

## СИНТЕЗ КВАЗІСОСЕРЕДЖЕНИХ РЕАКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ КРИСТАЛОПОДІБНИХ СТРУКТУР ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Ковбич А. О., студент; Адаменко В. О.; Адаменко Ю. Ф., к. т. н.  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Фільтри на основі кристалоподібних структур (КС) широко використовуються при проектуванні сучасних НВЧ пристроїв, і хоч вони мають значне теоретичне підґрунтя під собою, але їх моделювання є досить витратним процесом з точки зору часу та машинних ресурсів. В даній роботі представлено результати використання штучних нейронних мереж (ШНМ) для синтезу конструкцій КС (наприклад, з [1]) за заданими частотними характеристиками (ЧХ) з метою пришвидшення процесу проектування фільтрів.

У загальному випадку ємнісна чи індуктивна електромагнітно-кристалічна неоднорідність (ЕК) [1] є реактивним елементом, на основі якої можна спроектувати фільтр (рис. 1), що описується певним набором параметрів ЧХ. Ці параметри подаються на вхід ШНМ, а як результат роботи отримуємо геометричні параметри ключового елемента структури. Для ємнісної ЕК-неоднорідності основними показниками є діаметр зони металізації та товщина діелектрика під цією зоною. Для індуктивної ЕК-неоднорідності — діаметр наскрізного отвору та навісного провідника над ним.

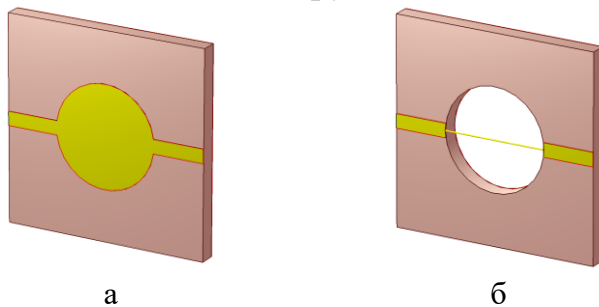


Рисунок 1. Зовнішній вигляд ємнісної (а) та індуктивної (б) ЕК-неоднорідності

Параметри ємнісної та індуктивної ЕК-неоднорідностей: матеріал підкладки Rogers RO3010 з товщиною 1,27 мм, товщиною металізації 0,035 мм; ширина 50-омного сигнального провідника 1,1 мм; діелектрик має форму квадрату, розміри якого у два рази більші діаметру ЕК-неоднорідності. Для ємнісної ЕК-неоднорідності діаметр змінювався в межах 6 – 10 мм з кроком 0,2 мм, товщина діелектрика — в межах 0,17 – 1,17 мм з кроком 0,05 мм. Для індуктивної ЕК-неоднорідності діаметр отвору змінювався в межах 6 – 10 мм з кроком 0,4 мм, діаметр навісного дрогового провідника — 0,02 – 0,5 мм з кроком 0,04 мм. Таким чином, для навчання ШНМ було отримано ЧХ для 441 варіанта ємнісної та 143 варіантів індуктивної ЕК-неоднорідності.

ШНМ для ємнісної ЕК-неоднорідності буде шукати відповідність між наступними даними:

Моделювання структур виконувалось за допомогою програмного пакету CST Microwave Studio, що дозволило отримати велику кількість тренувальних даних для ШНМ.

$$T_{\min}, F_{\min}, F_1, F_2, F_0, F_{1(-3dB)}, F_{2(-3dB)} \rightarrow \text{ШНМ} \rightarrow d_c, b$$

де  $T_{\min}$  та  $F_{\min}$  — мінімальне значення коефіцієнта проходження та відповідна йому частота;  $F_1$  та  $F_2$  — частоти мінімумів коефіцієнта відбиття;  $F_0$  — середнє значення між частотами  $F_1$  та  $F_2$ ;  $F_{1(-3dB)}$  та  $F_{2(-3dB)}$  — частоти, які відповідають смузі  $-3$  дБ по коефіцієнту відбиття;  $d_c$  та  $b$  — діаметр отвору та товщина діелектрика ЕК-неоднорідності.

Для індуктивної ЕК-неоднорідності відповідність буде знаходитись між наступними даними:

$$T_{\min}, F_{\min}, F_1, F_2, F_0, F_{1(-3dB)}, F_{2(-3dB)} \rightarrow \text{ШНМ} \rightarrow d_L, d_p$$

де  $d_L$  — діаметр отвору;  $d_p$  — діаметр навісного провідника.

Сама ШНМ була створена за допомогою мови програмування Python та додаткових бібліотек для цієї мови програмування, а саме CNTK та Keras. Даний набір прикладного програмного забезпечення дозволяє створити ШНМ будь-якої складності для різноманітних задач [2]. Обрано багатошарову нейронну мережу (глибока ШНМ) прямого поширення, наступної архітектури: вхідний шар — 1000 нейронів (Жорстка сигмоїда), перший прихований — 500 (Гіперболічний тангенс), другий — 250 (Сигмоїда), вихідний — 2 (Лінійна).

Методом оптимізації обрано стохастичний градієнтний спуск з моментом. Тренування виконувалося протягом 1600 епох для ємнісної неоднорідності та протягом 20000 епох для індуктивної. Після експериментальних досліджень така архітектура була обрана як найбільш оптимальна з точки зору часу та швидкості навчання.

Результатом навчання стали дві ШНМ для обох структур, кожна з яких може генерувати геометрію потрібної ЕК-неоднорідності за заданими параметрами частотних характеристик.

Перевірка роботи ШНМ виконувалась наступним чином: у ШНМ вводились параметри ЧХ бажаного фільтра, отримувались параметри геометрії, яка моделювалась у CST Microwave Studio, надалі змодельована ЧХ порівнювались з бажаною ЧХ. Так, для ШНМ, яка моделює ємнісну ЕК-неоднорідність, задано наступні параметри ЧХ фільтра та отримано результати:

$$-16; 3; 0,1; 6,3; 3,2; 0,3; 6 \rightarrow \text{ШНМ} \rightarrow 7,9; 0,27$$

Тобто ШНМ запропонувала структуру, у якій діаметр ЕК-неоднорідності складав 7,9 мм, товщина діелектрика під неоднорідністю — 0,27 мм. На рис. 2 наведено результати моделювання цієї структури в CST Microwave Studio. Результат моделювання підтвердив високу точність даного способу синтезу, так, на заданих частотах зрізу  $F_{1(-3dB)}$  та  $F_{2(-3dB)}$  отри-

мано послаблення  $-3,32$  та  $-2,81$  дБ відповідно; на  $F_{\min}$  отримано послаблення  $-16,2$  дБ.

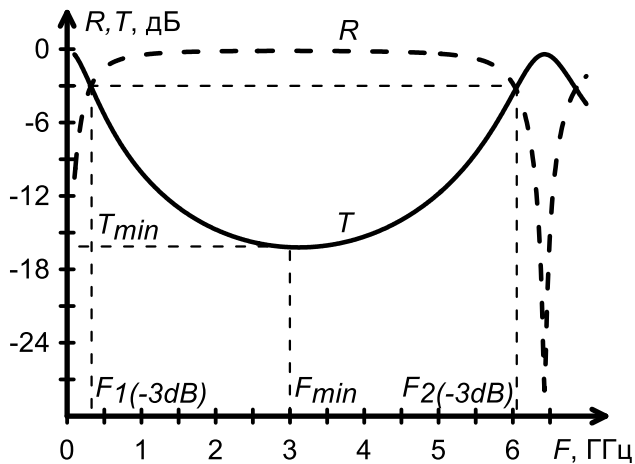


Рисунок 2 — Результати моделювання отриманої структури емнісної неоднорідності

Витрати часу для створення навчальної вибірки та навчання ШНМ склали близько 12 годин на кожну неоднорідність, що більше, ніж зазвичай потрібно на моделювання однієї структури в CST Microwave Studio. Проте використання останньої потребує порівняно високої кваліфікації робітника. Навчена ШНМ дозволяє вираховувати потрібну геометрію неоднорідності

практично миттєво, при цьому не потребує специфічних знань для використання CST Microwave Studio, як, власне, і самої програми, що є актуальним з погляду на її вартість. Подальші дослідження варто спрямувати на розгляд можливості комбінування навчених ШНМ у більш складні структури, які міститимуть різні неоднорідності та проведення експериментальних досліджень для підтвердження теоретичних моделей.

#### Перелік посилань

1. Биденко П. С. Квазисосредоточенные реактивные элементы на основе кристаллоподобных неоднородностей / П. С. Биденко, Е. А. Нелін, А. І. Назарько, Ю. Ф. Адаменко // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника — Т. 58, — №11 (2015). — С. XX—XX — <https://doi.org/10.20535/S0021347015110059>

2. Benchmarking CNTK on Keras: is it Better at Deep Learning than TensorFlow? — Режим доступу: <http://minimaxir.com/2017/06/keras-cntk/> — Назва з екрану.

#### Анотація

Запропоновано та практично підтверджено використання штучних нейронних мереж для синтезу квазисосредоточенных реактивных элементов на основе кристаллоподобных структур.

**Ключові слова:** кристаллоподібні структури, електромагнітнокристалічні неоднорідності, штучна нейронна мережа.

#### Анотация

Предложено и подтверждено на практике использование искусственных нейронных сетей для синтеза квазисосредоточенных реактивных элементов на основе кристаллоподобных структур.

**Ключевые слова:** кристаллоподобные структуры, электромагнитнокристаллические неоднородности, искусственная нейронная сеть.

#### Abstract

The usage of artificial neural networks for the synthesis of quasi-concentrated reactive elements based on crystal-like structures are proposed and confirmed in practice.

**Keywords:** crystal-like structures, electromagnetic inhomogeneities, artificial neural network.