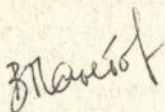


НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

На правах рукопису

УДК 621.396.677

ПАНТОВ  
Василь Станіславович



ВИПРОМІНЮВАЧІ ТА ЧАСТОТНО-СЕЛЕКТИВНІ ПОВЕРХНІ  
НА ОСНОВІ ПЕРІОДИЧНИХ МЕТАЛО-ДИЕЛЕКТРИЧНИХ  
СТРУКТУР

Спеціальність 05.12.07 - "Антени та пристрої мікрохвильової  
техніки"

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ - 1996

21.396.6

ДВ 34.073

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національній академії  
"Київський політехнічний інститут"  
радіотехніки

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00754283 (Т)

Наукові керівники:

доктор технічних наук, професор  
Трохименко Я.К.

кандидат технічних наук, старший  
науковий співробітник Дубровка Ф.Ф.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор  
Фіалковський О.Т.

кандидат технічних наук  
Стереополо Є.А.

Провідна установа:

НДІ "Сатурн", м. Київ

Захист відбудеться "11" березня 1996 р. о 15 на засіданні спеціалізованої вченої ради К 01.02.21 у Національному технічному університеті України "КПІ" за адресою: 252056, Київ-56, пр. Перемоги, 37, НТУУ "КПІ".

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету України "КПІ".

Автореферат розісланий "8" серпня 1996 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук

Кудінов Є.В.

ЛННБ ім. В. Стефаніка  
АН України

## АНОТАЦІЯ

Метою дисертаційної роботи є розробка математичних моделей, числові та експериментальні дослідження циліндричних випромінювачів та плоско-шаруватих частотно-селективних поверхонь на основі метало-діелектричних періодичних структур.

Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі розв'язані такі основні задачі:

1. Варіаційним методом часткових областей у наближенні нескінченно малої товщини кільця, ідеальної провідності металічних поверхонь та відсутності втрат у магнітодіелектричних середовищах розв'язані внутрішні крайові задачі електродинаміки для відкритого діелектричного стержня, періодично навантаженого кільцями, та екранованого кільцевого хвилеводу з діелектричним заповненням. З використанням методу перетворення Фур'є одержані замкнені вирази для компонентів поля випромінювання у далекій зоні.

2. Розроблені алгоритми та програми для аналізу випромінювачів на основі аксіально-симетричних періодичних структур з кільцями. Порівнянням числових результатів з експериментальними даними підтверджені точність і адекватність моделі. Досліджена залежність характеристик розповсюдження та випромінювання різних типів хвиль від геометричних параметрів структур і матеріальних параметрів магніто-діелектричних середовищ, що заповнюють часткові області.

3. У наближенні нескінченно малої товщини відбиваючих елементів та ідеальної провідності металічних поверхонь з використанням методу моментів та спектрального аналізу розв'язана задача дифракції плоскої електромагнітної хвилі на плоско-шаруватій частотно-селективній поверхні (ЧСП) з різною геометрією відбиваючих елементів, що періодично розташовані на кількох площинах. У матричній формі одержані вирази для узагальнених коефіцієнтів відбиття та проходження довільно поляризованих електромагнітних хвиль.

4. На основі розробленої моделі побудований алгоритм і створена програма розрахунку характеристик дифракції електромагнітних хвиль на плоско-шаруватих частотно-селективних поверхнях. Проведені числові дослідження характеристик багат шарових ЧСП з відбиваючими елементами непрямокутної форми.

### Автор захищає:

1. Розв'язок внутрішньої крайової задачі електродинаміки для аксіально-симетричних періодичних структур з кільцями, одержаний варіаційним методом часткових областей з урахуванням особливості поля на ребрі.

2. Математичні вирази для компонентів поля випромінювання у далекій зоні для випромінювачів у вигляді відкритого кінця екранованого кільцевого хвилеводу з діелектричним заповненням та для навантаженого тонкими кільцями діелектричного стержня, що одержані методом перетворення Фур'є від поперечних складових незбуреного поля періодичної структури.

3. Алгоритм і програму, що реалізують одержані математичні моделі випромінювачів на основі аксіально-симетричних періодичних структур з кільцями.

4. Розв'язок задачі дифракції плоскої електромагнітної хвилі на плоско-шаруватій частотно-селективній поверхні з відбиваючими елементами різної форми, що здобутий поєднанням методу моментів і спектрального аналізу з використанням апарату тензорних функцій Гріна.

5. Алгоритм і комплекс програм на мові ФОРТРАН 77 для розрахунку характеристик дифракції довільно поляризованих хвиль на плоско-шаруватих метало-діелектричних періодичних структурах.

6. Результати розробки широкосмугових діелектричних стержневих антен, навантажених тонкими металічними кільцями, що відзначаються низьким рівнем кросполяризованого випромінювання.

7. Результати розробки поляризаційно-інваріантного частотно-селективного контррефлектора з розширеною смугою відбиття для двохдіапазонної осесиметричної дзеркальної антени.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Антенні системи сучасних і перспективних радіотехнічних комплексів сантиметрового та міліметрового діапазонів хвиль мають забезпечувати прийом і випромінювання сигналів з ортогональними поляризаціями, низький рівень кросполяризованого випромінювання, одночасну роботу в декількох діапазонах частот в окремих випадках, відзначатись технологічністю, зменшеними масогабаритними параметрами та низькою вартістю. Розв'язання цих задач потребує оптимізації характеристик елементів антенних систем та пошуку нових технічних рішень, які можуть стати альтернативою існуючим за електродинамічними або конструкторсько-технологічними характеристиками.

Випромінювачі у вигляді круглих гофрованих хвилеводів та рупорів широко використовуються як поляризаційно чисті опромінювачі дзеркальних антен. Але для них характерні складність виготовлення та висока вартість. Для деяких практичних застосувань конкурентноспроможними поляризаційно-інваріантними випромінювачами можуть бути антени на основі циліндричних метало-діелектричних періодичних структур з кільцями. Вони відзначаються малими поперечними розмірами, технологічністю, достатньою широкосмуговістю, дозволяють досягати малих рівней кросполяризованого випромінювання.

Задачу суміщення кількох опромінювачів різних діапазонів в одній дзеркальній антені можна розв'язати шляхом застосування частотно- та поляризаційно-селективних контррефлекторів, що побудовані на основі плоско-шаруватих метало-діелектричних структур. Такі одно- та багат шарові дифракційні структури з відбиваючими елементами різних конфігурацій можуть бути використані також для

створення антенних решіток відбивного типу, двоходіапазонних хвилеводів та інших елементів перспективних антенно-фідерних систем.

Перевагами метало-діелектричних періодичних структур є мала вага, технологічність, висока відтворюваність параметрів та низька вартість при масовому виробництві.

Аналіз та синтез метало-діелектричних циліндричних випромінювачів і плоско-шаруватих дифракційних структур можливий лише при наявності достатньо точних математичних моделей, що розроблені на основі строгих постановок задач, коли виконуються точні межові умови та використовуються строгі методи розв'язання крайових задач.

Необхідність створення адекватних математичних моделей циліндричних випромінювачів і плоско-шаруватих частотно-селективних поверхонь на основі метало-діелектричних структур, проведення числових та експериментальних досліджень їхніх характеристик визначає актуальність цієї роботи.

**Основні методи дослідження.** При розв'язанні задач дисертації були використані варіаційний метод часткових областей з урахуванням особливості поля на ребрі, методи еквівалентної апертури та перетворення Фур'є, методи моментів і спектрального аналізу, апарат тензорних функцій Гріна, математичні методи лінійної алгебри та векторного аналізу.

**Наукова новизна дисертаційної роботи** полягає у таких результатах:

1. Здобуті нові розв'язки внутрішніх і зовнішніх крайових задач електродинаміки для випромінювачів на основі аксіально-симетричних періодичних структур з кільцями. У наближенні нульової просторової гармоніки проведений аналіз одержаних дисперсійних рівнянь, на підставі якого визначені типи хвиль, що поширюються в структурах. Для кожної із структур вперше у замкненій формі методом інтегралу Фур'є одержані вирази для складових поля випромінювання у далекій зоні.

2. За допомогою розробленої математичної моделі та створеної програми одержані частотні залежності фазової швидкості хвиль, що поширюються у структурах, ширини діаграми випромінювання (ДВ) на рівні половинної потужності та рівня кросполяризованого випромінювання в функції від геометричних параметрів періодичних структур і матеріальних параметрів магнітодіелектриків, що заповнюють часткові області. Досліджена відносна збіжність числових результатів і вироблені рекомендації щодо вибору кількості базисних функцій, використаних для апроксимації густини струмів на кільцях, та кількості просторових гармонік.

3. Розроблена нова математична модель плоско-шаруватої частотно-селективної структури з різною геометрією відбиваючих елементів, розташованих на декількох площинах. Запропоновано для апроксимації густини поверхневого струму на елементах періодичної структури використовувати базисні функції часткових областей у вигляді суми кусково-синусоїдних функцій. При цьому використані моди, які апроксимують розподіл поверхневого струму на елементарних провідних ділянках прямокутної форми, що довільно орієнтовані на площині, та на ділянках

складної конфігурації у вигляді трикутника з двома (або одним) приєднаними до нього прямокутниками. Одержані вирази для складових поля розсіяння елементарної провідної ділянки, яка довільним чином орієнтована на площині. Досліджена збіжність числових результатів та вироблені рекомендації щодо вибору конкретного виду базисних функцій для апроксимації поверхневого струму на елементах решітки та кількості складових хвильового спектру (гармонік Флоке).

**Практична цінність** дисертаційної роботи полягає в тому, що:

1. Створена програма "RINGA" електродинамічного аналізу випромінювачів на основі періодичних структур з кільцями, яку орієнтовано на використання персональних комп'ютерів, сумісних з IBM PC/AT. У дисертаційній роботі програму використано для одержання залежностей характеристик поширення та випромінювання азимутально-неоднорідних хвиль антенами у вигляді відкритого кінця екранованого кільцевого хвилеводу з діелектричним заповненням та діелектричного стержня, періодично навантаженого металічними кільцями.

2. Створений комплекс програм "PARUS" для розрахунку характеристик дифракції довільно поляризованих плоских електромагнітних хвиль на багатопарових багато-діелектричних структурах з відбиваючими елементами непрямокутної форми, які розташовані на декількох площинах. Топологія відбиваючих елементів кожної площини задається моделюванням розподілу поверхневого струму суперпозицією базисних функцій часткових областей у вигляді суми кусково-синусоїдних функцій.

3. Обґрунтована методика вимірювань, розроблений та створений цифровий автоматизований вимірювальний комплекс для дослідження характеристик випромінювання поляризаційно-інваріантних антен у сантиметровому діапазоні хвиль. Розроблена вимірювальна установка для експериментального визначення коефіцієнту проходження електромагнітних хвиль у метало-діелектричних дифракційних структурах у сантиметровому діапазоні хвиль.

4. Розроблені конструкції хвилеводного та зондового пристроїв збудження діелектричної стержневої антени, періодично навантаженої тонкими металічними кільцями. Хвилеводна схема забезпечує узгодження за рівнем КСХ 1,25 у 30% смузі частот. Пристрій збудження на основі двох зомдів з протифазним живленням забезпечує роботу у смузі частот 40% за рівнем КСХ 2,0.

5. Розроблені та випробувані дослідні зразки антен поверхневої хвилі з подовжньо-регулярною та зі змінною по довжині випромінювача геометріями структур. Схема збудження - хвилеводна. Перший випромінювач забезпечує у діапазоні частот 5,53...7,48 ГГц ширину діаграми випромінювання  $17^\circ \dots 38^\circ$ , максимальний рівень кросполяризованого випромінювання  $-29 \dots -23$  дБ. Антена, діаметр якої ступінчасто зменшується, має у діапазоні частот 5,3...7,8 ГГц ширину діаграми випромінювання  $20^\circ \dots 31^\circ$ , максимальний рівень кросполяризованого випромінювання  $-32 \dots -25$  дБ.

6. Розроблена конструкція поляризаційно-інваріантного частотно-селективного контррефлектора для двохдзеркальної антени діапазонів частот 3,7...4,2 ГГц / 10,9...13,2 ГГц. Контррефлектор має відбиваючі властивості за рівнем -3 дБ у діапазоні частот 7,4...22,1 ГГц. Нерівномірність коефіцієнту відбиття у діапазоні 10,9...13,2 ГГц складає -0,1 дБ. Проходження електромагнітних хвиль за рівнем -3 дБ забезпечується у діапазоні частот 1...7,4 ГГц.

**Реалізація результатів роботи.** Результати дисертаційної роботи використані в НДР "Граната УВО", "Едельвейс", "ВІ-КПІ-47-УО" та "Говерла", що були виконані та виконуються на кафедрі теоретичних основ радіотехніки Київського політехнічного інституту.

**Апробація роботи.** Основні положення та результати роботи доповідались і обговорювались на I Всесоюзній науково-технічній конференції "Проблеми совершенствования радиоэлектронных комплексов и систем обеспечения полетов" (Київ, 1989 р.), VII Науково-технічної конференції ДЗВРКУ "Перспективные вопросы получения и обработки радиолокационной информации и повышения надежности радиоэлектронных средств" (Дніпропетровськ, 1989 р.), XXVI Міжгалузевій науково-технічній конференції з теорії та техніки антен (Москва, 1990 р.), Всесоюзному семінарі "Математическое моделирование физических процессов в антенно-фидерных трактах" (Саратов, 1990 р.), на постійному семінарі "Електромагнітна сумісність радіоелектронних засобів" Харківського обласного управління ВНТТ ім. О.С. Попова (Харків, 1990 р.) та на 15-ому міжнародному симпозіумі URSI з електромагнітної теорії (С.-Петербург, 1995 р.).

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 11 друкованих робіт. Результати роботи відображені у 6 звітах з НДР.

**Структура та об'єм дисертації.** Дисертаційну роботу викладено на 117 сторінках друкованого тексту, ілюстровано рисунками на 47 сторінках та таблицями на 3 сторінках. Робота складається із вступу, чотирьох розділів, заключної частини та списку літератури, що включає 134 найменування.

## СТИСЛИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині визначені актуальні нерозв'язані питання розробки та створення нових випромінювачів з низьким рівнем кросполяризованого випромінювання та створення універсальних математичних моделей плоско-шарувитих метало-діелектричних дифракційних структур з елементами різної, у тому числі непрямокутної, геометрії, сформульовані мета та задачі дисертації, наведені основні положення, що подаються до захисту.

У першому розділі на підставі аналізу опублікованих робіт з розрахунку осесиметричних випромінювачів, які побудовані на основі періодичних структур було показано, що: 1) для визначення власних хвиль і дослідження їхньої дисперсії в періодичних структурах типу відкритого діелектричного стержня, навантаженого

тонкими металічними кільцями, та екранованого кільцевого хвилеводу з діелектричним заповненням доцільно застосувати варіаційний метод часткових областей з подовжнім розділенням, що дозволяє здобути достатньо точні розв'язки задачі навіть за досить грубої апроксимації полів на межі поділу та струмів на кільцях; 2) для розрахунку поля випромінювання у далекій зоні доцільно застосувати інтеграл Фур'є. При цьому розподіл поперечного електричного поля на плоскій апертурі, перпендикулярній вісі випромінювача, можна приймати таким, що відповідає полю власної гібридної хвилі періодичної структури.

Аналіз сучасного стану досліджень у галузі плоских дифракційних структур дозволив зробити висновок, що для розрахунку характеристик плоско-шаруватих частотно-селективних поверхонь доцільно поєднати метод спектрального аналізу з методом моментів, у якому використовуються часткові базисні функції. Таке поєднання дає можливість створити універсальну математичну модель, в основу якої покладено розв'язки для групи базисних елементів, і сукупний розв'язок є суперпозицією розв'язків для базисних сегментних елементів з урахуванням їхнього взаємного впливу.

Другий розділ присвячено розробці теорії випромінювачів на основі аксіально-симетричних періодичних метало-діелектричних структур з кільцями та числовому дослідженню характеристик поширення та випромінювання хвиль цими структурами.

Загальний вигляд та позначення геометричних параметрів періодичних структур наведені на рис. 1 та рис. 2.

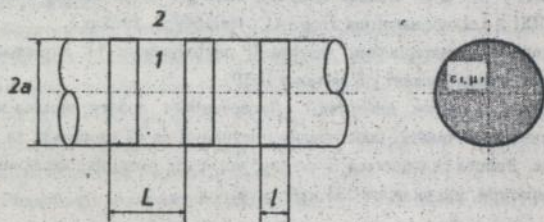


Рис. 1

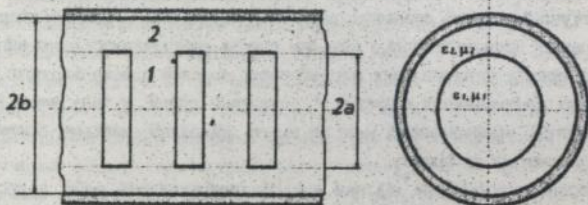


Рис. 2

Розв'язок внутрішньої крайової задачі електродинаміки для діелектричного стержня, навантаженого кільцями, та екранованого кільцевого хвилеводу з діелектричним заповненням здобуто варіаційним методом часткових областей у наближенні періодичності структур, ідеальної провідності нескінченно тонких кілець та екрану, відсутності втрат у ізотропних однорідних діелектричних середовищах, що заповнюють часткові області. Обґрунтований вибір базисних функцій, що апроксимують густину поверхневих струмів на кільцях періодичної структури. У наближенні нульової просторової гармоніки проведений аналіз дисперсійних рівнянь та визначені типи азимутально неоднорідних хвиль, що поширюються у структурах. Одержані наближені аналітичні розв'язки дисперсійних рівнянь для азимутально-неоднорідних хвиль із азимутальним індексом  $m=1$  на межах відсічки цих хвиль.

У наближенні інтегралу Фур'є від поперечних полів хвиль, що поширюються у періодичних структурах з кільцями, одержані замкнені вирази для компонентів поля випромінювання в далекій зоні.

$$E_z = \cos m\Phi \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ A_n \frac{\beta_{p,a}}{(p,a)^2 + (k_p a \sin \theta)^2} \frac{J_n(k_p a \sin \theta)}{(k_p a \sin \theta)} \times \right. \\ \times \left[ \frac{(k_p a \sin \theta) J_n(k_p a \sin \theta)}{J_n(k_p a \sin \theta)} + \frac{(k_p a \sin \theta)^2 (p,a) I_n(p,a)}{(p,a)^2 I_n(p,a)} \right] + \\ \left. + B_n \frac{k_p a \rho_p \mu_1}{(p,a)^2} \frac{J_n(k_p a \sin \theta)}{(k_p a \sin \theta)} - A_n \frac{\beta_{p,a}}{(p,a)^2 + (k_p a \sin \theta)^2} X - m D_n \frac{k_p a \rho_p \mu_2}{(q,a)^2} \right\} (-i)^n \quad (1)$$

$$E_\theta = -\sin m\Phi \cos \theta \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ A_n \frac{\beta_{p,a}}{(p,a)^2} m \frac{J_n(k_p a \sin \theta)}{(k_p a \sin \theta)} + B_n \frac{k_p a \rho_p \mu_1}{(p,a)^2 + (k_p a \sin \theta)^2} \frac{J_n(k_p a \sin \theta)}{(k_p a \sin \theta)} \times \right. \\ \times \left[ \frac{(k_p a \sin \theta) J_n(k_p a \sin \theta)}{J_n(k_p a \sin \theta)} + \frac{(k_p a \sin \theta)^2 (p,a) I_n(p,a)}{(p,a)^2 I_n(p,a)} \right] - \\ \left. - A_n \frac{\beta_{p,a}}{(q,a)^2} m \frac{J_n(k_p a \sin \theta)}{(k_p a \sin \theta)} - D_n \frac{k_p a \rho_p \mu_2}{(q,a)^2 + (k_p a \sin \theta)^2} \right\} (-i)^n; \quad (2)$$

Для діелектричного стержня періодично навантаженого кільцями :

$$Z = \frac{J_n(k_p a \sin \theta)}{(k_p a \sin \theta)} \left[ \frac{(k_p a \sin \theta) J_n(k_p a \sin \theta)}{J_n(k_p a \sin \theta)} + \frac{(k_p a \sin \theta)^2 (q,a) K_n(q,a)}{(q,a)^2 K_n(q,a)} \right]; \\ r = \frac{J_n(k_p a \sin \theta)}{(k_p a \sin \theta)}; \\ Y = \frac{J_n(k_p a \sin \theta)}{(k_p a \sin \theta)} \left[ \frac{(k_p a \sin \theta) J_n(k_p a \sin \theta)}{J_n(k_p a \sin \theta)} + \frac{(k_p a \sin \theta)^2 (q,a) K_n(q,a)}{(q,a)^2 K_n(q,a)} \right]$$

Для екранованого кільцевого хвилеводу з діелектричним заповненням:

$$Z = \frac{(k_p b \sin \theta)}{(q,a)^2} J_n(k_p b \sin \theta) \frac{X_n(q,a,b)}{X_n(q,a,b)} \frac{J_n(k_p a \sin \theta)}{(k_p a \sin \theta)}$$

$$\begin{aligned} & \times \left( \frac{(k_0 a \sin \theta) J_n(k_0 a \sin \theta)}{J_n(k_0 a \sin \theta)} + \frac{(k_0 a \sin \theta)^2 (q, a) X_n(q, a, b)}{(q, a)^2 X_n(q, a, b)} \right); \\ r &= \frac{J_n(k_0 b \sin \theta) Z_n(q, b, b)}{(k_0 a \sin \theta) Z_n(q, a, b)} - \frac{J_n(k_0 a \sin \theta)}{(k_0 a \sin \theta)}; \\ \varphi &= \frac{q, b}{q, a} J_n(k_0 b \sin \theta) \frac{Z_n(q, b, b)}{Z_n(q, a, b)} - \frac{J_n(k_0 a \sin \theta)}{(k_0 a \sin \theta)} \times \\ & \times \left( \frac{(k_0 a \sin \theta) J_n(k_0 a \sin \theta)}{J_n(k_0 a \sin \theta)} + \frac{(k_0 a \sin \theta)^2 (q, a) Z_n(q, a, b)}{(q, a)^2 Z_n(q, a, b)} \right); \end{aligned}$$

Тут:  $A_n, B_n, C_n$  и  $D_n$  - амплітуди просторових гармонік поля,  $J_n(z)$ ,  $J_n'(z)$  - функція Бесселя першого роду  $m$ -го порядку та її похідна по аргументу,  $I_n(z)$ ,  $K_n(z)$ ,  $I_n'(z)$ ,  $K_n'(z)$  - модифіковані функції Бесселя першого та другого роду  $m$ -го порядку та їх похідні по аргументу,  $X_n(\eta)$ ,  $Z_n(\eta)$ ,  $X_n'(\eta)$ ,  $Z_n'(\eta)$  - комбінації функцій Бесселя та їх похідні по аргументу;

$$\begin{aligned} \beta_n^2 &= \beta_0^2 + \frac{2m}{L}; & \rho_n^2 &= \beta_n^2 - k_1^2; & q_n^2 &= \beta_n^2 - k_2^2; \\ k_1 &= k_0 \sqrt{\epsilon_1 \mu_1}; & k_2 &= k_0 \sqrt{\epsilon_2 \mu_2}; & k_0 &= \frac{2\pi}{\lambda_0}, \end{aligned}$$

де  $\lambda_0$  - довжина хвилі у вільному просторі;  $\beta_0$  - фазова постійна нульової просторової гармоніки;  $m = 0, 1, 2, \dots$  - азимутальний індекс;  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  - номер просторової гармоніки поля.

На основі розроблених математичних моделей створена програма "RINGA" для аналізу характеристик поширення та випромінювання електромагнітних хвиль періодичними структурами обох типів. Через порівняння числових та експериментальних результатів оцінена точність моделей та визначені межі їхнього застосування.

Досліджені характеристики поширення та випромінювання перших трьох гібридних хвиль з  $m=1$  випромінювача у вигляді відкритого кінця екранованого кільцевого хвилеводу з діелектричним заповненням. При цьому виявлено, що шляхом підбору геометрії випромінювача та значення діелектричної проникності середовища всередині кільця та в області між екраном та кільцями можна забезпечити однохвильовий режим роботи випромінювача на кожній із цих хвиль. Для роботи на найбільш довгохвильовій з поміж них слід вибрати значення відношення діаметра екрана до діаметра кільця від 2 до 7. При цьому можуть бути досягнуті: смуги робочих частот від 40% до 100%, максимальний рівень кросполяризаційних пелюстків менший за мінус 60 дБ у смузі частот 20%, а ширина діаграми випромінювання за рівнем половинної потужності - від 80° до 50°. Як робочу можна використовувати також хвилю  $HE_{11}^s$  ( $EH_{11}$ ), але у тому діапазоні частот, де не поширюється хвиля  $EH_{11}$  ( $HE_{11}^s$ ). При цьому можна одержати у смузі частот 10% рівень кросполяризованого випромінювання менший за мінус 25 дБ.

Досліджені частотні залежності фазової швидкості поверхневої хвилі, максимального рівня кросполяризованого випромінювання та ширини ДВ на основній поляризації від геометричних параметрів та діелектричної проникності несучого стержня діелектричної антени, періодично навантаженої кільцями. Виявлено, що для створення антен, які мають робочу смугу частот 25...30% з максимальним рівнем кросполяризованого випромінювання не більшим за мінус 25 дБ, необхідно використовувати для центрального стержня діелектрик з відносною проникністю не більше 3,0, а значення відношення ширини кільця до періоду структури не повинно перебільшувати 0,4. Визначною перевагою випромінювача у вигляді навантаженого тонкими кільцями діелектричного стержня є малий поперечний розмір - близько чверті довжини хвилі.

За сукупністю електродинамічних та технологічних характеристик діелектрична антена, навантажена тонкими металічними кільцями, може бути використана як поляризаційно-інваріантний випромінювач середнього підсилення. Випромінювач у вигляді відкритого кінця екранованого кільцевого хвелеводу є конкурентно спроможним як поляризаційно-чистий опромінювач дзеркальних антен. Випромінювачі обох типів можуть бути застосовані як елементи ФАР та АР з керованою поляризацією.

У третьому розділі в наближенні періодичної структури з використанням методу моментів та методу спектрального аналізу розроблена математична модель плоско-шаруватої частотно-селективної поверхні (ЧСП) з відбиваючими елементами різної конфігурації, розташованими на кількох площинах. При розв'язанні задачі дифракції електромагнітних хвиль на багато-шаруватій ЧСП застосований апарат тензорних функцій Гріна для плоско-шаруватої області з розкладанням полів по  $E$ - та  $H$ -хвилям. Обґрунтований вибір часткових базисних функцій для завдання розподілу поверхневого струму на провідних елементах періодичної структури. В матричній формі одержані вирази для узагальнених коефіцієнтів відбиття та проходження довільно поляризованої хвилі.

Металодіелектрична структура, що досліджувалась (рис. 3), складається з  $N$  шарів, не обмежених на площині  $xy$ . Кожний із шарів характеризується комплексною діелектричною  $\epsilon_n$  та магнітною  $\mu_n$  проникністю. Нижня межа кожного шару описується координатою  $d_n$ . Останній шар може бути або обмеженим ідеально провідним екраном, або простягатись у нескінченність по координаті  $z$ . В структурі є  $M$  площин з відбиваючими нескінченно тонкими ідеально провідними елементами. Розташування цих площин описується координатами  $z = z_m$ , де  $m = 1...M$ .

Інтегральні рівняння для електричних струмів, що наведені зовнішніми джерелами на поверхні ідеально провідних відбиваючих елементів, одержані з використанням інтегрального зображення поля розсіювання та межових умов для тангенціальних складових електричного поля на поверхні елементів решітки.

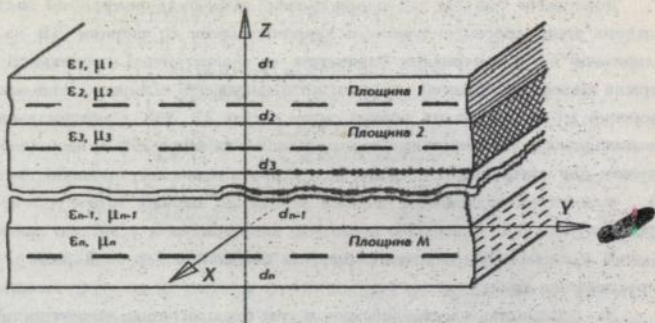


Рис. 3

Для розв'язання системи інтегральних рівнянь була застосована процедура методу Гальоркіна. У результаті одержана система лінійних алгебраїчних рівнянь

$$Z \cdot I = V, \quad (3)$$

у якій елементи матриці  $Z$  являють собою опори взаємозв'язку  $j$ -тої моди струму на площині  $s$  з  $v$ -тою модою на площині  $m$

$$Z_{vj}(m, s) = \frac{1}{|r_{m1x} r_{m2y} - r_{m2x} r_{m1y}|} \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} \bar{G}^v[k_x(s, p, q), k_y(s, p, q), z = z_m, z' = z_s] \times \\ \times \frac{\bar{F}_j[k_x(s, p, q), k_y(s, p, q)]}{b_j} \frac{\bar{F}_{mv}[-k_x(s, p, q), -k_y(s, p, q)]}{b_{mv}}, \quad (4)$$

де  $\bar{G}^v[k_x(s, p, q), k_y(s, p, q), z = z_m, z' = z_s]$  - компоненти функції Гріна у спектральній області,  $r_{m1x}$ ,  $r_{m1y}$  та  $r_{m2x}$ ,  $r_{m2y}$  є проєкціями векторів  $\bar{F}_{m1}$ ,  $\bar{F}_{m2}$ , що описують параметри двомірної решітки, у вузлах якої знаходяться відбиваючі елементи,  $k_x(s, p, q)$  і  $k_y(s, p, q)$  -  $x$ - та  $y$ -складові дискретних хвильових чисел,  $\bar{F}_j[k_x(s, p, q), k_y(s, p, q)]$  та  $\bar{F}_{mv}[-k_x(s, p, q), -k_y(s, p, q)]$  - Фур'є-трансформанти базисних функцій, що апроксимують розподіл струму моди  $j$  на площині  $s$  та моди  $v$  на площині  $m$ , які мають геометричну ширину  $b_j$  та  $b_{mv}$ , відповідно. Права частина системи рівнянь (3) описує електрорушійну силу зовнішнього поля, що збуджує структуру.

$$V(m, v) = -\bar{E}_{ex}(z_m) \Big|_{\text{на}} \bar{F}_{mv}(-k_{ex}, -k_{ey}). \quad (5)$$

Тут  $k_{ex}$  і  $k_{ey}$  - складові хвильового числа падаючої хвилі.

Моделювання розподілу поверхневого струму на відбиваючих елементах кожної площини здійснюється суперпозицією базисних функцій часткових областей у вигляді суми кусково-синусоїдних функцій. При цьому застосовано моди, які апроксимують розподіл поверхневого струму на елементарних провідних ділянках прямокутної форми, що довільно орієнтовані на площині, та на ділянках складної конфігурації у вигляді трикутника з двома (або одним) приєднаними до нього прямокутниками.

На основі одержаної моделі побудований алгоритм і створена програма розрахунку дифракції електромагнітних хвиль на плоско-шаруватих ЧСП. Програма дозволяє розраховувати комплексні векторні характеристики коефіцієнтів відбиття та проходження як функції частоти, кутів падіння хвилі, геометрії відбиваючих елементів та матеріальних параметрів багат шарового діелектричного середовища. Дослідження зв'язок точності та збіжності числових результатів із вибором базисних функцій, що апроксимують розподіл поверхневого струму на відбиваючих елементах. Результати числових досліджень вказують на можливість оптимізації цих структур за електродинамічними, конструктивними та технологічними критеріями шляхом варіації параметрів плоско-шаруватої діелектричної структури, геометрії відбиваючих елементів та кількості площин, на яких розташовані ці елементи.

У четвертому розділі обґрунтований вибір методик антенних вимірювань. Описаний цифровий автоматизований комплекс, що був спеціально створений для дослідження характеристик випромінювання поляризаційно-інваріантних антен у безлуній камері, внутрішня поверхня якої покрита радіопоглинаючим матеріалом, що забезпечує відбиття не більше -35 дБ у сантиметровому діапазоні хвиль. До складу комплексу входять вимірювальний прецизійний приймач, блок обробки інформації та блок автоматки. Динамічний діапазон вимірювань 0...-40 дБ, що дозволяє досліджувати антени з низькими рівнями бокових пелюстків та кросполяризованого випромінювання. Точність відліку по куту  $\pm 0,1^\circ$ .

Вибрана методика вимірювань та розроблена установка для експериментального визначення коефіцієнту проходження хвиль через метало-діелектричні дифракційні структури у діапазоні частот 2...18 ГГц. Діапазон вимірювання коефіцієнту проходження 0...-40 дБ.

Наведені результати розробки та випробування конструкції хвилеводного та зондових пристроїв збудження діелектричної стержньової антени, періодично навантаженої тонкими металічними кільцями. Хвилеводна схема забезпечує узгодження за рівнем КСХ 1,25 у смузі частот 30%. Пристрій збудження за допомогою двох зондів з протифазним живленням забезпечує роботу у смузі частот 40% за рівнем КСХ 2,0.

З використанням моделі випромінювача у вигляді діелектричного стержня, періодично навантаженого металічними кільцями, були створені два дослідних зразки антен поверхневої хвилі. Перший зразок розрахований на роботу у 30% смузі частот ( $f = 5,53...7,48$  ГГц). Його геометрія відповідає математичній моделі. Пристрій збудження - хвилеводний. Довжина випромінюючої структури 250 мм, її діаметр 10 мм. Діелектрична проникність опорного стержня  $\epsilon_r = 2,2$  (фторопласт). У всьому робочому діапазоні частот цього зразка ширина ДВ за рівнем половинної потужності змінюється від  $17^\circ$  до  $38^\circ$ , максимальний рівень кросполяризованого випромінювання - від мінус 29 дБ до мінус 23 дБ. Другий зразок випромінювача зі змінним по довжині профілем у смузі частот 5,6...7,8 ГГц має ширину ДВ  $20^\circ...31^\circ$ , рівень кросполяризованого випромінювання менший за мінус 25 дБ та мінус 30 дБ у смузі частот 6,4...7,3 ГГц.

З використанням розробленої математичної моделі плоско-шаруватої метало-діелектричної дифракційної структури створений частотно-селективний контррефлектор для дзеркальної антени діапазонів 3,7...4,2 ГГц / 10,9... 13,2 ГГц. Контррефлектор складається з п'яти діелектричних шарів і має діаметр 120 мм. Форму відбиваючих елементів вибрано такою, що забезпечує поляризаційну інваріантність властивостей, зменшення залежності характеристик ЧСП від кута падіння хвилі та збільшення смуги частот відбиття. За результатами розрахунків контррефлектор має відбиваючі властивості за рівнем -3 дБ у смузі частот 7,4...22,1 ГГц, а за рівнем -0,1 дБ - у смузі частот 9,8...14,6 ГГц. Проходження електромагнітних хвиль за рівнем -3 дБ забезпечується у смузі частот 1...7,4 ГГц, при цьому нерівномірність характеристик повного проходження у смузі частот 3,6...4,2 ГГц дорівнює -0,4 дБ.

У заключній частині сформульовані основні результати дисертації та зроблені висновки про можливі сфери їхнього застосування.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. У наближенні періодичної структури, нескінченно малої товщини кілець, ідеальної провідності металічних поверхонь та відсутності втрат у діелектриках варіаційним методом часткових областей з урахуванням особливості поля на ребрі одержаний новий розв'язок задачі поширення електромагнітних хвиль у екранованому кільцевому хвилеводі з діелектричним заповненням та над діелектричним стержнем, навантаженим кільцями. У наближенні нульової просторової гармоніки проведений аналіз одержаних дисперсійних рівнянь та визначені типи азимутально-неоднорідних хвиль, які поширюються у цих структурах. Методом інтегрального перетворення Фур'є від поперечного незбуреного поля періодичної структури вперше для кожної із структур одержані у замкненому вигляді вирази для компонентів поля випромінювання у далекій зоні.

2. Для аналізу випромінювачів на основі аксіально-симетричних періодичних структур з кільцями за розробленою математичною моделлю побудований алгоритм та створена програма на мові ФОРТРАН 77, яка орієнтована на IBM PC/AT-сумісні комп'ютери. Досліджена відносна збіжність числових результатів та вироблені рекомендації щодо вибору кількості базисних функцій, що апроксимують розподілення струмів на кільцях, та кількості просторових гармонік поля, які повинні бути враховані. Досліджені дисперсійні характеристики хвиль, що поширюються, ширини діаграми випромінювання на основній поляризації на рівні половинної потужності та рівні кросполяризованого випромінювання в функції від геометричних параметрів періодичних структур і матеріальних параметрів магнітодіелектриків, що заповнюють часткові області. Результати досліджень характеристик поширення та випромінювання азимутально-неоднорідних хвиль наведені у вигляді графічних залежностей, які можуть бути використані для проектування таких антен.

3. Розроблені та випробувані конструкції хвилеводного та зондового пристроїв збудження діелектричної стержньової антени, періодично навантаженої тонкими кільцями. З використанням розроблених математичної моделі та програмного забезпечення створені дослідні зразки антен поверхневої хвилі з регулярною та змінною по довжині випромінювача геометрією імпедансної структури, які відзначаються низьким рівнем кросполаризованого випромінювання.

4. У наближенні періодичної структури, нескінченно малої товщини та ідеальної провідності відбиваючих елементів методами моментів та спектрального аналізу одержаний розв'язок задачі дифракції плоскої довільно поляризованої електромагнітної хвилі на плоско-шаруватій частотно-селективній поверхні з різною геометрією відбиваючих елементів, які розташовані на декількох площинах.

5. На основі створеної універсальної математичної моделі розроблений комплекс програм на мові ФОРТРАН 77 для розрахунку характеристик дифракції довільно поляризованих електромагнітних хвиль на багатошарових метало-діелектричних структурах з відбиваючими елементами різної, у тому числі непрямокутної, геометрії. Досліджено питання збіжності числових результатів та вироблені загальні рекомендації щодо вибору конкретного виду базисних функцій та кількості складових хвильового спектру, які повинні бути враховані. Одержані числові результати підтверджують точність моделі та її придатність для аналізу та синтезу складних частотно-селективних структур. Результати числових досліджень вказують на можливість оптимізації таких дифракційних структур за електродинамічними та конструктивно-технологічними критеріями через варіації параметрів діелектриків, геометрії відбиваючих елементів і кількості площин, на яких ці елементи розташовані.

6. З використанням створеного комплексу програм розроблена конструкція поляризаційно-інваріантного частотно-селективного контррефлектора з розширеною смугою відбиття для двохдіапазонної асиметричної дзеркальної антени. Спроектований контррефлектор є'ятишаровою діелектричною структурою з відбиваючими елементами, розташованими на двох площинах.

7. Обґрунтований вибір методики вимірювання та розроблений цифровий автоматизований комплекс для дослідження характеристик випромінювання поляризаційно-інваріантних антен у сантиметровому діапазоні хвиль. Розроблена установка для експериментального визначення коефіцієнта проходження метало-діелектричних дифракційних структур у сантиметровому діапазоні хвиль. Проведене експериментальне дослідження діаграм випромінювання розроблених антен поверхневої хвилі на основній поляризації та на кросполаризації.

8. Основні результати дисертаційної роботи були використані та впроваджені в НДР "Граната-УВО", "ВІ-КПІ-47-УО", "Едельвейс" та "Говерла", які проводилися на замовлення НВО ім. Пleshакова (Москва), СПП при Президії НАН України та ДКНТ України. Математичні моделі та програмне забезпечення, які були розроблені в дисертації, можуть бути використані при створенні систем автоматизованого проектування антен НВЧ.

СПИСОК РОБІТ,  
ЩО БУЛИ ОПУБЛІКОВАНІ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Дубровка Ф.Ф., Пантов В.С. Излучение электромагнитных волн цилиндрическими кольцевыми антеннами // Радиоэлектроника. - 1991. - Том 34 - №5 - С. 44 - 49. (Изв. высш. учебн. заведений)
2. Дубровка Ф.Ф., Исаков Б.С., Ленивенко В.А., Пантов В.С., Степаненко П.Я., Юдин Л.И. Спецтема. - М.: 1990.
3. Дубровка Ф.Ф., Пантов В.С. Излучатель в виде открытого конца экранированного кольцевого волновода // Радиоэлектроника. - 1993. - Том 36 - №11 - 12 - С. 3 - 17. (Изв. высш. учебн. заведений)
4. Aroudaki H., Pantow W., Eibert T., Hansen V. Spektralbereichsanalyse planarer frequenzselektiver Schirme mit nichtrechtwinkligen Leitungsgeometrien // Frequenz - 1994 - Band 48 - Heft 11/12 - S. 286 - 290.
5. Пантов В.С. Расчет многослойных планарных частотно-селективных структур // Радиоэлектроника. - 1995 - №2 - С. 3 - 11. (Известия высших учебных заведений)
6. Дубровка Ф.Ф., Пантов В.С., Ленивенко В.А., Донцов А.Н., Дымко А.М., Онисимов Ю.В. Цифровой автоматизированный комплекс для исследования характеристик излучения антенн // I Всесоюзная научно-техническая конференция "Проблемы совершенствования радиоэлектронных комплексов и систем обеспечения полетов": Тез. докл. - Киев, 1989, С. 159.
7. Пантов В.С. Лабораторный цифровой автоматизированный комплекс для исследования характеристик излучения антенн с управляемой поляризацией // VII Научно-техническая конференция ДВЗРКУ "Перспективные вопросы получения и обработки радиолокационной информации и повышения надежности радиоэлектронных средств": Сб. материалов - Днепропетровск, 1989, С. 26 - 27.
8. Донцов А.Н., Дубровка Ф.Ф., Дымко А.М., Куприй А.М., Ленивенко В.А., Пантов В.С. Лабораторный комплекс для исследования характеристик излучения антенн // XXVI Межотраслевая научно-техническая конференция по теории и технике антенн: Тез. докл. - Москва, 1990, С. 3.
9. Дубровка Ф.Ф., Пантов В.С. Анализ характеристик распространения и излучения гибридных электромагнитных волн цилиндрическими кольцевыми антеннами. // Всесоюзный семинар "Математическое моделирование физических процессов в антенно-фидерных трактах": Тез. докл. - Саратов, 1990, С. 27.
10. Дубровка Ф.Ф., Пантов В.С. Анализ и синтез диэлектрических антенн с металлическими кольцами // XXVI Межотраслевая научно-техническая конференция по теории и технике антенн: Тез. докл. - Москва, 1990, С. 22.
11. Aroudaki H., Hansen V., Pantow W. Efficient design of multilayered FSS taking into account effects of different periodicities and arbitrary incidence angles. // In: Proc. of the 15-th Int. Symp. on Electromagnetic Theory, St. Petersburg, Russia, 1995, P. 594 - 597.

Пантов В.С. Излучатели и частотно-селективные поверхности на основе периодических металло-диэлектрических структур, рукопись.

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

Разработаны математические модели, проведены численные и экспериментальные исследования цилиндрических излучателей и плоскостных частотно-селективных поверхностей на основе металл-диэлектрических периодических структур. Впервые получены в замкнутом виде выражения поля излучения в дальней зоне излучателей на основе аксиально-симметричных периодических структур с кольцами. Полученная модель частотно-селективной поверхности отличается универсальностью, позволяет исследовать многослойные структуры с различной геометрией отражающих элементов.

С использованием разработанного программного обеспечения созданы экспериментальные образцы антенн поверхности волны, отличающиеся низким уровнем кроссполаризованного излучения. Спроектирован частотно-селективный поляризационно-инвариантный контррефлектор с расширенной полосой отражения для двухдиапазонной зеркальной антенны.

Pantov W.S. Radiators and frequency selective surfaces based on periodic metallic dielectric structures, manuscript.

Ph.D. thesis. Speciality - 05.12.07 Antennas and microwave devices, National Technical University of Ukraine "KPI", Kyiv, 1996.

Mathematical models have been built and numerical and experimental investigations of cylindrical radiators and multilayered frequency selective surfaces based on periodic metal-dielectric structures have been carried out. For the first time presentations of radiation fields in far field region for antennas built on axially-symmetrical periodic structures with rings have been obtained in closed form. The model of frequency selective surface is universal and permits to predict characteristics of multilayered structures with various patches geometry.

The developed software has been used to design the surface-wave antennas with low crosspolarization levels and frequency selective polarizationally invariant subreflector with extended reflection frequency band for dual-band reflector antennas.

**Ключові слова:** аксіально-симетричний випромінювач, частотно-селективна поверхня, плоско-шарувата структура, метало-діелектрична структура.



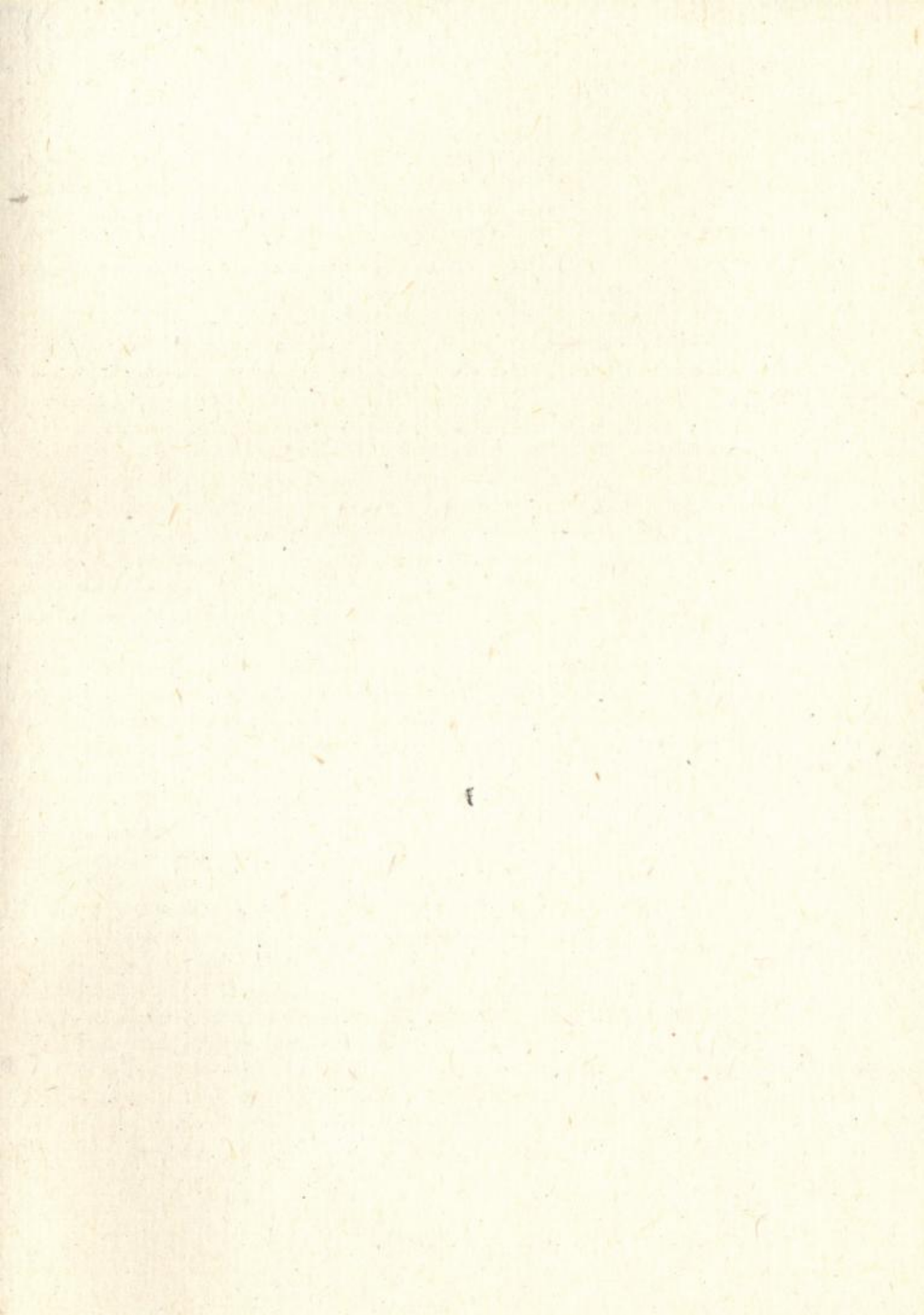
---

Підписано до друку 01.02.96. Формат 60x84/16. ПапІр друкарський.  
Офсетний друк. Ум.фарбовідб. 5. Ум.друк.арк.0,93.Обл.вид.арк.І,0.  
Тираж 100 прим. Замовлення № 36-І. Ціна . Вид. № 189/Ш.

---

Видавництво ЮЛУЦА.

252058. Київ-58, проспект Космонавта Комарова, І.



AB 34.045