

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

ГНАТЮК Максим Олександрович

УДК 537.874

**РОЗВИТОК МЕТОДУ ІНТЕГРАЛЬНИХ РІВНЯНЬ ЧАСТКОВИХ
ОБЛАСТЕЙ, ЩО ПЕРЕТИНАЮТЬСЯ, ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ
ХВИЛЕВОДНИХ ЗАДАЧ ДИФРАКЦІЇ**

01.04.03 — радіофізика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Дніпровському національному університеті імені Олеся Гончара Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

кандидат фізико-математичних наук, доцент
Морозов Валентин Михайлович,
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
МОН України,
доцент кафедри телекомунікаційних систем та мереж.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор
Горобець Микола Миколайович,
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
МОН України,
завідувач кафедри прикладної електродинаміки.

доктор фізико-математичних наук, професор
Онуфрієнко Володимир Михайлович,
Національний університет «Запорізька політехніка»
МОН України,
завідувач кафедри вищої математики.

Захист відбудеться «08» квітня 2021 р. о 13:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.052.03 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, Україна, м. Харків, пр. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, Україна, м. Харків, пр. Науки, 14.

Автореферат розісланий «___» _____ 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В. М. Безрук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Актуальність теми. Задачі дифракції електромагнітної хвилі в хвилеводах є важливими задачами сучасної електродинаміки надвисоких частот (НВЧ). Хвилеводні лінії передачі НВЧ широко використовуються при побудові різноманітних пристроїв, таких як фільтри, трансформатори, узгоджуючі пристрої, а також можуть бути використані в якості елементарних випромінювачів антенних решіток. Розрахунок параметрів таких пристроїв найчастіше достатньо складний і виконується на ЕОМ за допомогою електродинамічних моделей, що значно полегшують розробку розглянутих НВЧ пристроїв на етапі їх проектування.

Методам електродинамічного аналізу хвилеводних пристроїв присвячена велика кількість робіт. В даний час розв'язування електродинамічних задач виконується як з використанням числових сіткових методів, наприклад, методу скінченних елементів і скінченних різниць, так і чисельно-аналітичних методів. Окремо слід відмітити аналітичні методи, зокрема метод факторизації, які дозволяють отримати точний розв'язок задачі у аналітичній формі, але область застосування цих методів достатньо обмежена.

Числові сіткові методи посіли важливе місце у області обчислювальної електродинаміки завдяки своїй універсальності і можливості розв'язувати широкий клас задач електродинаміки. Проте основним недоліком цих методів є їх високі вимоги до обчислювальних ресурсів, також постає питання вибору методів ефективної дискретизації і обмеження області, у якій відшукується розв'язок. Також, ці методи часто не дозволяють врахувати і дослідити деякі характерні фізичні особливості конкретної задачі. В таких випадках застосування числових сіткових методів може виявитися малоефективним.

Велика увага приділяється розвитку чисельно-аналітичних методів. Такі методи дозволяють забезпечити високу ефективність у певному класі задач електродинаміки, оскільки дозволяють на аналітичному етапі розв'язання задачі виявити і врахувати особливості фізичних процесів, що протікають у досліджуваній структурі.

Одним з ефективних чисельно-аналітичних методів є метод еквівалентного кола, який дозволяє проводити аналіз хвилеводної структури за допомогою методів теорії довгої лінії. Цим методом отримують наближений розв'язок з використанням невеликих обчислювальних ресурсів, особливо в одномодовому наближенні, але за рахунок зменшення точності результатів.

Метод часткових областей є достатньо потужним і універсальним чисельно-аналітичним методом електродинамічного розрахунку хвилеводних пристроїв. Цей метод дозволяє розв'язувати задачі дифракції на неоднорідностях різних типів, а також застосовується для хвилеводів складного поперечного перерізу. В цілому метод є добре розвиненим і має значний потенціал подальшого розвитку.

Метод інтегрального рівняння є перспективним методом і також широко застосовується для розв'язування задач дифракції електромагнітної хвилі. Використання функцій Гріна дозволяє в інтегральній формі зв'язати джерела поля із полем дифракції або випромінювання. При цьому знижується розмірність задачі, а розв'язок інтегрального рівняння має більшу точність, ніж розв'язок диференціального або інтегро-диференціального рівнянь. При цьому, методи розв'язання інтегральних рівнянь є добре розвиненими.

Метод Шварца з використанням апарату функцій Гріна та метод інтегральних рівнянь часткових областей, що перетинаються (МЧОП), поєднують в собі особливості методів часткових областей та інтегрального рівняння. В основі методів лежить розбиття всієї складної області визначення поля на прості області, що перетинаються, для яких функція Гріна відома або може бути легко побудована. Початкова задача формулюється у вигляді інтегрального рівняння Фредгольма другого роду, яке розв'язується ітераційними або проєкційними методами. Методи є перспективними з точки зору підвищення універсальності та швидкості обчислень, але їх застосування обмежується складністю побудови алгоритму чисельного розрахунку.

При проектуванні НВЧ пристроїв часто використовують комерційні програми комп'ютерного моделювання. Такі програми дозволяють розв'язувати широкий спектр електродинамічних задач, проте, навіть для сучасних ЕОМ процес моделювання НВЧ пристроїв вимагає значних витрат часу, а зміна геометрії досліджуваної структури призводить до необхідності повторного виконання всіх етапів обчислювальної процедури, що значно ускладнює розв'язок задач оптимізації НВЧ пристроїв, а у відсутності хорошого початкового наближення часто взагалі не дозволяють розв'язати поставлену задачу.

Таким чином, розвиток ефективних чисельно-аналітичних методів розрахунку і оптимізації хвилеводних пристроїв є актуальною науково-прикладною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження пов'язані з НДР, яка виконувалася в Дніпровському національному університеті ім. О. Гончара на кафедрі прикладної і комп'ютерної радіофізики: "Взаємодія електромагнітних хвиль мікрохвильового та терагерцового діапазонів з об'єктами складної структури", 2016-2018 рр. (ДР № 0116U003360), в якій здобувач був виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розвиток ефективних методів чисельного аналізу процесу дифракції електромагнітної хвилі в хвилеводних лініях передачі, а саме альтернуючого методу Шварца і методу інтегральних рівнянь часткових областей, що перетинаються. Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати такі задачі:

1. Провести аналіз обчислювальних алгоритмів на основі методу інтегрального рівняння для розв'язування задач електродинаміки НВЧ.

2. Розвинути альтернуючий метод Шварца для розв'язування задач дифракції електромагнітних хвиль на хвилеводних ФАР при наявності діелектричних вставок і покриття хвилеводів решітки, а також при наявності узгоджувальних неоднорідностей у вигляді ступеневих вирізів в стінках хвилеводів.

3. Розробити методику побудови функцій Гріна при наявності пласкошаруватого діелектричного заповнення для альтернуючого методу Шварца і методу часткових областей, що перетинаються.

4. Розвинути альтернуючий метод Шварца і метод часткових областей, що перетинаються, для розв'язання тривимірних задач дифракції електромагнітних хвиль на неоднорідностях у хвилеводних лініях передачі.

Об'єкт дослідження — процес дифракції електромагнітних хвиль на неоднорідностях у хвилеводних лініях передачі.

Предмет дослідження — електродинамічні моделі дифракції електромагнітних хвиль в хвилеводних лініях передачі.

Методи дослідження: метод інтегрального рівняння, математичний апарат електродинаміки НВЧ, апарат тензорних функцій Гріна, а також методи обчислювальної математики і чисельного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Розроблено алгоритм оптимальної ітерації, який на відміну від відомого алгоритму простої ітерації, дозволяє розширити область застосування альтернуючого методу Шварца для зовнішніх і внутрішніх задач електродинаміки НВЧ.

2. Вперше альтернуючим методом Шварца розв'язана тривимірною задачею дифракції електромагнітної хвилі на з'єднанні двох прямокутних хвилеводів з різними розмірами поперечного перерізу з довільною величиною взаємного зміщення осей хвилеводів. Показано, що запропоновані підходи дозволяють спростити побудову алгоритму чисельного розрахунку, а також збільшити швидкодію методу Шварца.

3. Вперше методом Шварца на основі алгоритму оптимальної ітерації розв'язані двовимірні задачі дифракції на ФАР з пласкопаралельних хвилеводів при наявності апертурних пласкошаруватих діелектричних і ступінчастих неоднорідностей. Показано, що застосування алгоритму оптимальної ітерації дозволяє отримати збіжний ітераційний процес в умовах, коли існуючий алгоритм Шварца стає розбіжним.

4. Запропоновано підхід в межах методу часткових областей, що перетинаються, при якому система інтегральних представлень полів в кожній області безпосередньо зводиться до системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Це дозволило значно скоротити кількість аналітичних перетворень необхідних для складання алгоритму чисельного розрахунку. Підхід особливо ефективний для тривимірних задач з неоднорідностями, що взаємодіють по вищим типам хвиль у порівнянні з існуючими алгоритмами методу Шварца та МЧОП.

5. На основі запропонованого підходу вперше методом часткових областей, що перетинаються, розв'язана векторна тривимірною задачею

дифракції електромагнітної хвилі на послідовному з'єднанні трьох прямокутних хвилеводів з різними розмірами поперечного перерізу. Показана можливість ефективного застосування запропонованого підходу для задач оптимізації розмірів хвилеводних пристроїв на прикладі дослідження впливу розмірів секцій хвилеводного трансформатора на частотні характеристики модулю коефіцієнту відбиття.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Представлено розвиток альтернуючого методу Шварца і методу часткових областей, що перетинаються, для розв'язування задач дифракції електромагнітної хвилі на нескінченних хвилеводних ФАР з апертурними неоднорідностями, а також в хвилеводних лініях передачі зі ступінчастою зміною поперечних розмірів..

2. Розроблено методику розв'язання електродинамічних задач і створений пакет програм, які дозволяють проводити аналіз хвилеводних ліній передачі зі ступеневими неоднорідностями, а також плоских хвилеводних ФАР при наявності плоскошаруватого діелектричного заповнення і ступінчастих вирізів в стінках хвилеводів.

3. Розширено область застосування альтернуючого методу Шварца на основі виділення областей, що перетинаються, із застосуванням апарату тензорних функцій Гріна на тривимірні задачі дифракції.

4. Покращена чисельна збіжність альтернуючого методу Шварца на основі виділення областей, що перетинаються, для задач дифракції електромагнітної хвилі за рахунок застосування методу оптимальної ітерації. Отримані чисельні результати підтвердили доцільність використання ступеневих вирізів в стінках хвилеводів ФАР з плоскопаралельних хвилеводів як ефективний метод узгодження.

5. На основі запропонованого підходу в межах методу часткових областей, що перетинаються, досліджено процес дифракції електромагнітної хвилі у хвилеводному трансформаторі. Показано вплив проміжної секції хвилеводу на якість узгодження. Встановлено, що для проміжної секції з довжиною кратною чверті довжини хвилі вдається отримати коефіцієнт відбиття не більше 0.04 в діапазоні частот від 11 до 18 ГГц ($0.6 \dots 0.95 a_1/\lambda$). Для секції з довжиною кратною половині довжини хвилі отриманий коефіцієнт відбиття менш за 0.01 в діапазоні частот від 11.5 до 12.5 ГГц.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок автора наступний:

1. Розробка математичної моделі і алгоритму чисельного розрахунку, отримання підсумкового інтегрального рівняння і його розв'язок, отримання чисельних результатів і їх порівняння з відомими даними [1–3, 6].

2. Розробка алгоритму оптимальної ітерації у вигляді матричного рівняння, створення алгоритму розв'язку задач і отримання результатів та їх аналіз [2, 7–12].

3. Розробка методики розв'язання задач, створення алгоритму розв'язування, отримання чисельних результатів і їх аналіз [4,5, 13–15].

Апробація результатів дисертації. Викладені в дисертації результати доповідалися і обговорювалися на конференціях: III Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки» (м. Чернівці, 24–26 жовтня 2013 р.), Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи» (м. Київ, 10 – 16 березня 2014), 19-й, 21-й та 22-й Міжнародний молодіжний форум Радіоелектроніка та молодь в XXI столітті (м. Харків, 20 – 22 квітня 2015, 25–27 квітня 2017 р., 17-19 квітня 2018), Міжрегіональна науково-практична конференція молодих вчених, «ТАК»: телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології (м. Красноармійськ, 16-17 листопада 2015 р.), XXth IEEE International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED) 2015 (Львів, 21-24 вересня 2015), IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET) 2018 (Київ, 2-5 липня 2018).

Публікації. Матеріали дисертації опубліковані в 15 наукових роботах, серед яких 5 статей у спеціалізованих наукових журналах [1–5] (з них 2 статті видано в зарубіжних наукових виданнях [1, 3], що індексуються у Scopus), 10 тез доповідей на конференціях [6-15] (з них [10, 15] індексуються у Scopus).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Її загальний об'єм становить 148 сторінок. Дисертація містить 25 рисунків. Список використаних джерел на 12 сторінках містить 105 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** до дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми дисертації, зазначено зв'язок з науковими програмами та темами, сформульовано мету та задачі дослідження, зазначено наукову новизну і практичну цінність роботи, наведено інформацію про публікації за темою дисертації, її апробацію та структуру.

У **першому розділі** «Методи розв'язання задач дифракції електромагнітної хвилі в закритих хвилеводах і хвилеводних системах» виконано огляд публікацій, присвячених розв'язанню задач дифракції електромагнітних хвиль у хвилеводах. Розглянуто особливості поширених методів розв'язку задач такого класу. Наведено методіку отримання інтегральної теореми векторної теорії дифракції, а також особливості її застосування до розв'язання задач дифракції в залежності від граничних умов. Показано застосування альтернуючого методу Шварца та методу часткових областей, що перетинаються, до розв'язання крайових задач математичної фізики. Методи розв'язку засновані на розбитті всієї складної області визначення поля на прості області, що перетинаються одна з одною.

Як розвиток методу Шварца побудований числовий алгоритм розв'язку двовимірної хвилеводної задачі дифракції на прикладі задачі про випромінювання електромагнітної хвилі з нескінченної лінійної хвилеводної

фазованої антенної решітки (ФАР), що сканує в H -площині. Запропоновано підхід, що полягає у представленні вкладених циклів підсумовування в виразах для коефіцієнта відбиття матричними арифметичними операціями. Для визначення коефіцієнта відбиття падаючої хвилі побудовано ітераційний процес довільного порядку у вигляді матричного рівняння. Показано, що представлений підхід дозволяє скоротити час рахунку і спростує побудову алгоритму чисельного розрахунку. Проведено дослідження збіжності та визначено границі застосування методу Шварца для розглянутої задачі.

У другому розділі «Застосування ітераційного методу до розв'язування хвилеводних двовимірних задач дифракції» як розвиток методу Шварца для розширення границь його застосування запропоновано підхід, що дозволяє отримати збіжний розв'язок для випадків, коли існуючий метод Шварца стає розбіжним. Запропоновано підходи до побудови функцій Гріна і функції, пов'язаної з падаючою хвилею. Як приклад, розглянуто розв'язання задачі дифракції електромагнітної хвилі на нескінченній ФАР з пласкопаралельних хвилеводів при наявності пласкошаруватого діелектричного заповнення.

В результаті чисельного дослідження було встановлено, що у тому випадку, коли відносна товщина стінок хвилеводів ФАР перевищує значення $t=0,063$, ітераційний процес стає розбіжним, і застосування методу Шварца виявляється неможливим. Для отримання збіжного розв'язку вираз в інтегральній формі для y -складової напруженості електричного поля в частковій області хвилеводу в ітерації i -порядку перетворюється до наступного вигляду:

$$E^{(i)}(x, z) = \beta E_{ex}(x, z) + (1 - \beta) E^{(i-1)}(x, z) + \beta \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} E^{(i-1)}(x'', 0) K(x, z; x'', 0) dx'', \quad (1)$$

де $K(x, z; x'', z'')$ — ядро отриманого інтегрального рівняння. Для визначення величини коефіцієнта відбиття хвилі H_{q0} в хвилеводі решітки скористаємося властивістю ортогональності поперечних власних функцій відповідної часткової області, а в якості початкового наближення візьмемо функцію падаючої хвилі $E_{ex}(x, z)$. При фіксації точки спостереження на $z=0$ вираз для коефіцієнта відбиття хвилі типу H_{q0} в ітерації i -порядку приймає вигляд:

$$R_q^{(i)} = R_q^{(1)} + (1 - \beta) R_q^{(i-1)} + \beta \sum_{m=-M}^M \sum_{p=1}^Q R_p^{(i-1)} C_{q,m} D_{m,p}. \quad (2)$$

Тут: M, Q — число врахованих типів хвиль у хвилеводній області і області випромінювання.

$$C_{qm} = \sqrt{\frac{2}{ab}} \frac{-q\pi}{2a\gamma_q(\gamma_q + \Gamma_m)} \left[\exp\left(-j \frac{aU_m}{2b}\right) - \exp\left(j \frac{aU_m}{2b}\right) \cos(q\pi) \right], \quad (3)$$

$$D_{mq} = \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \varphi_q(x'') \psi_m^*(x'') dx'', \quad (4)$$

$$\psi_m(x) = \sqrt{\frac{1}{b}} \exp\left(j \frac{U_m}{b} x\right), U_m = kb \sin \theta + 2m\pi, \Gamma_m = -j \sqrt{\left(\frac{2m\pi + kb \sin \theta}{b}\right)^2 - k^2}, \quad (5)$$

$$\varphi_q(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{q\pi}{a} \left(x + \frac{a}{2}\right), \gamma_q = -j \sqrt{\left(\frac{q\pi}{a}\right)^2 - k^2}, \quad k = 2\pi. \quad (6)$$

Підхід, розроблений у першому розділі, дозволяє представити вираз (2) у матричній формі:

$$\mathbf{R}^{(i)} = \mathbf{R}^{(1)} + (1 - \beta) \mathbf{R}^{(i-1)} + \beta \cdot \mathbf{A} \mathbf{R}^{(i-1)} \quad (7)$$

Вибираючи значення β таким, що дорівнює зворотній величині норми ядра інтегрального рівняння, можна отримати ітераційний процес, який збігається до наближеного результату з мінімальною відносною похибкою.

При необхідності врахування діелектричного заповнення хвилеводів решітки (рис. 1) для побудови поздовжньої функції Гріна і визначення функції падаючої хвилі, в частковій області, в якій присутнє діелектричне заповнення, виділяються підобласті з відповідним значенням відносної діелектричної проникності середовища. Вид шуканої функції залежить від взаємного розташування точок джерел і точок спостереження.

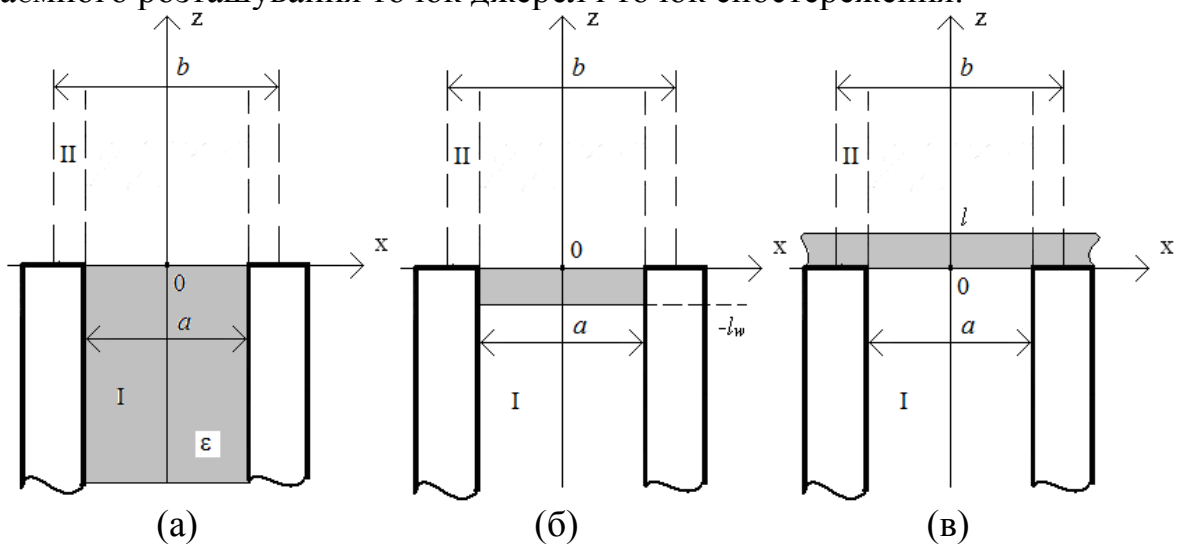


Рис. 1. Одинична комірка нескінченної ФАР з діелектричним заповненням (а), вставкою (б) і покриттям (в)

Так, для ФАР із суцільним діелектричним заповненням хвилеводів (рис. 1 (а)) в області нескінченного хвилеводу виділяються дві підобласті: підобласть, заповнена діелектриком (d) і підобласть вільного простору (f).

Функцію Гріна плоскопаралельного хвилеводу, заповненого діелектриком, представимо у витокopodobній формі:

$$G^I(x, z; x', z') = \sum_{q=1}^{\infty} \varphi_q(x) \varphi_q(x') f^{d,f}(z, z') \quad (8)$$

Виходячи з постановки задачі (рис. 1 (а)), координати точок джерел приймають значення $0 \leq z' \leq \infty$. Тоді, загальний вираз для поздовжньої функції Гріна приймає вигляд:

$$f_q^d(z, z') = t \exp(j\gamma_q^d z), \quad -\infty \leq z \leq 0$$

$$f_q^f(z, z') = \frac{1}{2j\gamma_q^f} \exp(-j\gamma_q^f |z - z'|) + r \exp(-j\gamma_q^f z), \quad 0 \leq z \leq \infty. \quad (9)$$

Для ФАР з діелектричними вставками товщиною l_w в хвилеводах, одинична комірka якої зображена на рис. 1 (б), область хвилеводу розділяється на три підобласті: підобласть w – хвилевод без діелектричного заповнення, підобласть dw – хвилеводна вставка ($-l_w \leq z \leq 0$), підобласть f – хвилевод без діелектричного заповнення, продовжений в нескінченність.

У задачі для ФАР з діелектричним покриттям хвилеводів товщиною l (рис. 1 (в)), область хвилеводу розділяється на три підобласті: підобласть w – хвилевод без діелектричного заповнення ($-\infty \leq z \leq 0$), підобласть d – діелектричне покриття ($0 \leq z \leq l$), підобласть f – хвилевод без діелектричного заповнення, продовжений в нескінченність ($l \leq z < \infty$). Підобласті, аналогічні двом останнім, виділяються і в області II.

Представлений вище метод оптимальної ітерації (МОІ) використовувався для розрахунку коефіцієнту відбиття падаючої хвилі для ФАР, одинична комірka якої зображена на рис. 1 (а) з наступними параметрами: в першому варіанті $b = 0.5714\lambda$, у другому варіанті $b = 0.4\lambda$, відносна товщина стінок хвилеводів становить $t = (b - a)/b = 0,063$ для кожного випадку. Діелектрична проникність середовища, що заповнює хвилевод, змінюється від 0,9 до 3,0 для першого варіанту і від 2,0 до 6,5 для другого. На рис. 2 і 3 наведені графіки залежностей модуля і фази коефіцієнту відбиття від кута сканування для кожного з варіантів розмірів решітки. Розрахунки виконувалися методом простої (суцільна лінія) і оптимальної ітерації (точки).

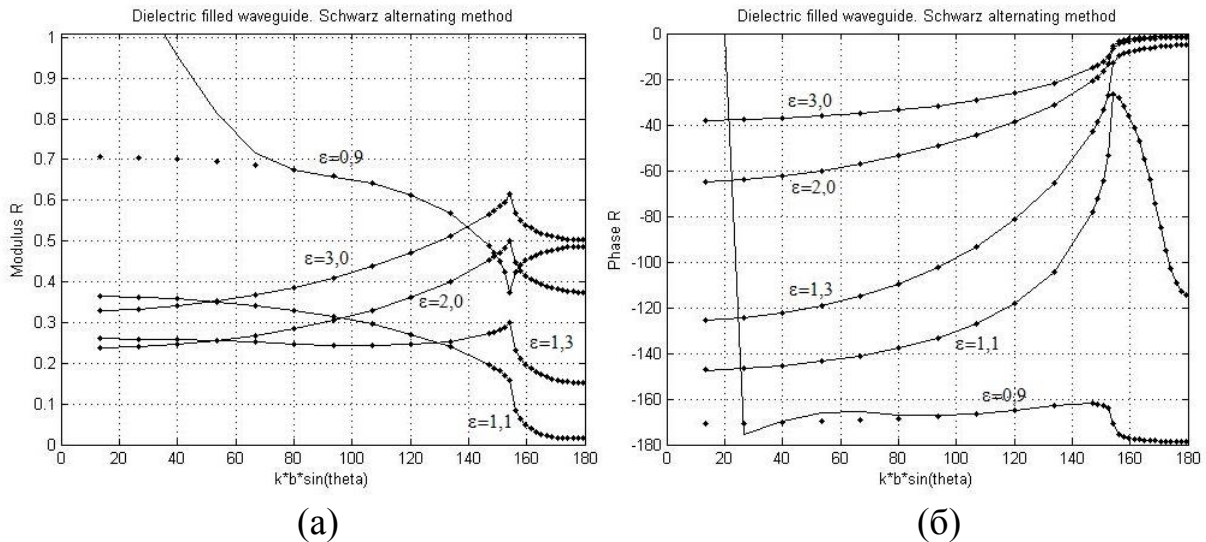


Рис. 2 — Залежність модуля (а) і фази (б) коефіцієнту відбиття від керуючого зсуву фаз ($b=0.5714\lambda$, $t = (b - a)/b = 0,063$).

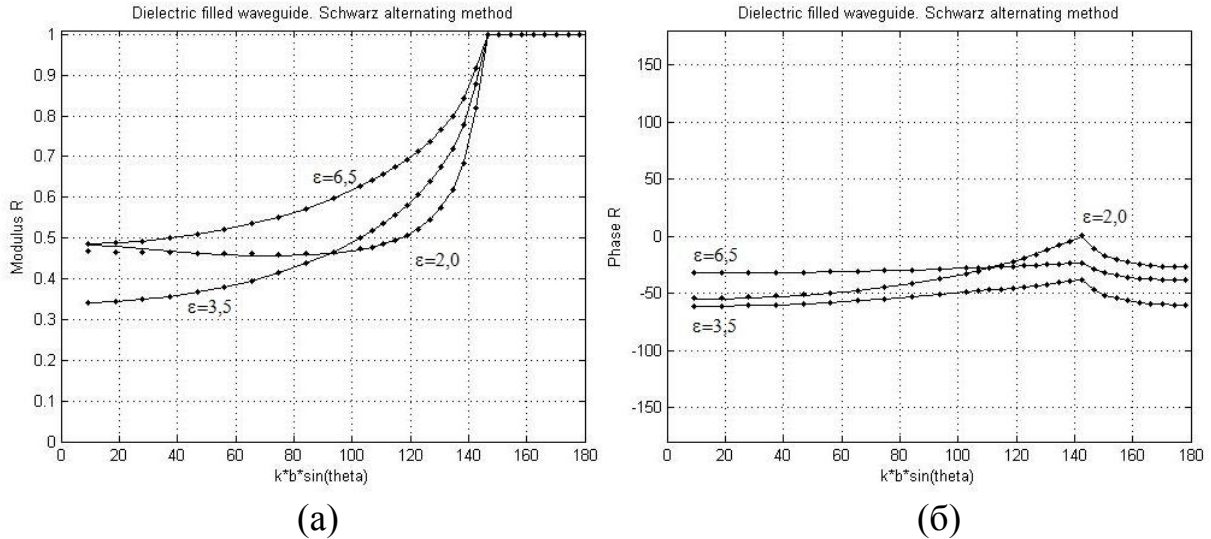


Рис. 3 — Залежність модуля (а) і фази (б) коефіцієнта відбиття від керуючого зсуву фаз ($b=0.4\lambda$, $t = (b - a)/b = 0,063$).

На рис. 4 (а) та (б) показані графіки залежності модуля і фази коефіцієнта відбиття від кута сканування для решітки с діелектричним покриттям ($b/\lambda=0,5714$, $a=b$, $\epsilon=3,0625$). Як видно з графіків, наявність покриття невеликої товщини ($\lambda/32$ або $\lambda/64$) дозволяє домогтися деякого зниження величини модуля коефіцієнта відбиття в порівнянні з ФАР без покриття.

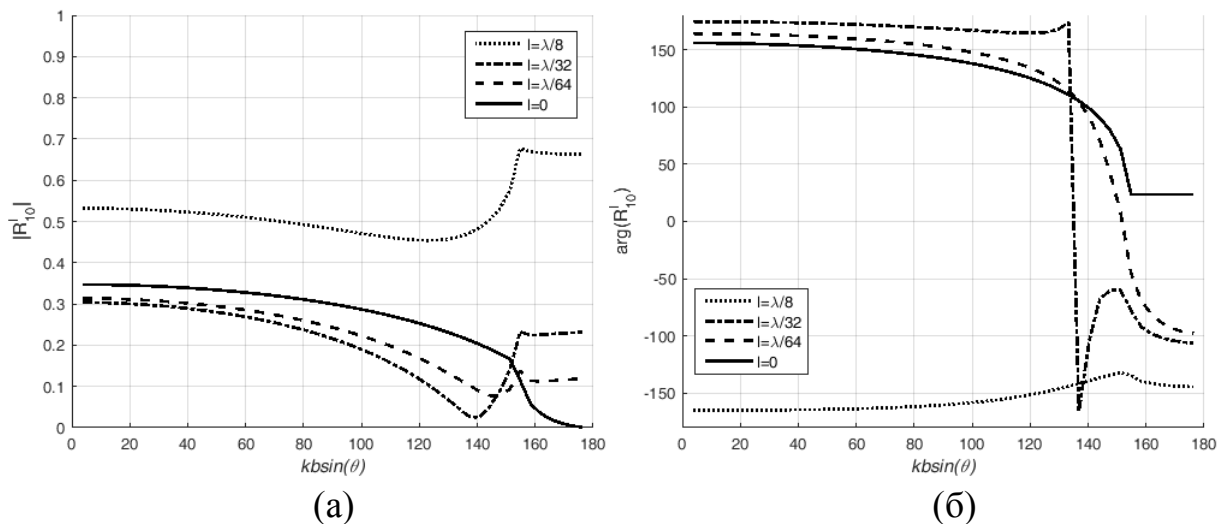


Рис. 4 — Залежність модуля (а) і фази (б) коефіцієнта відбиття від кута сканування для решітки з паралельних пластин з одношаровим діелектричним покриттям ($b/\lambda=0,5714$, $a=b$, $\epsilon=3,0625$).

На рис. 5 (а) та (б) показані графіки залежності модуля і фази коефіцієнта відбиття хвилі H_{10} від кута сканування $kbsin\theta$ для решітки з діелектричними вставками різної товщини: $l_w = 1,03b$; $0,824b$; $0,618b$ ($b/\lambda=0,5714$, $a=0,937b$, $\epsilon=2$).

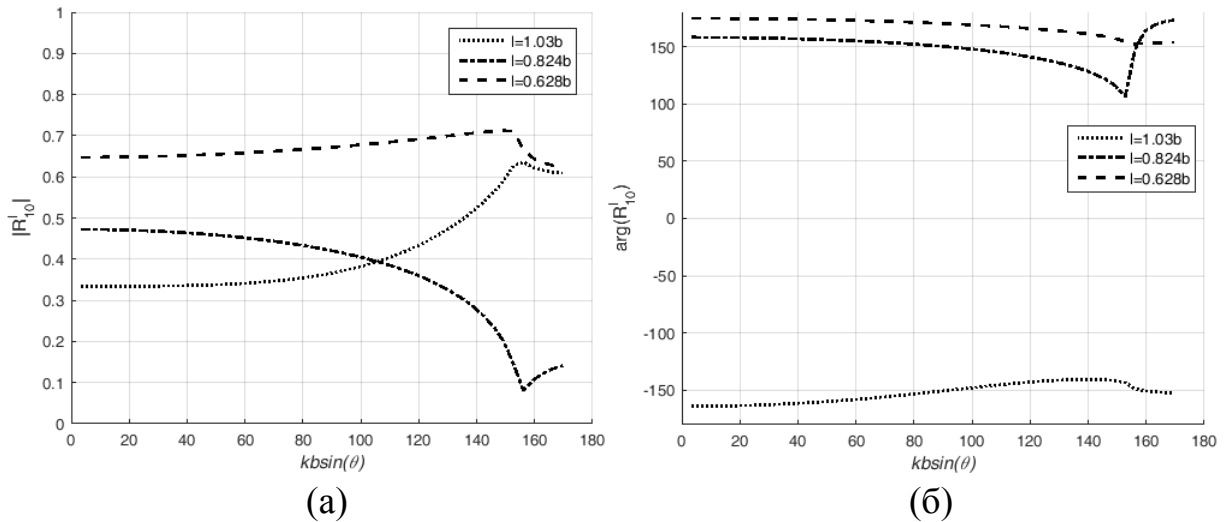


Рис. 5 — Залежність модуля (а) і фази (б) коефіцієнта відбиття від кута сканування для решітки з паралельних пластин з діелектричними вставками ($b/\lambda=0,5714$, $a=0,937b$, $\epsilon=2$).

Отримані результати з графічною точністю збігаються з результатами, отриманими іншими методами. Розв'язок аналогічної задачі за допомогою МЧОП при тому ж числі врахованих типів хвиль дає збіжність результатів у п'ятому знаку після коми. Отримані результати ілюструють доцільність використання розробленого алгоритму для розрахунку задач дифракції електромагнітних хвиль на ФАР з кінцевою товщиною стінок хвилеводів при наявності апертурних діелектричних неоднорідностей.

У **третьому розділі** «Застосування ітераційного методу Шварца для розв'язування тривимірної задачі дифракції» розглядається розв'язання методом Шварца з використанням апарату тензорних функцій Гріна векторної тривимірної задачі дифракції електромагнітної хвилі на стику двох прямокутних хвилеводів з різними розмірами поперечного перерізу. Геометрія даної структури зображена на рис. 6 (а) та (б).

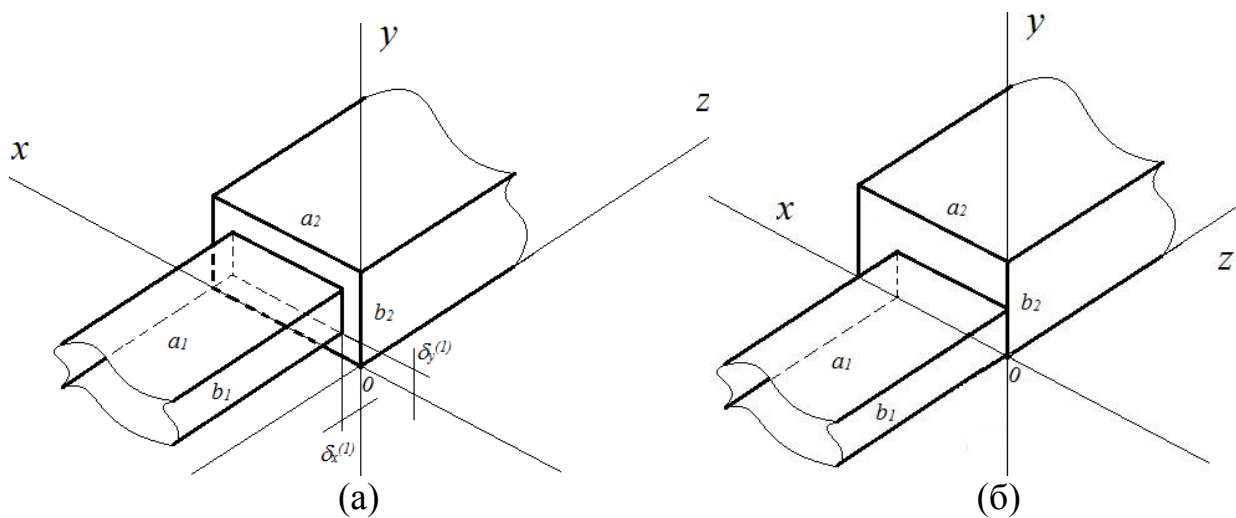


Рис. 6 — Стик прямокутних хвилеводів

Всю область визначення поля розбиваємо на дві області, що перетинаються. Область 1: прямокутний хвилевод з розмірами $a_1 \times b_1$, продовжений в нескінченність, $\delta_x^{(1)}$, $\delta_y^{(1)}$ — зміщення хвилеводу по осях Ox і Oy , для співвісного з'єднання $\delta_x^{(1)} = (a_2 - a_1)/2$, $\delta_y^{(1)} = (b_2 - b_1)/2$. Область 2: напівнескінченний прямокутний хвилевод розмірами $a_2 \times b_2$. В області 1 при $z \rightarrow -\infty$ збуджується хвиля типу H_{10} .

Система інтегральних представлень для повних полів виділених часткових областей прийме вид:

$$\begin{cases} \vec{E}_1(\vec{r}) = \vec{E}_{ex} + \int_{S_1} \vec{n}_1 \times \vec{E}_2(\vec{r}') \cdot \nabla' \times \vec{G}_1^e(\vec{r}, \vec{r}') dS_1; \\ \vec{E}_2(\vec{r}) = \int_{S_2} \vec{n}_2 \times \vec{E}_1(\vec{r}') \cdot \nabla' \times \vec{G}_2^e(\vec{r}, \vec{r}') dS_2. \end{cases} \quad (10)$$

Тут \vec{n}_i , $i=1,2$ — внутрішня нормаль до відповідної поверхні інтегрування, \vec{E}_{ex} — вектор напруженості електричного поля збуджуючої хвилі H_{10} , \vec{r} і \vec{r}' — радіус-вектори точок спостереження і точок джерел поля відповідно, \vec{G}_i^e , $i=1,2$ — функції Гріна електричного типу відповідної області. Поверхня S_1 представлена уявними стінками хвилеводу розмірами $a_1 \times b_1$, продовженими від $z=0$ в нескінченність, а S_2 — апертура з розмірами $a_1 \times b_1$, яка утворена стиком хвилеводів при $z=0$.

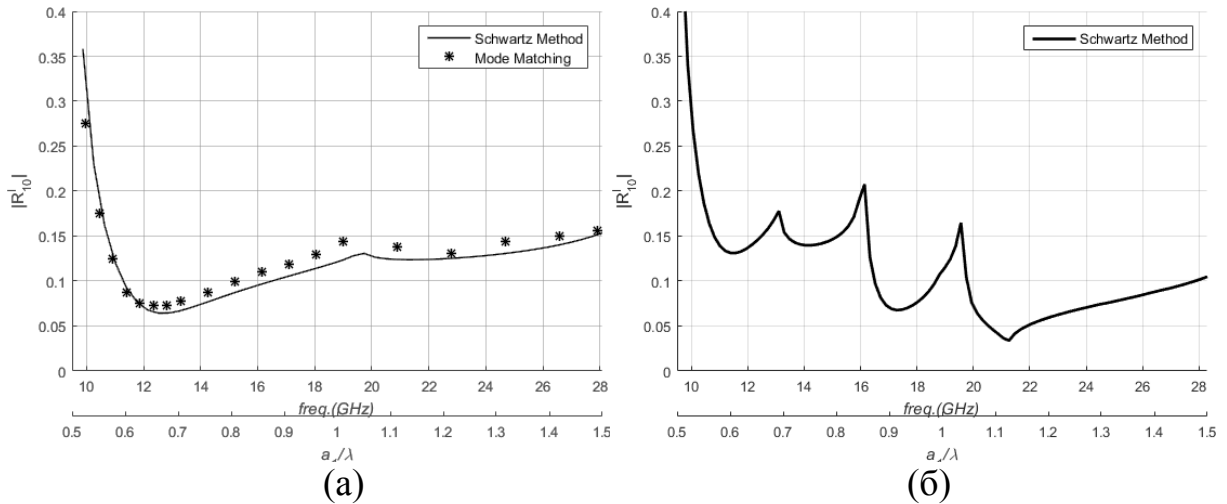


Рис. 7— Частотна залежність модуля коефіцієнта відбиття для співвісного (а) та неспіввісного (б) з'єднання прямокутних хвилеводів

На рис. 7 (а) показана залежність модуля коефіцієнта відбиття хвилі H_{10} від співвідношення a_1/λ для співвісного з'єднання хвилеводів WR62 (область 1: $a_1 = 15.8$ мм, $b_1 = 7.9$ мм) і WR90 (область 2: $a_2 = 22.86$ мм, $b_2 = 10.16$ мм). Символами «*» на графіку показані результати, отримані *H. Patzelt, F. Arndt*.

Залежність модулю коефіцієнта відбиття хвилі H_{10} від частоти для неспіввісного з'єднання ($\delta_x^{(1)} = \delta_y^{(1)} = 0$) показана на рис. 7(б). Частоти локальних максимумів на графіку відповідають критичним частотам для кожного з хвилеводів. Отримані результати підтверджують коректність

розробленого алгоритму, а також ефективність методу Шварца для тривимірних задач дифракції.

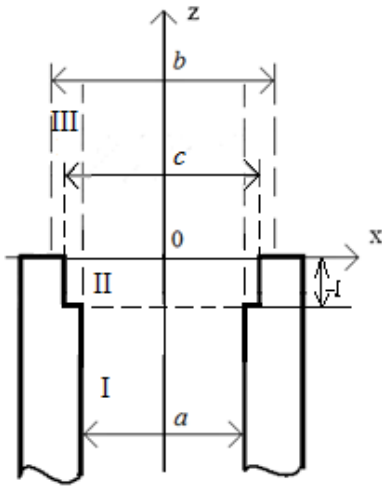


Рис. 8 — Одинична комірка ФАР

У четвертому розділі «Розв'язання задач дифракції електромагнітної хвилі на неоднорідностях, що взаємодіють по вищих типах хвиль» розглядаються скалярна і векторна задачі дифракції електромагнітної хвилі на каскадних східчастих неоднорідностях, які взаємодіють між собою по вищих типах хвиль. Розв'язання задач здійснюється за допомогою розроблених у попередніх розділах підходів на основі ітераційного методу Шварца і методу часткових областей, що перетинаються. Особливість застосування цих методів до задач такого класу полягає в тому, що початкова система інтегральних представлень полів не може бути зведена до одного остаточного

рівняння відносно поля в одній частковій області.

Одинична комірка нескінченної ФАР з плоскопаралельних хвилеводів при наявності апертурних неоднорідностей показана на рис. 8. Розіб'ємо всю область визначення поля на три області, що перетинаються. Область I: $-a/2 \leq x \leq a/2$, $-\infty \leq z \leq \infty$, область II: $c/2 \leq x \leq c/2$, $-l \leq z \leq \infty$, область III: $-b/2 \leq x \leq b/2$, $0 \leq z \leq \infty$. У площині $z \rightarrow -\infty$ області I збуджується падаюча хвиля H_{10} плоскопаралельного хвилеводу. Складемо систему інтегральних представлень для електричного поля кожної часткової області:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_I(x, z) = E_{inc}(x, z) + \int_{-l}^0 E_{II}(x', z') \frac{\partial G_I(x, z; x', z')}{\partial \vec{n}'} dz' + \\ \quad + \int_0^{\infty} E_{III}(x', z') \frac{\partial G_I(x, z; x', z')}{\partial \vec{n}'} dz'; \\ E_{II}(x, z) = \int_{-a/2}^{a/2} E_I(x', z') \frac{\partial G_{II}(x, z; x', z')}{\partial \vec{n}'} dx' + \int_0^{\infty} E_{III}(x', z') \frac{\partial G_{II}(x, z; x', z')}{\partial \vec{n}'} dz'; \\ E_{III}(x, z) = \int_{-c/2}^{c/2} E_{II}(x', z') \frac{\partial G_{III}(x, z; x', z')}{\partial \vec{n}'} dx'. \end{array} \right. \quad (11)$$

Тут x, z — координати точок спостереження, а x', z' — координати точок джерел, G_I, G_{II}, G_{III} функції Гріна областей I, II и III, \vec{n}' позначає вектор нормалі до поверхні, що обмежує часткову область, символ штриху позначає, що диференціювання виконується за координатами точок джерел.

Для розв'язання системи (11) запропоновано наступний підхід. Невідомі функції кожної області представляються у вигляді розкладання в ряд по ортогональних власних функціях з невідомими амплітудними коефіцієнтами, які мають фізичний зміст коефіцієнтів відбиття і

проходження відповідної моди хвилеводу. Далі, користуючись властивістю ортогональності власних функцій, система (11) зводиться до системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів. Відповідно до представленого підходу були проведені чисельні розрахунки коефіцієнта відбиття в хвилеводі одиничної комірки нескінченної ФАР.

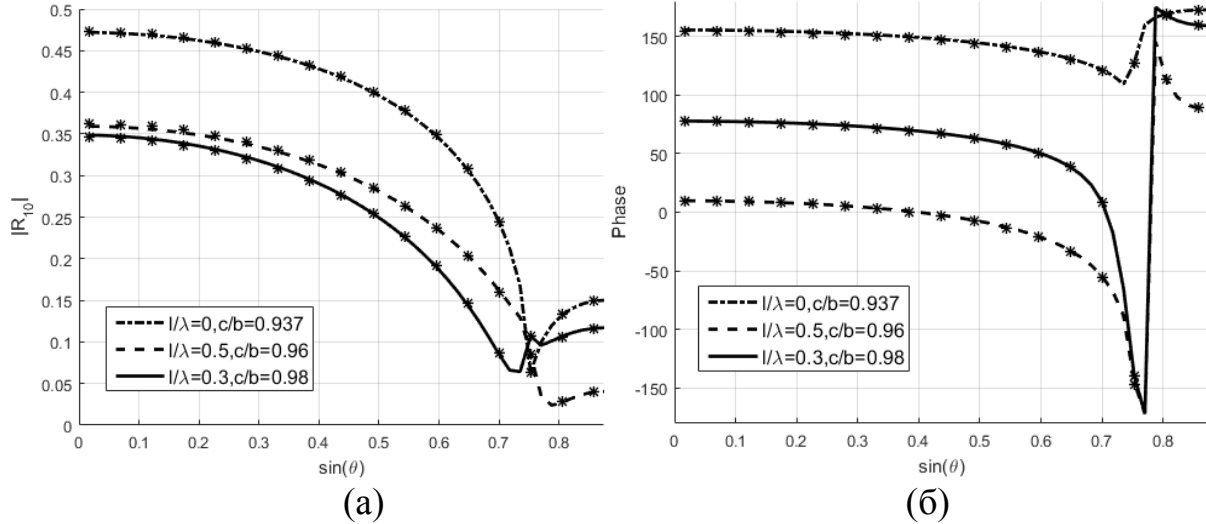


Рис. 9 — Залежність модуля (а) та фази (б) коефіцієнта відбиття падаючої хвилі від керуючого зсуву фаз для $b/\lambda=0.5714$, $a/b=0.937$

На рис. 9 показана залежність модуля (а) та фази (б) коефіцієнта відбиття падаючої хвилі від керуючого зсуву фаз $\sin(\theta)$ для ФАР з розмірами $b/\lambda = 0,5714$, $a/b = 0,937$ при різних величинах c/b і l/λ . Символами "*" на кривих графіків показані значення, що отримані за допомогою МЧОП. Слід зазначити, що коректний розв'язок даної задачі вдається отримати тільки з використанням методу оптимальної ітерації.

До основної особливості запропонованого підходу слід віднести те, що в кожному інтегральному представленні поля часткової області функція Гріна множиться тільки на власну функцію тієї часткової області, в якій знаходяться точки джерел конкретного інтегрального представлення. Це дозволяє значно скоротити обсяг аналітичних перетворень, які передують чисельному розрахунку, що є особливо ефективним для векторних задач.

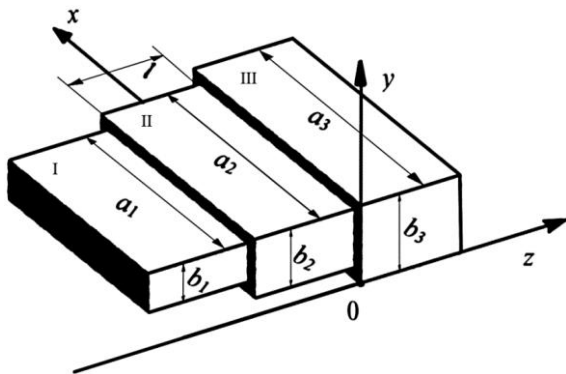


Рис. 10 – Співвісне з'єднання хвилеводів

Співвісне з'єднання трьох прямокутних хвилеводів з різним розміром поперечного перерізу показано на рис. 10. Виділимо три часткові області, що перетинаються. Область I: $(\delta^I_x \leq x \leq \delta^I_x + a_1, \delta^I_y \leq y \leq \delta^I_y + b_1, -\infty \leq z \leq \infty)$. Область II: $(\delta^{II}_x \leq x \leq \delta^{II}_x + a_2, \delta^{II}_y \leq y \leq \delta^{II}_y + b_2, l \leq z \leq \infty)$. Область III: $(0 \leq x \leq a_3, 0 \leq y \leq b_3, 0 \leq z \leq \infty)$. Тут коефіцієнт δ позначає зсув по осях Ox або Oy початкових координат

стінок відповідних хвилеводів.

Поле в кожній частковій області представляється у вигляді розкладання в ряд по повній системі ортогональних власних функцій з невідомими коефіцієнтами розкладання і початкова задача зводиться до системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів розкладання.

На рис. 11 (а) показана залежність модуля коефіцієнта відбиття хвилі H_{10} в області I від частоти і співвідношення a_1/λ для співвісного каскадного з'єднання трьох прямокутних хвилеводів типу WR62 (область I: $a_1 = 15.8$ мм, $b_1 = 7.9$ мм), WR75 (область II: $a_2 = 19.05$ мм, $b_2 = 9.525$ мм) та WR90 (область III: $a_3 = 22.86$ мм, $b_3 = 10.16$ мм). Довжина проміжного хвилеводу l приймала значення рівні $0,2747a_1$, $0,3103a_1$, $0,3459a_1$, $0,38035a_1$, $0,4475a_1$ які відповідають чверті довжини хвилі в хвилеводі області II для значень нормованих частот $a_1/\lambda = 1,0$; $0,7$; $0,6$; $0,55$ та $0,5$ відповідно. Для порівняння наведено частотну залежність модуля коефіцієнта відбиття для випадку стику двох хвилеводів.

На рис. 11 (б) показана частотна залежність модуля коефіцієнта відбиття хвилі H_{10} для випадків, коли довжина проміжного хвилеводу l приймала значення $0,5494a_1$, $0,6206a_1$, $0,6918a_1$, $0,7607a_1$ та $0,8950a_1$, що відповідає половині довжини хвилі області II для значень нормованих частот, аналогічних попередньому випадку. Як видно з результатів, вибір довжини проміжного хвилеводу $l=0,5494a_1$ дозволяє отримати значення модуля коефіцієнта відбиття не більше $0,01$ в діапазоні частот від $11,5$ до 13 ГГц з мінімумом на частоті $12,6$ ГГц.

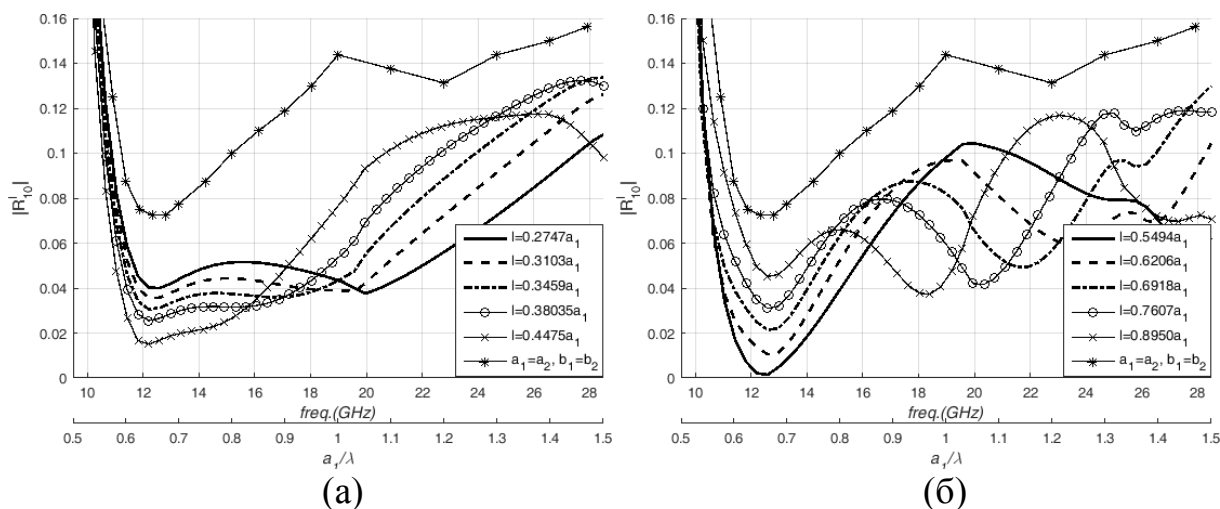


Рис. 11 — Частотна залежність модуля коефіцієнта відбиття для випадків $l=\lambda_B/4$ (а) и $l=\lambda_B/2$ (б).

На рис. 12 (а) та (б) показані частотні характеристики для аналогічного з'єднання, отримані за допомогою програмного пакета HFSS, що підтверджує достовірність результатів, отриманих за допомогою запропонованого в роботі підходу, а також його ефективність для такого класу електродинамічних задач.

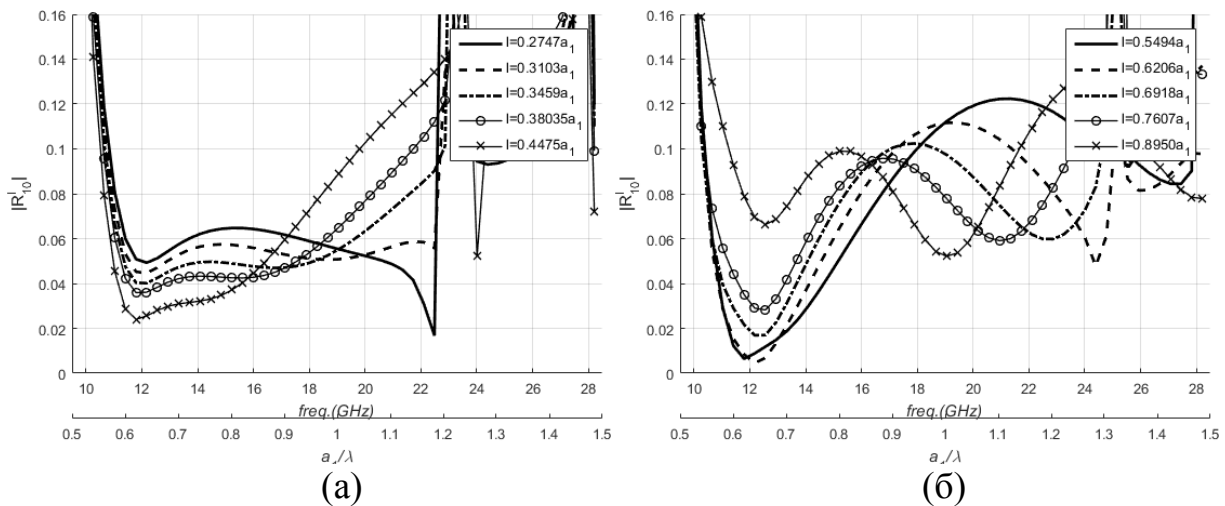


Рисунок. 12 – Результати, отримані у HFSS для $l=\lambda_B/4$ (а) та $l=\lambda_B/2$ (б)

Таким чином, представлений в роботі підхід на основі ітераційного методу Шварца та МЧОП дозволяє виконувати електродинамічний аналіз та розв'язувати задачі оптимізації хвильоводних НВЧ пристроїв з неоднорідностями, геометрія яких дозволяє виконати розбиття всієї області визначення поля на три і більше часткові області, що перетинаються. При цьому, розв'язання отримується у вигляді розкладання в ряд по власних функціях кожної часткової області.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну задачу розвитку методів аналізу процесу дифракції електромагнітної хвилі у хвильоводних лініях передачі. В основі запропонованих підходів лежать ітераційний метод Шварца, а також метод інтегральних рівнянь часткових областей, що перетинаються, з використанням апарату тензорних функцій Гріна.

Основні результати роботи і висновки:

1. В межах ітераційного методу Шварца розроблено підхід, який полягає у перетворенні добутку рядів власних функцій у ядрі інтегрального рівняння на операцію добутку матриць. Запропонований підхід дозволив представити загальний вираз для визначення коефіцієнта відбиття падаючої хвилі у вигляді матричного рівняння, яке далі розв'язується методом послідовних наближень. Застосування розробленого підходу в межах методу інтегральних рівнянь часткових областей, що перетинаються, приводить до аналогічного матричного рівняння, яке розв'язується проекційними методами. На прикладі задачі дифракції електромагнітної хвилі на ФАР з пласкопаралельних хвильоводів, що сканує у H -площині, показано, що такий підхід дозволяє спростити процедуру побудови числового алгоритму, а також скоротити відносний час розрахунку величини коефіцієнта відбиття, при чому з ростом числа врахованих типів хвиль перевага запропонованого алгоритму в швидкодії збільшується.

2. Запропоновано підхід на основі ітераційного методу Шварца, який дозволив розширити область застосування методу Шварца та отримати збіжний розв'язок у випадках, коли метод послідовних наближень стає розбіжним. Розроблений підхід полягає у введенні в початкове інтегральне рівняння ітераційного параметру β . Показано, що для досягнення збіжного ітераційного процесу необхідно обирати значення параметру β таким, що дорівнює оберненій величині норми ядра інтегрального рівняння.

3. На основі запропонованих підходів розроблено чисельний алгоритм оптимальної ітерації, за допомогою якого розв'язано задачі дифракції електромагнітних хвиль на нескінченних ФАР з пласкопаралельних хвилеводів при наявності пласкошаруватих діелектричних неоднорідностей. На прикладі розглянутих задач було запропоновано методику побудови функцій Гріна часткових областей для такого типу неоднорідностей і функцій, пов'язаних з джерелом поля. Наведено чисельні результати розрахунку амплітуди і фази коефіцієнта відбиття падаючої хвилі в одиничній комірці нескінченної ФАР, які отримані за допомогою алгоритму оптимальної ітерації методу Шварца.

4. Вперше методом Шварца, з використанням розроблених підходів, розв'язана векторна задача дифракції електромагнітної хвилі на з'єднанні двох прямокутних хвилеводів з різними розмірами поперечного перерізу. Досліджено чисельну збіжність отриманого розв'язання в залежності від числа врахованих типів хвиль. Встановлено оптимальне співвідношення числа врахованих типів хвиль в часткових областях, при якому досягається прийнятна точність з мінімальним часом рахунку.

5. Запропоновано узагальнений підхід на основі методу інтегральних рівнянь часткових областей, що перетинаються, і методу Шварца для аналізу процесу дифракції електромагнітної хвилі на неоднорідностях, що взаємодіють по вищих типах хвиль. Розроблений узагальнений підхід дозволяє значно скоротити обсяг аналітичних перетворень, необхідних для отримання чисельного розв'язання, за рахунок безпосереднього зведення системи інтегральних представлень полів часткових областей до системи лінійних алгебраїчних рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів відбиття та проходження поля у кожній частковій області. Підхід дозволяє ефективно аналізувати електродинамічні структури, в яких є можливість виділити основну область поширення радіохвиль та області, що представляють собою малі відхилення від регулярності.

6. На основі розробленого узагальненого підходу розв'язано задачу дифракції електромагнітної хвилі на нескінченній ФАР з пласкопаралельних хвилеводів зі східчастими узгоджувальними вирізами в стінках хвилеводів. Проведено чисельне дослідження впливу геометричних розмірів вирізу на коефіцієнт відбиття падаючої хвилі у хвилеводі комірці ФАР. Були визначені оптимальні розміри узгоджувальної неоднорідності, що дозволяє отримати найбільш рівномірну залежність модуля коефіцієнта відбиття від кута сканування.

7. Вперше з використанням запропонованого узагальненого підходу в методі інтегральних рівнянь часткових областей, що перетинаються, розв'язано

тривимірну векторну задачу дифракції електромагнітної хвилі на співвісному каскадному з'єднанні трьох прямокутних хвилеводів з різними розмірами поперечного перерізу. Досліджено чисельну збіжність отриманого розв'язання в залежності від числа врахованих типів хвиль, а також вплив геометричних розмірів узгоджувальної області на частотну залежність модуля коефіцієнта відбиття хвилі H_{10} в першому хвилеводі. Показано, що підбір довжини узгоджувального хвилеводу дозволяє знизити величину модулю коефіцієнта відбиття і отримати як широкосмугове, так і вузькосмугове узгодження. Достовірність отриманого розв'язання підтверджується порівнянням з результатами, отриманими в умовах граничних переходів до з'єднання двох хвилеводів, а також з результатами, отриманими за допомогою пакета програм HFSS.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. M. A. Gnatyuk, V. M. Morozov and A. M. Sjanov, “A Schwarz algorithm for three-dimensional diffraction problems” *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)*, Volume 74, Issue 1, pp. 1-8, 2015. (Scopus).
2. Morozov V. M., Gnatyuk M. A. Phased antenna array analysis with Schwartz alternating method. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія «Фізика. Радіoeлектроніка»*. Дніпропетровськ, 2015. Том 23. Вип. 22. С. 132 – 141.
3. M. A. Gnatyuk and V. M. Morozov, “The Schwarz method application to the calculation of waveguide phased arrays in the presence of dielectric insertions and coating” *Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika)* Volume 77, Issue 1, pp. 1-11, 2018. (Scopus).
4. Gnatyuk M. A., Morozov V. M. An integral equation technique for the analysis of phased array antenna with matching step discontinuities. *Journal of Physics And Electronics*. Dnipro, Vol. 26(2). 2018 p. 101–106.
5. Гнатюк М. А., Морозов В. М., Марченко С. В. Дифракция электромагнитной волны на каскадном соединении прямоугольных волноводов. *Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник Радиотехника*. Харьков, Украина, 2019. Вып.196. С. 130-137.
6. Гнатюк М. А., Морозов В. М., Стык прямоугольных волноводов различного поперечного сечения. *Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки: Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернівці, 24–26 жовтня 2013 р.)*. Чернівці, 2013. С. 101.
7. Гнатюк М. А., Морозов В. М., Съянов А. М. Решение дифракционной задачи методом Шварца: метод простой и оптимальной итерации. *Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 10 – 16 березня 2014)*. Київ, 2014. С. 123–125.

8. Гнатюк М. А., Морозов В. М. Расчет методом Шварца антенной решетки из волноводов с диэлектрическим заполнением. *Радіоелектроніка та молодь в XXI столітті*: Матеріали 19-го міжнародного молодіжного форуму. (м. Харків, 20 – 22 квітня 2015). Харків, 2015. С. 7–8.
9. Гнатюк М. А., Марченко С. В., Морозов В. М., Сьянов А. М. Применение метода интегрального уравнения к решению дифракционных задач. *«ТАК»: телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології*: зб. доповідей міжрегіон. наук.-практ. конф. молодих вчених. (м. Красноармійськ, 16-17 листопада 2015). Красноармійськ: ДВНЗ «ДонНТУ», 2015. С. 53–55.
10. M. A. Gnatyuk, and V. M. Morozov, “On the Schwarz alternating method for solving electromagnetic problems,” In Proc. XXth IEEE International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED), Sep. 21-24, 2015, pp. 132-135. (Scopus).
11. Гнатюк М. А., Морозов В. М., Сьянов А. М. Анализ фазированных антенных решеток с плоскостойким диэлектрическим заполнением. *«ТАК»: телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології*: зб. тез доповідей міжрегіон. наук.-практ. конф. молодих вчених (м. Покровськ, 29-30 листопада 2016 р.). Покровськ, 2016. С. 34–36.
12. Гнатюк М. А., Морозов В. М. Расчет альтернирующим методом Шварца антенной решетки при наличии диэлектрических вставок и покрытия. *Радіоелектроніка та молодь в XXI столітті*: Матеріали 21-го міжнародного молодіжного форуму. (м. Харків, 25 – 27 квітня 2017), Харків, 2017, с. 5-6.
13. Гнатюк М. А., Морозов В. М. Электродинамический алгоритм расчета фазированной антенной решетки на основе альтернирующего метода Шварца. *Проблеми навігації і управління рухом*: Тези доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів (м. Київ, 22–24 листопада 2017 р.). Київ, 2017. С. 48.
14. Гнатюк М. А., Морозов В. М. Решение задач дифракции методом интегральных уравнений частичных пересекающихся областей. *Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті*: Зб. матеріалів 22-го міжнародного молодіжного форуму. форуму. Т.3. (м. Харків, 17-19 квітня 2018). Харків: ХНУРЕ, 2018. С. 5–6.
15. M. A. Gnatyuk and V. M. Morozov, “An Integral-Equation Analysis of Waveguide Step Discontinuities,” In Proc. 17th IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET), Jul. 3-6, 2018, pp. 209 – 212. (Scopus).

АНОТАЦІЯ

Гнатюк М. О. Розвиток методу інтегральних рівнянь часткових областей, що перетинаються, для розв'язання хвильоводних задач дифракції. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 «Радіофізика». – Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України; Харків, 2021.

Дисертація присвячена розвитку ітераційного методу Шварца та методу часткових областей, що перетинаються (МЧОП) для розв'язання задач дифракції електромагнітних хвиль на пласкошаруватих діелектричних та східчастих неоднорідностях у хвилеводних лініях передачі. Для розширення границь застосування методу Шварца розроблено підхід, що дозволяє отримати збіжний розв'язок для випадків, коли існуючий метод Шварца стає розбіжним. Запропоновано методу побудови функцій Гріна часткових областей при наявності пласкошаруватого діелектричного заповнення хвилеводів ФАР. Вперше методом Шварца розв'язана тривимірна задача дифракції електромагнітної хвилі на стику двох прямокутних хвилеводів з різним розміром поперечного перерізу. Запропоновано узагальнений підхід в межах МЧОП та методу Шварца, з використанням якого розв'язана тривимірна задача дифракції електромагнітної хвилі на співвісному каскадному з'єднанні трьох прямокутних хвилеводів з різними розмірами. Досліджено вплив довжини узгоджувальної області на частотну залежність модуля коефіцієнта відбиття хвилі типу H_{10} в першому хвилеводі.

Ключові слова: інтегральні рівняння Фредгольма, функція Гріна, метод Шварца, прямокутний хвилевод, хвилеводна антенна решітка.

АННОТАЦІЯ

Гнатюк М. А. Развитие метода интегральных уравнений частичных пересекающихся областей для решения волноводных задач дифракции. — Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 «Радиофизика». – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2021.

Диссертация посвящена развитию итерационного метода Шварца и метода частичных пересекающихся областей (МЧПО) для решения задач дифракции электромагнитных волн на плоскостойких диэлектрических и ступенчатых неоднородностях в волноводных линиях передачи. Для расширения границ применимости метода Шварца разработан подход, позволяющий получить сходящееся решение для случаев, когда существующий метод Шварца становится неприменимым. Предложена методика построения функций Грина частичных областей при наличии плоскостойкого диэлектрического заполнения волноводов ФАР. Впервые методом Шварца решена трехмерная задача дифракции электромагнитной волны на стыке двух прямоугольных волноводов с различным размером поперечного сечения. Предложен обобщенный подход в рамках МЧПО и метода Шварца, с использованием которого решена трехмерная задача дифракции электромагнитной волны на соосном каскадном соединении трех прямоугольных волноводов с различными размерами. Исследовано влияние продольных размеров согласующей области на частотную зависимость модуля коэффициента отражения волны типа H_{10} в первом волноводе.

Ключевые слова: функция Грина, интегральное уравнение Фредгольма, метод Шварца, волноводная антенная решетка, прямоугольный волновод.

ABSTRACT

Gnatyuk Maksim. The development of the integral equation method of partial overlapping domains for solving waveguide diffraction problems. — Manuscript.

The Candidate of science degree thesis in physics and mathematics by specialty 01.04.03 –“Radiophysics”. Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2021.

The thesis is devoted to the development of the Schwartz alternating method and the method of overlapping partial domains, which are used with Green’s functions. These methods are applied to problems of electromagnetic wave diffraction on layered dielectric inhomogeneities and stepwise discontinuities in rectangular waveguides. Considered methods are based on splitting the whole field definition domain into simple overlapping subdomains.

In order to develop the Schwartz method the original numerical algorithm was established for solving 2-D problem of the electromagnetic wave diffraction on an infinite linear waveguide PAA, which scans in H-plane. The proposed algorithm reduces an initial integral equation to a matrix equation, which is solved with direct or iteration methods. The numerical experiment has shown that for some cases the Schwartz method gives a divergent series of iterations. In order to improve a convergence of the Schwartz method the optimal iteration method has been suggested. It has been shown that proposed method allows improving a convergence of the Schwartz method for cases in which the initial Schwartz method yields an incorrect solution. In addition, an approach for the Green’s function deriving in cases of partial domains contain layered dielectric medium has been presented.

The developed approaches were used for solving a three dimensional problem of an electromagnetic wave diffraction on a rectangular waveguide junctions. The convergence of the obtained results is investigated depending on the number of modes taken into account. Frequency dependencies of reflection coefficient modulus are shown for two cases: coinciding waveguide axes and two waveguides have a common edge.

A generalized approach within Schwartz method and overlapping partial domain method is proposed. The approach allows solving diffraction problems for discontinuities interacting on higher order modes. The proposed approach reduces a system of integral equations to a system of linear equations for all unknown field functions in each partial domain. Wherein, unknown functions are represented as series of orthogonal eigenfunctions. The developed approach reduces significantly an amount of analytical transformations required before performing numerical calculations, especially for three-dimensional problems. The problem of electromagnetic wave diffraction on a cascaded co-axial junction of three rectangular waveguides is solved using the proposed approach. The effect of longitudinal dimensions of matching section on the frequency dependence of an H_{10} -wavetype reflection factor is investigated.

Keywords: Fredholm integral equations, Green functions, Schwartz method, rectangular waveguide, waveguide antenna array

ГНАТЮК Максим Олександрович

**РОЗВИТОК МЕТОДУ ІНТЕГРАЛЬНИХ РІВНЯНЬ ЧАСТКОВИХ
ОБЛАСТЕЙ, ЩО ПЕРЕТИНАЮТЬСЯ, ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ
ХВИЛЕВОДНИХ ЗАДАЧ ДИФРАКЦІЇ**

(Автореферат)

Підписано до друку 24.02.2021. Формат 60x90/16
Папір офсет. Цифровий друк. Умовн. друк. арк 0,9.
Обіково-видавн. арк 0,9. Наклад 100 прим. Зам. № 05/21

Дніпровський державний технічний університет
вул. Дніпробудівська, 2, м. Кам'янське, Дніпропетровська обл., 51918

