

КОНСТРУКЦІЙНА ОПТИМІЗАЦІЯ ХВИЛЕВОДНО-ВІБРАТОРНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА З ПОВЕРНУТОЮ ПЛОЩИНОЮ ПОЛЯРИЗАЦІЇ

Запропоновано конструкцію 5-елементного випромінювача на основі лінійної вібраторно-хвильової решітки для використання у складі пристрою опромінення діелектричних матеріалів електромагнітним полем частотою 2,45 ГГц, розраховано основні параметри для досягнення високої рівномірності розподілу поля перед випромінювачем. Показано вплив відстані між вібраторами і поверхнею хвильовода на ширину діаграми розподілу поля, визначено оптимальне розташування зони для розміщення діелектричного матеріалу, що підлягає опроміненню. Для конструкції з оптимізованими параметрами виконано оцінку поляризаційної та амплітудної однорідності поля.

Ключові слова: вібратор, хвильовід, ближня зона, випромінювач, надвисокі частоти, поляризація.

ВСТУП

До основних типів хвильоводних антенних решіток відносяться хвильоводно-щілинні та хвильоводно-вібраторні відповідно до типу елементів випромінювання, що у них використовуються. Їх перевага порівно з рупорними аналогами полягає у менших розмірах, що особливо важливо для побудови плоских антенних решіток, також з'являється можливість створення розподіленого випромінювача, що живиться від одного джерела. Частіше у діапазоні НВЧ такі антени створюються з використанням мікросмужкової технології, однак для призначень, де має місце випромінювання електромагнітної енергії високої потужності, смужкові лінії стають малоприматними внаслідок виділення у них значної кількості теплоти.

Завдяки кращій технологічності і компактності лінійні решітки переважно створюються на основі щілин, прорізаних у стінці хвильоводу [1, 2]. Водночас лінійні решітки з випромінювачами у вигляді вібраторів, що живляться від прямокутного хвильоводу залишаються малодослідженими.

Хвильоводні антенні решітки знаходять застосування основним чином для спрямованих антен зв'язку або радіолокації. В той же час лише в окремих роботах розглядається ближнє поле випромінювання таких антен, наприклад, з точки зору їх застосування для діелектричного нагріву матеріалів [3], генерування плазми [4] тощо.

1 ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Мета роботи полягає у розробленні та дослідженні лінійної решітки випромінювачів для використання у складі мікрохвильового пристрою діелектричного нагріву, опис якого приведено у [6]. Пристрій сформований циліндричною камерою взаємодії, через яку проходить потік речовини, що підлягає опроміненню електромагнітним полем надвисоких частот. Концентрично

навколо камери паралельно її осі розташовані лінійні випромінювачі, що дає змогу забезпечити достатній рівень щільності енергії завдяки просторовому складанню хвиль від генераторів невисокої потужності. Для зниження рівня взаємодії між протилежно розташованими джерелами циліндрична камера оточена спіралеподібним поляризованим дзеркалом, вісь поляризації якого створює кут 45° до основи камери. Таким чином, електромагнітна енергія, що проходить у зону взаємодії з одного боку буде відбиватися від протилежної сторони внаслідок перпендикулярної орієнтації осі поляризації дзеркала з протилежних сторін. Відповідно, джерела електромагнітної енергії повинні виконуватися у вигляді лінійних решіток, і, при цьому, площа поляризації поля повинна бути повернута під кутом 45° до осі решітки. Крім того, технічні характеристики камери оброблення вимагають забезпечення високої рівномірності напруженості електричного поля в зоні взаємодії.

Дослідження виконувались за допомогою засобів комп'ютерного моделювання електродинамічних структур Ansys HFSS™ і CST MWS™.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Відомі конструкції щілинних решіток, у яких щілини розміщені в центрі широкої стінки прямокутного хвильовода під кутом до його осі і орієнтовані по чергово в протилежні сторони [4, 2]. В таких антенах повертання щілин навколо центру виконується для забезпечення необхідного їх збудження і узгодження з хвильоводом, однак внаслідок симетричності кутів повороту у дальній зоні формується хвиля, поляризована паралельно осі хвильовода. Можлива конструкція хвильоводної антени, яка забезпечує повернуту, відносно осі хвильовода, площину поляризації, у якій щілини орієнтовані паралельно між собою і утворюють певний кут відносно осі хвильовода [2].

В такому випадку щілини розміщуються вздовж широкої стінки хвилевода зі зміщенням відносно його центру почергово у різні сторони (так звані «складні» щілини). Така реалізація забезпечує повернуту поляризацію хвилі у дальній зоні, однак, внаслідок нерівномірного розташування апертур щілин напруженість поля поблизу випромінювача розподіляється нерівномірно. Важливим недоліком щілинних антен є неможливість або значна складність регулювання збудження окремих щілин.

Альтернативою використанню щілинних випромінювачів, що дозволить уникнути властивих їм недоліків, є використання випромінюючих елементів у вигляді вібраторів, що живляться від хвилевода. Внаслідок того, що випромінювачі не є інтегрованими у хвилевід це дає змогу регулювати збудження кожного елемента, змінювати кут поляризації випромінювання.

У запропонованій конструкції використаний випромінювач хвилеводно-вібраторного типу (рис. 1) [7], основу якої складає прямокутний хвилевід 4 (рис. 1), що з одного кінця закритий рухомих короткозамикаючим поршнем 5, а іншим кінцем підключається до генератора. Елементи випромінювання енергії утворені вібраторними секціями, розташованими вздовж хвилевода в центрі широкої стінки. Кожна секція складається з відрізка коаксіальної лінії, що з одної сторони входить у хвилевід штирем 3, а з іншої, через щілинний симетруючий пристрій 2, живить плечі півхвильового вібратора 1. Відбір енергії від хвилевода виконується штирем 3, що є продовженням центрального провідника коаксіальної лінії. Забезпечення повернутої відносно осі хвилевода площини поляризації поля здійснено завдяки повернутому положенню усіх вібраторів на відповідний кут до осі хвилевода, що складає 45° .

Для узгодження хвилеводної решітки із генератором використано реактивний вібратор 6, розташований на відстані D_p перед першим штирем в центрі широкої стінки і має довжину L_p , реактивність якого компенсує реактивність усіх штирів.

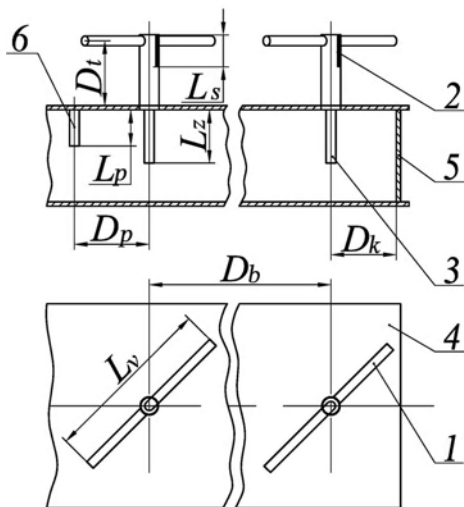


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд випромінювача з розрізом

Робоча частота пристрою становить 2,45 ГГц (довжина хвилі $\lambda_0 \approx 122$ мм), відповідно, обрано тип хвилевода WR-340 (стандарт EIA) з внутрішніми розмірами 86×43 мм і товщиною стінки 2 мм.

Для забезпечення високої рівномірності поля поблизу випромінювача всі елементи повинні випромінювати енергію синфазно, а амплітуди збудження кожної секції мають бути розрахованими таким чином, щоб забезпечити максимальну однорідність напруженості електромагнітного поля у заданій зоні; одночасно з цим відстань між вібраторами повинна бути якомога меншою. Мінімальна відстань L_b між сусідніми елементами може бути досягнута, якщо встановити її приблизно $\lambda_g/2$ (відповідає довжині хвилі у хвилеводі) з урахуванням поправки на внесену реактивність штирів для компенсування фазового зсуву, однак, при цьому струми у сусідніх коаксіальних відрізках будуть протифазними. Відповідно, для збереження синфазності випромінювання сусідні вібратори взаємно розвернуті на 180° .

Довжина кожного штиря L_z визначається відповідно до необхідної величини збудження вібратора, що може також регулюватись шляхом зміщення штирів убік від центру або вздовж хвилевода. Останнє можливе завдяки тому, що випромінювач працює у режимі змішаних хвиль і вздовж хвилевода має місце значний коефіцієнт стоячої хвилі по напрязі (КСХн) – положення штирів на поперечної осі впливає на інтенсивність їх збудження залежно від того чи він знаходиться у максимумі, чи в мінімумі поля. При цьому необхідно щоб розміщення усіх штирів забезпечувало синфазність їх збудження.

Одною з умов оптимізації пристрою було забезпечення максимального узгодження коаксіальних ліній із вібраторними секціями, і, таким чином, розрахунок всього пристрою було розділено на внутрішню та зовнішню задачі.

На першому етапі, в ході вирішення зовнішньої задачі, задавалися значення відстаней між сусідніми випромінюючими секціями, визначалися оптимальні параметри вібраторів і симетруючих елементів, необхідні амплітуди їх збудження, які забезпечать узгодження кожного вібратора з коаксіальними відрізками, створюючи при цьому рівномірний розподіл поля в області перед ними.

Внутрішня задача полягала у розрахунку прямокутного хвилевода, в центрі широкої стінки якого розташовано ряд хвилеводно-коаксіальних переходів. Розраховувались оптимальні значення відстаней між штирями переходів і довжини кожного з них для забезпечення необхідної амплітуди і синфазності збудження кожного коаксіального відрізка. Одночасно із оптимізацією параметрів штирів відбувався розрахунок розмірів і положення реактивного вібратора для компенсації відбитої від хвилевода хвилі.

3 РЕЗУЛЬТАТИ

Характер розподілу поля вздовж хвилевода над вібраторами залежить основним чином від їх кількості, відстані між ними, амплітуди і фази збудження. Розподіл поля у поперечному напрямі визначається більшою мірою па-

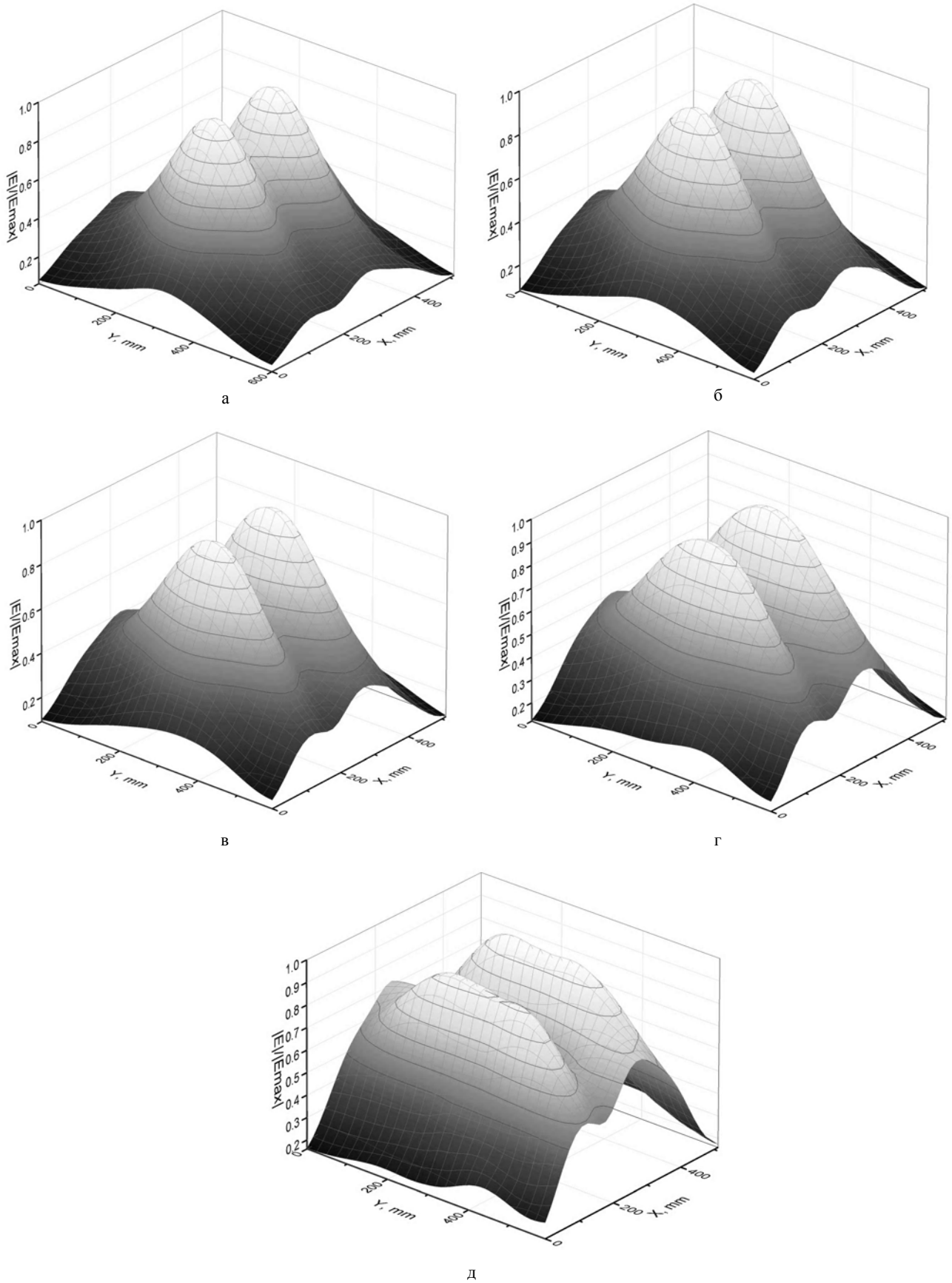


Рисунок 2 – Нормований модуль напруженості електричного поля: а – $D_i=20$ мм; б – $D_i=30$ мм; в – $D_i=40$ мм; г – $D_i=50$ мм; д – $D_i=60$ мм

раметрами вібраторів та відстанню від них до поверхні хвилеводу D_i . Так, при резонансній довжині вібратора і відстані D_i близькій до половини довжини хвилі діаграма розподілу поля у ближній зоні розширюється, а при чверті довжини хвилі – звужується. Останнє твердження пояснюється тим, що при відстані від вібратора до хвилевода приблизно рівній $\lambda_0/4$, хвилі у перпендикулярному до хвилевода напрямі синфазно складаються із відбитими від хвилевода, внаслідок чого інтенсивність випромінювання енергії у перпендикулярному до хвилевода напрямі зростає. Якщо ж D_i наближається до величини $\lambda_0/2$, то відбиті від металевої поверхні хвилі виявляються протифазними і потік енергії у перпендикулярному напрямі зменшується, призводячи до зростання потоку енергії у бокових напрямках.

Для конструкції мікрохвильового пристрою, складовою якого є випромінювач, необхідно забезпечувати вузьку діаграму розподілу напруженості електричного поля у поперечному напрямі – у протилежному випадку хвилі, що випромінюються під значним кутом до нормалі, матимуть значну поляризаційну неузгодженість із поляризованим дзеркалом.

Необхідна кількість вібраторів визначається виходячи із потужності джерела, що живить хвилевід, необхідної щільності потужності поля у зоні взаємодії і при цьому їх кількість повинна бути достатньою для забезпечення перед випромінювачем зони рівномірного розподілу електромагнітного поля у поздовжньому, відносно хвилевода, напрямі.

У роботі розглядався випромінювач, що складається з п'яти вібраторних елементів.

Шляхом оптимізації параметрів вібраторних секцій, у яких діаметр плечей становив 2 мм, в межах розв'язання зовнішньої задачі, визначено, що для забезпечення величини КСХн на рівні не більше 1,1 довжина усіх вібраторів L_v повинна становити 50 мм, довжина симетруючих щілин L_s – 23 мм, діаметр внутрішнього провідника та хвильовий опір коаксіальної лінії становив, відповідно, 3 мм та 50 Ом. При цьому, незважаючи на те, що взаємодія центрального вібратора з іншими сильніша, ніж крайніх, розбіжність рівня узгодження кожного з них при однакових параметрах залишається в межах вказаного КСХн.

Важливою проблемою при проектуванні решітки випромінювачів є визначення оптимального розташування зони взаємодії, в межах якої буде забезпечена максимальна рівномірність параметрів поля, і, зокрема його максимальна поляризаційна однорідність. Останній показник важливий для поляризаційного узгодження електромагнітного поля з поляризованим дзеркалом.

Нормований розподіл модуля напруженості електричного поля у площині на відстані $h = 150$ мм від вібраторів, при різних відстанях від них до хвилевода, зображено на рис. 2, де координата x орієнтована паралельно, а y – перпендикулярно осі хвилевода. Збудження вібраторів відбувалось однаковими за амплітудами і фазами струмами. З рисунків видно, що з віддаленням вібраторів від хвилевода ширина діаграми розподілу поля розширюється, що відповідає вказаному вище твердженню.

При цьому висота розташування площини вібраторів над хвилеводом є основним чинником, що визначає розподіл кута поляризації поля. На рис. 3 приведені характеристики співвідношення між складовою електричного поля паралельною до вібраторів і модулем напруженості електричного поля при різних значеннях D_i і $h = 150$ мм, які характеризують ступінь відповідності поляризації поля і поляризованого дзеркала, розміщеного над випромінювачем, у якого вісь поляризації перпендикулярна до вібраторів. Характеристики розраховані у площині, перпендикулярній осі x в точці максимальної напруженості поля. Очевидно, що однорідність поляризації хвилі зростає з наближенням площини вібраторів до металевої площини.

Таким чином, з огляду на покращення амплітудної і поляризаційної однорідності, необхідно встановлювати найменшу висоту розташування вібраторів над металевою основою, яка, однак, обмежена довжиною симетруючої щілини, і для даного випадку становить $D_i = 22$ мм.

Забезпечуючи відповідний розподіл інтенсивності збудження кожного з вібраторів можна змінювати характер розподілу напруженості поля у ближній зоні.

Шляхом оптимізації амплітуд збудження кожного елемента було встановлено, що при співвідношенні амплітуд живлення вібраторів як 5:14:10:14:7, відповідно (починаючи від входу), при однакових фазах, досягнуто максимальної рівномірності поля вздовж осі хвилевода. Для цього випадку розподіл напруженості поля, нормований до максимального значення у різних перетинах над випромінювачем з оптимізованими параметрами, зображено на рис. 4. З приведених залежностей можна зробити висновок, що оптимальна зона розташування середовища для опромінення знаходиться на відстані приблизно $h = 100$ мм від вібраторів. Рівень складової електричного поля, паралельної до плечей вібраторів, для даного випадку, відносно загального модуля напруженості електричного поля, приведено на рис. 5.

В результаті оптимізації були розраховані оптимальні параметри конструкції випромінювача. Визначено, що довжини L_z штирів для забезпечення зазначених раніше амплітуд збудження вібраторів повинні становити (по-

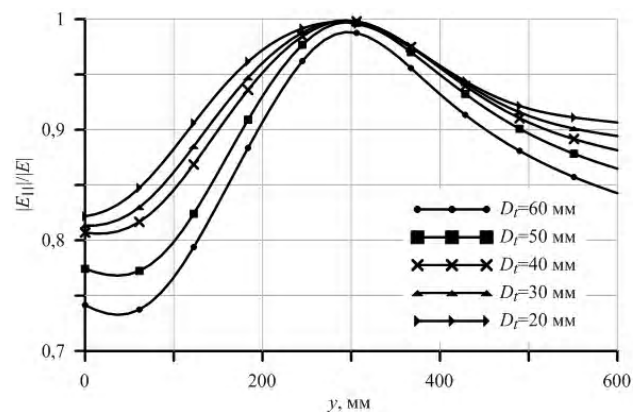


Рисунок 3 – Коефіцієнт поляризаційної однорідності електричного поля

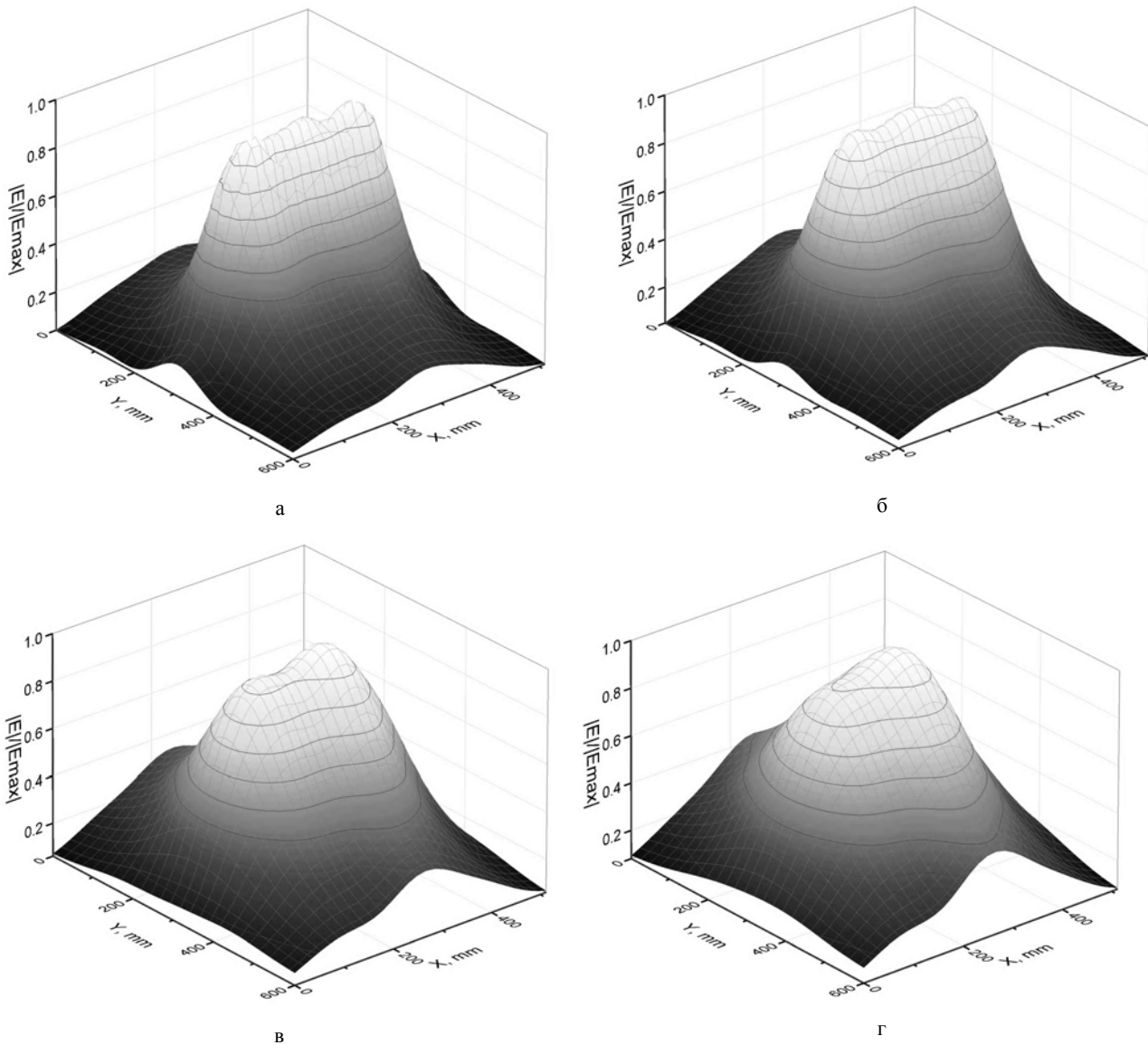


Рисунок 4 – Нормований модуль напруженості електричного поля а – $D_t = 20$ мм на відстані $h = 75$ мм; б – $h = 100$ мм; в – $h = 150$ мм; г – $h = 200$ мм від хвилевода

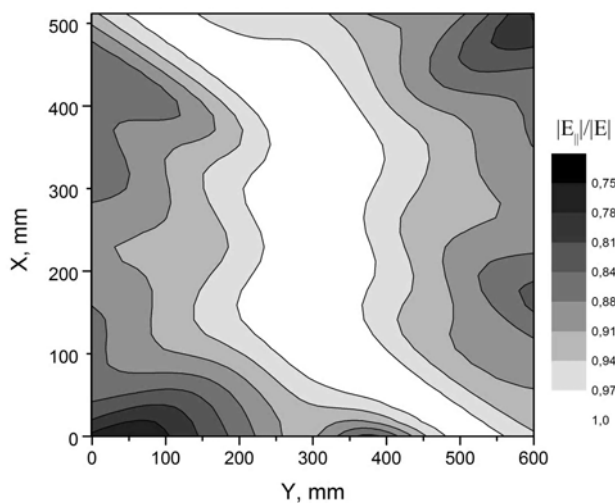


Рисунок 5 – Коефіцієнт поляризаційної однорідності поля при $h=100$ мм

чинаючи від входу) 13,3 мм, 16 мм, 17,8 мм, 17,6 мм та 17,3 мм, відповідно; відстань між центрами випромінювальних секцій D_b , для синфазності їх збудження дорівнюють, відповідно, 92 мм, 79 мм, 88 мм, 87 мм.

З метою кількісної оцінки поляризаційної однорідності поля розрахований показник, що характеризує відносну величину випроміненої енергії, що пройде крізь ідеальне плоске поляризоване дзеркало, розташоване паралельно поверхні хвилевода, вісь поляризації якого орієнтована перпендикулярно осі вібраторів:

$$P = \frac{\int \int_{x y} E_{\parallel}^2(x, y) dx dy}{\int \int_{x y} E^2(x, y) dx dy} \quad (1)$$

Розрахувавши (1), підставляючи значення, що відповідають рис. 4б та рис. 5, було отримано $P \approx 0,9$.

За таких параметрів конструкції було забезпечено КСХн у всіх коаксіальних відрізках не більше 1,05, а на вході хвилевода не більше 1,1.

ВИСНОВКИ

Повертання площини поляризації поля у ближній зоні випромінювача можна забезпечити відповідним орієнтуванням вібраторів відносно осі хвилевода. Показано, що для звуження діаграми розподілу поля вібратори повинні розташовуватись на мінімальній відстані від верхніх хвилевода. Випромінювач дає змогу забезпечити високий рівень однорідності напруженості електричного поля у напрямі, паралельному осі випромінювача. Для розглянутої конструкції, що складається із 5 вібраторних секцій, повернутих на кут 45° до осі хвилевода, оптимальна зона розташування матеріалу для опромінення знаходиться на відстані 100 мм від площини вібраторів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Orefice M. Design of waveguide-fed series slot arrays / M. Orefice, R. S. Elliott // IEE Proc. – 1982. – Vol. 129, No. 4. – P. 165–169.
- Design of inclined and displaced slotted waveguide array antennas with low sidelobe radiation patterns / [S. Yamaguchi, H. Miyashita, T. Takahashi, et. al.] // Proceedings of the 4th EuCAP. – 2010. – P. 1–5.
- A slotted waveguide applicator for continuous flow grain drying / [E. St-Denis, G. Raghavan, C. Akyel, M. Venkatesh] // Journal of microwave power and electromagnetic energy. – 2001. – Vol. 36, No. 1. – P. 3–16.
- Sauve G. Slotted waveguide field applicator for the generation of long uniform plasmas / G. Sauve, M. Moisan, Z. Zakrewski // Journal of microwave power and electromagnetic energy. – 1993. – Vol. 28, No. 3. – P. 123–131.
- Meredith R. Engineer's handbook of industrial microwave heating / R. Meredith. – London : IEE Publishing, 1998. – 365 p.
- Пат. Україна 65629 Н05В 6/64. Мікрохвильовий пристрій для передпосівної обробки насіння, сушіння зерна та інших сипучих матеріалів / Сидорук Ю. К.; заяв. 20.05.2011, опубл. 12.12.2011, Бюл. № 23, 2011 р.
- Жук М. С. Проектирование антенно-фидерных устройств / М. С. Жук, Ю. Б. Молочков. – М.-Л. : Энергия, 1966. – 648 с.

Стаття надійшла до редакції 02.04.2014.

Зиньковский Ю. Ф.¹, Сидорук Ю. К.², Туровский А. А.³

¹Д-р техн. наук, профессор, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина

²Доцент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина

³Ассистент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина

КОНСТРУКЦИОННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ВОЛНОВОДНО-ВИБРАТОРНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ С ПОВЕРНУТОЙ ПЛОСКОСТЬЮ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Предложена конструкция 5-элементного излучателя на основе линейной вибраторно-волноводной решетки для использования в составе устройства облучения диэлектрических материалов электромагнитным полем частотой 2,45 ГГц, рассчитаны основные его параметры для достижения максимальной равномерности распределения поля перед излучателем. Показано влияние расстояния между вибраторами и поверхностью волновода на ширину диаграммы распределения поля, определено оптимальное расположение зоны для размещения диэлектрического материала, подлежащего облучению. Для конструкции с оптимизированными параметрами выполнена оценка поляризационной однородности поля.

Ключевые слова: вибратор, волновод, ближняя зона, излучатель, сверхвысокие частоты, поляризация.

Zinkovskiy Yu. F.¹, Sydoruk Yu. K.², Turovskiy A. O.³

¹Doctor of Science, Professor, National technical university of Ukraine «Kyiv polytechnic institute», Ukraine

²Associate Professor, National technical university of Ukraine «Kyiv polytechnic institute», Ukraine

³Assistant, National technical university of Ukraine «Kyiv polytechnic institute», Ukraine

DESIGN OPTIMIZATION OF WAVEGUIDE FED DIPOLE APPLICATOR WITH INCLINED POLARIZATION PLANE

A design of microwave waveguide fed dipole applicator consisted of 5 elements for use in a device for bulk dielectric materials treatment with microwave electromagnetic field is proposed. In order to provide maximum amplitude and polarization homogeneity of the field distribution before the transmitter the main parameters of the design are calculated. Due to the dipoles being fully matched with feeding coaxial line segments the calculation of the whole structure is divided into internal and external problems. The influence of distance between the dipoles and waveguide's surface on the width of the near field distribution pattern is shown and it is clarified that the reducing the distance will narrowing the field pattern. It was determined that the optimal zone location for placing of the bulk dielectric material to be irradiated is at the distance 100–150 mm from the dipoles.

Keywords: vibrator, waveguide, near field, irradiator, microwaves, polarization.

REFERENCES

- Orefice M., Elliott R. S. Design of waveguide-fed series slot arrays, *IEE Proc.*, 1982, Vol.129, No. 4, pp.165–169.
- Yamaguchi S., Miyashita H., Takahashi T., et. al. Design of inclined and displaced slotted waveguide array antennas with low sidelobe radiation patterns, *Proc. of the 4th EuCAP*, 2010, pp. 1–5.
- St-Denis E., Raghavan G., Akyel C., Venkatesh M. A slotted waveguide applicator for continuous flow grain drying, *Journal of microwave power and electromagnetic energy*, 2001, Vol. 36, No. 1, pp. 3–16.
- Sauve G., Moisan M., Zakrewski Z. Slotted waveguide field applicator for the generation of long uniform plasmas, *Journal of microwave power and electromagnetic energy*, 1993, Vol. 28, No. 3, pp. 123–131.
- Meredith R. Engineer's handbook of industrial microwave heating. London, IEE Publishing, 1998, 365 p.
- Sydoruk Yu. K. Mikrokhvyl'ovyyi prystriy dlya peredposivnoi obrobky nasinnya, sushinnya zerna ta inshykh sypuchykh materialiv, Patent of Ukraine 65629, May 2011.
- Zhuk M. S. Proektirovanie antenno-fidernykh ustoystv. Moscow, Energia, 1966, 648 p.