

DOI: 10.18372/2310-5461.41.13526

УДК 621.372.852 (045)

Т. Ю. Приходько, аспірантНаціональний авіаційний університет
orcid.org/0000-0001-6909-7697
e-mail: tata@mirohost.net;**І. О. Басюк**, аспірантНаціональний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-2666-1136
e-mail: basya2000@gmail.com;**Н. О. Ліщиновська**, аспірантДержавний університет телекомунікацій
orcid.org/0000-0002-4989-5664
e-mail: natashalil@ex.ua

СПЕКТРАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО СИНТЕЗУ ПРИСТРОЇВ НА ОСНОВІ НЕОДНОРІДНИХ ЛІНІЙ ТА ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ХВИЛЬОВОГО ОПОРУ ПО ЦЕНТРАЛЬНИМ ЧАСТОТАМ КАНАЛІВ ВИТОКУ ІНФОРМАЦІЇ (ОГЛЯД)

Вступ

Розглянута процедура збільшення частотної полоси загородження розподілених фільтрів нижніх частот (ФНЧ) за рахунок використання неоднорідних (нерегулярних) відрізків ліній передач в якості секцій фільтрів [3]. Дана задача має безліч рішень, одне з яких знаходження такої функції зміни хвильового опору від координати лінії, при якій в заданій смузі частот відсутні канали витоку інформації (паразитні канали). Завдяки чому можна отримати значний вииграш в розрядці спектра резонансних частот, підвищити виборчі властивості, придушити паразитні смуги пропускання, зробити технологічними вузли, реалізація яких на базі однорідних ліній була б неможливою.

Постановка завдання дослідження

Розглянути спектральний підхід до синтезу пристроїв на основі неоднорідних ліній по заданому розподілу резонансних і протирезонансних частот на основі процедури Річардса та провести огляд матеріалів з розглядом процедур визначення хвильового опору по центральним частотам каналів витоку інформації. Показати труднощі в реалізації процедури Річардса.

Аналіз літературних даних і виклад основного матеріалу

Як відомо [1], кола електроживлення є одним з основних електричних каналів витоку інформації різних телекомунікаційних систем, а також засобів обчислювальної техніки. Поява інформаційних сигналів в колах живлення можлива як за рахунок побічних електромагнітних випроміню-

вань (ПЕМІ), так і за рахунок внутрішніх паразитних ємнісних і (або) індуктивних зв'язків випрямного пристрою блоку живлення.

Одним з методів запобігання витоку інформації є фільтрація [1] яка здійснюється з метою запобігання поширенню високочастотних інформаційних сигналів за межі контрольованої зони (КЗ). Для фільтрації сигналів в колах живлення в даний час використовуються перешкодоподавляючі фільтри нижніх частот (ФНЧ).

Зосереджені фільтри так і фільтри комбінованого типу, що використовують зосереджені і розподілені елементи, дозволяють запобігти витоку інформації приблизно до частот 1 ГГц. На частотах понад 1 ГГц використовуються розподілені фільтри, оскільки зі збільшенням швидкості передачі інформації, коли довжина хвилі стає сумірною з геометричними розмірами окремих елементів (індуктивностей, ємностей, активних опорів, різних кіл на їх основі) необхідно враховувати хвильовий характер процесів в реальних елементах.

У найпростішому випадку окремі елементи і пристрої розраховуються на основі теорії довгих ліній. В цьому випадку матриця передачі (ланцюгова матриця) однорідного відрізка лінії з хвильовим опором Z_{x1} і електричною довжиною $\theta_1 = \omega t_1$, де t_1 — час затримки відрізка лінії, дорівнює:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & jZ_{x1} \sin \theta_1 \\ \frac{j}{Z_{x1}} \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Оскільки елементи матриці A є періодичними функціями, то і її характеристики при частотно-незалежних навантаженнях (вхідний опір, передавальні функції) будуть також періодичними функціями частоти. Періодичність елементів ланцюгової матриці призводить до появи провалів амплітудно-частотних характеристик пристроїв фільтрації. Слід урахувувати, що можливості відомих принципів побудови фільтруючих систем на базі однорідних ліній уже вичерпані. Для усунення каналів витоку інформації, викликаних зростанням швидкості передачі інформації, пропонується, в якості елементів перешкодоподавляючих фільтрів, використовувати лінії передачі зі змінним по довжині хвильовим опором (неоднорідні лінії передачі) [8–9]. Відомо, що характер зміни хвильового опором повністю визначає АЧХ фільтрів, тому виникає задача знаходження такої

функції зміни хвильового опором від координати лінії, за якої в заданій смузі частот відсутні канали витоку інформації (паразитні канали). Завдяки цьому можна отримати значний вигреш в розрядці спектра резонансних частот, підвищити виборчі властивості, придушити паразитні смуги пропускання, зробити технологічними вузли, реалізація яких на базі однорідних ліній була б неможливою.

Канали витоку інформації визначаються розташуванням нулів і полюсів вхідного опором лінії, на основі якої будується фільтр. При цьому можливі дві ситуації: при побудові фільтра можна змінювати нулі і полюси як вхідного опором розімкнутої, так і замкнутої лінії.

Отже, підбираючи розташування резонансних і протирезонансних частот [5–6], можна варіювати розташування паразитних смуг пропускання і розташування максимуму загасання.

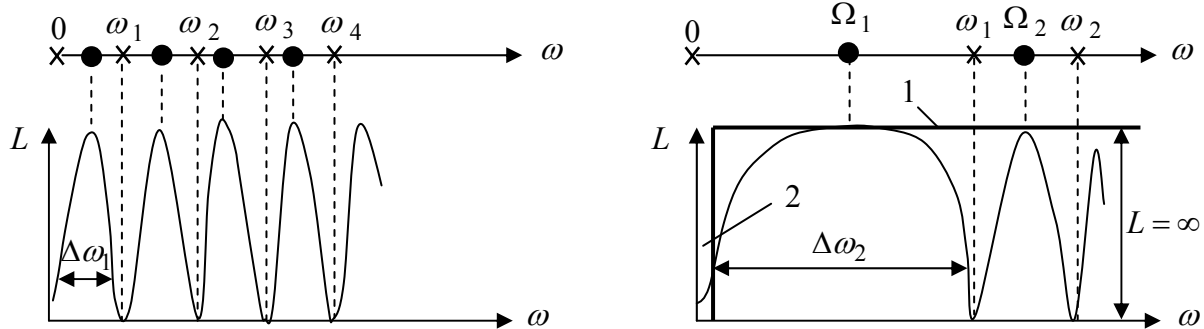


Рис. 1. Зв'язок загасання ФНЧ з розташуванням резонансних і протирезонансних частот: 1 — характеристика ідеального ФНЧ; 2 — робоча область

Фізично резонансні частоти є полюсами вхідного опором розімкнутої лінії, а протирезонансні частоти є нулями вхідного опором розімкнутої лінії. Таким чином, для отримання широкої смуги загородження ФНЧ необхідно частоту ω_1 взяти якомога більшу. Для того, щоб і друга смуга загородження була якомога ширше необхідно збільшити другу резонансну частоту ω_1 , тобто треба здійснити розрядку спектра резонансних частот (сукупність резонансних і протирезонансних частот утворює спектр лінії передачі) [6].

Як елемент ФНЧ необхідно використовувати багатоступінчасту пов'язану лінію передачі, причому кожна ступінь має однаковий час затримки. Такі кола відносяться до класу Річардса стрижневої структури. З огляду на слабкий вплив рівня зв'язку пов'язаних ліній на спектр, розрахунки доцільно здійснювати для незв'язаних ліній, а потім врахувати зв'язок. Для чого і слід використовувати відому теорему Річардса, згідно до якої вхідний опір розімк-

нутого і короткозамкнутого кола стрижневої структури записуються у такому вигляді:

$$ZP(s) = A \frac{\prod_{i=1}^m (s^2 + \delta_i^2)}{s \prod_{i=1}^m (s^2 + \zeta_i^2)} = A \frac{a_0 + a_2 s^2 + \dots + a_{n-1} s^{n-1}}{b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_n s^n}; \quad (2)$$

$$Z^k(s) = A \frac{s \prod_{i=1}^m (s^2 + \delta_i^2)}{\prod_{i=1}^m (s^2 + \zeta_i^2)} = A \frac{a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_n s^n}{b_0 + b_2 s^2 + \dots + b_{n-1} s^{n-1}}, \quad (3)$$

де $s = thpt_3$ — частотна змінна Річардса; p — комплексна частота змінна $p = j\omega$; t_3 — час затримки одиничного елемента (електрична довжина однієї секції $\theta = \omega t_3$), що визначається за умови відсутності хибних резонансів у робочому діапазоні [2]:

$$t_3 = \frac{\pi}{2\omega_{\max}}, \quad (4)$$

де ω_{\max} — найбільша частота робочого діапазону; A — постійний додатний коефіцієнт

(нормуючий множник); $\pm j\delta_i$ і $\pm j\zeta_i$ — нулі та полюси вхідного опору в s -площині, де коефіцієнти δ_i і ζ_i визначаються за формулами (5).

Для прикладу розглянемо найпростішу нерегулярну лінію згідно з теоремою Річардса — триступеневу лінію передачі з вхідним опором:

$$Z(s) = A \frac{s^2 + \delta^2}{s(s^2 + \zeta^2)}, \quad A > 0, 0 < \delta < \zeta. \quad (6)$$

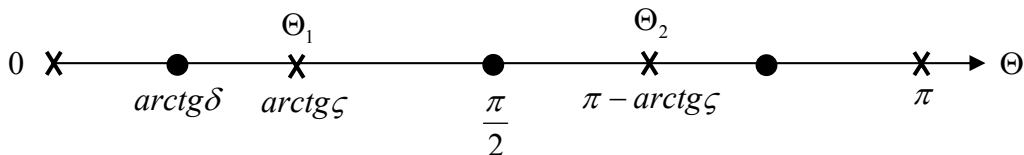


Рис. 2. Розподіл нулів і полюсів триступеневої секції

Оскільки θ_1 та θ_2 визначають протяжність першої і другої смуг загородження, то представляється можливим вибором значення δ мінімізувати хвильовий перепад (відношення максимального хвильового опору до мінімального хвильовому опору), який характеризує ступінь технічної реалізації ступеневої лінії. Мінімізацію хвильового опору необхідно здійснювати при заданому відношенні центральної частоти другої смуги пропускання до центральної частоти першої смуги пропускання θ_2/θ_1 .

Для цього слід скористатись процедурою Річардса, яка при застосуванні до непов'язаних ліній полягає в такому.

1. За реактивним вхідним опором $Z_1(s)$, $s = thpt_3$, знаходимо хвильовий опір першого ОЕ (одиночного елемента, який представляє відрізок однорідної лінії з заданим часом затримки) $Z_{x1} = Z_1(1)$.

2. Визначаємо опір навантаження виділеного

$$\text{ОЕ } Z_2(s) = \frac{Z_{x1}(Z_1(s) - sZ_{x1})}{Z_{x1} - sZ_1(s)}. \quad (7)$$

3. Чисельник і знаменник $Z_2(s)$ скорочуємо на $1-s^2$ і за отриманим опором $Z_2(s)$ визначаємо хвильовий опір другого ОЕ $Z_{x2} = Z_2(1)$ і т. д. Процес повторюємо доти, поки не будуть виділені всі одиночні елементи. Після скорочення на $1-s^2$ порядок подальшого кола буде зменшений на 1.

У праці [4] розроблена процедура оптимізації секцій ФНЧ, побудованих на багатоступневих лініях, за критерієм мінімуму хвильового перепаду та за умови заданого виграшу по смузі загородження.

Не порушуючи спільності прийнемо $A = 1$. Від вибору величин δ_i і ζ_i залежать значення хвильових опорів Z_{x1} , Z_{x2} , Z_{x3} незв'язаних ліній (секції).

Розподіл нулів та полюсів буде виглядати наступним чином рис. 2.

Аналіз результатів оптимізації показав, що зі збільшенням кількості секції фільтра зменшується перепад хвильових опорів.

Теоретична межа у виграші по смузі загородження визначається виключно кількістю ступенів секцій n .

Що ж стосується реалізації п. 3. самої процедури, то головною трудностю при програмній реалізації [4] процедури є реалізація п. 3, що пов'язано з труднощами здійснення поділу поліномів чисельника і знаменника вхідного опору на $1-s^2$.

Чисельне дослідження опорів, побудованих за рекурентною формулою (7), показало, що замість поділу на $1-s^2$ для виключення невизначеності $0/0$ можна скористатись правилом Лопітала.

При цьому диференціювання поліномів чисельника і знаменника опору типу (7) доцільно здійснювати в чисельній формі, оскільки алгоритм розкриття невизначеності виходить стійким.

Використання диференціювання в символічній формі не завжди приводить до бажаного результату, так як іноді виникає ситуація поділу на нуль і робота алгоритму припиняється.

Оскільки

$$1-s^2 = (1-s)(1+s),$$

то правило Лопітала можна використовувати при $s \rightarrow \pm 1$.

У результаті хвильовий опір з номером n можна визначати виходячи з формули (7) при $s = \pm 1$:

$$Z_{xn}(s) = \frac{d[Z_{xn-1}(Z_{n-1}(s) - sZ_{xn-1})]}{ds} = -Z_{xn-1} \frac{\frac{d}{ds}Z_{n-1}(s) - Z_{xn-1}}{Z_{n-1}(s) + s \frac{d}{ds}Z_{n-1}(s)}, \quad s = \pm 1. \quad (8)$$

Відомо, що при чисельному диференціюванні знижується точність обчислень.

Отже, з ростом номера ОЕ, точність визначення хвильового опору при використанні (8) буде знижуватися. При цьому найнижча точність буде при визначенні хвильового опору з найвищим номером (останнього хвильового опору).

Спростити знаходження останнього хвильового опору можна виходячи з відомої статичної ємності багатоступеневої лінії, що складається з n ступенів.

Величина n визначає максимальну степінь полінома чисельника і (або) знаменника в загальній формулі для розімкнутої багатоступеневої секції:

$$Z(s) = \frac{a_0 + a_2s^2 + a_4s^4 + \dots}{b_1s + b_3s^3 + b_5s^5 + \dots}, \quad s = thpt_c, \quad (9)$$

статичну ємність C_{cm} знаходимо з умови поведінки $Z(s)$ при $s \rightarrow 0$:

$$Z(s) = \frac{1}{pC_{cm}} = \frac{a_0}{b_1s} = \frac{a_0}{b_1pt_c}. \quad (10)$$

Звідки

$$C_{cm} = \frac{b_1t_c}{a_0}. \quad (11)$$

Прирівнюючи (10) і (11), знаходимо останній хвильовий опір

$$Z_{xn} = \frac{1}{\frac{b_1}{a_0} - \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{Z_{xk}}}. \quad (12)$$

Вираз (12) дозволяє на останньому етапі процедури Річардса уникнути операції диференціювання і уникнути помилок при визначенні хвильових опорів за критерієм статичної ємності, тобто при використанні формули (12) відсутнє накопичення помилок у визначенні статичної ємності.

Крім того, оскільки в області нижніх частот при $\omega \rightarrow 0$ АЧХ ФНЧ визначається $C_{\bar{\omega}}$, то при використанні (12) гарантується найкраще відтворення АЧХ фільтра.

Висновки

Більшість методик синтезу використовують наближення до теорії довгих ліній. Слід зазначити, що в кожному випадку необхідно прагнути до граничних характеристик з урахуванням габаритних розмірів, надійності, технологічності і т. д. Як видно з наведеного, суть спектрального підходу до синтезу пристроїв на основі неоднорідних ліній, відмінними рисами якого є універсальність і зручність, полягає в наступному: при спектральному підході в якості єдиної універсальної системи параметрів, необхідних для побудови пристроїв СВЧ із заданими властивостями, приймаються власні числа (нулі і полюси) рівнянь, якими описуються процеси в них (рівняння довгих ліній). Набір нулів та полюсів складають резонансні і протирезонансні частоти, які утворюють спектр лінії. З розглянутої методики в використаних літературних джерелах та проведених робіт щодо синтезу пристроїв на відрізках ліній передачі в техніці НВЧ можна виділити певний перелік значущих моментів щодо використання наведеної процедури, за якою можливо: розробити метод визначення хвильового опору фільтрів за центральними частотам каналів витоку інформації, отримати аналітичні вирази для визначення хвильових опорів багатоступеневих ліній з необхідною кількістю ступенів, що дозволяє безпосередньо по заданих областям каналів витоку інформації визначати хвильові опори ступенів фільтра; визначити обмеження на протяжність смуги захисту від зовнішнього деструктивного впливу; синтезувати секції фільтрів, що забезпечують мінімальний перепад хвильових опорів при заданій частотній області захисту від зовнішніх деструктивних впливів; використати наведені заходи щодо спрощення знаходження останнього хвильового опору виходячи з відомої статичної ємності багатоступеневої лінії, що складається з n ступенів.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Хорошко В. А.**, Чекатков А. А. Методы и средства защиты информации. К., 2003. 502 с.
2. **Козловский В. В.** Расчет многоступенчатых резонаторов, состоящих из однородных отрезков линий передач по диапазону перестройки. *Радиотехника*, 1979, Т.34 №8. С. 30–34.

3. **Shih-Cheng Lin**, Pu-Hua Deng, Yo-Shen Lin, ChiHsuehWang, Chun Hsiung Chen. Wide-Stopband MicrostripBandpass Filters Using Dissimilar Quarter-Wavelength Stepped Impedance Resonators. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 54, no. 3, march 2006, 1011.P. 1011-1018.

4. **Козловский В. В.** Минимизация перепада волновых сопротивлений многоступенчатых фильтров. *Системы управління, навігації та зв'язку*. 2014. Вип. 2(30). С. 118–123.

5. **Козловский В. В.**, Лысенко Р. М. Синтез базовых элементов для распределенных фильтров нижних частот с расширенной полосой заграждения. *Інформаційна безпека*. 2013. №1(9). С. 78–84.

6. **Бердышев Р. В.**, Кордюков Р. Ю., Аверкин В. Н. Программная реализация процедуры Ричардса для синтеза неоднородных линий. *Программные продукты и системы*. 2011. №1. С. 40–45.

7. **Матей Д. Л.**, Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. М.: Связь, 1971. Т.1. 439 с.

8. **Литвиненко О. Н.**, Сошников В. И. Теория неоднородных линий и их применение в радиотехнике. М.: Советское Радио, 1964. 535 с.

9. **Литвиненко О. Н.**, Сошников В. И. Колебательные системы из отрезков неоднородных линий. М.: Советское радио, 1972. 144 с.

Приходько Т. Ю., Басюк І. О., Ліщиновська Н. О.

СПЕКТРАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО СИНТЕЗУ ПРИСТРОЇВ НА ОСНОВІ НЕОДНОРІДНИХ ЛІНІЙ ТА ПИТАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ ХВИЛЬОВОГО ОПОРУ ПО ЦЕНТРАЛЬНИМ ЧАСТОТАМ КАНАЛІВ ВИТОКУ ІНФОРМАЦІЇ (ОГЛЯД)

Одним з методів запобігання витоку інформації є фільтрація, яка здійснюється з метою запобігання поширенню високочастотних інформаційних сигналів за межі контрольованої зони. Для фільтрації сигналів в колах живлення в даний час використовуються перешкодоподавляючі фільтри нижніх частот (ФНЧ). Встановлено, що канали витоку інформації визначаються розташуванням нулів і полюсів вхідного опору лінії, на основі якої будується фільтр. При цьому можливі дві ситуації: при побудові фільтра можна змінювати нулі і полюси як вхідного опору розімкнутої, так і замкнутої лінії. Набір нулів та полюсів складають резонансні і протирезонансні частоти, які утворюють спектр лінії. Розглянута процедура збільшення частотної полоси загородження розподілених фільтрів нижніх частот (ФНЧ) за рахунок використання неоднорідних (нерегулярних) відрізків лінії передач в якості секцій фільтрів. Дана задача має безліч рішень, одне з яких знаходження такої функції зміни хвильового опору від координати лінії, при якій в заданій смузі частот відсутні канали витоку інформації (паразитні канали). Завдяки чому можна отримати значний виграв в розрядці спектра резонансних частот, підвищити виборчі властивості, придушити паразитні смуги пропускання, зробити технологічними вузли, реалізація яких на базі однорідних ліній була б неможливою. Розглянуті методики можна використати для розробки методів побудови фільтрів із заданим розподілом каналів витоку інформації за допомогою зсуву нулів і полюсів вхідного опору, та отримати аналітичні вирази для визначення хвильових опорів багатоступеневих ліній з необхідною кількістю ступенів, що дозволяє безпосередньо по заданих областях каналів витоку інформації визначати хвильові опори ступенів фільтра. Даний метод доцільно використовувати при побудові фільтрів кіл живлення систем передачі інформації.

Ключові слова: НВЧ; фільтр; фільтрація; лінія передачі; смуга пропускання; хвиля; хвилевід.

Prihodko T., Basiuk I., Lishchynovska N.

SPECTRAL APPROACH TO DEVELOPMENT SYNTHESIS ON THE BASIS OF INHOMOGENEOUS LINES AND ISSUES OF DETERMINING WAVE RESISTANCE ACCORDING TO THE CENTRAL PART OF LEAKAGE INFORMATION CHANNELS (REVIEW)

One of the methods to prevent information leakage is filtering, which is carried out in order to prevent the propagation of high-frequency information signals outside the controlled area. To filter the signals in the power supply circuits, noise suppressing low-pass filters (LPF) are currently used. It is established that information leakage channels are determined by the location of the zeros and poles of the input impedance of the line on which the filter is based. In this case, two situations are possible: when building a filter, it is possible to change the zeros and poles of both the input resistance of the open circuit and the closed line. The set of zeros and poles consists of resonance and resonance frequencies that form the spectrum of the line. The procedure for increasing the frequency band of the barrier of distributed low-pass filters (LPF) due to the use of non-uniform (irregular) segments of transmission lines as filter sections is considered. This task has many solutions, one of which is the finding of such a function of wave impedance change from the line coordinate, for which there are no information leakage channels (parasitic channels) in a given frequency band. As a result, it is possible to obtain a significant gain in the discharge of the spectrum of resonant frequencies, improve the selective properties, suppress spurious bandwidths, and make technological nodes, the realization of which on the basis of homogeneous lines would be impossible. The considered techniques can be used to develop methods for constructing filters with a given distribution of information leakage channels by shifting the zeros

and poles of the input resistance and to obtain analytical expressions for determining the wave resistances of multi-step lines with the required number of steps, which allows determining wave resistances filter steps. This method is advisable to use when building filters for power supply systems of information transmission systems.

Keywords: superhigh frequency devices; filtering devices; transmission line; bandwidth; view, waveguide.

Приходько Т. Ю., Басюк И. О. Лициновская Н. А.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ ПОДХОД К СИНТЕЗА УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ НЕОДНОРОДНЫХ ЛИНИЙ И ВОПРОСЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПО ЦЕНТРАЛЬНЫМ ЧАСТОТАМ КАНАЛОВ УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ (ОБЗОР)

Одним из методов предотвращения утечки информации является фильтрация, которая осуществляется с целью предотвращения распространения высокочастотных информационных сигналов за пределы контролируемой зоны. Для фильтрации сигналов в цепях питания в настоящее время используются помехоподавляющие фильтры нижних частот (ФНЧ). Установлено, что каналы утечки информации определяются расположением нулей и полюсов входного сопротивления линии, на основе которой строится фильтр. При этом возможны две ситуации: при построении фильтра можно менять нули и полюсы как входного сопротивления разомкнутой, так и замкнутой линии. Набор нулей и полюсов составляют резонансные и противорезонансные частоты, которые образуют спектр линии. Рассмотрена процедура увеличения частотной полосы заграждения распределенных фильтров нижних частот (ФНЧ) за счет использования неоднородных (нерегулярных) отрезков линий передач в качестве секций фильтров. Данная задача имеет множество решений, одно из которых нахождение такой функции изменения волнового сопротивления от координаты линии, при которой в заданной полосе частот отсутствуют каналы утечки информации (паразитные каналы). Благодаря чему можно получить значительный выигрыш в разрядке спектра резонансных частот, повысить избирательные свойства, подавить паразитные полосы пропускания, сделать технологическими узлы, реализация которых на базе однородных линий была бы невозможной. Рассмотренные методики можно использовать для разработки методов построения фильтров с заданным распределением каналов утечки информации с помощью сдвига нулей и полюсов входного сопротивления и получить аналитические выражения для определения волновых сопротивлений многоступенчатых линий с необходимым количеством ступеней, что позволяет непосредственно по заданным областям каналов утечки информации определять волновые сопротивления ступеней фильтра. Данный метод целесообразно использовать при построении фильтров цепей питания систем передачи информации.

Ключевые слова: СВЧ; фильтр; фильтрация; линия передачи; полоса пропускания; волна; волновод.

Стаття надійшла до редакції 29.01.2019 р.

Прийнято до друку 20.02.2019 р.