

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені В.Н. КАРАЗІНА

ДУХОПЕЛЬНИКОВ Сергій Володимирович

УДК 517.968.519.6

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ БАГАТОЩІЛИННИХ АНТЕН ТА АКСІАЛЬНО-
СИМЕТРИЧНИХ ГОФРОВАНИХ ХВИЛЕВОДІВ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
ГАНДЕЛЬ Юрій Володимирович
Харківський національний університет
імені В.Н. Каразіна,
професор кафедри математичної фізики та
обчислювальної математики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сухаревський Олег Ілліч, Харківський
університет Повітряних Сил імені І. Кожедуба,
провідний науковий співробітник наукового
центру Повітряних Сил;

кандидат фізико-математичних наук, доцент
ДУШКІН Володимир Давидович
Академія Внутрішніх Військ МВС України,
професор кафедри фундаментальних дисциплін.

Захист відбудеться “23” вересня 2009 р. о 15:30 на засіданні спеціалізованої вченої ради К 64.051.09 у Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна за адресою: 61077, м. Харків, пл. Свободи, 4.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна за адресою: 61077, м. Харків, пл. Свободи, 4.

Автореферат розісланий “18” червня 2009 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук

С.І. Шматков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Створення математичних моделей для розрахунків різних типів хвилеведучих систем та антенних пристроїв є важливою частиною сучасних досліджень в галузі високочастотної радіоелектроніки.

Різноманітні пристрої, що розсіюють та випромінюють електромагнітні хвилі, являють собою або можуть бути змодельовані незамкненими провідними екранами різноманітної конфігурації. До таких пристроїв відносяться апертурні та поверхневі антени, антени хвиль що витікають, щілинні хвилеводи та пристрої на їх основі типа фільтрів та збудників хвиль у порожніх хвилеводах.

Прямі кругові циліндричні діафрагмовані хвилеводи та прискорюючі структури широко використовуються в лінійних прискорювачах електронів. Окрім того, на основі прямих кругових діафрагмованих хвилеводів створюють прискорюючі станції для електронних синхротронів, прискорюючі секції для електрон-позитронних колайдерів. Прискорюючі структури широко використовуються при створенні високоенергетичної частини лінійних прискорювачів протонів, у рейстрекових мікротронах.

Розроблені протягом останніх років методи в працях Шестопалова В.П., Носича О.Й., Кириленко А.О., Яшиної Н.П., Сухаревського О.І., Зіолковського Р.В., Левіна Л., Вайнштейна Л.А., Хижняка М.А., Назарчука З.Т., Войтовича М.М., Андрійчука М.І., Савенко П.О. для розрахунків технічних характеристик аксіально-симетричних хвилеводів з гофрами та циліндричних антен кругового поперечного перетину з подовжніми щілинами мають ряд недоліків. Ці методи придатні до структур, які мають лише одну щілину або гофру, розповсюдити ж їх на більше число гофрів або щілин не має можливості.

Метод дискретних вихрів, який використаний в працях Білоцерковського С.М., Ліфанова І.К., Довгого С.О., Желаннікова А.І., Чернія Д.І., під час розрахунків у прикладній аеродинаміці та метод дискретних особливостей, який використаний у працях Ганделя Ю.В., Міщенко В.О., Душкіна В.Д. та їх учнів, перспективний у випадку вирішення задач дифракції на багатощілинних решітках та при розрахунку полів у хвилеводах. Ці методи не отримали достатнього розвитку при вирішенні задач дифракції хвиль на циліндричних антенах та в аксіально-симетричних хвилеводах.

Таким чином, побудова точних та наближених дискретних математичних моделей, а також розробка програмного забезпечення для розрахунків фізичних характеристик вказаних технічних пристроїв, які мають скінченну кількість гофр або щілин з довільними параметрами, з контрольованою або наперед заданою точністю, є актуальною в антенній техніці та техніці прискорюючих пристроїв.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі математичної фізики та обчислювальної математики механіко-математичного факультету Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Дисертація є частиною

держбюджетної науково-дослідної роботи “Математичне моделювання фізичних процесів та чисельний експеримент” (номер державної реєстрації 01040002366) та “Спектральний багатомодовий аналіз хвильоводів та відкритих резонаторів – теорія та чисельне моделювання” (номер державної реєстрації 0106U001534 (2006-2008 р.).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка математичних моделей та методів обчислювання, які підвищують ефективність та точність розрахунків широкого класу багатoelementних антен та хвильоводів, а також прискорювачів на їх основі, які використовуються у техніці.

В процесі досягнення зазначеної мети дослідження були вирішені наступні задачі:

- здійснено аналіз існуючих методів розрахунків електродинамічних характеристик гофрованих аксіально-симетричних хвильоводів та циліндричних структур кругового поперечного перетину з подовжніми щілинами;
- розроблено математичну модель для розрахунків електромагнітних полів, коефіцієнтів матриць розсіяння у випадках ТМ- та ТЕ- мод в аксіально-симетричних гофрованих хвильоводах, з скінченням числом розширень, що мають неоднорідне заповнення;
- розроблено математичну модель розсіювання плоскої монохроматичної хвилі на циліндричних антенах кругового перетину, які мають скінченну кількість подовжніх щілин, у випадках ТМ- та ТЕ-мод;
- розроблено математичну модель випромінювання хвилі з циліндричних антен кругового перетину, що мають скінченне число подовжніх щілин, у випадку ТМ-мод;
- проведено розрахунки полів у дальній та ближній зоні, поперечника повного розсіяння циліндричних антен кругового перетину з скінченням числом подовжніх щілин;
- розроблено математичну модель для розрахунків полів у випадках падіння плоскої монохроматичної хвилі на кругову циліндричну антену з подовжніми щілинами та вкладеним круговим ідеально провідним циліндром;
- проведені чисельні аналізи технічних характеристик аксіально-симетричних хвильоводів та циліндричних антен кругового перетину з подовжніми щілинами;
- проведено порівняння результатів, отриманих розробленими методами, з результатами, відомими раніше для однощілинних структур.

Об'єктом дослідження є моди гофрованих аксіально-симетричних хвильоводів частково заповнених діелектриком, та подовжньо-щілинних антен кругового поперечного перетину.

Предметом дослідження є математичні моделі гофрованих аксіально-симетричних хвильоводів для розрахунків коефіцієнтів матриць розсіяння та полів усередині хвильоводу, та математичні моделі подовжньо-щілинних

циліндричних антен кругового перетину для розрахунку поперечника повного розсіяння, полів у ближній зоні та полів у дальній зоні.

Методи дослідження. В ході дослідження були використані методи математичного моделювання, методи радіотехніки та електроніки, методи математичної фізики для побудови математичних моделей крайових задач для рівнянь Максвелла та Гельмгольца, методи інтегральних рівнянь, методи теорії операторів у функціональних просторах, чисельні методи та методи побудови комп'ютерних алгоритмів.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше:

- розроблено метод для розрахунків технічних характеристик частково заповнених аксіально-симетричних хвильоводів, які мають скінченне число розширень. Цей метод відрізняється від існуючих на даний час методів, які дозволяють розраховувати характеристики для однієї неоднорідності;
- розроблено метод для розрахунку розсіяних та випромінених хвиль циліндричною структурою кругового поперечного перетину, яка має скінченне число подовжніх щілин. Цей метод, на відміну від існуючих на поточний момент методів, які дозволяють розраховувати характеристики тільки для однієї щілини, дає можливість отримати технічні характеристики пристроїв, які мають скінченну кількість подовжніх щілин;
- проведено чисельний аналіз характеристик електромагнітних хвиль в частково заповнених аксіально-симетричних хвильоведучих структурах з скінченою кількістю розширень та циліндричних структур кругового перетину з скінченим числом подовжніх щілин.

На основі розроблених методів створені математичні моделі розсіяння електромагнітних полів в частково заповнених аксіально-симетричних хвильоводах та на циліндричних структурах кругового поперечного перетину з подовжніми щілинами, які дають можливість збільшувати кількість параметрів, що можна варіювати: довільна кількість гофр та щілин, довільні геометричні характеристики – ширина кожної гофри та щілини, а також глибину гофри; електродинамічні характеристики – вибір діелектричного заповнення кожної гофри, робочої зони хвильоводу, внутрішньої частини циліндричної антени з подовжніми щілинами, вибір частот коливань у широкому частотному діапазоні. Крім цього, забезпечується розрахунок технічних характеристик з контрольованою або наперед заданою точністю.

В дисертаційній роботі отримав подальший розвиток метод дискретних особливостей математичного моделювання задач дифракції у частково заповнених аксіально-симетричних хвильоводах з скінченим числом розширень та в задачах дифракції на циліндричних структурах кругового поперечного перетину з скінченою кількістю подовжніх щілин.

Практичне значення отриманих результатів. Побудовані в дисертаційній роботі математичні моделі дають можливість проводити розрахунки технічних характеристик неоднорідно заповнених аксіально-симетричних хвильоводів та циліндричних антен кругового поперечного перетину, які мають скінченне число подовжніх щілин. Важливе практичне значення побудованих моделей дає можливість використовувати їх для розрахунків технічних характеристик при різноманітних геометричних параметрах: скінченне число гофрів та патрубків, подовжніх щілин з широким діапазоном ширини кожного гофру та кожної щілини, а також можливість варіювати глибину гофру; окрім того, заповнення кожної гофри різноманітними діелектричними включеннями. Метод, розроблений в дисертаційній роботі, суттєво розширює можливості розрахунку технічних характеристик подібних пристроїв, на відміну від існуючих методів.

Отримані чисельні результати можуть бути використані для побудови та оптимізації апертурних антен та лінійних прискорювачів, про що свідчать акти використання в інституті радіофізики та електроніки імені О.Я. Усікова (м. Харків), та в Національному науковому центрі “Харківський фізико-технічний інститут”.

Розроблені комп’ютерні алгоритми на базі побудованих математичних моделей та відповідних їм дискретних математичних моделей, які дають можливість розраховувати поля у ближній та дальній зоні, поперечник повного розсіяння, коефіцієнти проходження та відбиття, коефіцієнти матриць розсіяння, використовуються на практичних заняттях в Харківському національному університеті імені В.Н. Каразіна, про що є відповідний акт впровадження.

Особистий внесок здобувача. Усі основні наукові положення, результати та висновки дисертаційної роботи отримані автором самостійно та опубліковані у [1-16]. Праці [6,8,13,15] надруковані у спеціалізованих виданнях, затверджених ВАК України по технічним наукам. Другий розділ дисертації поданий у статтях [6,15], третій розділ у статті [6] та четвертий розділ у статтях [8,13].

Роботи [12,14-16] написані у співавторстві з науковим керівником Ганделем Ю.В. В роботі [12] дисертантом побудовані математичні моделі дифракції в гофрованих аксіально-симетричних хвильоводах, відповідні їм дискретні математичні моделі, та на їх основі отримані наближені вирази для фізичних величин з контрольованою точністю. В роботі [14] дисертантом побудовані математичні моделі дифракції плоскої монохроматичної хвилі на кругових циліндричних структурах з скінченною кількістю подовжніх щілин та математичні моделі випромінювання циліндричної хвилі з щілин циліндричної структури. Побудовані дискретні математичні моделі та проведений чисельний аналіз. В роботах [15] та [16] дисертантом побудовані математичні моделі дифракції на круговій циліндричній антені з подовжніми щілинами та

вкладеним круговим ідеально провідним циліндром, відповідні їм дискретні математичні моделі, а також проведений чисельний аналіз на їх основі.

Апробація результатів. Результати, які викладені в дисертаційній роботі, доповідались та обговорювались: Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, м. Харків, семінар “Математичне моделювання в математичній фізиці методами дискретних особливостей”, керівник проф. Ю.В. Гандель, 2003-2007; міжнародний симпозіум “Методи дискретних особливостей в задачах математичної фізики” (м. Херсон – Лазурне, 2003, 2005, 2007); десята, одинадцята та дванадцята міжнародні наукові конференції ім. академіка М. Кравчука (м. Київ, 2004, 2006, 2008); International conference Dynamical System Modelling And Stability Investigation (м. Київ, 2007); Міжнародна школа-семінар “Методи дискретних особливостей в задачах математичної фізики” (м. Орел, Росія, 2005, 2008); VI Харківська конференція молодих науковців “Радіофізика та Електроніка” (ІРЕ ім. О.Я. Усикова, м. Харків, 2006); міжнародна наукова конференція для студентів та аспірантів “Сучасні проблеми математики та її застосування в природничих науках та інформаційних технологіях” (ХНУ імені В.Н. Каразіна, м. Харків, 2007).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 16 наукових праць, з них 4 статті в спеціалізованих виданнях, затверджених ВАК України по технічним наукам, та одна у науковому журналі Міністерства освіти і науки України, а також 11 доповідей на міжнародних наукових конференціях та симпозіумах.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 183 сторінки тексту, основний зміст викладено на 153 сторінках, містить 49 рисунків з них 1 рисунок на окремій сторінці, 1 таблицю, список використаних джерел складається з 137 найменувань на 17 сторінках та 7 додатків на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, зазначено її зв'язок із науковими темами Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, де виконувалась робота. Сформульовано мету і задачі дослідження. Вказується об'єкт, предмет та методи дослідження, розкривається наукова новизна та практичне значення отриманих результатів. Наведена інформація про публікації та апробацію викладеного в роботі матеріалу, а також відзначено особистий внесок здобувача.

У першому розділі проведено огляд літератури за темою дисертації. Розглянуті технічні питання використання циліндричних антен кругового перетину з подовжніми щілинами, а також описані математичні методи, використані раніше для розрахунків діаграм спрямованості та повного поперечника розсіяння. Описана область використання аксіально-симетричних гофрованих хвилеводів в техніці, наведені математичні методи розрахунків

коефіцієнтів проходження. Розглянуті математичні моделі на базі гіперсингулярних та сингулярних інтегральних рівнянь, наведений історичний огляд розвитку метода, а також галузі його використання.

Наведено обґрунтування розвитку методів, які дозволяють розраховувати діаграми спрямованості, поля у ближній зоні, поперечник повного розсіяння для прямої циліндричної антени з скінченним числом подовжніх щілин, а також для кругової циліндричної антени з скінченною кількістю подовжніх щілин та вкладеним ідеально провідним циліндром.

У випадку аксіально-симетричного хвилеводу зі скінченним числом гофрів або підстроювальних патрубків дано обґрунтування необхідності розвитку методів розрахунків коефіцієнтів матриць розсіяння.

У другому розділі побудована математична модель для розрахунків поперечника розсіяння, діаграми спрямованості, поля у ближній зоні у випадку дифракції ТЕ-, ТМ- хвиль на прямому круговому циліндрі з скінченною кількістю подовжніх щілин в поперечному перетині якого лежить коло (рис. 1).

Рис. 1. Поперечний перетин циліндричної антени з скінченним числом щілин, в перетині коло

Вказані електродинамічні структури знайшли широке використання при проектуванні апертурних та поверхневих антен, відкритих резонаторів, щілинних хвилеводів та фільтрів на їх основі. У світловому діапазоні – це вузькосмугові фільтри, детектори світла та фазачутливі елементи. Особливості сучасних структур такого типу припускають наявність скінченної кількості подовжніх щілин у циліндричних структурах.

Розглянуто квазістаціонарний випадок. Залежність від часу $e^{-i\omega t}$, де ω – кутова частота.

Поля задовольняють рівнянням Максвелла у всьому просторі, за винятком дуг структури:

$$\text{rot}\mathbf{H} = -i\omega\epsilon\mathbf{E}, \quad \text{rot}\mathbf{E} = i\omega\mu\mathbf{H}.$$

Геометрія структури дозволяє із рівнянь Максвелла отримати два незалежних рівняння Гельмгольца для випадків ТЕ- та ТМ- хвиль.

Представлення полів шукаємо у вигляді:

$$u^+(r, \phi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n^+ J_n(kr) e^{in\phi}, \quad r < a,$$

$$u^-(r, \phi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n^- H_n^{(1)}(kr) e^{in\phi}, \quad r > a.$$

Використовуючи граничні умови та умови спряженості, отримані парні ряди Фур'є. За допомогою параметричних представлень інтегральних

операторів у випадку ТЕ-хвиль, отримана система гіперсингулярних інтегральних рівнянь (ГСІР) на стандартному інтервалі, вигляду:

$$-\frac{B_1}{\pi} \left(a, f, p, \int_{-1}^1 \frac{\gamma_p(t)}{(t-t_0)^2} \sqrt{1-t^2} dt \right) - \frac{B_2}{\pi} \left(\frac{\beta_q - \alpha_q}{2} \right)^2 \int_{-1}^1 \gamma_p(t) \ln|t-t_0| \sqrt{1-t^2} dt + \\ + \frac{1}{\pi} \sum_{q=1}^m \left(\frac{\beta_q - \alpha_q}{2} \right)^2 \int_{-1}^1 \tilde{K}_{pq}(t_0, t) \gamma_q(t) \sqrt{1-t^2} dt = \tilde{f}_p(t_0), \quad p=1, \dots, m, \quad |t_0| < 1. \quad (1)$$

Методом дискретних особливостей система ГСІР (1) зводиться за допомогою квадратурних формул інтерполяційного типу до системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР), яка має розв'язання за допомогою метода Гауса.

Був розроблений комп'ютерний алгоритм на основі СЛАР, за допомогою якого був проведений чисельний аналіз. У випадку чотирьох щілин ($\alpha_1 = 20^\circ$, $\beta_1 = 70^\circ$, $\alpha_2 = 110^\circ$, $\beta_2 = 160^\circ$, $\alpha_3 = 200^\circ$, $\beta_3 = 250^\circ$, $\alpha_4 = 290^\circ$, $\beta_4 = 340^\circ$) розрахунки поперечника повного розсіювання, в залежності від хвильового числа, наведені на рис. 2. Знайдені локальні максимуми поперечника повного розсіювання, та в одному з резонансних значень для хвильового числа $ka = 8.26$, одержані поля

Рис. 2. Залежність поперечника повного розсіювання в залежності від хвильового числа, випадок чотирьох щілин

у ближній зоні (рис. 3) та у дальній зоні (рис. 4).

Рис. 3. Поле у ближній зоні (ТЕ-хвиля)

Рис. 4. Поле у дальній зоні (ТЕ-хвиля)

Аналіз отриманих результатів показав, що при збільшенні кількості щілин у випадку ТЕ-хвиль, кількість та рівень бічних пелюсток зменшується. Так, наприклад, у випадку падіння плоскої хвилі з хвильовим числом $ka = 9$ на структуру з двома щілинами $\alpha_1 = -170^\circ$, $\beta_1 = -10^\circ$, $\alpha_2 = 10^\circ$, $\beta_2 = 170^\circ$ рівень

максимального бічного пелюстка дорівнює 0.25, натомість у випадку падіння плоскої хвилі на структуру з чотирма щілинами $\alpha_1 = -170^\circ$, $\beta_1 = -100^\circ$, $\alpha_2 = -80^\circ$, $\beta_2 = -10^\circ$, $\alpha_3 = 10^\circ$, $\beta_3 = 80^\circ$, $\alpha_4 = 100^\circ$, $\beta_4 = 170^\circ$ рівень максимального бічного пелюстка дорівнює 0.164.

У випадку ТМ-хвилі за допомогою параметричних представлень інтегральних операторів отримана система сингулярних інтегральних рівнянь (СІР) на стандартному інтервалі у вигляді:

$$\frac{B}{\pi} \text{v.p.} \int_{-1}^1 \frac{\gamma_q(t)}{t-t_0} \frac{dt}{\sqrt{1-t^2}} + \frac{1}{\pi} \sum_{p=1}^m \int_{-1}^1 K_{pq}(t, t_0) \gamma_p(t) \frac{dt}{\sqrt{1-t^2}} = f_q'(t_0), \quad q=1, \dots, m, \quad (2)$$

з додатковою умовою

$$\begin{aligned} \frac{B}{\pi} \left(\pi \ln 2 - \ln \left| \frac{\beta_q - \alpha_q}{2} \right| \right) \int_{-1}^1 \gamma_q(t) \frac{dt}{\sqrt{1-t^2}} + \\ + \frac{1}{\pi} \sum_{p=1}^m \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 K_{pq}(t, t_0) \frac{dt_0}{\sqrt{1-t_0^2}} \gamma_p(t) \frac{dt}{\sqrt{1-t^2}} = \int_{-1}^1 f_q(t_0) \frac{dt_0}{\sqrt{1-t_0^2}}, \quad q=1, \dots, m. \end{aligned} \quad (3)$$

Методом дискретних особливостей система СІР (2) з додатковою умовою (3) зводиться за допомогою квадратурних формул інтерполяційного типу до СЛАР.

Рис. 5. Поле у ближній зоні (ТМ-хвиля)

Рис. 6. Поле у дальній зоні (ТМ-хвиля)

Був розроблений комп'ютерний алгоритм на основі СЛАР, за допомогою якого проведений чисельний аналіз. У випадку чотирьох щілин ($\alpha_1 = 10^\circ$, $\beta_1 = 80^\circ$, $\alpha_2 = 100^\circ$, $\beta_2 = 170^\circ$, $\alpha_3 = 190^\circ$, $\beta_3 = 260^\circ$, $\alpha_4 = 280^\circ$, $\beta_4 = 350^\circ$) розрахунки наведені для поля у ближній зоні (рис. 5) та у дальній зоні (рис. 6).

Також у даному розділі отримані системи алгебраїчних рівнянь для розрахунку технічних характеристик кругової циліндричної антени з подовжніми щілинами та вкладеним круговим ідеально провідним циліндром, проміжок між двома циліндрами заповнений діелектриком (рис. 7). Розглянуто випадки ТЕ-, ТМ- хвиль. Отримані гіперсингулярні (випадок ТЕ-хвилі) та сингулярні (випадок ТМ-хвилі) рівняння. Ці рівняння співпадають з ГСІР (1) та

з СІР (2) з додатковою умовою (3), відповідно. Тому для чисельного аналізу використані комп'ютерні алгоритми, які побудовані для кругової циліндричної антени з подовжніми щілинами.

Рис. 7. Поперечний перетин антени з скінченною кількістю щілин та вкладеним круговим циліндром

Рис. 8. Поперечник повного розсіяння в залежності від хвильового числа (ТМ-хвиля)

На рис. 8 наведений поперечник повного розсіяння в залежності від хвильового числа для трьох щілин ($\alpha_1 = 55^\circ$, $\beta_1 = 170^\circ$, $\alpha_2 = 190^\circ$, $\beta_2 = 305^\circ$, $\alpha_3 = 325^\circ$, $\beta_3 = 395^\circ$). Результати отримані шляхом чисельного аналізу для випадку падіння ТМ-хвилі. Для хвильового числа $ka = 5.82$, в якому поперечник повного розсіяння досягає локального максимуму, наведене поле у ближній зоні (рис. 9) та діаграма розсіяння (рис. 10).

Рис. 9. Поле у ближній зоні (ТМ-хвиля)

Рис. 10. Поле у дальній зоні (ТМ-хвиля)

Чисельний аналіз показав збіжність отриманих результатів у випадку збільшення точок інтерполяції. Окрім того, додатковою перевіркою були отримані результати для симетричного розташування щілин відносно вісі абсцис, якщо хвильовий вектор з віссю був колінеарний. Поля для таких випадків також були симетричні, що добре видно на наведених рисунках.

У третьому розділі розглянутий випадок випромінювання циліндричної ТМ-хвилі з циліндричної антени з скінченною кількістю подовжніх щілин, яка зображена на рис. 11.

Як і у другому розділі, поля задовольняють рівнянню Гельмгольца.

Для рішення поставленої задачі побудовані три різні математичні моделі. Одна з них використовує ГСІР, а дві інші СІР. Окрім цього, в одній моделі з використанням СІР вузли інтерполяції розташовані на “металі”, а в іншій – на “щілинах”.

Рис. 11. Поперечний перетин циліндричної антени з скінченим числом подовжніх щілин

Отримані результати розрахунків коефіцієнтів проходження для різних математичних моделей наведені в таблиці 1. Побудовані графіки залежності коефіцієнта проходження від хвильового параметру для випадку трьох щілин (рис. 12), і в резонансних точках побудовані поле у

ближній зоні та діаграма спрямованості.

Таблица 1

Порівняння результатів, отриманих за допомогою двох математичних моделей

	СИУ		ГСИУ	
	N=10			
C ₀	7.272020e-002	1.05	7.276056e-002	0.109
C ₁	6.745604e-002		6.749474e-002	
C ₂	5.325068e-002		5.328422e-002	
	N=50			
C ₀	7.270561e-002	21.09	7.270586e-002	2.218
C ₁	6.743969e-002		6.743994e-002	
C ₂	5.322914e-002		5.322938e-002	
	N=100			
C ₀	7.270586e-002	84.41	7.270586e-002	16.65
C ₁	6.743995e-002		6.743994e-002	
C ₂	5.322942e-002		5.322939e-002	

В таблиці 1 наведені модулі коефіцієнтів розповсюдження, які отримані різними методами для однакових геометричних та електродинамічних параметрів. Також в цій таблиці вказаний час, витрачений на розрахунки та кількість вузлів інтерполяції, що дає можливість спостерігати збіжність методів. Параметри структури, для яких побудована таблиця 1: $ka = 4$, $\alpha = -\frac{\pi}{4}$,

$$\beta = \frac{\pi}{4}, R=1.$$

Наведені в табл. 1 дані доводять кращу швидкість збіжності метода з використанням ГСІР, а також можливість отримання результатів за коротший проміжок часу.

Ці моделі також дають можливість перевірити комп'ютерні алгоритми, які використані в другому розділі.

Для значення $ka = 7.58$, при якому коефіцієнт проходження досягає локального максимуму (рис. 12), побудовані поле у ближній зоні (рис. 13) та діаграма спрямованості поля в дальній зоні (рис. 14).

Рис. 12. Норма коефіцієнта проходження $|C_0|$ у випадку трьох циліндрів

Рис. 13. Поле у ближній зоні (ТМ-хвиля)

Рис. 14. Поле у дальній зоні (ТМ-хвиля)

У четвертому розділі розглянуті питання дифракції електромагнітних хвиль у аксіально-симетричних хвильоводах з гофрами (рис. 15) та патрубками (рис. 16).

Рис. 15. Осьовий переріз хвильоводу з розширеннями, заповненими діелектриком

Рис. 16. Подовжній переріз хвильоводу з патрубками, заповненими діелектриком

Такі структури використовують у променевій терапії, при неруйнівному контролі товстостінних виробів, при активаційному аналізі, в радіаційній

технології, у лінійних прискорювачах електронів. Лінійні прискорювачі електронів використовуються для отримання високоенергетичних неперервних пучків, а також в експериментальній ядерній фізиці. На базі пришвидшувальних лінійних секцій будують електрон-позитронні колайдери.

Поля в “робочій зоні” шукаємо у вигляді:

$$E_{\phi,\delta}^+(\rho, z) = \int_{-\infty}^{\infty} C_{\phi}^+(\lambda) \frac{(-i)I_1(\gamma_{\delta}^+ \rho)}{\lambda I_1(\gamma_{\delta}^+ R)} e^{i\lambda z} d\lambda,$$

$$H_{\phi,\delta}^+(\rho, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{B_{\phi}^+(\lambda) I_1(\gamma_{\delta}^+ \rho)}{\gamma_{\delta}^+ I_0(\gamma_{\delta}^+ R)} e^{i\lambda z} d\lambda,$$

$$\text{де } \gamma_{\delta}^+ = \sqrt{\lambda^2 - (k_{\delta}^+)^2}.$$

Поля у “зоні розширень”:

$$E_{\phi}^{-(q)}(\rho, z) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n^{(q)E}(\rho) C_{\phi,n}^{-(q)} \sin \lambda_n^{(q)}(z - a_q),$$

$$\text{де } V_n^{(q)E}(\rho) = \frac{1}{\lambda_n^{(q)}} \frac{K_1(\gamma_n^{-(q)} R_q) I_1(\gamma_n^{-(q)} \rho) - I_1(\gamma_n^{-(q)} R_q) K_1(\gamma_n^{-(q)} \rho)}{K_1(\gamma_n^{-(q)} R_q) I_1(\gamma_n^{-(q)} R) - I_1(\gamma_n^{-(q)} R_q) K_1(\gamma_n^{-(q)} R)}.$$

$$H_{\phi}^{-(q)}(\rho, z) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n^{(q)H}(\rho) B_{\phi,n}^{-(q)} \cos \lambda_n^{(q)}(z - a_q),$$

$$\text{де } V_n^{(q)H}(\rho) = \frac{1}{\gamma_n^{-(q)}} \frac{K_0(\gamma_n^{-(q)} R_q) I_1(\gamma_n^{-(q)} \rho) - I_0(\gamma_n^{-(q)} R_q) K_1(\gamma_n^{-(q)} \rho)}{K_0(\gamma_n^{-(q)} R_q) I_0(\gamma_n^{-(q)} R) - I_0(\gamma_n^{-(q)} R_q) K_0(\gamma_n^{-(q)} R)},$$

$$\gamma_n^{-(q)} = \gamma^-(\lambda_n^{(q)}) = \sqrt{(\lambda_n^{(q)})^2 - (k_q^-)^2}, \quad k_q^- = \varepsilon_q^- \mu \omega^2.$$

За допомогою параметричних представлень СІР, теорії лишків та деяких інтегральних перетворень, отримані СІР (4) та (6) з додатковими умовами (5) та (7) відповідно.

—для ТЕ-хвилі

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\pi} \int_{a_q}^{b_q} \frac{w_q(\xi)}{\xi - z} \frac{d\xi}{\sqrt{(\xi - a_q)(b_q - \xi)}} + \\ & + \sum_{p=1}^m \frac{1}{\pi} \int_{a_p}^{b_p} K_{qp}^H(z, \xi) w_p(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(\xi - a_q)(b_q - \xi)}} = -\frac{\partial}{\partial z} H_{0\phi}(R, z), \quad z \in L_q, \end{aligned} \quad (4)$$

з додатковою умовою

$$\sum_{p=1}^m \frac{1}{\pi} \int_{a_p}^{b_p} F_q^H(\xi) w_p(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(\xi - a_p)(b_p - \xi)}} +$$

$$+V_0^{(q)H}(R) \int_{a_q}^{b_q} w_q(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(\xi - a_q)(b_q - \xi)}} = \int_{a_q}^{b_q} H_{0\phi}(R, \xi) d\xi, \quad q=1, \dots, m, \quad (5)$$

—для ТМ-хвилі

$$\begin{aligned} \frac{1}{\pi} \int_{a_q}^{b_q} \frac{v_q(\xi)}{\xi - z} \frac{d\xi}{\sqrt{(\xi - a_q)(b_q - \xi)}} + \sum_{p=1}^m \frac{1}{\pi} \int_{a_p}^{b_p} K_{qp}^E(z, \xi) v_p(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(\xi - a_p)(b_p - \xi)}} = \\ = H_{0z}(R, z) + \frac{\partial}{\partial \rho} E_{0\phi}(R, z), \quad z \in L_q, \quad q=1, \dots, m, \end{aligned} \quad (6)$$

з додатковою умовою

$$\frac{1}{\pi} \int_{a_q}^{b_q} v_q(\xi) \frac{d\xi}{\sqrt{(\xi - a_q)(b_q - \xi)}} = 0, \quad q=1, \dots, m. \quad (7)$$

Використовуючи квадратурні формули інтерполяційного типу для сингулярних інтегралів та інтегралів з гладким ядром, отримуємо СЛАР. Вирішуючи її, знаходимо поля та модулі коефіцієнтів матриці розсіянь (R_{11} — модуль коефіцієнта відбиття, T_{11} — модуль коефіцієнта проходження).

Для випадку хвилеводу з патрубками також отримані СІР з додатковими умовами, які схожі з системами (4), (5) та (6), (7) з

Рис. 17. Коефіцієнти матриці розсіяння, випадок чотирьох розширень (ТМ – хвиля)

урахуванням того, що інтегрування проводиться по розкриву патрубка.

Побудовані залежності коефіцієнтів матриць розсіяння від хвильових чисел. На рис. 17 представлена залежність для випадку розповсюдження ТМ-хвиль у хвилеводі, який має параметри $\varepsilon^+ = 4$, $R=1$, $a_1=0$, $b_1=1$, $a_2=2$, $b_2=3$, $a_3=4$, $b_3=5$, $a_4=6$, $b_4=7$, $h_{1,2,3,4}=1$, $\varepsilon_{1,2,3,4}^- = 4$.

Рис. 18. Залежність коефіцієнтів матриці розсіяння від розміру патрубка

На рис. 18 представлена залежність коефіцієнтів проходження та відбиття від розміру виступу патрубку, хвилевід має такі параметри $a_1 = 0$, $b_1 = 1$, $h = 1$, $R = 1$, $\varepsilon^+ = 4$, $\varepsilon^- = 4$, $\omega = 1$. Аналіз показав, що коефіцієнт проходження, починаючи з розміру виступу $\alpha_1 = 0.405$, перевищує значення $T_{11} \geq 0.99$ та наближується до 1,0 у випадку збільшення розміру виступу, що відповідає відсутності неоднорідності та відповідно відсутності відбиття.

Чисельний аналіз хвилеводів з різною геометрією дає можливість отримати значення хвильових чисел для випадків повного відбиття та повного проходження.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі були побудовані:

1) математичні моделі розсіювання ТЕ- та ТМ- хвиль циліндричними структурами, в перетині яких площиною, перпендикулярною до твірних, лежить коло або круговою циліндричною антеною з подовжніми щілинами та вкладеним круговим ідеально провідним циліндром;

2) математична модель випромінювання ТМ-хвилі з скінченної кількості подовжніх щілин на базі гіперсингулярного інтегрального рівняння;

3) математичні моделі для аксіально-симетричних хвилеводів з скінченною кількістю гофрів або патрубків, заповнених діелектриком, для випадків ТЕ- та ТМ-хвиль.

Отримав подальший розвиток метод дискретних особливостей до задач дифракції електромагнітних хвиль на циліндричних структурах з скінченною кількістю подовжніх щілин, та до задач дифракції хвиль в аксіально-симетричному хвилеводі з неоднорідностями. Використовуючи удосконалений метод дискретних особливостей, отримані дискретні математичні моделі для описаних задач дифракції.

На базі дискретних математичних моделей були розроблені комп'ютерні алгоритми, які реалізовані на мові Octave. Використовуючи програмний продукт, уперше були отримані:

1) поперечник повного розсіювання, поля у ближній та дальній зоні в задачах дифракції ТМ- та ТЕ-хвиль на циліндричних антенах з скінченною кількістю подовжніх щілин для різних геометрій структури та різних хвильових чисел. Вперше це зроблено у випадку декількох щілин;

2) таблиці коефіцієнтів проходження, поля у ближній та дальній зоні у випадку випромінювання ТМ-хвилі з подовжніх щілин циліндричної антени для різних математичних моделей;

3) коефіцієнти матриць розсіювання для аксіально-симетричних хвилеводів з декількома гофрами та з декількома патрубками.

Таким чином, можна зробити висновок, що:

1) математичні моделі антен, які описують циліндричні структури кругового поперечного перетину з скінченною кількістю подовжніх щілин,

розроблені в дисертаційній роботі та наведені у другому та третьому розділі, не мають подібних труднощів у порівнянні з методами, відомими раніше. Розроблені в дисертаційній роботі методи дають можливість будувати діаграми розсіяння та спрямованості, поля у ближній зоні та розраховувати поперечник повного розсіяння для різної кількості щілин, для різних геометричних параметрів щілин та при різному діелектричному заповненні структури. Запропоновані математичні моделі розглянутих електродинамічних структур дозволяють провести мінімізацію бічних пелюсток апертурних антен у діаграмах розсіяння та спрямованості, знаходити найкращу робочу частоту, використовуючи розрахунки поперечника повного розсіяння;

2) математичні моделі гофрованих аксіально-симетричних хвилеводів, неоднорідно заповнених діелектриком, які розроблені в дисертаційній роботі та описані у четвертому розділі, дозволяють варіювати геометричні параметри: кількість гофрів (патрубків), ширину та глибину кожного елемента гофра. Використання побудованих в дисертаційній роботі методів відкриває можливість змінювати електродинамічні параметри пристроїв та систем: можливість заповнення гофрів діелектриком. При цьому діелектрична проникність у кожному гофрі та в робочій зоні можуть бути різні. Змінюючи геометрію хвилеводу, можна відсікати не “головні” типи хвиль, що не дає можливість перекачувати енергію від одних мод до інших, що дозволяє стабілізувати сталу затухання;

3) описані властивості дають можливість стверджувати, що методи та моделі, які розроблені в дисертаційній роботі, дозволяють на цій базі створювати пристрої в більш широкому діапазоні входних та вихідних параметрів, на відміну від методів, які були розроблені раніше.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Духопельников С. В. Дискретные математические модели на базе МДО в модельных сингулярных интегральных уравнениях / С. В. Духопельников // Методы дискретных особенностей в задачах математической физики : труды XI международного симпозиума. – Харьков, Херсон, 2003. – С. 93-97.

2. Духопельников С. В. Математическая модель дифракции монохроматической Е – поляризованной волны на щели в прямом круговом цилиндре / С. В. Духопельников // Десята міжнародна наукова конференція імені академіка М. Кравчука, 13-15 трав. 2004 р. : матеріали конф. – К., 2004. – С. 102.

3. Духопельников С. В. Математическая модель излучения цилиндрической волны из продольных щелей в прямом круговом цилиндре / С. В. Духопельников // Методы дискретных особенностей в задачах математической физики : труды международных школ-семинаров. – Орел : ОГУ, 2005. – Вып. 4. – С. 45-50.

4. Духопельников С. В. Математическая модель дифракции плоской волны на продольных щелях в волноводе кругового сечения / С. В. Духопельников // Методы дискретных особенностей в задачах математической физики : труды международных школ-семинаров. – Орел : ОГУ, 2005. – Вып. 4. – С.50-56.

5. Духопельников С. В. Математическая модель для расчета излучения Е-поляризованной волны из продольных щелей в волноводе кругового сечения / С. В. Духопельников // Методы дискретных особенностей в задачах математической физики : труды XII международного симпозиума. – Харьков, Херсон, 2005. – С. 118-121.

6. Духопельников С. В. Математические модели для расчета излучения из продольных щелей в волноводе кругового сечения / С. В. Духопельников // Вісник Харківського національного університету : Зб. наук. праць. – Харків, 2005. – № 661, – С. 104-113. – (Серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління; вип. 4)

7. Духопельников С. В. Сингулярные интегральные уравнения задачи дифракции неоднородно заполненных диэлектриком аксиально-симметричных волноводов / С. В. Духопельников // Одинадцята міжнародна наукова конференція імені академіка М. Кравчука, 18-20 трав. 2006 р. : матеріали конф. – К., 2006. – С. 99.

8. Духопельников С. В. Математическая модель для расчета гофрированного волновода на базе сингулярных интегральных уравнений и метода дискретных особенностей / С. В. Духопельников // Вісник Харківського національного університету : Зб. наук. праць. – Харків, 2006. – № 733, – С. 117-133. – (Серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління; вип. 6)

9. Духопельников С. В. Математическая модель для расчета гофрированного волновода на базе сингулярных интегральных уравнений / С. В. Духопельников // VI Харківська конференція молодих науковців “Радіофізика та Електроніка”, 13 - 14 грудня 2006 р. : матеріали конф. – Х., 2006. – С. 74.

10. Духопельников С. В. Метод дискретных особенностей в аксиально-симметричных волноведущих структурах с диэлектрическими вставками / С. В. Духопельников // Методы дискретных особенностей в задачах математической физики : труды международных школ-семинаров. – Орел : ОГУ, 2007. – Вып. 5. – С.48-52.

11. Духопельников С. В. Математична модель для розрахунку хвилеводу з патрубками на базі сингулярних інтегральних рівнянь / С. В. Духопельников // Современные проблемы математики и ее приложения в естественных науках и информационных технологиях, 23-25 марта 2007г. : сборник материалов международной научной конференции для студентов и аспирантов / Под ред. проф. Г.Н. Жолткевича. – Харьков: ХНУ, 2007. – С. 63-65.

12. Гандель Ю. В. Дифракция электромагнитных волн в аксиально-симметричных волноводах частично заполненных диэлектриком /

Ю. В. Гандель, С. В. Духопельников // International conference Dynamical System Modelling And Stability Investigation, 22-25 May 2007 : Thesis of Conference reports. – К., 2007. – . Р.181.

13. Духопельников С.В. Математические модели для расчета дифракции в цилиндрическом волноводе с патрубками частично заполненным диэлектриком / С. В. Духопельников // Вісник Харківського національного університету : Зб. наук. праць. – Харків, 2007. – № 775, – С. 140-151. – (Серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління; вип. 7)

14. Гандель Ю.В. Краевые задачи для уравнений Гельмгольца и Максвелла на многощелевых цилиндрических структурах и граничные интегральные уравнения на системе отрезков / Ю. В. Гандель, С. В. Духопельников // Крайові задачі для диференціальних рівнянь : Зб. наук. праць. – Чернівці : Прут, 2008. – Вип. 16. – С. 264-293.

15. Гандель Ю.В. Математическая модель дифракции монохроматической волны на идеально проводящем кольцевом волноводе с продольными щелями, заполненным диэлектриком / Ю. В. Гандель, С. В. Духопельников // Вісник Харківського національного університету : Зб. наук. праць. – Харків, 2008. – № 809, – С. 42-59. – (Серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління; вип. 9)

16. Гандель Ю.В. Математическая модель дифракции на диэлектрическом цилиндрическом слое с границей, частично состоящей из идеально проводящих поверхностей / Ю. В. Гандель, С. В. Духопельников // Дванадцята міжнародна наукова конференція імені академіка М. Кравчука, 15-17 трав. 2008 р. : матеріали конф. – К., 2008. – С. 84.

АНОТАЦІЯ

Духопельников С.В. Математичні моделі багатощілинних антен та аксіально-симетричних гофрованих хвилеводів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, 2009.

В дисертаційній роботі вперше розроблено математичні моделі для прямих кругових циліндричних антен з скінченною кількістю подовжніх щілин або для кругових циліндричних антен з подовжніми щілинами та вкладеним круговим ідеально провідним циліндром, у випадках ТЕ- та ТМ-хвиль. Також вперше розроблені математичні моделі для аксіально-симетричних хвилеводів, які мають скінченну кількість гофр або патрубків з внутрішньою частиною, заповненою діелектриком.

Задачі дифракції зведені до граничних гіперсингулярних інтегральних рівнянь для випадків ТЕ-хвиль для щілинних антен, і граничних сингулярних

інтегральних рівнянь для ТМ-хвиль для щілинних антен та у випадку аксіально-симетричних хвильоводів з неоднорідностями.

На основі побудованих математичних моделей розроблені комп'ютерні алгоритми, на базі яких проведено чисельний аналіз для широких діапазонів параметрів структури.

Побудовані математичні моделі дозволяють оптимізувати технічні характеристики розроблених антен та хвильоводів, фільтрів та лінійних прискорювачів, що є необхідним для проектування та побудови сучасних пристроїв радіоелектроніки.

Ключові слова: математичні моделі, метод дискретних особливостей, сингулярні та гіперсингулярні інтегральні рівняння, щілинні антени, аксіально-симетричні хвильоводи.

АННОТАЦИЯ

Духопельников С.В. Математические модели многощелевых антенн и аксиально-симметричных гофрированных волноводов. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, 2009.

В диссертационной работе впервые построены математические модели для прямых круговых цилиндрических антенн с конечным числом щелей или для круговых цилиндрических антенн с продольными щелями и вложенным идеально проводящим цилиндром. Получены граничные гиперсингулярные интегральные уравнения для случая ТЕ-волн и сингулярные интегральные уравнения для случая ТМ-волн. Построены дискретные математические модели на базе гиперсингулярных и сингулярных интегральных уравнений численными методами дискретных особенностей, при этом использованы квадратурные формулы интерполяционного типа, которые сведены к системам алгебраических уравнений. Для численной реализации дискретной математической модели разработаны компьютерные алгоритмы и проведен численный анализ, который показал устойчивость методов и быструю сходимость. В диссертационной работе приведены графики зависимостей поперечника полного рассеяния от волнового числа, а также приведены поля в ближней и дальней зоне. На основе полученных результатов возможна оптимизация новых устройств на базе щелевых антенн.

Проведено сравнение результатов для случая излучения цилиндрической волны из продольных щелей, которые получены методами основанными на сингулярном и гиперсингулярном интегральном уравнении на базе одной структуры.

Построены математические модели для аксиально-симметричных волноводов с конечным числом гофр или патрубков, заполненных

диэлектриком. Построены сингулярные интегральные уравнения для случаев ТЕ- и ТМ-волн, и с помощью метода дискретных особенностей получены системы алгебраических уравнений. На базе построенных моделей разработаны компьютерные алгоритмы и проведен численный анализ. Построены графики зависимостей коэффициентов матрицы рассеяния от волнового числа.

Ключевые слова: математические модели, метод дискретных особенностей, сингулярные и гиперсингулярные интегральные уравнения, щелевые и аксиально-симметричные волноводы.

ABSTRACT

S.V. Dukhopelnykov. Mathematical models of multislot antennas and of axially symmetrical corrugated waveguides - Manuscript.

Technics candidate's thesis on the speciality 01.05.02 – Mathematical Modelling and Computational Approachs. V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2009.

In the thesis mathematical models are developed for the first time for straight circular cylindrical antennas with the finite number of longitudinal slits or for circular cylindrical antennas with longitudinal slits and enclosed circular perfectly conducting cylinder, in the cases of TE- & TM-waves. Also mathematical models are developed for the first time for axially symmetrical waveguides which have a finite number of corrugations and nipples with the interior filled by dielectric.

The problems of diffraction are reduced to the boundary hypersingular integral equations for the cases of TE-waves for slot antennas, and to the boundary singular integral equations for the cases of TM-waves for slot antennas and in the cases of axially symmetrical waveguides with heterogeneities.

In terms of the developed mathematical models computer algorithms are built on basis of which numerical analysis was held for wide range of parameters of the structure.

The developed mathematical models allow to optimize technical characteristics of the developed antennas and waveguides, filters and linear accelerators what is necessary for projecting and building of the modern radioelectronic devices.

Key words: mathematical models, method of discrete traits, singular and hypersingular integral equations, slot antennas, axially symmetrical waveguides.

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Підписано до друку 09.06.2009 р. Формат видання 145x215.
Формат паперу 60x90/16. Папір офсетний. Друк – ризографія.
Ум.-друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Зам. № 03-06/09

Надруковано Комп'ютерно-копіювальний центр. ФО-П Мізітов Е.К.
Свідоцтво № 930259 від 28.02.2003 р.
61022 , м. Харків, вул. Сумська, 39, к. 16