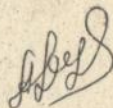


Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут"

На правах рукопису
УДК 621.372.8

ДУДКО Ганна Георгіївна



ДОСЛІДЖЕННЯ Н-ПЛОЩИННИХ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ
СТРУКТУР ІЗ СКРУГЛЕННЯМ ГОСТРИХ КРОМОК ТА КУТІВ

05.12.07. - Антени та пристрої мікрохвильової техніки

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

Київ-1996

21.396.6

ДВ 34.047

Дисертація є рукописом

Роботу виконано в НДІ
"Київський політехнічний інститут"

Науковий керівник

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00754282 (S)

Офіційні опоненти

доктор технічних наук, професор
ІЛЬНИЦЬКИЙ Л.Я.

кандидат технічних наук
ДЕМЧЕНКО О.В.

Провідна організація

Науковий центр при Київському
військовому інституті управління і
зв'язку

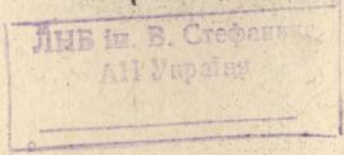
Захист відбудеться - 11 - березня 1996 р. в 15 годин на
засіданні спеціалізованої ради К 01.02.21 при Національному технічному
Університеті України "Київський політехнічний інститут" (252056, Київ-
36, проспект Перемоги, 37)

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці НТУУ "КПІ".

Автореферат розіслав 8 лютого 1996

Вчений секретар
Спеціалізованої Ради К 01.02.21
к.т.н.

Кудінов Е.В.Кудінов



АНОТАЦІЯ

Головне завдання дисертаційної роботи: розвинення методу розрахунку широкого класу Н-площинних електродинамічних структур із скругленням гострих кромки і кутів (СГКК), створення математичних моделей, алгоритмів, програмного забезпечення та дослідження електродинамічних характеристик структур із СГКК.

У зв'язку з цим автором особисто розв'язано такі основні задачі:

1. У припущенні ідеальної провідності металевих поверхонь побудовано математичну модель стиків і ступінчатих переходів прямокутних хвильоводів у Н-площині із скругленням гострих кромки (СГК). Досліджено дифракцію хвиль H_{10} на зазначених структурах.
2. Побудовано математичні моделі й проведено дослідження різного роду Т-з'єднань у Н-площині: із СГК, із СГК і провідним гребнем складної форми (клиноподібним, а також скругленим клиноподібним), із провідним гребнем і компенсуючими уступами (прямокутними і прямокутними із скругленнями внутрішніх кутів). Досліджено АЧХ і ФЧХ таких з'єднань.
3. Розроблено алгоритми й комплекс програм, що реалізують одержані математичні моделі.
4. Проведено дослідження інтегралів, що зустрічаються при аналізі структур із СГКК. Одержано аналітичні вирази таких інтегралів.

Автор захищає такі основні положення дисертації:

1. Розвинений метод, розроблені алгоритми й програми розрахунку електродинамічних структур із СГКК.
2. Розв'язки внутрішніх граничних задач електродинаміки й побудовані математичні моделі стиків прямокутних хвильоводів у Н-площині із СГК, Н-площинних ступінчатих переходів із СГК, різного роду Т-з'єднань у Н-площині (із СГК, із СГК і провідним гребнем складної форми, а також із провідним гребнем і компенсуючими уступами).
3. Результати дослідження електродинамічних характеристик вищезазначеного класу структур.
4. Результати дослідження інтегралів, що зустрічаються при аналізі електродинамічних структур із СГКК, аналітичні вирази зазначених інтегралів.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток техніки НВЧ і КВЧ діапазонів, підвищення енергетичного потенціалу приладів вимагає пошуку нових принципів конструювання й удосконалювання елементної бази НВЧ пристроїв і систем, розробки конструктивно простих електродинамічних елементів та вузлів із поліпшеними характеристиками: більш широкою смугою пропускання та пробивною потуж-

ністю, кращими амплітудно-частотними характеристиками, зменшеними масогабарітними параметрами.

Традиційно використовувані в техніці НВЧ електродинамічні об'єкти найчастіше характеризуються або різкими переходами, стрибками (стики ліній передачі, ступінчаті переходи, Т-з'єднання, діафрагми й пристрої на їхній основі, гребневі хвилеводи, тощо) або плавними змінами геометрії (рупори, плавні переходи, тощо). Однак такі об'єкти в більшості випадків не є, в певному розумінні, оптимальними. Як правило, оптимальними виявляються об'єкти з різкою, але не стрибкоподібною зміною геометрії, так звані "із скругленнями". Електродинамічні об'єкти із СГКК можуть, у принципі, мати більш привабливі характеристики, ніж ті ж самі об'єкти без скруглень: більшу пробивну потужність, кращі частотні характеристики (менший КСХ, більш широку смугу пропускання), оскільки зменшується напруженість поля й ємність у місцях стиків хвилеводів. При цьому такі структури, як правило, більш технологічні. Побудова Н-площинних Т-з'єднань прямокутних хвилеводів на базі структур із СГКК та введення до з'єднувальної області скруглених провідних вставок дозволяє розв'язати задачу ширококутового узгодження та пошуку технологічних конструкцій таких з'єднань для використання їх у потужних пристроях НВЧ та КВЧ діапазонів.

Однак електродинамічні об'єкти із скругленнями досліджено недостатньо. Основними причинами цього були задоволеність характеристиками пристроїв із стрибкоподібними або повільними змінами геометрії, складність розв'язання задач й відсутність достатньо ефективних і надійних методів їх проектування. Але розвиток методів розрахунку, ЕОМ, неухильне підвищення вимог до електродинамічних об'єктів зробило можливим, актуальним і поставило в практичну площину розв'язання задач для структур із СГКК.

Метод дослідження засновано на синтезі гіпотези Релея щодо аналітичного продовження розв'язку хвильового рівняння, методу часткових областей (МЧО) і методу заміни хвильової задачі польовими (МЗХЗП).

Наукова новизна роботи визначається такими результатами:

1. Розвинуто метод, заснований на синтезі гіпотези Релея щодо аналітичного продовження розв'язку хвильового рівняння, МЧО й МЗХЗП, для аналізу широкого класу Н-площинних структур із СГКК (стиків прямокутних хвилеводів, ступінчатих переходів, різного роду Т-з'єднань).
2. Показано ефективність розвинутого методу стосовно до зазначеного класу структур. Проведено дослідження внутрішньої збіжності методу й вироблено рекомендації щодо вибору кількості враховуваних членів розкладів полів у кожній частковій області, що забезпечує найкраще наближення до точного розв'язку.

3. За допомогою розроблених математичних моделей і комплексу програм уперше досліджено дифракцію хвиль на зазначеному класі електродинамічних структур.
4. Розроблено ефективні методи обчислювання інтегралів, що зустрічаються при аналізі структур із СГКК, одержано аналітичні вирази таких інтегралів.

Обґрунтованість і достовірність одержаних результатів визначається коректністю постановки електродинамічних задач, відповідністю одержаних результатів фізичним уявленням щодо структур без гострих ребер, дослідженням внутрішньої збіжності одержаних розв'язків, порівнянням з результатами, одержаними іншими методами, та з експериментом.

Практична цінність роботи. Розвинений у дисертації метод і реалізація на його основі алгоритмів чисельного розв'язання електродинамічних задач дозволили створити ефективні комплекси програм електродинамічного розрахунку великої кількості Н-площинних структур із СГКК (стиків прямокутних хвилеводів, ступінчатих переходів, різних модифікацій Т-з'єднань), орієнтованих на використання ПЕОМ, що дають змогу значно поліпшити параметри пристроїв, які проектуються, і зменшити вартість і строки розробок. Розроблені моделі й програми можуть бути рекомендовані для використання в системах автоматизованого проектування пристроїв НВЧ і КВЧ діапазонів.

Реалізація результатів роботи. Результати, висновки, рекомендації дисертації, програми розрахунків характеристик систем із СГКК використовуються в Національному технічному університеті України.

Апробація роботи. Положення й результати роботи доповідалися й обговорювалися на

- XII Всесоюзному семінарі з лінійних прискорювачів заряджених частинок (Харків, 1991);
- Міжнародній конференції "Mathematical Methods in the Electromagnetic Theory" (Алушта, 1991);
- II Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми совершенствования радиоэлектронных комплексов и систем обеспечения полетов" (Київ, 1992);
- XXIV General Assembly of International Union of Radio Science (URSI) (Киото, Японія, 1993).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 7 друкованих праць.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів та підсумку. Вона містить 165 сторінок, 43 рисунка, список літератури з 129 назв на 13 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

1. Обґрунтовано актуальність теми дисертації, дано огляд літератури з досліджуваних проблем, визначено мету та задачі роботи, сформульовано наукову

новизну й практичну цінність одержаних результатів, подано структуру роботи й основні положення, що виносяться до захисту.

2. Розв'язано граничні задачі для стиків і ступінчатих переходів і прямокутних хвильоводів у H -площині із SGK (рис. 1, а, б).

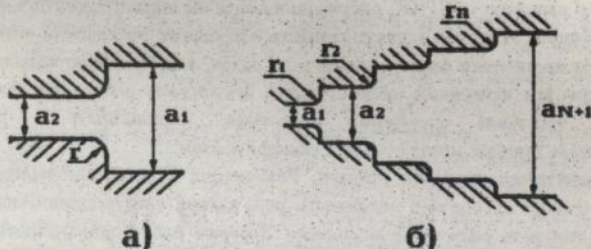


Рис. 1

Ступінчаті переходи із SGK належать до немонотонних переходів і мають кращі частотні характеристики, ніж звичайні ступінчаті переходи тієї ж довжини.

Розроблено математичну модель й алгоритм електродинамічного аналізу ступінчатих переходів прямокутних хвильоводів в H -площині із SGK. За ключову розглянуто задачу дифракції хвиль H_{10} на стикі із SGK. Останню розв'язано МЧО з використанням гіпотези Релея. Прийнято, що втрати в середовищі й стінках хвильоводів відсутні. Залежність від часу гармонічна. Скруглення стиків може бути описано довільною функцією. Виділено 2 часткові області, границя розподілу проходить через точки початку регулярної частини хвильовода меншого перерізу. Гіпотеза Релея дозволяє зобразити поля в нерегулярній області скруглень у вигляді розкладу за власними функціями прямокутної області більшого перерізу.

Граничні умови на границі розподілу часткових областей (функціональні рівняння) спроектовано на відповідні повні й ортогональні системи функцій. У результаті одержано системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) відносно амплітуд розкладів полів S_{mn}^{11} і S_{mn}^{12} в області більшого поперечного перерізу. Амплітуди S_{mn}^{21} і S_{mn}^{22} визначаються за одержаними перерахунковими формулами. В результаті визначено узагальнену матрицю розсіяння (УМР) стиків із SGK.

Одержані СЛАР являють собою системи I роду. Це є наслідком використання гіпотези Релея: поля в нерегулярній області, що містить скруглення, розкладено за системою функцій, що не є системою власних функцій даної області, внаслідок чого вона не ортогональна системі використаних базисних функцій. Для обґрунтування застосування редукції проведено чи-сельний аналіз інтегралів I_{mp}^{11} , що визначають належність СЛАР до систем I роду. Показано, що найбільші значення I_{mp}^{11} мають при $m=p$, тобто найбільшими є елементи, що належать

головній діагоналі матриці коефіцієнтів СЛАР. Інші елементи менші за діагональні на 1-2 порядки. Із зростанням індексів m і r значення $I_{mp}^{(j)}$ зменшуються. Тому одержана СЛАР є системою I роду з превалюючими діагональними елементами, що допускає розв'язання методом редукції. Досліджено поведінку амплітуд хвиль, спричинених стиком із SGK, в залежності від номера члена розкладу m . Внаслідок більшої регулярності полів для стику із SGK спостерігається більша швидкість зменшення амплітуд із зростанням m , ніж в структурах із гострими ребрами.

Досліджено внутрішню збіжність методу. Показано, що для забезпечення збіжності по $|S_{11}^{(j)}|$ не гірше 10^{-3} достатньо врахувати 18...20 членів розкладу поля в області більшого поперечного перерізу. Кількість членів розкладу в області меншого перерізу визначалося співвідношенням розмірів за правилом Міттри. Показано, що на стійкість і збіжність одержаних СЛАР суттєво впливає розмір радіуса скруглення r . З його збільшенням розв'язки збігаються до точного значення при менших порядках систем. При великих r ($r/a_1 > 0.2$) підвищувати порядок СЛАР треба дуже обережно: підвищення порядку понад певної величини може привести до нестійкості алгоритму, що пов'язано із наростанням похибок округлення при чисельному інтегуванні.

Розроблено програму розрахунку УМР стику із SGK. Розраховано залежності електродинамічних характеристик стиків із SGK при дифракції хвилі H_{10} при скругленні радіусом r від параметрів a_1/λ , a_2/a_1 при $r/a_1 = \text{const}$, а також при різних r/a_1 . Показано поліпшення узгодження й розширення смуги пропускання пристрою із збільшенням r/a_1 . Так, наприклад, для стику з відношенням розмірів $a_2/a_1=0.6$ при скругленні радіусом $r/a_1=0.2$ смуга узгодження при рівні КСХ=1.2 збільшилася приблизно на 8%.

Після розв'язання ключових задач відшукування УМР переходу здійснюється послідовним об'єднанням УМР окремих неоднорідностей з урахуванням зсувів фази хвиль у хвилевідних каналах скінченної довжини, з'єднуючих неоднорідності. Алгоритм відзначається універсальністю. Його недоліки - неможливість визначення полів у внутрішніх областях після відшукування УМР пристрою в цілому й необхідність обернення великої кількості матриць високого порядку. Тому також здійснено пряме розв'язання граничної задачі для переходу, що складається з N неоднорідностей. Виділено $N+1$ часткову область. Одержано нескінченну СЛАР, що складається з N нескінченних підсистем лінійних алгебраїчних рівнянь I роду з превалюючими діагональними елементами відносно амплітуд хвиль $S_{\alpha\beta}^{(j)}$, $T_{\alpha\beta}^{(j)}$, що біжать відповідно в позитивному і негативному напрямках у j -му відрізку хвилеводу, $j=2, \dots, N+1$. Матриця коефіцієнтів редукованої СЛАР є блочною і має стрічковий характер, що свідчить про слабкий зв'язок віддалених між собою неоднорідностей. Кожний блок являє собою матрицю, складену з коефіцієнтів при невідомих амплітудах розкладів полів у часткових областях.

Розроблено пакет програм розрахунку модуля $|R_1|$ і фази $\arg(R_1)$ коефіцієнтів відбиттів ступінчатого переходу із SGK при дифракції хвиль H_{10} . Здійснено розрахунки залежностей $|R_1|$ і $\arg(R_1)$ при дифракції хвилі H_{10} від a_1/λ для різних радіусів скруглень для одно- і двоступінчатих переходів. Усі стики мали однакові радіуси скруглення, довжина переходу залишалася незмінною. Показано значне поліпшення характеристик переходів при наявності SGK. Із збільшенням радіусів скруглень поліпшується узгодження переходу і його діапазонні властивості. Так для одноступінчатого переходу ($a_2/a_1=1.6$, $a_3/a_1=2.2$) при скругленні радіусом $r/a_1=0.2$ смуга пропускання при рівні КСХ=1.2 збільшилась приблизно на 12%. Також показано, що для ступінчатого переходу із SGK задані характеристики можна одержати при меншій довжині переходу в порівнянні з довжиною ступінчатих і плавних переходів, що традиційно використовуються.

3. Для ширококутового узгодження Т-з'єднань, які застосовуються в потужних НВЧ і КВЧ пристроях, запропоновано такі технологічні модифікації Н-площинних Т-з'єднань: із SGK (рис.2,а), із SGK і провідним гребнем складної форми (клиноподібним, а також із скругленим клиноподібним гребнем) (рис.2,б-г). Для зазначених з'єднань розв'язано внутрішні граничні задачі, побудовано математичні моделі й досліджено електродинамічні характеристики. Зроблено такі припущення: усі металеві поверхні є ідеально провідними; Т-з'єднання працюють в одномодовому режимі. Залежність від часу гармонічна.

Задачу розв'язано для випадку збудження хвилею H_{10} зі сторони бокового хвилеводу. На прикладі Т-з'єднання із SGK розглянуто методику розв'язання внутрішньої граничної задачі при збудженні з боку прямого хвилеводу. При розв'язанні використано метод, заснований на синтезі гіпотези Релея, МЧО і МЗХЗП.

При збудженні Т-з'єднання зі сторони бокового хвилеводу МЗХЗП дав змогу подати початкову граничну (хвильову) задачу у вигляді лінійної комбінації двох польових задач (ПЗ). Перехід до них здійснено шляхом установаження в прямому хвилеводі на деякій відстані від з'єднання прямого й бокового хвилеводів по черзі електричних (1-ша ПЗ) і магнітних (2-га ПЗ) стінок. Зображення розв'язку хвильового рівняння в одержаній обмеженій області зведено до розв'язку задач Штурма-Ліувілла з нульовими значеннями тангенціального електричного (магнітного) поля на введених стінках.

При збудженні з боку прямого хвилеводу розв'язок граничної задачі знайдено у вигляді лінійної комбінації чотирьох ПЗ. Перші дві ПЗ: а) синфазне збудження (магнітна стінка в площині симетрії Т-з'єднання) і б) протифазне збудження (електрична стінка в площині симетрії). Кожну з них розбито ще на дві незалежні ПЗ з електричною та магнітною стінками, що обмежують боковий хвилевід. Із двох розв'язків ПЗ для синфазного й протифазного збуджень змодельовано падіння на вхід прямого хвилеводу хвилі з одиничною амплітудою.

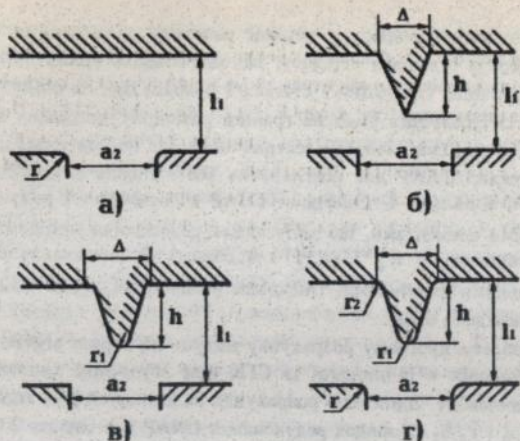


Рис.2

Після розв'язання всіх ПЗ поля в прямому (боковому) хвилеводі в областях, близьких до областей установаження стінок, перерозкладено за хвилями прямого (бокового) хвилеводу. Із умови поширення хвиль у регулярних хвилеводах знайдено співвідношення між амплітудами ПЗ і, таким чином, розв'язок граничної задачі в цілому.

Коефіцієнт відбиття на вході Т-з'єднання дорівнює

$$R_1^{E(M)} = (H_1^E R_1^M + i H_1^M R_1^E) / (H_1^E + i H_1^M),$$

де $R_1^{E(M)}$ - коефіцієнти відбиття на вході для 1-ї та 2-ї ПЗ, відповідно, $H_1^{E(M)}$ - амплітуди перерозкладів полів за хвилями вихідного хвилеводу. При збудженні з боку прямого хвилеводу $R_1^{E(M)} = (R_1^{E(M)+} + R_1^{E(M)-}) / 2$. Індекс "+" відповідає синфазному збудженню, "-" - протифазному.

Т-з'єднання із СГК (рис.2,а). Розв'язок граничної задачі подано для випадку скруглення радіусом r . При розв'язанні задачі МЧО з використанням гіпотези Релея виділено 2 часткові області. Границю розподілу розміщено в кінці регулярної частини вхідного хвилеводу. Поверхню, що включає скруглення, границю розподілу й бокову стінку вихідного хвилеводу, що примикає до вхідного, описано функціями $f(x_1)$ і $\psi(x_1)$ при збудженні із сторони бокового й прямого хвилеводів, відповідно. Поле в області II подано у вигляді розкладу за власними функціями прямокутної області з нульовими значеннями тангенціального електричного поля на металевих стінках. Поле в нерегулярній області I, що

містить скруглення, подано у вигляді розкладу за власними функціями прямокутної області більшого перерізу, що задовольняє граничним умовам на введених електричних (магнітних) стінках і боковій пря-молінійній стінці прямого хвилеводу. Із граничних умов на границі розподілу часткових областей і умови рівності нулю тангенціального електричного поля на поверхні, що містить скруглення, одержано СЛАР для розглянутих ПЗ відносно амплітуд розкладів полів $T_n^{E(M)}$ ($T_{nz}^{E(M)}$) в області I. Одержані СЛАР є системами I роду з превалюючими діагональними елементами, що допускають розв'язання методом редукції. Амплітуди розкладів полів $R_n^{E(M)}$ ($R_{nz}^{E(M)}$) в області II визначаються за одержаними перерахунковими формулами. Подальше розв'язання задачі здійснено за методикою, що викладено вище.

Розроблено програму розрахунку модуля $|R|$ і фази $\arg(R)$ коефіцієнта відбиття Т-з'єднання в Н-площині із СГК при збудженні хвилею H_{10} із сторони бокового хвилеводу. Здійснено розрахунки залежностей $|R|$ і $\arg(R)$ від a_2/λ для різних l_1/a_2 і r/a_2 . Порядок редукованих СЛАР дорівнював 20, кількість членів розкладів в області II обчислювалася за правилом Міттри. Показано, що СГК зменшує мінімальне значення $|R|$ і зміщує його в бік більших a_2/λ . Так для Т-з'єднання при скругленні радіусом $r/a_2=0.3$ мінімальне значення КСХ становить приблизно 2.92 замість 3.44, що досягається у звичайному Т-з'єднанні з гострими кромками. Змінюючи l_1/a_2 (за умовою збереження одномодового режиму), можна здійснювати зміщення мінімуму $|R|$ по робочому діапазону частот. Поліпшення узгодження досягається без погіршення смугових характеристик.

Досліджено збіжність одержаних розв'язків від порядку СЛАР. Показано, що для стабілізації трьох значущих цифр в $|R|$ і $\arg(R)$ досить урахувати 18...20 членів розкладів полів в області I.

Т-з'єднання із СГК і провідним гребнем (рис.2,б-г). Розв'язок граничної задачі приведено для випадків скруглення радіусами r , r_1 і r_2 при збудженні хвилею H_{10} із сторони бокового хвилеводу. Як і вище, виділено 2 часткові області. Поверхня, що містить стінку прямого хвилеводу з провідним гребнем, описана функцією $\phi(x)$. Згідно з гіпотезою Релея поле в області, що містить скруглення й провідний гребінь, подано у вигляді розкладу за власними функціями прямокутної області більшого перерізу. По поздовжній координаті поля зображено у вигляді лінійної комбінації хвиль, що біжать назустріч одна одній. Із граничних умов на границі розподілу часткових областей й умови рівності нулю тангенціального складової електричного поля на поверхнях, що містять провідний гребінь й СГК, одержано нескінченну СЛАР відносно амплітуд розкладів полів $T_n^{E(M)}$ і $S_n^{E(M)}$ в області I. Одержані СЛАР є системами I роду з превалюючими діагональними елементами. Порядок редукованих СЛАР становить $M_{opt} = 2M_{max}$, M_{max} - кількість членів розкладів, що враховуються в області I. Кількість членів розкладів в області II обчислювалося за правилом Міттри.

Розроблено програму розрахунку модуля $|R|$ і фази $\arg(R)$ коефіцієнта відбиття зазначених Т-з'єднань. Здійснено розрахунки для Т-з'єднань з клиноподібним гребнем глибиною h (рис.2,б), із скругленим клиноподібним гребнем (скруглення тільки на вершині гребня (рис.2,в), а також як на вершині, так і при основі (рис.2,г)). При розрахунках кількість враховуваних членів розкладів полів $M_{\text{max}}=10$. Показано, що збільшення h/l_1 для клиноподібного гребня при $\Delta/l_1=\text{const}$ зменшує мінімальне значення $|R|$ і розширює смугу узгодження; мінімум $|R|$ зміщується в бік більших a_2/λ . Так для з'єднання з клиноподібним гребнем з розмірами $h/l_1=0.35$ та $\Delta/l_1=0.711$ досягається узгодження за рівнем КСХ=1.85 у смузі частот приблизно 37%. Із збільшенням Δ/l_1 (при $h/l_1=\text{const}$) зменшується мінімальне значення $|R|$ і розширюється смуга. Показано, що існує оптимальне значення Δ/l_1 (для кожного конкретного h/l_1). У Т-з'єднанні з клиноподібним гребнем, скругленим на вершині, скруглення подано у вигляді кола, описаного навколо вершини, при цьому Δ/l_1 залишилося без зміни. Показано, що скруглення поліпшує узгодження, а збільшення r_1/l_1 призводить до зменшення мінімального значення $|R|$ (для гребнів з малими h/l_1). Для $h/l_1 > 0.3$ існує оптимальне значення r_1/l_1 . Скруглення при основі гребня слабо впливає на характеристики. Однак воно є доцільним за технологічними причинами.

Досліджено збіжність одержаних розв'язків від порядку СЛАР. Для стабілізації чотирьох значущих цифр в $|R|$ і $\arg(R)$ досить враховувати 12...14 членів розкладів в області I.

Хоча введення клиноподібного гребня (клиноподібного із скругленнями) не дозволяє досягти повного узгодження, застосування його як узгоджувального елемента слід вважати перспективним: Т-з'єднання є широкосмужним; такий елемент має великі геометричні розміри, що важливо для діапазону КВЧ.

4. Для покращення узгодження Т-з'єднання у Н-площині з провідним гребнем в якості додаткових узгоджувальних елементів запропоновано ввести частотно-селективну структуру у вигляді прямокутних (а також прямокутних із скругленнями внутрішніх кутів) уступів, що їх виконано у бокових стінках бокового хвилеводу (рис.3). Розглянуто Т-з'єднання з одним (рис.3,а-в) та двома (рис.3,г-е) компенсуючими уступами. Така конструкція відрізняється простотою та технологічністю вузла, що полегшує його виготовлення у КВЧ діапазоні. Крім того, такий спосіб узгодження характеризується підвищеною електричною міцністю, що робить його перспективним для використання в пристроях, які працюють на підвищених рівнях потужності.

Для обох варіантів Т-з'єднань розв'язок граничної задачі одержано у припущенні роботи з'єднань в одномодовому режимі при збудженні бокового хвилеводу. При розв'язанні ПЗ для Т-з'єднання з одним компенсуючим уступом виділено 4 часткові області, для Т-з'єднання з двома уступами - 6. Граничну задачу розв'язано для загального випадку Т-з'єднання з провідним гребнем складної

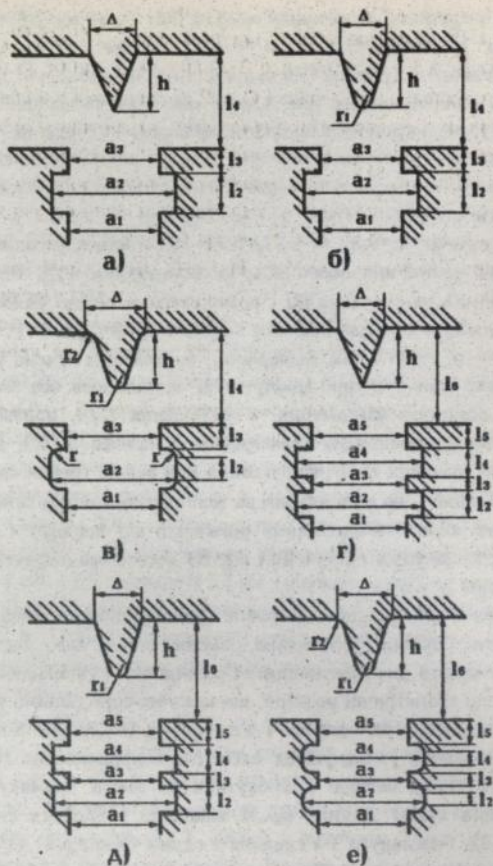


Рис.3

форми та компенсуючими уступами із скругленими внутрішніми кутами. Границі розподілу проходять через точки спряження скруглень із прямолінійними ділянками бокового хвильоводу. Поля в виділених часткових областях за умови використання гіпотези Релея представлено у вигляді розкладів за власними функціями прямокутних областей більших поперечних перерізів. Із граничних умов на границях розподілу часткових областей й умов рівності нулю тангенціальних складових електричних полів на поверхнях із скругленнями і з провідним гребнем одержано нескінченні СЛАР відносно амплітуд розкладів полів $T_m^{E(M)}$, $S_m^{E(M)}$.

$U_1^{E(M)}, V_1^{E(M)}$ у II і IV областях та амплітуд розкладів $T_m^{E(M)}, S_m^{E(M)}, N_1^{E(M)}, O_1^{E(M)}$,
 $U_1^{E(M)}, V_1^{E(M)}$ у II, IV і VI областях для Т-з'єднання з одним та двома компенсуючими уступами відповідно. Одержані СЛАР складаються з 4 або 6 підсистем I роду з превалюючими діагональними елементами, що можна розв'язати методом редуції. Особливо відзначено, що одержані СЛАР виражено через амплітуди розкладів полів в областях більшого перерізу. Це було зроблено для уніфікації алгоритму й можливості розрахунку обох структур за однією тією ж розрахунковою програмою, оскільки СЛАР для структур без скруглення внутрішніх кутів являє собою окремий випадок структури із СГКК. Для структур без скруглень може бути одержано інша СЛАР меншого порядку за рахунок виразу амплітуд розкладів полів у більших областях через амплітуди розкладів полів у менших областях. Це неможливо для структур із СГКК: функції, за якими розкладено поля у нерегулярних областях, які містять скруглення, не є власними функціями даної області, внаслідок чого порушується ортогональність з використовуваними базисними функціями. Це призводить до систем I роду (а не II роду, як у звичайному випадку) з превалюючими діагональними елементами.

Розроблено програми розрахунку модуля $|R|$ і фази $\arg(R)$ коефіцієнта відбиття зазначених Т-з'єднань. Здійснено розрахунки $|R|$ і $\arg(R)$ Т-з'єднання з провідним гребнем і прямокутними компенсуючими уступами.

Т-з'єднання з провідним гребнем та одним компенсуючим уступом (рис.3,а-в). При розрахунках характеристик такого з'єднання в вхідній області I звичайно урахувалося $N_{\max} = 9-12$ типів хвиль. Кількість урахованих хвиль у решті часткових областей обчислювалось за правилом Міттри. Порядок СЛАР дорівнює $P_{\text{от}} = 2(P_{\max} + L_{\max})$, де P_{\max} і L_{\max} - кількість типів хвиль в областях II і IV, відповідно. Проаналізовано й показано можливі шляхи варіювання частоти найкращого узгодження, рівня й ширини смуги узгодження. Наявні 8 можливих варіантів: зміна глибини занурення провідного гребня h , його ширини Δ , радіуса скруглення гребня r , ширини й довжини уступу a_2 і l_2 , ширини й довжини з'єднувальної області a_1 і l_1 , ширини прямого хвилеводу l_4 . Подано результати розрахунків, що демонструють вплив кожного із розмірів на характеристики Т-з'єднання. Показано можливість узгодження вищезгаданого Т-з'єднання практично в будь-якій точці одномодового діапазону частот при рівні КСХ < 1.2 у смугі частот не менше 9% (для Т-з'єднання з клиноподібним гребнем) та 13% (для Т-з'єднання із скругленим клиноподібним гребнем). Ці значення досягнуто для величини занурення провідного гребня $h/l_4 = 0.4$. При збільшенні цього параметра смугові характеристики зазначеного Т-з'єднання покращуються.

Т-з'єднання з провідним гребнем та двома компенсуючими уступами (рис.3,г,д). Для розширення смуги узгодження такого Т-з'єднання запропоновано ввести другий компенсуючий уступ. Розміри

цього узгоджуючого елемента вибрано з таких міркувань: по-перше, так, щоб прохідний резонатор, що елемент його утворює, резонував би на частоті, що дорівнює або близька до частоти найкращого узгодження Т-з'єднання з одним компенсуючим уступом; по-друге, виходячи з того, що цей резонатор має мати достатньо низьку добротність, тобто він має працювати в одномодовому режимі та мати порівняно мале співвідношення поперечних розмірів; по-третє, відстань між уступами має забезпечити зв'язок між другим уступом і рештою Т-з'єднання більший за критичний. Як і вище, при розрахунках у вхідній області і звичайно ураховувалося $N_{\max} = 9-12$ типів хвиль. Кількість урахованих хвиль у решті часткових областей обчислювалось за правилом Міттри. При введенні другого компенсуючого уступу до наявних ступеней свободи додаються ще чотири (а саме: ширина та довжина другого уступу, а також ширина та довжина з'єднувальної області між уступами). Проаналізовано та наведено результати оцінки впливу другого компенсуючого прямокутного уступу на модуль коефіцієнта відбиття зазначеного Т-з'єднання. Показано можливість узгодження такого з'єднання за рівнем КСХ < 1.2 у смузі частот приблизно 15...16%, крім того, досягнуто узгодження за рівнем КСХ < 1.1 у смузі частот приблизно 7% практично у будь-який точці одномодового діапазону частот.

5. При обчисленні елементів матриці коефіцієнтів СЛАР для структур із СГКК при скругленні з радіусом r виникає необхідність обчислення інтегралів

$$I_{mp} = \int_0^{\psi} \exp(\pm i\beta_m r(\cos\varphi - 1)) \frac{\sin \frac{\pi r}{a}(d + r\sin\varphi)}{\cos \frac{\pi r}{a}(d + r\sin\varphi)} \frac{\sin \frac{\pi r}{a}(d + r\sin\varphi)}{\cos \frac{\pi r}{a}(d + r\sin\varphi)} \cos\varphi d\varphi,$$

а також інтегралів, що можуть бути зведені до їхньої комбінації. Тут ψ - довільний кут (якщо скруглення здійснено у вигляді 1/4 частини кола - $\psi = \pi/2$). Якщо затухання відсутнє, то β_m може бути як дійсною, так і чисто уявною величиною.

При програмній реалізації алгоритмів розрахунку структур із СГКК зазначені інтеграли обчислювалися чисельно за методом Сімпсона. Одержані значення уточнялися за допомогою процесу Ейткена: уточнене значення визначалося за трьома результатами чисельного інтегрування, одержаними при різних кроках розбиття з постійним їхнім відношенням. Метод вибрано через простоту реалізації й високу точність одержаних результатів. Показано, що для забезпечення достатньої точності слід вибирати кількості інтервалів розбиття на один півперіод гармонічної функції рівними 8, 16 і 32. Вибір більших значень слабо впливає на точність обчислення інтегралів, але значно збільшує затрати ресурсів ЕОМ.

Одержано аналітичні вирази інтегралів і проведено їхній аналіз з точки зору можливості їхньої програмної реалізації. Одержано три варіанти аналітичних зображень:

розкладання у нескінченні ряди функцій Бесселя (засновано на тригонометричних перетвореннях підінтегральної функції й розкладанні тригоно-

метричних й гіперболічних функцій від тригонометричного аргументу в ряди функцій Бесселя);

- розкладання у нескінченні ряди функцій Бесселя й функцій Струве (засновано на розкладанні експоненціальної функції у степеневий ряд);
- у замкненому вигляді через неповні циліндричні функції (НЦФ) у формі Пуассона (справедливо для довільного значення ψ).

Проведено порівняння результатів розрахунків за різними зображеннями. Показано гарний збіг значень інтегралів, обчислених різними способами, при невеликих значеннях m і p . Для великих m і p накопичення похибки при підсумовуванні знакозмінних рядів обчислення за одержаними виразами можуть дати неправильні результати. Для малих m і p виграш за затратами машинного часу у порівнянні з чисельним інтегруванням незначний, із зростанням m і p він збільшується приблизно в 3 рази, при цьому потрібний менший об'єм оперативної пам'яті ЕОМ.

6. Узагальнено основні результати роботи, зазначено перспективи подальшого розвитку методу і поліпшення характеристик досліджених класів структур.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА ПІДСУМКИ РОБОТИ

1. Розвинуто метод аналізу широкого класу N -площинних структур із СГКК (стиків прямокутних хвилеводів, ступінчатих переходів, різного роду T -з'єднань), заснований на синтезі гіпотези Релея щодо аналітичного продовження розв'язку хвильового рівняння, МЧО і МЗХЗП.
2. Показано ефективність методу стосовно зазначеного класу структур.
3. Показано, що для структур із СГКК внутрішні граничні задачі зводяться до нескінченних СЛАР I роду з переважуючими діагональними елементами, що допускають розв'язання методом редукції.
4. Проведено дослідження внутрішньої збіжності й розроблено рекомендації щодо вибору кількості враховуваних членів розкладів полів у часткових областях. Показано, що із зростанням радіуса скруглення розв'язки збігаються до точного значення при менших порядках систем.
5. Побудовано математичні моделі зазначених структур. На основі цих моделей розроблено комплекс програм для розрахунків характеристик N -площинних структур із СГКК.
6. Визначено шляхи поліпшення узгодження в широкій смузі частот T -з'єднань у N -площині й зміни частоти найкращого узгодження. Здійснено розрахунки конкретних технологічних T -з'єднань для застосування у потужних приладах НВЧ і КВЧ діапазонів.
7. Досліджено дифракцію хвиль $H_{ю}$ на стиках і ступінчатих переходах у N -площині із СГК. Показано значне поліпшення характеристик структур при наяв-

ності SGK. Продемонстровано, що для ступінчатого переходу із SGK задані характеристики можна одержати при меншій довжині переходу в порівнянні із довжиною традиційно використовуваних ступінчатих і плавних переходів.

8. Розроблено ефективні методи обчислення інтегралів, що зустрічаються при аналізі структур із SGK, одержано їхні аналітичні зображення й проведено їхній аналіз.
9. Розвинутий метод може бути ефективно використаний для аналізу Е-площинних типів структур із SGK, а також випромінюючих структур із SGK (диско-стержньових антен, решіток хвилеводів, рупорів), що працюють при підвищених рівнях потужності.

ОСНОВНІ МАТЕРІАЛИ ДИСЕРТАЦІЇ НАДРУКОВАНО У ПРАЦЯХ:

1. Найденко В.И., Гусева Е.В., Дудко А.Г. Анализ стыка прямоугольных волноводов со скруглением // Радиоэлектроника. - 1992. - Т.35. - N2. - С. 74 - 77 (Изв. высш. учебн. заведен.)
2. Найденко В.И., Дудко А.Г. Расчет волноводного тройника в Н-плоскости со скруглением и проводящим гребнем // Радиоэлектроника. - 1993. - Т.36. - N2. - С. 36-44. (Изв. высш. учебн. заведений).
3. Дудко А.Г., Найденко В.И., Онуфриенко Л.М., Чумаченко В.П. Согласование Т-соединения прямоугольных волноводов в Н-плоскости // Радиоэлектроника. - 1994. - Т. 37. - N9. - С. 57 - 62 (Изв. высш. учебн. заведений).
4. Naidenko V.I., Guseva E.V., Dudko A.G. Calculation of H-plane tee with rounded sharp edges by method of substitution of wave problems for field ones // 4th Int. Seminar "Mathematical methods in electromagnetic theory". - 1991. - Ukraine, Alushta. - P.339 - 341.
5. Найденко В.И., Гусева Е.В., Дудко А.Г. Анализ стыка прямоугольных волноводов со скруглением // 12 Всесоюзный семинар по линейным ускорителям заряженных частиц: Тез. докл. - Харьков. - 1991. - С.30.
6. Дудко А.Г. Расчет волноводного тройника в Н-плоскости со скруглением и проводящим гребнем // II Межд. научно-техн. конференция "Проблемы совершенствования радиоэлектронных комплексов и систем обеспечения полетов": Тез. докл. - Киев. - 1992. - С.67.
7. Dudko A.G., Naidenko V.I. Calculation of H-plane waveguide tee with rounded sharp edges and conductive lug by method of substitution of wave problem for field ones // 24th URSI GA. - 1993. - Kyoto, Japan.- P.696.

Дудко А.Г. Исследование H-плоскостных электродинамических структур со скруглением острых кромок и углов, рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 - антенны и устройства микроволновой техники, Национальный технический университет Украины, Киев, 1996.

Развит эффективный метод расчета H-плоскостных электродинамических структур со скруглением острых кромок и углов, построены математические модели таких структур, исследованы их электродинамические характеристики. Показано значительное улучшение свойств структур при наличии скруглений. Предложены и рассчитаны технологичные ступенчатые переходы и T-соединения, выполненные на основе структур со скруглениями острых кромок и углов.

Dudko A.G. Investigation of H-plane electrodynamic structures with rounded sharp edges and angles, .manuscript

Ph.D. thesis. Speciality 05.12.07. - antennas and microwave devices. National Technical University of Ukraine, Kiev, 1996.

Effective method to calculate H-plane electrodynamic structures with rounded sharp edges and angles has been developed, mathematical models of such structures have been built, their electrodynamic characteristics have been investigated. Sufficient improvement of structures properties with roundnesses has been shown. Stepped junctions and T-junctions adaptable to production based on structures with rounded sharp edges and angles have been proposed and calculated.

Ключові слова:

електродинамічна структура, скруглення гострих кромок та кутів

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Підписано до друку 01.02.96. Формат 60x84/16. Папір друкарський.
Офсетний друк. Ум.фарбовідб. 5. Ум.друк.арк. 0,93. Обл.вид.арк.1,0.
Тираж 100 прим. Замовлення № 35-І. Ціна . Вид. № 188/Ш.

Видавництво КМУЦА.

252068. Київ-58, проспект Космонавта Комарова, 1.

AB 34.047