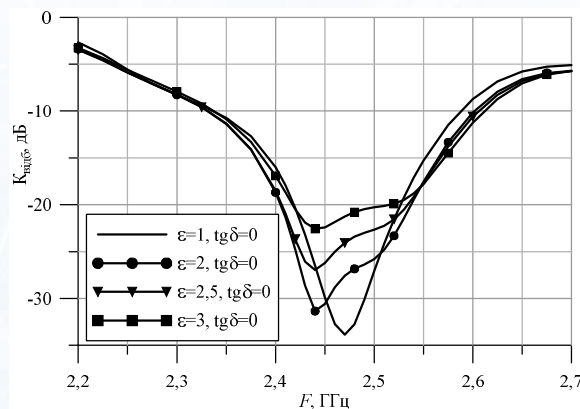
Розподiл збудження щiлин — рiвномiрний,  
Кiлькiсть щiлин — 4.

Параметри заповнення БД:  
крок  $D_s$  : 0,5мм, крок  $L_s$  : 0,25мм.

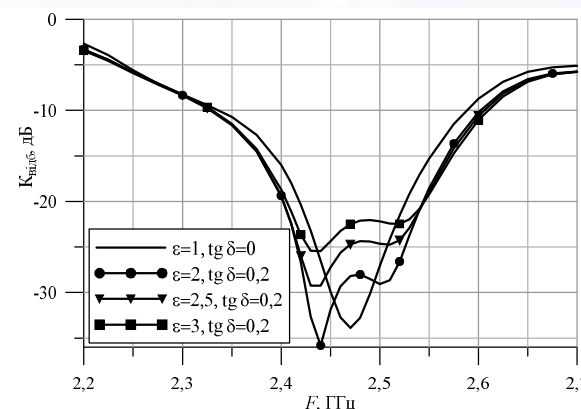
Параметри спроектованої решiтки

№ щiлини	1	2	3	4
Змiщення $D_s$ , мм	20	-22	17,5	-19
Довжина $L_s$ , мм	65,25	58,25	56	60,5
Довжина $l$ , мм	86,2	78,6	83,6	45

$\Psi_p < 25^\circ$ ,  $P(1):P(2):P(3):P(4)=0,85:1:0,92:0,86$



а



б

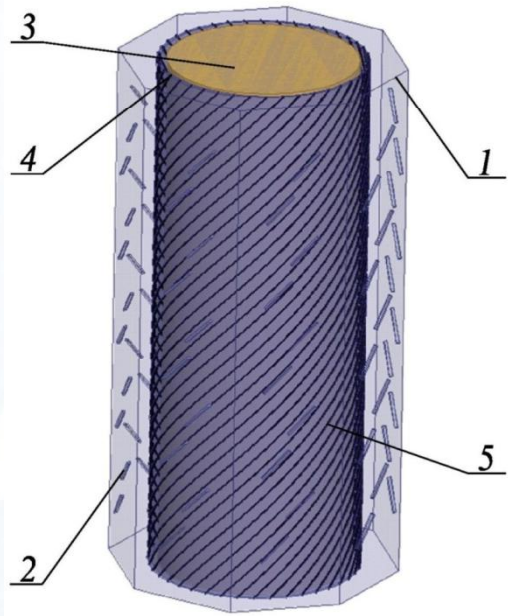
АЧХ решiтки (HFSS) при випромiнюваннi у iдеальний диелектричний пiвпростiр (а) i пiвпростiр з втратами (б), розташований на вiдстанi 100 мм

Коефіцієнт нерівномірності розподілу поля

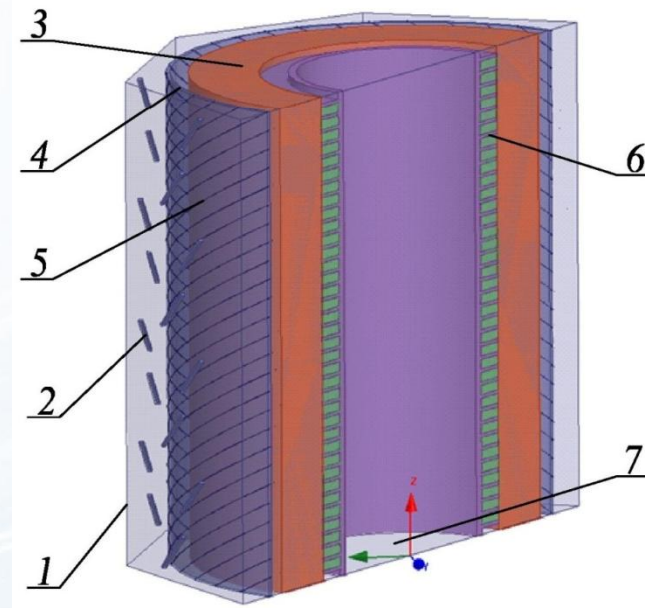
$$\sigma_r = \frac{1}{\bar{X}} \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N}}$$

$\bar{X}$  — математичне очікування розподілу  
 $N$  — кількість експериментальних точок

**Зустрічнорефлекторна камера**  
діаметр камери обробки — 300 мм,  
відстань від поверхні сировини до  
випромінювача — 100 мм



**Роторефлекторна камера**  
Зовнішній діаметр камери  
обробки — 600 мм,  
внутрішній — 400 мм

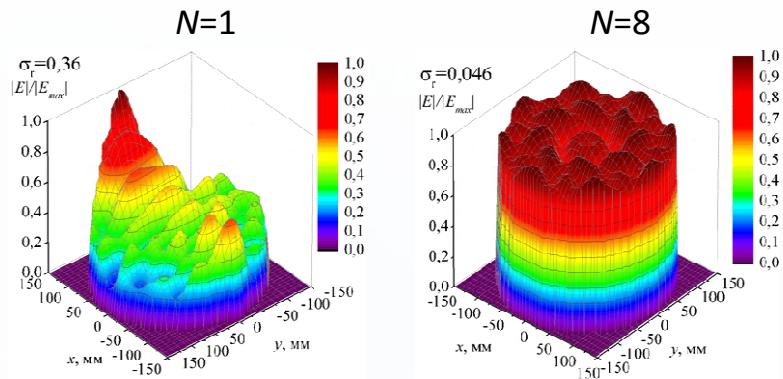




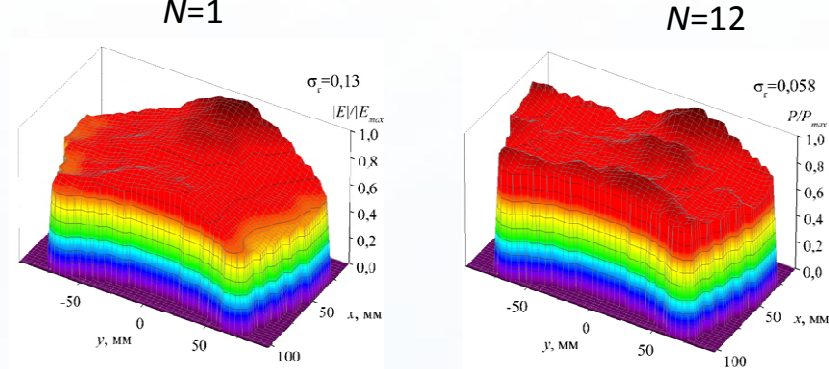
# Результати дослідження робочих камер

25

Зустрічнорефлекторна камера



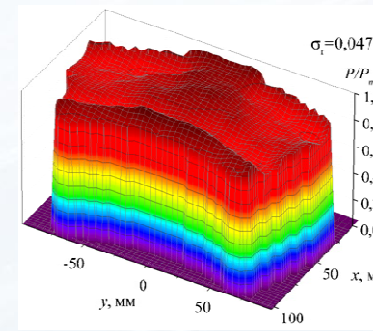
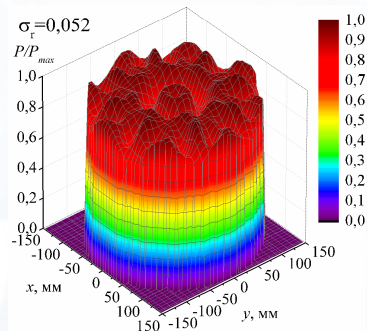
Роторефлекторна камера



Нормована інтегральна поглинута потужність –

$$\frac{P(x_M, y_M)}{P_{\max}} = \frac{1}{|E_{\max}|^2} \sum_{n=1}^{N_c} \left| E \left( x_M, y_M, \frac{2l}{N_c} (n-1) \right) \right|^2$$

$x_M, y_M$  – координати,  $N_c$  – кількість перетинів вздовж одного періоду решітки



$F$	2,39	2,51	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
$\varepsilon_r$	2,65;	2,65;	2,4;	2,65;	2,65;	3,1;0,	3,1;
$\text{tg}\delta$	0,11	0,11	0,08	0,11	0,15	11	0,15
$R_p$	0,08	0,045	0,086	0,057	0,084	0,113	0,12
$\sigma_r$	0,089	0,065	0,085	0,052	0,12	0,079	0,12

$F$	2,39	2,51	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45	2,45
$\varepsilon_r$	2,65;	2,65;	2,4;	2,65;	2,65;	3,1;	3,1;	3,5;
$\text{tg}\delta$	0,11	0,11	0,08	0,11	0,15	0,11	0,15	0,18
$R_p$	0,062	0,04	0,068	0,048	0,067	0,084	0,1	0,12
$\sigma_r$	0,046	0,047	0,058	0,047	0,061	0,051	0,068	0,082

1. Розроблено **принцип** забезпечення рівномірного опромінення діелектричної сировини завдяки **багаторазовому** проходженні енергії падаючої ЕМХ крізь камеру обробки.
2. Розроблено теорію для аналізу відбивання ЕМХ з паралельною та перпендикулярною поляризацією від роторефлекторів плоскорешітчастого та гофрованого типів, що дає змогу визначати коефіцієнт еліптичності відбитої хвилі та оптимізувати параметри роторефлектора для забезпечення умови повертання площини поляризації хвилі на  $90^\circ$ .
3. Для основних типів поляризаційних дзеркал, утворених решіткою паралельних провідників круглого перетину та плоских смужок отримано аналітичні вирази для розрахунку коефіцієнта проходження та відбивання, які дають можливість визначити параметри структури для забезпечення необхідного рівня відбивання хвиль.
4. Завдяки використанню набору **дискретних** генераторів електромагнітної енергії замість одного з великою потужністю досягнуто підвищення характеристик **рівномірності** розподілу щільності енергії у робочій камері внаслідок зниження рівня стоячої хвилі. Досягнення необхідної щільності потужності виконано шляхом **просторового** складання енергій від окремих джерел, що надає можливість створювати пристрої **довільної** продуктивності.
5. Для проектування випромінювальної **решітки** розроблено **алгоритм**, на основі якого реалізована комп'ютерна програма. В алгоритмі використовується представлення щілинної решітки у вигляді **еквівалентної** електричної схеми з'єднання комплексних опорів.
6. На основі запропонованих принципів розроблені **моделі** зустрічнорефлекторної та роторефлекторної робочих камер, **моделюванням** яких доведено, що нерівномірність розподілу щільності енергії по перетину оброблюваного матеріалу не перевищує **5%**. Роторефлекторна конструкція характеризується вищою стабільністю параметрів при варіюванні властивостей сировини та робочої частоти.

Усього опубліковано 24 наукові роботи, з яких

- 7 статей в періодичних фахових виданнях
- 15 — матеріали та тези конференцій (11 — міжнародні)
- 2 патенти України на корисну модель

Назва видання/заходу	Кількість	Реферується у
Electronics and control systems	1	РИНЦ, Google Scholar
Вісник НТУУ «КПІ» Серія — Радіотехніка . Радіоапаратобудування	2	Google Scholar, ВИНИТИ
Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського	1	Index copernicus, ВИНИТИ
Наукові записки УНДІЗ	1	Google Scholar
Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія Техніка та енергетика АПК.	1	Google Scholar
Радіоелектроніка, Інформатика, Управління.	1	Index Copernicus
International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology (CRIMICO)	1	Scopus
International conference on antenna theory and techniques (ICATT)	1	Scopus
Патент України на корисну модель	2	—

Дякую за увагу!