

# Мікросмушкові тривимірні ємнісні шлейфи

Первак С. Г., Зінгер Я. Л., Адаменко Ю. Ф., Адаменко В. О., Нелін Є. А.

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

E-mail: [singer.yana@gmail.com](mailto:singer.yana@gmail.com)

Мікросмушкові фільтри широко застосовують в радіоелектронних системах. Фільтри нижніх частот конструюють на основі квазісосереджених індуктивностей та ємностей. Квазісосереджену ємність виконують як мікросмушкову секцію із широким сигнальним провідником або як розімкнутий шлейф, з'єднаний з основною лінією. Традиційні конструкції таких ємностей двовимірні (2D) у вигляді відрізків мікросмушкової лінії. Запропоновані авторами тривимірні (3D) квазісосереджені елементи мають в 1,5...4 рази більші значення реактивних параметрів. Розімкнутий 3D-шлейф являє собою глухий металізований отвір у діелектричній основі, з'єднаний з основною лінією. У статті розглянуто конструктивні відмінності 2D та 3D ємнісних шлейфів. 3D-шлейф як порівняти з 2D-шлейфом має суттєво кращі параметри: його хвильовий імпеданс менший в 1,4...3,5 рази, а ємність більша в 1,6...4,1 рази. Оскільки для фільтра необхідні задані значення ємності, площа 3D-шлейфа відповідно менша. 3D-моделюванням проаналізовано особливості залежностей електричних параметрів 3D-шлейфа від його конструктивних параметрів. Показано, що частота режекції шлейфа дорівнює частоті резонанса шлейфа з паразитною індуктивністю, зумовленою шлейфним Т-з'єднанням. У разі традиційних розмірів контакту шлейфа та основної лінії ця індуктивність від'ємна, що призводить до збільшення значення частоти режекції і, відповідно, погіршення крутості амплітудно-частотних характеристик шлейфа та фільтра. Для зменшення паразитної індуктивності запропоновано конструктивне рішення у вигляді контактної майданчика між лінією та шлейфом. Досліджено залежності цієї індуктивності від конструктивних параметрів шлейфа та майданчика. Оптимізація розмірів контактної майданчика дозволяє оптимізувати значення індуктивності з умови необхідної крутості амплітудно-частотної характеристики. Запропоновано одновимірну модель 3D-шлейфа, що характеризує його еквівалентними хвильовим імпедансом та відносною діелектричною проникністю. Ця модель може використовуватися як модель першого наближення під час проектування та дослідження мікросмушкових фільтрів на основі ємнісних 3D-шлейфів.

*Ключові слова:* фільтр нижніх частот; ємнісний шлейф; тривимірна модель; одновимірна модель; шлейфне Т-з'єднання

DOI: [10.20535/RADAP.2019.77.30-35](https://doi.org/10.20535/RADAP.2019.77.30-35)

## Вступ

Мікросмушкові фільтри широко застосовують у різноманітних радіоелектронних системах, зокрема телекомунікаційних [1]. Фільтри нижніх частот (ФНЧ) конструюють на основі квазісосереджених індуктивностей та ємностей. Квазісосереджену ємність виконують як мікросмушкову секцію основної лінії із широким сигнальним провідником або як розімкнутий (ємнісний) шлейф, з'єднаний з основною лінією [2, 3].

Традиційні шлейфи двовимірні (2D) і являють собою відрізки мікросмушкової лінії. У попередніх роботах авторами запропоновано мікросмушкові квазісосереджені реактивні елементи на основі тривимірних (3D) неоднорідностей. Порівняно з 2D реактивними елементами 3D-елементи мають в

1,5...4 рази більші значення реактивних параметрів за умови однакових розмірів або менші розміри за умови заданих значень реактивних параметрів.

В [4] розглянуто ФНЧ на основі 3D-реактивностей. Ємності реалізовано як секції. Порівняно із секціями шлейфи забезпечують кращу частотну вибірність. У випадку 2D-шлейфа його ширина визначається хвильовим імпедансом, а довжина — ємністю згідно з простими формулами [5]. Розрахунок 3D-шлейфа складніший, оскільки потребує 3D-моделювання.

Ціль статті полягає в аналізі особливостей залежностей електричних параметрів 3D-шлейфа від його конструктивних параметрів. Розрахунки виконано в програмному пакеті 3D-моделювання CST Microwave Studio.

# 1 Амплітудно-частотна характеристика ємнісного 3D-шлейфа

На рис. 1 зображено ємнісні 2D- та 3D-шлейфи. 2D-шлейф являє собою відрізок мікросмужкової лінії, а 3D-шлейф — глухий металізований отвір у діелектричній основі. Шлейф з'єднано з основною лінією; вхідний та вихідний відрізки основної лінії — 50-омні. На відміну від [4], де отвір 3D-неоднорідності круглий, у представленій роботі отвір квадратний із заокругленими кутами. За такої форми отвору краще використовується площа, а заокруглення обумовлені технологією виготовлення.

У попередніх роботах авторами показано, що мікросмужкову 3D-секцію основної лінії в першому наближенні можна моделювати одновимірною (1D) моделлю у вигляді відрізка довгої лінії. Покаже-

мо, що і 3D-шлейф у першому наближенні можна моделювати 1D-моделлю у вигляді шлейфа довгої лінії. Хвильовий імпеданс  $Z$  та ефективна відносна діелектрична проникність  $\varepsilon_{\text{еф}}$  такого шлейфа визначаються відповідними параметрами відрізка довгої лінії.

Параметри 1D-моделі дорівнюють

$$Z = \frac{1 - \sqrt{1 - T_{\text{мін}}^2}}{T_{\text{мін}}} Z_0, \quad \varepsilon_{\text{еф}} = \left( \frac{c}{4f_{\text{мін}}l} \right)^2,$$

де  $Z_0$  — хвильовий імпеданс мікросмужкової лінії;  $T_{\text{мін}}$  та  $f_{\text{мін}}$  — значення мінімуму коефіцієнта проходження та частота мінімуму відповідно (визначаються 3D-моделюванням 3D-секції);  $l$  — довжина відрізка, що дорівнює довжині неоднорідності;  $c$  — швидкість світла у вакуумі.

На рис. 2 а наведено залежності параметрів

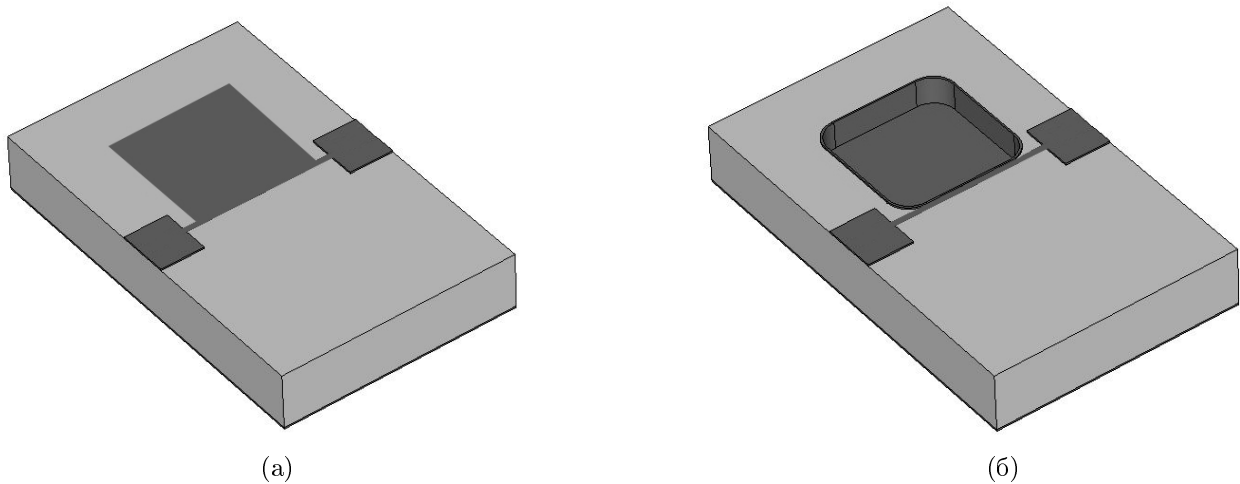


Рис. 1. Ємнісні 2D- (а) та 3D- (б) шлейфи.

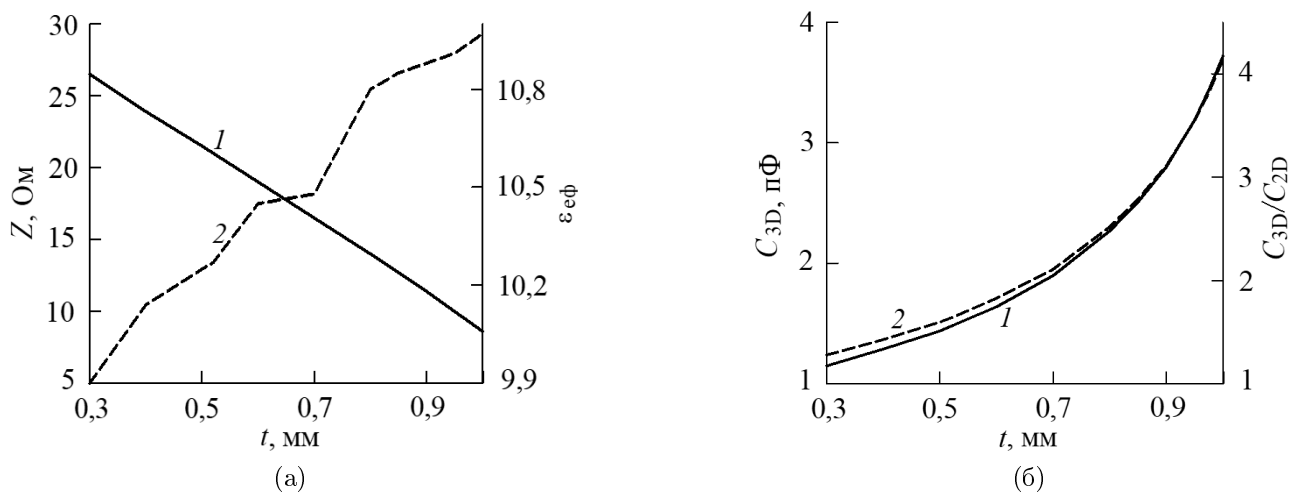


Рис. 2. Залежності параметрів 1D-моделі —  $Z(t)$  та  $\varepsilon_{\text{еф}}(t)$  — від глибини неоднорідності  $t$  (а) та ємності 3D-секції  $C_{3D}$  (1), а також відношення ємності 3D-секції до ємності 2D-секції (2) (б).

1D-моделі. Матеріал основи — Rogers RO3010, відносна діелектрична проникність  $\varepsilon = 10,2$ , товщина 1,27 мм, товщина металізації 0,035 мм. Параметри неоднорідності:  $l = 2,9$  мм, радіус заокруглення 0,5 мм. Зі зростанням глибини неоднорідності зростає її вплив на падаючу хвилю: зростає амплітуда сумарної відбитої хвилі та амплітуди окремих багатократно відбитих хвиль. Останнє відповідає збільшенню затримки сигналу. Відповідно зменшується значення  $Z$  та зростає  $\varepsilon_{\text{еф}}$ . Звернемо увагу, що у разі  $t \geq 0,5$  мм внаслідок значної затримки сигналу  $\varepsilon_{\text{еф}} > \varepsilon$  — ефективна відносна діелектрична проникність перевищує відносну діелектричну проникність матеріала основи!

Порівнюємо отримані параметри з параметрами мікросмужкової лінії із сигнальним провідником завширшки 2,9 мм. Згідно з емпіричними формулами, наведеними в [5], маємо  $Z = 30,3$  Ом та  $\varepsilon_{\text{еф}} = 7,4$ . Таким чином, 3D-секція забезпечує значне зменшення хвильового імпедансу та збільшення ефективної відносної діелектричної проникності.

Ємність мікросмужкової секції визначається формулою [5].

$$C = \frac{l\sqrt{\varepsilon_{\text{еф}}}}{Zc}. \quad (1)$$

Згідно з (1) ємність 2D-секції таких же розмірів, як і 3D-секція, дорівнює  $C_{2D} = 0,9$  пФ. Рис. 2 б ілюструє залежності ємності 3D-секції, а також відношення ємності 3D-секції до ємності 2D-секції. Як бачимо, ємність 3D-секції суттєво перевищує ємність 2D-секції.

На рис. 3 наведено амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) 3D-шлейфа. Неоднорідність шлейфа з'єднано з мікросмужковим провідником завширшки 0,1 мм, який відповідає послідовним індуктивностям ФНЧ; відстань між шлейфом та 50-омними відрізками — 0,5 мм.

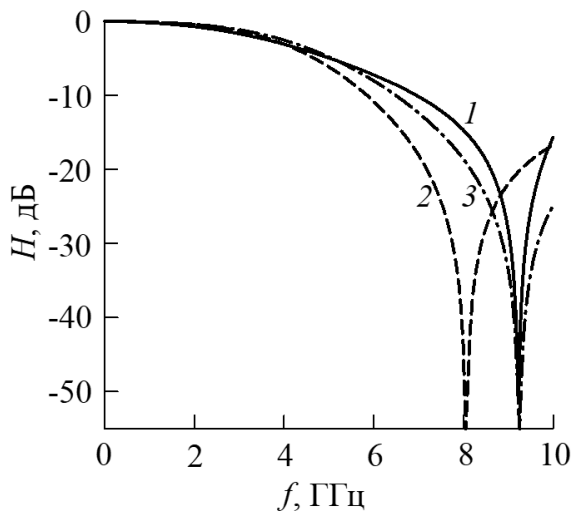


Рис. 3. АЧХ шлейфа згідно з 3D-моделлю (1) та з 1D-моделлю (2, 3) без урахування паразитної індуктивності (2) та з її урахуванням (3);  $t = 0,52$  мм.

За 1D-моделлю частота режекції  $f_p$  визначається чвертьхвильовою умовою  $l = \lambda_p/4$ :

$$f_p = \frac{c}{4\sqrt{\varepsilon_{\text{еф}}l}}, \quad (2)$$

де  $\lambda$  — довжина хвилі, індекс «р» означає значення на частоті  $f_p$ . Як бачимо з залежностей рис. 3, згідно з 3D-моделлю значення  $f_p$  суттєво більше ніж за умови (2). Як показано далі, це зумовлене впливом паразитної індуктивності шлейфного Т-з'єднання. При урахуванні цієї індуктивності АЧХ шлейфа згідно з 1D- та 3D-моделлями близькі (криві 1 та 3 на рис. 3), що свідчить про прийнятність 1D-моделі як моделі першого наближення.

## 2 Вплив паразитної індуктивності на частоту режекції шлейфа

Згідно з 1D-моделлю вихідний імпеданс розімкненого шлейфа

$$Z_{\text{ш}} = \frac{Z}{itgkl}, \quad (3)$$

де  $i = \sqrt{-1}$ ;  $k = 2\pi/\lambda$ . Оскільки у разі  $f \rightarrow f_p$  маємо  $Z_{\text{ш}} \rightarrow 0$ , на значення  $f_p$  буде впливати незначна додаткова реактивність.

Шлейфне Т-з'єднання вносить паразитні реактивні елементи (рис. 4 [6]). Індуктивність  $L_2$  та шлейф утворюють послідовний коливальний контур. Частота резонанса цього контура і є частотою  $f_p$ .

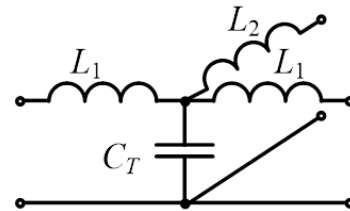


Рис. 4. Еквівалентна схема Т-з'єднання.  $L_{1,2}$  та  $C_T$  — еквівалентні елементи

Проаналізуємо емпіричну формулу для індуктивності  $L_2$  у випадку 2D-шлейфа [6]:

$$L_2 = FL_{w2}h, \quad (4)$$

$$F = (0,12w_1 - 0,47)w_2 + 0,195w_1 - 0,357 + 0,0283 \sin[\pi(w_1 - 0,75)], \quad (5)$$

$$L_{w2} = Z\sqrt{\varepsilon_{\text{еф}}}/c, \quad (6)$$

$$(1 < w_1 < 2, 0,5 < w_2 < 2), \quad (7)$$

де  $L_{w2}$  — погонна індуктивність шлейфа;  $w_{1,2} = W_{1,2}/h$ ,  $W_{1,2}$  — ширина мікросмужкового провідника лінії та шлейфа відповідно;  $h$  — товщина основи.

У разі виконання умов (7) похибка значення  $L_2$  менша 5% [6]. У випадку ФНЧ  $w_1 \ll 1$  та  $w_2 > 2$ , що за межами умов (7); відповідно межа похибки  $L_2$  збільшиться. З огляду на (5) співвідношенню  $w_1 \ll 1$  відповідає

$$F \approx -0,47w_2 - 0,357. \quad (8)$$

Унаслідок того, що  $F < 0$ , значення  $L_2 < 0$ . Така індуктивність за характером частотної залежності опору відповідає індуктивності, а за характером реактивності — ємності. Оскільки  $L_2 < 0$ , для компенсації цієї реактивності шлейф має бути індуктивним. У результаті значення  $f_p$  збільшується як порівняти з умовою (2) (рис. 3).

На рис. 5 наведено АЧХ ФНЧ третього порядку на основі 2D-реактивностей (фільтр зображено на вставці), а також АЧХ шлейфа цього ФНЧ. Параметри ФНЧ та його АЧХ відповідають [5]. В [5] стверджується, що частоту режекції визначає умова (2). У дійсності, як і у випадку, розглянутому на рис. 3, значення  $f_p$  АЧХ фільтра суттєво більше ніж згідно з (2) (5,62 і 4,54 ГГц відповідно). В [5] не враховано вплив індуктивності  $L_2$ .

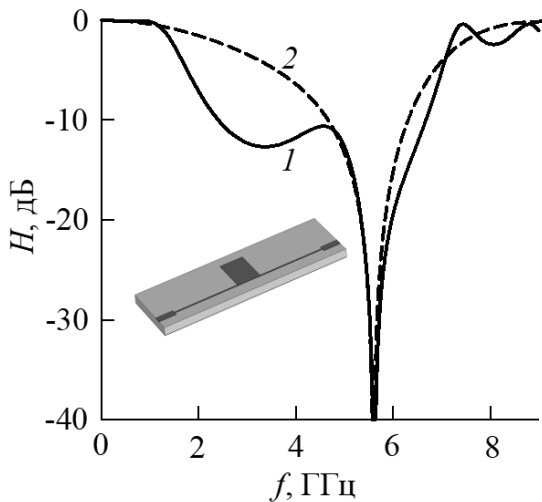


Рис. 5. АЧХ ФНЧ (1) та шлейфа (2) згідно з 3D-моделлю.

З зіставлення АЧХ 1 та 2 на рис. 5 можна зробити висновок, що АЧХ шлейфа в значній мірі визначає особливості АЧХ фільтра. Унаслідок збільшення значення  $f_p$  погіршується крутість АЧХ шлейфа та фільтра. Для підвищення крутості АЧХ необхідно зменшити значення  $|L_2|$ .

Як видно з формул (4) та (6), щоб зменшити величину  $|L_2|$  необхідно зменшити значення  $|F|$  та  $Z$ . Зменшення  $Z$  забезпечить перехід від 2D- до 3D-шлейфа. Як бачимо з (8), для зменшення значення  $|F|$  необхідно зменшити величину  $w_2$ . Для такого зменшення між шлейфом і основною лінією уведемо контактний майданчик малих розмірів  $a \times b$  (рис. 6 а,  $a$  — ширина майданчика, що дорівнює відстані між шлейфом та основною лінією,  $b$  — дов-

жина майданчика — його розмір вздовж основної лінії).

На рис. 6 б наведено АЧХ шлейфа для різних значень  $b$ . Як і очікувалося, зі зменшенням  $b$  зменшується частота режекції.

### 3 Залежності частоти режекції та паразитної індуктивності 3D-шлейфа

У випадку 2D-шлейфа індуктивність  $L_2$  за умови заданих параметрів основи залежить від двох параметрів — ширини провідника основної лінії та ширини шлейфа. Параметри 3D-шлейфа та шлейфного Т-з'єднання залежать і від третього параметра — глибини неоднорідності шлейфа.

Розглянемо залежності частоти режекції та індуктивності  $L_2$  від глибини неоднорідності та довжини контактної майданчика шлейфа. Індуктивність  $L_2$  знайдемо з умови резонансу шлейфа та індуктивності  $L_2$ :  $Z_{ш} + i\omega_p L_2 = 0$ , де  $\omega_p = 2\pi f_p$ . З огляду на (3) маємо

$$L_2 = \frac{Z}{\omega_p \operatorname{tg} k_p l}. \quad (9)$$

Значення  $f_p$  визначається 3D-моделюванням.

Згідно з (9) 3D-шлейф, розглянутий на рис. 6 б, має такі значення  $L_2$ :  $-0,08$ ,  $-0,05$  та  $0,03$  нГн для АЧХ 1, 2 та 3 відповідно. Як бачимо з залежностей на рис. 7, на частоту режекції і, відповідно, індуктивність  $L_2$ , суттєво впливає глибина неоднорідності. Значення  $L_2$  можуть бути не лише від'ємними, як в [6], але й додатними.

Якщо  $L_2 > 0$  частота режекції  $f_p$  менша ніж за умови (2). У цьому випадку крутість АЧХ шлейфа вища порівнюючи з чвертьхвильовою умовою. Залежності, наведені на рис. 7 б, ілюструють можливість забезпечення необхідної величини  $L_2$  вибором значень параметрів  $t$  та  $b$ .

### 4 Обговорення отриманих результатів

У разі збільшення глибини неоднорідності 3D-шлейфа з 0,5 до 1 мм його хвильовий імпеданс порівнюючи з 2D-шлейфом менший в 1,4... 3,5 рази, а ємність більша в 1,6... 4,1 рази.

Важлива особливість АЧХ шлейфа — наявність режекції, частота якої без урахування паразитних параметрів визначається чвертьхвильовою умовою для довжини шлейфа. На частоту режекції впливає незначна додаткова індуктивність, включена послідовно шлейфу. У разі традиційних розмірів контакту шлейфа та лінії ця індуктивність від'ємна, що призводить до збільшення значення  $f_p$  і, як наслідок, до погіршення крутості АЧХ шлейфа та

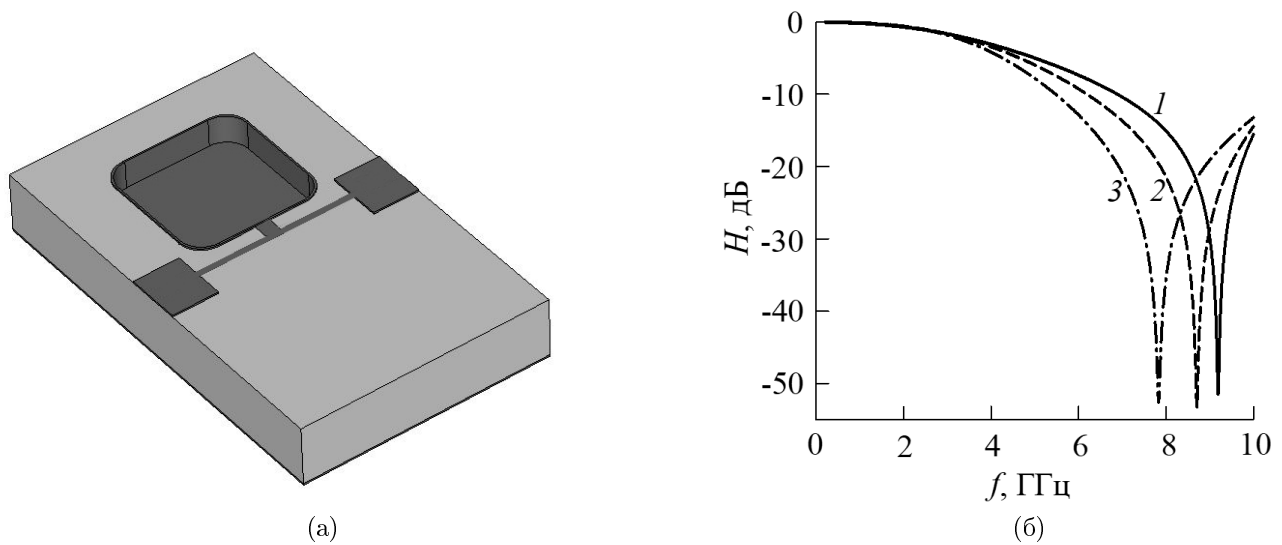


Рис. 6. 3D-шлейф із контактним майданчиком (а) та АЧХ 3D-шлейфа (б);  $b = 1,9, 1,0$  та  $0,2$  (1, 2 та 3 відповідно),  $a = 0,2$  мм,  $t = 0,52$  мм.

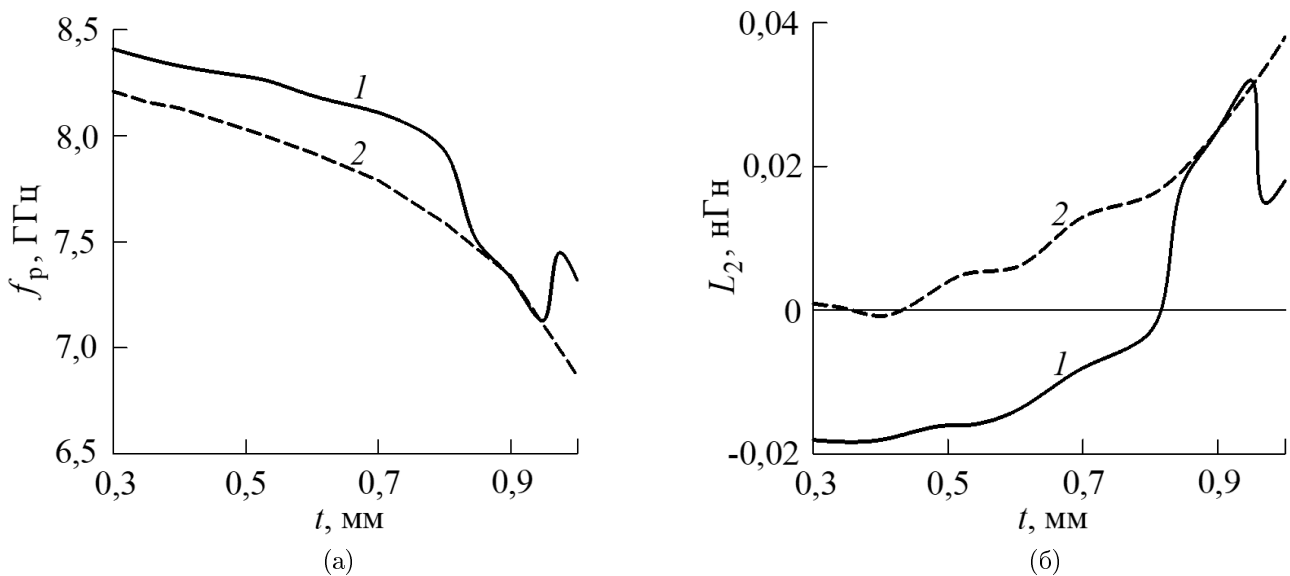


Рис. 7. Залежності частоти режекції (а) та індуктивності  $L_2$  3D-шлейфа (б);  $b = 0,5$  мм (1) та  $0,3$  мм (2),  $a = 0,2$  мм.

ФНЧ. Контактний майданчик між лінією та шлейфом дозволяє оптимізувати параметри шлейфного з'єднання з умови необхідної крутості АЧХ.

ектування та дослідження мікросмушкових ФНЧ на основі ємнісних 3D-шлейфів.

## Висновки

3D-шлейф має суттєво кращі параметри як порівняти з 2D-шлейфом. Оскільки для ФНЧ необхідні задані значення ємності, залежно від глибини неоднорідності площа 3D-шлейфа менша в 1,6...4,1 рази.

1D-модель 3D-шлейфа характеризує шлейф еквівалентними хвильовим імпедансом та відносною діелектричною проникністю та може використовуватися як модель першого наближення під час про-

## References

- [1] Gupta K. and Sahayam N. (2018) A review on microstrip filters for the application in communication systems. *IRJET*, Vol. 5, No 12, pp. 709-717.
- [2] Edwards T.C. and Steer M.B. (2016) *Foundations for Microstrip Circuit Design*, Wiley. DOI: 10.1002/9781118936160
- [3] Jubril A. and Nyitamen D. S. (2018) 2GHz microstrip low pass filter design with open-circuited stub. *IOSR-Journal of Electronics and Communication Engineering*, Vol. 13, No 2, pp. 1-9. DOI: 10.9790/2834-1302020109
- [4] Nelin E.A., Zinher Y.L. and Popsui V.I. (2018) Low-Pass Filters Based on Crystal-Like Inhomogeneities. *Radi-*

*oelectronics and Communications Systems*, Vol. 61, Iss. 5, pp. 214-221. DOI: 10.3103/s0735272718050059

- [5] Hong J.-S. (2011) *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, Wiley. DOI:10.1002/9780470937297
- [6] Gard R., Bahl I. and Bozzi M. (2013) *Microstrip Lines and Slotlines*, Artech House, 590 p.

## Микрополосковые трехмерные емкостные шлейфы

*Первак С. Г., Зингер Я. Л., Адаменко Ю. Ф.,  
Адаменко В. А., Нелин Е. А.*

Рассмотрены конструктивные отличия традиционного двумерного и трехмерного (3D) емкостных шлейфов и выполнено сравнение их емкостей. Проанализированы особенности зависимостей электрических параметров 3D-шлейфа от его конструктивных параметров. Показано, что частота режекции емкостного шлейфа равна частоте резонанса шлейфа с паразитной индуктивностью, обусловленной шлейфным Т-соединением. Предложено конструктивное решение для уменьшения этой индуктивности, а также исследованы ее зависимости от параметров шлейфа. Обоснована возможность использования одномерной модели 3D-шлейфа как модели первого приближения.

*Ключевые слова:* фильтр нижних частот; емкостной шлейф; трехмерная модель; одномерная модель; шлейфное Т-соединение

## Microwave Three-Dimensional Capacitive Stubs

*Pervak S. H., Zinher Ya. L., Adamenko Yu. F.,  
Adamenko V. O., Nelin E. A.*

**Introduction.** Microstrip filters are widely used in a variety of radio-electronic systems, including telecommunications. Low frequency filters (LPFs) are constructed on the basis of quasi-lumped inductances and capacitances. Quasi-lumped capacitances are performed as microstrip sections with a wide signal conductor or open stubs. Traditional quasi-lumped elements are two-dimensional (2D). Three-dimensional (3D) quasi-lumped elements have 1.5 to 4 times greater reactivity values. The purpose of the paper is to analyze 3D-stubs characteristics.

**1 Capacitive 3D-stub transfer characteristic.** The 3D-stub is a deaf metalized hole. In the presented paper hole is a square with rounded corners. Dependencies of 1D-model parameters of 3D-stub are shown. From a comparison of 3D- and 1D-transfer characteristics of the 3D-stub it is shown that the 3D-stub in the first approximation can be simulated by a 1D-model in the form of a long line stub.

**2 Influence of parasitic inductance on stub notch frequency.** For a 1D-model, the stub notch frequency is determined by a quarter-wave condition of it's length. Stub's T-junction brings in parasitic reactivities. The parasitic inductance and stub form a series oscillatory circuit. The resonance frequency of this circuit is equal to stub notch frequency. Since traditionally this inductance is negative, the notch frequency increases and stub and LPF transfer characteristics slope decreases. In order to reduce the inductance influence for stub and line contact it is suggested to use a small contact pad.

**3 3D-stub notch frequency and parasitic inductance dependences.** The dependences of the notch frequency and parasitic inductance on the 3D-stub heterogeneity depth and contact pad length are analyzed. According to simulation results for a variant with a contact pad inductance values can be not only negative, but also positive. If inductance is positive, notch frequency is less than according to quarter-wave condition. In this case, stub and LPF transfer characteristics slope is higher compared to quarter-wave condition.

**4 Discussion of the results.** With an increase of the 3D-stub heterogeneity depth from 0.5 to 1 mm, its wave impedance is less in 1.4 ... 3.5 times compared to 2D-stub, and the capacity is greater in 1.6 ... 4.1 times. Contact pad between the stub and line allows to optimize the stub parameters from the condition of the required transfer characteristics slope.

**Conclusion.** 3D-stub has significantly better parameters than 2D-stub. Since the LPF requires the specified capacitance values, depending on the 3D-stub inhomogeneity depth, the area of the 3D-stub is less than 1.6 ... 4.1 times. The 1D-model of the 3D-stub allows to characterize the stub by equivalent wave impedance and relative dielectric permittivity and can be used as the first approximation model for the design and simulating of microstrip LPFs based on capacitive 3D-stubs.

*Key words:* low pass filter; capacitive stub; three-dimensional model; one-dimensional model; stub's T-junction