

О. М. Кузьменко

## ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОХВИЛЬОВИХ ПРИСТРОЇВ ЩОДО ОПОРІВ УВІМКНЕННЯ

*У статті проілюстровано визначення якості імітаційного моделювання з погляду надійності, валідності та адекватності отриманих результатів з метою визначення можливості впевненого використання запропонованої методики імітаційного моделювання щодо опорів увімкнення під час проектування пристроїв мікрохвильового діапазону.*

**Ключові слова:** імітаційне моделювання, мікрохвильовий пристрій, функціональна характеристика, надійність, адекватність, валідність.

### Вступ

Складність оцінювання якості імітаційного моделювання (ІМ) мікрохвильових пристроїв (МП) [1 – 3] щодо параметрів увімкнення полягає в неможливості загалом підтвердити отримані в термінах матриці розсіювання результати безпосередніми експериментальними дослідженнями, котрі можливі лише під час дослідження МП із використанням у якості навантажень, підключених до їхніх входів/виходів, стандартизованих трактів [4]. Водночас визначення рівня якості результатів ІМ (а отже, і відповідних математичних моделей, на підставі яких це моделювання здійснюється) має велике значення для впевненого та ефективного їхнього використання у практичній діяльності щодо реалізації як МП, так і радіоелектронних систем (РЕС), де такі пристрої використовують.

Загалом ІМ має відповідати визначеним вимогам, які доцільно розділити на три групи, що характеризують надійність, валідність та адекватність отриманих на підставі ІМ результатів:

- надійність ІМ характеризує ступінь довіри до отриманих результатів з погляду можливості їхнього відтворення за заданих умов із заданою точністю за визначеної ймовірності;

- валідністю ІМ характеризуватимемо ступінь упевненості в тому, що отримані результати відображають саме ті закономірності, які є предметом дослідження, тобто вказують на залежність функціональних характеристик (ФХ) МП саме від параметрів увімкнення;

- адекватністю ІМ характеризуватимемо відповідність отриманих результатів реальним процесам та залежностям, що проявляються під час увімкнення МП до реального тракту (тобто відповідність результатів ІМ практиці).

Поділ задачі оцінювання якості ІМ на три вказані складники не суперечить основним засадам реалізації процесу ІМ та водночас дозволяє розглядати кожен із цих складників окремо.

### Надійність результатів імітаційного моделювання

Категорія надійності результатів ІМ визначає ступінь довіри до отриманих статистичних показників (математичного сподівання, дисперсії, середньоквадратичного відхилення тощо) ФХ досліджуваного МП. Розв'язання цієї задачі пов'язане з реалізацією відомих [5] алгоритмів визначення довірчих інтервалів для статистичних показників, відібраних для відображення результатів ІМ.

Отримані результати ІМ показують, що статистичні показники та їхні довірчі інтервали залежать не лише від кількості реалізацій чисельного експерименту, а й від значень ФХ МП. Причому чим ширший інтервал змінень значень ФХ, тим більшої варіативності зазнають відповідні довірчі інтервали. Як показують розрахунки, наприклад, за ІМ частотного фільтра,

параметри ФХ (амплітудно-частотних характеристик) якого змінюються в широких межах, отримання прийняттого значення довірчого інтервалу за різних значеннях частоти потребує суттєво відмінної (у десятки разів) кількості реалізацій відповідного чисельного експерименту.

На рис. 1 як приклад наведено залежності довірчого інтервалу  $I$  математичного сподівання  $M[L]$  величини  $L$  від кількості реалізацій  $K$  чисельного експерименту за різних первісних значень  $L$  (тобто тих значень, які спостерігаються під час підключення до МП узгоджених навантажень). При цьому (як і в подальших розрахунках) довірчу ймовірність приймаємо такою, що дорівнює 0,95.

Із рис. 2 видно, що збільшення кількості чисельних експериментів, звичайно, зменшує величину довірчого інтервалу, але на цю величину суттєво впливає й первісне значення  $L$ . Причому довірчий інтервал менший за більших первісних значень  $L$ . Зазначимо, що за  $K > 60$  зменшення довірчого інтервалу практично припиняється.

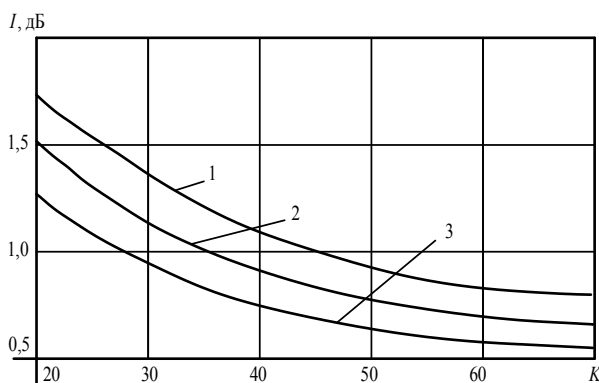


Рис. 1. Залежність довірчого інтервалу математичного сподівання величини  $L$  від кількості реалізацій чисельного експерименту за первісних значень  $L = 0$  дБ (крива 1);  $L = 3$  дБ (крива 2);  $L = 10$  дБ (крива 3)  
( $K_{U_{\max 1}} = K_{U_{\max 2}} = 2$  за  
 $-\pi/2 \leq \psi_i \leq \pi/2; i = 1, 2$ )

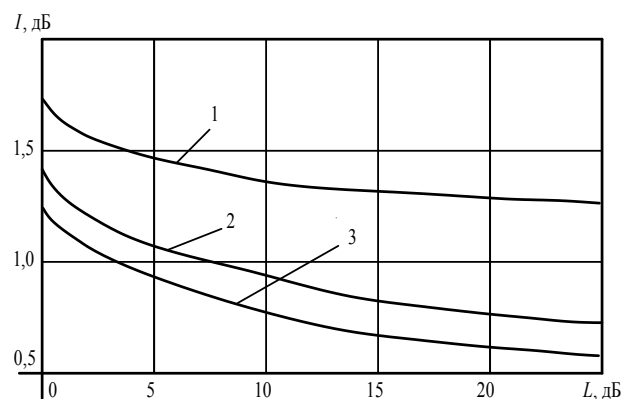


Рис. 2. Залежність довірчого інтервалу математичного сподівання величини  $L$  від первісних значень цієї величини за кількості реалізацій чисельного експерименту 20 (крива 1), 30 (крива 2) та 40 (крива 3)  
( $K_{U_{\max 1}} = K_{U_{\max 2}} = 2$  за  
 $-\pi/2 \leq \psi_i \leq \pi/2; i = 1, 2$ )

Чисельні розрахунки показують аналогічні залежності і щодо величини довірчого інтервалу середньоквадратичного відхилення коефіцієнта передачі чотириполосника.

Зазначимо, що наведене залишається справедливим і для коефіцієнта відбиття, а саме: довірчі інтервали статистичних параметрів коефіцієнта відбиття більші за його менших первинних значень.

Отже, для раціональної організації процесу ІМ було б доречним задавати величину довірчого інтервалу залежно від значення ФХ МП. За такого способу можна суттєво зменшити загальну кількість реалізацій чисельного експерименту, а отже, підвищити ефективність процесу без зниження статистичних показників щодо надійності.

Для розв'язання вказаної задачі з метою розрахунку математичного сподівання  $M$  та середньоквадратичного відхилення  $\sigma$  визначеного параметра МП пропонуємо використовувати рекурентні формули, які можна отримати на підставі відповідних співвідношень [5] для визначення вказаних параметрів:

$$M_{k+1} = \frac{kM_k + y_{k+1}}{k+1}; \quad (1)$$

$$\sigma_{k+1} = \sqrt{\frac{k}{k+1} \left[ \sigma_k^2 + \frac{(y_{k+1} - M_k)^2}{k+1} \right]}, \quad (2)$$

де  $M_0 = 0$ ;  $\sigma_0 = 0$ ;  $y_k, y_{k+1}$  – значення ФХ МП при  $k$ -му та  $(k+1)$ -му чисельному експерименті відповідно;  $M_k, \sigma_k = 0$  – визначені за результатами оброблення вибірки з  $k$  елементів математичне сподівання та середньоквадратичне відхилення ФХ відповідно;  $M_{k+1}, \sigma_{k+1} = 0$  – ті ж величини, але визначені за результатами вибірки з  $(k+1)$  елементів.

Використання співвідношень (1) та (2) дозволяє раціоналізувати процес ІМ, забезпечивши прийнятну величину довірчих інтервалів за варіативності значень ФХ МП. Для цього достатньо розрахунки вказаних інтервалів проводити одночасно з нарощуванням кількості реалізацій чисельного експерименту (починаючи, наприклад, з  $K$ -ї реалізації на кожному кроці або з періодичністю  $m$  реалізацій).

З урахуванням наведеного, алгоритм реалізації чисельного експерименту з дослідження впливу параметрів увімкнення на ФХ МП можна подати в такому вигляді:

- 1) відповідно до характеру використання МП визначити модель параметрів увімкнення;
- 2) прийняти  $M_0 = 0, \sigma_0 = 0$ ;
- 3) генерувати параметри увімкнення згідно з визначеною моделлю;
- 4) розрахувати шукані ФХ МП за отриманих значень параметрів увімкнення у його плечах;
- 5) отримані значення ФХ МП використати для визначення їхніх статистичних параметрів (математичних сподівань і середньоквадратичних відхилень) за співвідношеннями (1), (2);
- 6) виконувати пп. 3 – 5 до досягнення вибраної кількості  $K$  реалізацій;
- 7) починаючи з  $K$ -ї реалізації, з вибраною періодичністю  $m$ , розраховувати поточні значення довірчих інтервалів, вибравши заздалегідь прийнятні довірчі ймовірності;
- 8) за умови, що розраховані значення довірчих інтервалів не гірші за прийнятні, розрахунки припинити, у протилежному випадку – розрахунки повторюють, починаючи з п. 3.

### Валідність результатів імітаційного моделювання

Валідність отриманих результатів ІМ означає, що вони є саме тими результатами, для отримання яких і був реалізований відповідний чисельний експеримент і відображають саме ті закономірності, які є предметом дослідження.

Валідність результатів ІМ, отриманих на підставі пропонованих алгоритмів з введенням категорії псевдопристрою [3], можна довести аналізом їх збігу з результатами, отриманими іншими відомими алгоритмами (у межах прийнятих припущень) [6, 7].

Задачу визначення вхідного імпедансу чотириполюсника, навантаженого з боку вихідного плеча довільним імпедансом  $Z_n = R_n + jX_n$ , розв'язуватимемо в термінах матриці передачі класичної теорії кіл.

Для побудови матриці передачі псевдопристрою [3]  $\tilde{\mathbf{a}}$  розглядатимемо каскадне увімкнення досліджуваного чотириполюсника, заданого матрицею  $\mathbf{a}$ , та чотириполюсника, утвореного послідовним реактивним імпедансом, що збігається з реактивним складником імпедансу  $Z_n$ , тобто дорівнює  $-jX_n$ .

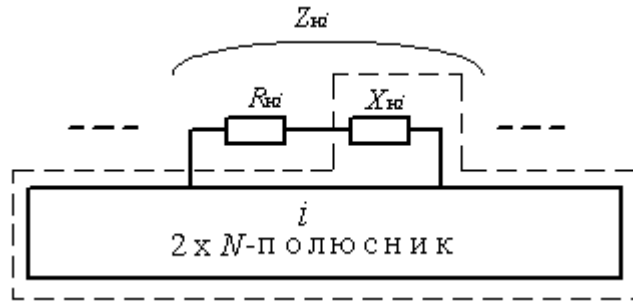


Рис. 3.  $2 \times N$ -полюсник, навантажений на комплексні імпеданси (пунктирна лінія вказує межі псевдопристрою)

Матрицю передачі чотириполюсника, утвореного імпедансом  $jX_n$ , визначають відповідно до [6, 7] як

$$\mathbf{a}_x = \begin{bmatrix} 1 & jX_n \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Отже, матриця передачі псевдопристрою  $\tilde{\mathbf{a}}$  матиме вигляд:

$$\tilde{\mathbf{a}} = \mathbf{a} \times \mathbf{a}_x = \begin{bmatrix} a_{11}^{(p)} & a_{12}^{(p)} \\ a_{21}^{(p)} & a_{22}^{(p)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & jX_n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^{(p)} & a_{12}^{(p)} + ja_{11}^{(p)}X_n \\ a_{21}^{(p)} & a_{22}^{(p)} + ja_{21}^{(p)}X_n \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де позначкою  $(p)$  позначені елементи матриці реального чотириполюсника.

Згідно з [6], вхідний імпеданс реального чотириполюсника з навантаженням  $Z_n$  визначають як

$$Z_{ex}^{(p)} = \frac{a_{11}^{(p)}Z_n + a_{12}^{(p)}}{a_{21}^{(p)}Z_n + a_{22}^{(p)}} = \frac{a_{11}^{(p)}R_n + a_{12}^{(p)} + ja_{11}^{(p)}X_n}{a_{21}^{(p)}R_n + a_{22}^{(p)} + ja_{21}^{(p)}X_n}. \quad (5)$$

Зважаючи на те, що  $Z_n^{(n)} = R_n$  та  $\tilde{\mathbf{a}}$  – матриця передачі псевдопристрою, із врахуванням (4) і (5) вхідний імпеданс псевдопристрою становитиме

$$Z_{ex}^{(n)} = \frac{a_{11}^{(n)}Z_n^{(n)} + a_{12}^{(n)}}{a_{21}^{(n)}Z_n^{(n)} + a_{22}^{(n)}} = \frac{a_{11}^{(p)}R_n + a_{12}^{(p)} + ja_{11}^{(p)}X_n}{a_{21}^{(p)}R_n + a_{22}^{(p)} + ja_{21}^{(p)}X_n} \quad (6)$$

(позначкою  $(n)$  позначені елементи матриці псевдопристрою).

Із (5) та (6) видно, що за умови формування псевдопристрою відповідно до рис. 3

$$Z_{ex}^{(p)} = Z_{ex}^{(n)}.$$

Отже, отримані вхідні імпеданси реального чотириполюсника, навантаженого на комплексний імпеданс, та псевдопристрою, навантаженого на імпеданс дійсного характеру (при цьому реактивний складник опору навантаження включено до складу МП), збігаються на аналітичному рівні. Це доводить валідність результатів моделювання, отриманих на основі введеної категорії псевдопристрою.

### Адекватність результатів імітаційного моделювання

Адекватність результатів ІМ характеризує їхню відповідність залежностям, яких набуватимуть ФХ МП за його включення до реального тракту.

Найявна на сьогодні вимірювальна апаратура та відповідні методики передбачають вимірювання функціональних характеристик мікрохвильових пристроїв виключно у

стандартизованих трактах. Виміряти ФХ МП за умови підключення до його входів/виходів довільних, а тим більше комплексних, навантажень загалом є неможливим. Тому й неможливим є усебічне експериментальне підтвердження отриманих результатів ІМ.

За таких умов адекватність результатів можна підтвердити не безпосередніми методами, а шляхом зведення задачі, яку розв'язують, до простіших. Так аналітичні розрахунки показують, що коефіцієнт відбиття від входу псевдопристрою повністю збігається з коефіцієнтом відбиття мікрохвильового пристрою, навантаженого на комплексний імпеданс.

Для підтвердження вищезазначеного наведемо доведення збігу матриць розсіювання потужностей, у термінах яких і визначені коефіцієнти відбиття, реального пристрою та псевдопристрою.

Відомо, що матрицю розсіювання потужності МП, навантаженого на довільний імпеданс, визначають на основі співвідношення [8]:

$$\tilde{\mathbf{S}}^{(v)} = \mathbf{F} \times [\mathbf{Z} - \mathbf{G}^\dagger] \times [\mathbf{Z} + \mathbf{G}]^{-1} \times \mathbf{F}^{-1}, \quad (7)$$

де

$$\mathbf{F} = \text{diag} \left[ \frac{1}{2\sqrt{\text{Re} Z_{ref1}}}, \frac{1}{2\sqrt{\text{Re} Z_{ref2}}}, \dots, \frac{1}{2\sqrt{\text{Re} Z_{refN}}} \right],$$

$$\mathbf{G} = \text{diag}[Z_{ref1}, Z_{ref2}, \dots, Z_{refN}],$$

$\mathbf{Z}$  – матриця імпедансів МП.

Референсні імпеданси загалом мають комплексний характер, тобто визначаються як

$$Z_{ref i} = R_{ref i} + jX_{ref i}. \quad (8)$$

Із використанням (8) та відомих математичних положень:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{S}}^{(v)} &= \mathbf{F} \times [\mathbf{Z} - \mathbf{G}^\dagger] \times [\mathbf{Z} + \mathbf{G}]^{-1} \times \mathbf{F}^{-1} = \\ &= \mathbf{F} \times [\mathbf{Z} - \text{diag}[R_{ref1} - jX_{ref1}, \dots, R_{refN} - jX_{refN}]] \times \\ &\times [\mathbf{Z} + \text{diag}[R_{ref1} + jX_{ref1}, \dots, R_{refN} + jX_{refN}]]^{-1} \times \mathbf{F}^{-1} = \\ &= \mathbf{F} \times [\mathbf{Z} + \text{diag}[jX_{ref1}, \dots, jX_{refN}] - \text{diag}[R_{ref1}, \dots, R_{refN}]] \times \\ &\times [\mathbf{Z} + \text{diag}[jX_{ref1}, \dots, jX_{refN}] + \text{diag}[R_{ref1}, \dots, R_{refN}]]^{-1} \times \mathbf{F}^{-1}, \end{aligned}$$

визначимо «нову» матрицю імпедансів як матрицю імпедансів псевдопристрою:

$$\tilde{\mathbf{Z}} = \mathbf{Z} + \text{diag}[jX_{ref1}, \dots, jX_{refN}]. \quad (9)$$

Позначивши матрицю імпедансів «додаткового» багатополісника як  $\mathbf{Z}_X = \text{diag}[jX_{ref1}, \dots, jX_{refN}]$ , співвідношення (9) подамо у формі

$$\tilde{\mathbf{Z}} = \mathbf{Z} + \mathbf{Z}_X. \quad (10)$$

З урахуванням (10):

$$\begin{aligned}
\tilde{\mathbf{S}}^{(v)} &= \mathbf{F} \times [\tilde{\mathbf{Z}} - \text{diag}[R_{ref\ 1}, \dots, R_{ref\ N}]] \times \\
&\times [\tilde{\mathbf{Z}} + \text{diag}[R_{ref\ 1}, \dots, R_{ref\ N}]]^{-1} \times \mathbf{F}^{-1} = \\
&= \mathbf{F} \times [\tilde{\mathbf{Z}} - \text{diag}[R_{ref\ 1}, \dots, R_{ref\ N}]] \times \mathbf{F} \times \\
&\times \mathbf{F}^{-1} \times [\tilde{\mathbf{Z}} + \text{diag}[R_{ref\ 1}, \dots, R_{ref\ N}]]^{-1} \times \mathbf{F}^{-1} = \\
&= [\mathbf{F} \times \tilde{\mathbf{Z}} \times \mathbf{F} - \mathbf{F} \times \text{diag}[R_{ref\ 1}, \dots, R_{ref\ N}] \times \mathbf{F}] \times \\
&\times [\mathbf{F} \times \tilde{\mathbf{Z}} \times \mathbf{F} + \mathbf{F} \times \text{diag}[R_{ref\ 1}, \dots, R_{ref\ N}] \times \mathbf{F}]^{-1}.
\end{aligned}$$

Надалі враховуватимемо, що

$$\begin{aligned}
&\mathbf{F} \times \text{diag}[R_{ref\ 1}, \dots, R_{ref\ N}] \times \mathbf{F} = \\
&= \text{diag}\left[\frac{1}{2\sqrt{R_{ref\ 1}}}, \dots, \frac{1}{2\sqrt{R_{ref\ N}}}\right] \times \text{diag}[R_{ref\ 1}, \dots, R_{ref\ N}] \times \\
&\times \text{diag}\left[\frac{1}{2\sqrt{R_{ref\ 1}}}, \dots, \frac{1}{2\sqrt{R_{ref\ N}}}\right] = \frac{1}{4} \times \mathbf{I}
\end{aligned} \tag{11}$$

та

$$\mathbf{F} \times \tilde{\mathbf{Z}} \times \mathbf{F} = \frac{1}{4} \tilde{\mathbf{Z}}_{norm} \tag{12}$$

де  $\tilde{\mathbf{Z}}_{norm}$  - нормована щодо активних складників референсних імпедансів (навантажень) матриця імпедансів уявного (віртуального) мікрохвильового пристрою (псевдопристрою).

Тоді з урахуванням (11) та (12):

$$\begin{aligned}
\tilde{\mathbf{S}}^{(v)} &= [\mathbf{F} \times \tilde{\mathbf{Z}} \times \mathbf{F} - \mathbf{F} \times \text{diag}[R_{ref\ 1}, \dots, R_{ref\ N}] \times \mathbf{F}] \times \\
&\times [\mathbf{F} \times \tilde{\mathbf{Z}} \times \mathbf{F} + \mathbf{F} \times \text{diag}[R_{ref\ 1}, \dots, R_{ref\ N}] \times \mathbf{F}]^{-1} = \\
&= \frac{1}{4} [\tilde{\mathbf{Z}}_{norm} - \mathbf{I}] \times 4 [\tilde{\mathbf{Z}}_{norm} - \mathbf{I}]^{-1} = [\tilde{\mathbf{Z}}_{norm} - \mathbf{I}] \times [\tilde{\mathbf{Z}}_{norm} - \mathbf{I}]^{-1}.
\end{aligned}$$

Отже, отримані залежності доводять, що на аналітичному рівні матриці розсіювання потужності (серед яких і коефіцієнти відбиття) реального пристрою та псевдопристрою збігаються.

Збіг коефіцієнтів відбиття від входу реального МП, навантаженого на комплексний імпеданс, та від входу псевдопристрою підтверджується також експериментально та може слугувати визнанням адекватності прийнятої математичної моделі та результатів імітаційного моделювання. Більше того, за умови, що параметри увімкнення не мають уявного складника (тобто активні), використання категорії псевдопристрою призводить до відомих результатів, пов'язаних з описом мікрохвильового пристрою в термінах матриць розсіювання будь-якого виду [8 – 11] або в термінах відповідних матриць теорії кіл.

### Висновки

Отримані оцінки якості результатів ІМ МП щодо параметрів увімкнення забезпечують можливість впевненого використання запропонованої методології моделювання для проектування різних класів МП із можливістю прогнозування спотворень ФХ МП у складі реальних РЕС та висуненням обґрунтованих вимог щодо її інших елементів для задовільного

функціонування системи в цілому.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузьменко О. Н. Имитационное моделирование СВЧ-фильтров на основе экспериментальных данных / О. Н. Кузьменко, Г. А. Мирских // 22-я Международная Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь 10-14 сентября 2012 г.: материалы конф. В 2 т. - Т. 1. Севастополь: Вебер, 2012 – С. 559 – 560.
2. Кузьменко О. Н. Имитационное моделирование СВЧ устройств, включенных в несогласованные тракты / О. Н. Кузьменко, Г. А. Мирских // 21-я Международная Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь 12-16 сентября 2011 г.: материалы конф. В 2 т. - Т. 1. Севастополь: Вебер, 2011 – С. 440 – 441.
3. Кузьменко О. М. Вплив на характеристики частотно-вібрових мікрохвильових пристроїв параметрів включення / О. М. Кузьменко, Г. О. Мірських // Вісник НТУУ «КПІ». Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2012. – Вип. 49. – С. 129 – 135
4. Morin Dehah. Characterization and Modeling of SOI RF integrated components / Morin Dehah. – Universite catholique de louvain laboratoire d'hyperfrequences, 2003. – 212 p.
5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. Уч. пособие. / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М. : Высшая школа, 2000. – 480 с
6. Фельдштейн А. Л. Синтез четырехполосников и восьмиполосников на СВЧ / А. Л. Фельдштейн, Л. Р. Явич. – М. : Связь, 1971. – 388 с.
7. Матей Д. Л. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи, т. 1 / Д. Л. Матей, Л. Янг, Е. М. Т. Джонс. – М. : Связь, 1971. – 439 с.
8. Marks R. B. A General Waveguide Circuit Theory / R. B. Marks, D. F. Williams // J. Res. Natl. Inst. Stan. – 1992. – Vol. 97. – P. 543 – 562.
9. Microwave measurements division, Jarvis Drive, Morgan Hill Arbitrary impedance Application Note [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://downloadfile.anritsu.com/RefFiles/en-US/Services-Support/Downloads/Application-Notes/Application-Note/11410-00284B.pdf>
10. Dobrowolski Janusz A. Microwave network design using scattering matrix / Janusz A. Dobrowolski. – Artech house, 2010. - p. 269.
11. Kurokawa K. Power Waves and the Scattering Matrix / K. Kurokawa // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1965. – Vol. MTT-13, No. 2. – P. 194 – 202.

**Кузьменко Оксана Миколаївна** – аспірантка кафедри радіоприйому та оброблення сигналів.  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».