

УДК 621.396.674

**НЕЙРОННА МОДЕЛЬ ШИРОКОСМУГОВОЇ ПРОФІЛЬОВАНОЇ ЩІЛИННОЇ АНТЕНИ**

*Мазуркевич Г. М.<sup>1</sup>, магістрант; Василенко Д. О.<sup>2</sup>, к. т. н., асистент*  
*<sup>1</sup>Національний технічний університет України*  
*«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*  
*<sup>2</sup>ТОВ НВП Аеротехніка-МЛТ, Київ, Україна*

**NEURAL MODEL FOR ULTRAWIDEBAND TAPERED SLOT ANTENNA**

*Hanna Mazurkevych<sup>1</sup>, Undergraduate Student; Dmytro Vasylenko<sup>2</sup>, PhD, Assistant*  
*<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine*  
*<sup>2</sup>Aerotechnica-MLT”LTD*

В умовах розвитку сучасної техніки необхідними є антени, що поєднують в собі мініатюрність, інтегрованість, простоту конструкції та виробництва зі сталим осьовим випромінюванням в смузі частот з коефіцієнтом перекриття більше 100%. Таким вимогам повністю задовольняють профільовані щілинні антени, зокрема антена Вівальді. Існує потреба в проектуванні даних антен для використання у таких сферах як радіоастрономія, радіолокація (в тому числі в радарях для визначення підземних об'єктів), радіомоніторинг, широкосмугові системи зв'язку, медицина (використовується в томографах, пристроях для виявлення злоякісних пухлин тощо) [1-3], зокрема, у діапазоні частот 3,1 – 10,6 ГГц, який нещодавно відкрито для широкого використання.

Синтез профільованої щілинної антени для заданого діапазону частот із заданими характеристиками вимагає проведення великої кількості розрахунків у програмах точного електродинамічного розрахунку (наприклад, CST Microwave Studio), оскільки аналітичної моделі таких антен не існує. У [5] наведені результати синтезу плоскої дипольної антени типу «метелик» (bow-tie) нейронно-генетичним методом, модель антени для якої створена на основі багат шарового перцептронну. Профіль антени у [5] представлено кусочно-лінійною апроксимацією, а нейронна модель антени представляє залежність коефіцієнта відбиття і коефіцієнта спрямованої дії антени типу «метелик» від координат точок профілю. Похибка створеної моделі не перевищує 10%. Комплементарність антени типу «метелик» і профільованої щілинної антени дозволяє застосувати методику дослідження [5] для створення моделі профільованої щілинної антени.

У представленій роботі визначено параметри нейронної мережі, яка моделює коефіцієнт відбиття та коефіцієнт підсилення профільованої щілин-

ної антени із найменшою похибкою, використовуючи невелику кількість тренувальних даних.

### Результати моделювання

Розглянемо профільовану щілинну антену (ПЩА), профіль якої апроксимовано п'ятьма точками (рис. 1). Антена виконана за друкованою технологією з однієї сторони діелектричної основи. Максимальні розміри антени  $L = 100$  мм,  $H = 20$  мм, товщина діелектричної основи  $0,762$  мм, а її діелектрична проникність  $\epsilon = 2,17$ . Для забезпечення стабільності параметрів антени на кінцях діапазону, моделювання здійснюється у діапазоні частот  $3\text{--}11$  ГГц (робочий діапазон складає  $3,1\text{--}10,6$  ГГц). Максимальна довжина  $100$  мм відповідає довжині хвилі на частоті  $3$  ГГц. При такій довжині

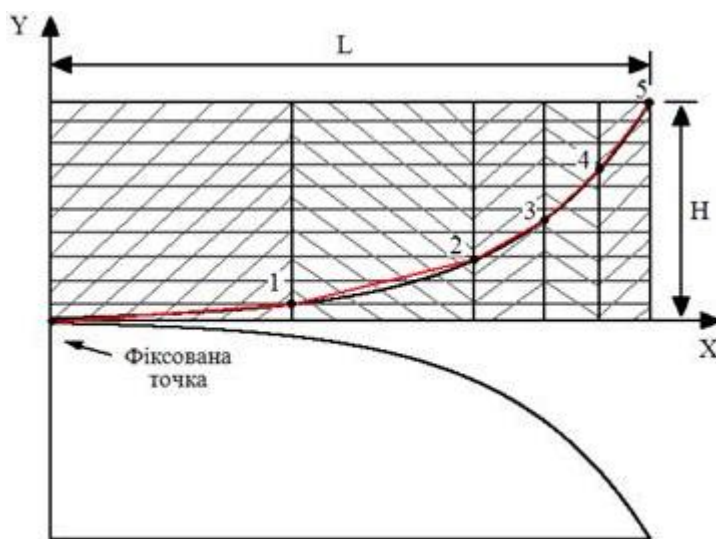


Рис. 1. Профільована щілинна антенна з кусочно-лінійним профілем

ще можна розглядати антену як профільовану щілинну антену з випромінюванням уздовж осі  $X$ . Дуже часто ПЩА використовується як елемент скануючої фазованої антенної решітки. При скануванні в межах  $\pm 20\text{--}25^\circ$  максимальна відстань між елементами, а отже, і максимальний розмір елемента повинен бути менше  $20$  мм (для частоти  $10,6$  ГГц).

На основі емпіричних досліджень встановлено, що для створення нейронної моделі ПЩА достатньо тренувальних даних в обсязі  $1500$  довільних профілів антени. Ще  $500$  довільних профілів, які не входять до тренувальних даних, використовується для аналізу точності нейронної мережі. У [5] на основі числових досліджень визначено, що залежність  $S_{11}$  та КСД від геометричних параметрів антени занадто складна, щоб бути реалізованою в одній нейронній мережі для всього частотного діапазону, та запропоновано використання модульної структури, в якій одна нейронна мережа відповідає за моделювання залежності  $S_{11}$  та/або КСД лише на одній частоті. Отже, кожна нейронна мережа має  $10$  вхідних нейронів, що відповідає п'яти  $X$ - та п'яти  $Y$ - координатам точок профілю, та один вихідний нейрон, який видає значення коефіцієнта відбиття або коефіцієнта підсилення на одній з частот. Точки профілю знаходяться в межах прямокутника із розмірами  $L \times H$ , який уздовж осі абсцис розбитий на  $5$  проміжків (на рисунку зображено штриховкою) із довжинами  $50; 25; 10; 10; 5$  мм. При цьому, кожна з точок профілю довільним чином розміщується в межах

свого проміжку і для підготовки тренувальних даних має 4 можливі еквідистантні позиції уздовж осі абсцис та 10 уздовж осі ординат. Нерівномірність довжини підобластей та їх розміщення вибрано з умови включення апріорної інформації про характеристики антени у модель. Так, діаграма спрямованості створюється не струмами на поверхні антени, а безпосередньо розподілом поля у розкритті щілини. Для забезпечення узгодження важливим є весь профіль щілини, однак вхідна частина профілю є, як правило, достатньо плавною. Отже, щільнішого розбиття потребує кінцева частина профілю.

Повна нейронна модель ПЩА містить 40 нейронних мереж, кожна з яких описує залежність коефіцієнта відбиття або коефіцієнта підсилення антени на одній із 20 частот у межах робочого діапазону частот (крок складає 0,42 ГГц). При цьому, враховуючи досвід [6], дослідження швидкості і якості тренування проводиться не на всіх 20 частотах діапазону, а вибірково на 6 частотах всередині та на краях діапазону. Для тренування одного профілю відводимо 5 спроб. Такий спосіб тренування нейронної мережі збільшує ймовірність знаходження глобального екстремуму, тобто зменшення помилок.

На сьогоднішній день існує велика кількість різних нейронних мереж, які відрізняються між собою кількістю прихованих шарів, типом нейронів (лінійні, нелінійні), видами зв'язків між нейронами, способами проходження сигналу, способами корекції помилок тощо [7]. Для визначення оптимальної нейронної мережі необхідно визначити оптимальну для даної задачі топологію, функцію активації нейронів та тренування мережі. На основі порівнянь переваг і недоліків різних нейронних мереж, наведених в [7], для подальших досліджень обираємо багатошаровий перцептрон, оскільки він може представляти будь-яку складну функцію, проявляючи при цьому глобальні узагальнюючі властивості. Для моделі антени такою складною функцією є залежність параметрів антени (коефіцієнт відбиття, коефіцієнт підсилення тощо) від її геометрії [6].

Ґрунтуючись на дослідженні [6] для визначення найкращої функції тренування багатошарового перцептрона використано топологію  $10 \times 10 \times 10 \times 10 \times 1$  (3 прихованих шари по 10 нейронів у кожному, 10 вхідних нейронів і один вихідний нейрон) і функцію активації у вигляді гіперболічного тангенсу, тренувальні дані представлено в лінійному масштабі для  $S_{11}$  і у децибелах для коефіцієнта підсилення. В табл. 1 наведені середні по частоті результати тренування нейронної мережі для чотирьох різних функцій тренування для коефіцієнта відбиття і коефіцієнта підсилення, відповідно. Для порівнянь було обрано функції тренування на основі регуляризації Байєса, градієнтного спуску, методу Ньютона та методу оптимізації Левенберга-Марквардта.

<b>Таблиця 1</b>	Функція тренування	Мін. похибка мережі	Середня похибка мережі	Мін. похибка мережі, %	Середня похибка мережі, %	Час тренування, с
Коефіцієнт відбиття	Метод Левенберга-Марквардта із регуляризациєю Байєса	0,028	0,032	14,4	16,8	39,6
	Гradientний спуск	0,086	0,097	44,1	49,3	45,9
	Метод Ньютона	0,036	0,040	18,5	20,9	98,1
	Метод оптимізації Левенберга-Марквардта	0,049	0,067	25,9	35,5	16,6
Коефіцієнт підсилення	Метод Левенберга-Марквардта із регуляризациєю Байєса	0,199	0,243	5,8	8,2	52,6
	Гradientний спуск	0,710	0,823	21,1	26,3	31,8
	Метод Ньютона	0,222	0,254	6,7	8,1	72,1
	Метод оптимізації Левенберга-Марквардта	0,364	0,859	11,7	28,6	15,7

З табл. 1. видно, що найменшу похибку забезпечує функція тренування на основі методу оптимізації Левенберга-Марквардта із використанням регуляризациї Байєса.

У табл. 2 наведено середні по частоті результати тренування нейронної

<b>Таблиця 2</b>	Функція активації	Мін. похибка мережі	Середня похибка мережі	Мін. похибка мережі, %	Середня похибка мережі, %	Час тренування, с
Коефіцієнт відбиття	Тангенс гіперболічний	0,024	0,029	13,3	15,4	45,7
	Логістична функція	0,023	0,025	12,6	13,6	84,4
Коефіцієнт підсилення	Тангенс гіперболічний	0,167	0,181	4,3	4,7	62,9
	Логістична функція	0,169	0,514	4,4	4,8	93,7

мережі для двох різних функцій активації мережі для коефіцієнта відбиття і коефіцієнта підсилення антени Вівальді. Для порівняння обрано логістичну функцію та функцію у вигляді гіперболічного тангенсу.

Порівнюючи дані з табл. 2., бачимо, що похибки мережі для обох функцій активації відрізняються незначним чином. При цьому, час тренування значно менший для гіперболічного тангенсу.

В табл. 3 приведені середні по частоті результати тренування нейронної мережі для різних топологій мережі при моделюванні характеристик антени. На основі досвіду [5, 6] припускаємо, що мережа має не більше трьох

прихованих шарів з кількістю нейронів в кожному шарі не більше 30. Загалом тренування проводилось для 15 різноманітних топологій з одним, двома та трьома прихованими шарами. При цьому, в табл. 3 наведені найбільш репрезентативні результати тренувань.

Таблиця 3

Параметр антени	Топологія мережі	Мін. похибка мережі	Середня похибка мережі	Мін. похибка мережі, %	Середня похибка мережі, %	Час тренування, с
Коефіцієнт відбиття	10x10x1	0,029	0,031	15,5	16,1	13,9
	10x30x1	0,023	0,024	12,6	13,9	56,7
	10x20x10x1	0,023	0,023	11,9	12,6	65,6
	10x30x30x1	0,023	0,027	12,5	15,4	547,5
	10x10x10x10x1	0,024	0,029	13,3	15,4	45,5
Коефіцієнт підсилення	10x10x1	0,224	0,238	6,1	6,7	23,3
	10x30x1	0,160	0,173	4,1	4,6	67,3
	10x20x10x1	0,154	0,163	4,1	4,2	73,7
	10x30x30x1	0,159	0,345	3,9	11,5	575,4
	10x10x10x10x1	0,167	0,181	4,3	4,7	62,9

Як бачимо, із ускладненням топології похибка нейронної мережі зменшується і для топології 10x20x10x1 досягає свого мінімуму. При цьому, подальше збільшення кількості прихованих шарів та кількості нейронів у кожному шарі, призводить до зростання похибки нейронної мережі для обох характеристик антени.

### **Висновки**

При моделюванні залежності коефіцієнта відбиття і коефіцієнта підсилення профільованої щілинної антени від геометрії щілини найменшу похибку забезпечує багатошаровий перцептрон з двома прихованими шарами, які складаються з 20 та 10 нейронів відповідно. При цьому використовується функція активації у вигляді гіперболічного тангенса, а тренування здійснюється функцією на основі методу оптимізації Левенберга-Марквардта із використанням регуляризації Байєса.

Для коефіцієнта відбиття досягнуто абсолютної похибки 0,023 та відносної похибки 12,6 %. Для коефіцієнта підсилення досягнуто абсолютної та відносної похибок 0,163 і 4,2%, відповідно.

### **Перелік посилань**

1. Ostadrahimi M. A novel microwave tomography system based on the scattering probe technique / M. Ostadrahimi, P. Mojabi, S. Noghianian // [IEEE Transactions on instrumentation and measurement](#). — 2012. — Vol. 61, № 2. — P. 379—390.
2. Reid E. W. A 324-element Vivaldi antenna array for radio astronomy instrumentation / E. W. Reid, L. Ortiz-Balbuena, A. Ghadiri, K. Moez // [IEEE Transactions on instrumentation and measurement](#). — 2012. — Vol. 61, № 1. — С. 241—249.
3. Schaubert D. H. Endfire tapered slot antennas on dielectric substrates / D. H. Schaubert, E. L. Kollberg, T. Korzeniowski, T. Thungren, J. Johansson, K. S. Yngvesson //

[IEEE Transactions on antennas and propagation](#). — 1985. — Vol. SP — 33, № 12. — P. 1392—1400.

4. Christodoulou C. Applications of neural networks in electromagnetics / C. Christodoulou, M. Georgiopoulos. — Norwood: Artech House, 2001. — 515 p.

5. Дубровка Ф. Ф. Синтез ультраширокопосмугової планарної дипольної bow-tie антени нейронно-генетичним методом / Ф.Ф. Дубровка, Д.О. Василенко // [Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування](#). — 2008. — № 37. — С. 53—60.

6. Дубровка Ф. Ф. Конструктивный синтез планарных антенн с помощью природных алгоритмов оптимизации / Ф. Ф. Дубровка, Д. О. Василенко // [Известия вузов. Радиоэлектроника](#). — 2009. — Т. 52, № 4. — С. 3—22.

7. Zhang Q. J. Neural networks for RF and microwave design / Q. J. Zhang, K. C. Gupta. — Norwood: Artech House, 2000. — 369 p.

#### References

1. Ostadrahimi M., Mojabi P. and Noghianian S. (2012) A novel microwave tomography system based on the scattering probe technique. [IEEE Transactions on instrumentation and measurement](#). Vol. 61, No 2, pp. 379–390.

2. Reid E. W., Ortiz–Balbuena L., Ghadiri A. and Moez K. (2012) A 324–element Vivaldi antenna array for radio astronomy instrumentation. [IEEE Transactions on instrumentation and measurement](#). Vol. 61, No 1. pp. 241–249.

3. Schaubert D. H., Yngvesson K. S., and Thomas L. (1985) Endfire tapered slot antennas on dielectric substrates. [IEEE Transactions on antennas and propagation](#). Vol. SP–33, No 12. pp. 1392–1400.

4. Christodoulou, C. and Georgiopoulos, M. (2001) *Applications of neural networks in electromagnetics*. Norwood: Artech House, 515 p.

5. Dubrovka, F. F. and Vasylenko, D. O. (2008) Synthesis of ultrawideband planar dipole bow-tie antenna by neural-genetic method. [Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparato-buduv.](#) no. 37, pp. 53-60. (in Ukrainian)

6. Dubrovka F. F. and Vasylenko D. O. (2009) Synthesis of UWB planar antennas by means of natural optimization algorithms. [Radioelectronics and Communications Systems](#). Vol. 52, No 4, pp. 3-22.

7. Zhang Q. J. and Gupta K. C. (2000) *Neural networks for RF and microwave design*. Norwood, Artech House, 369 p.

*Мазуркевич Г. М., Василенко Д. О. Нейронна модель широкопосмугової профільованої щілинної антени. У роботі наведено аналіз топології і параметрів нейронної мережі для моделювання коефіцієнта відбиття і коефіцієнта підсилення широкопосмугової профільованої щілинної антени. Знайдені оптимальні параметри забезпечують середню похибку 0,023 для коефіцієнта відбиття і 0,163 для коефіцієнта підсилення.*

**Ключові слова:** антена, параметри антени, оптимальна нейронна мережа, антена Вівальді.

*Мазуркевич А. Н., Василенко Д. А. Нейронная модель широкополосной профилированной щелевой антенны. В работе представлено анализ топологии и параметров нейронной сети для моделирования коэффициента отражения и коэффициента усиления широкополосной профилированной щелевой антенны. Найденные оптимальные параметры обеспечивают среднюю ошибку 0,023 для коэффициента отражения и 0,163 для коэффициента усиления.*

**Ключевые слова:** антенна, параметры антенны, оптимальная нейронная сеть, антенна Вивальди.

*Mazurkevych H. M., Vasylenko D. O. Neural model of wideband tapered slot antenna.*

*This paper presents an analysis of topology and parameters of neural network for simulation reflection coefficient and gain of wideband tapered slot antenna.*

*Simulation results. Neural model of tapered slot antenna was created. This model contains 40 neural networks for simulation reflection coefficient and gain of tapered slot antenna in frequency range 3,1 – 10,6 GHz.*

*Conclusions. The optimal parameters were found. Optimal training function is Levenberg-Marquardt backpropagation. Optimal activation function is hyperbolic tangent. Optimal topology of neural network for simulation reflection coefficient and gain of tapered slot antenna is 10x20x10x1. These optimal parameters provide an average error of 0,023 for reflection coefficient and 0.163 for gain.*

**Keywords:** *antenna, antenna parameters, optimal neural network, Vivaldi antenna*