

УДК621.372.061

МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОХВИЛЬОВИХ ПРИСТРОІВ, ВКЛЮЧЕНИХ ДО РЕАЛЬНИХ ТРАКТІВ**О. М. Кузьменко**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: kuzmenko-oksana@i.ua

Включення мікрохвильових пристроїв до реальних трактів як правило супроводжується спотворенням їх функціональних характеристик, що неможливо виявити безпосередніми експериментальними дослідженнями цих пристроїв. Для прогнозування вказаного спотворення пропонується використати методологію імітаційного моделювання на підставі рандомізації навантажень, що є підключеними до пристрою при його включенні у тракт. Використовуючи апарат матричного аналізу та теорії ймовірності, представлені орієнтовані на реалізацію імітаційного моделювання моделі мікрохвильових пристроїв і рандомізованих навантажень. З метою раціоналізації та підвищення ефективності процесу імітаційного моделювання, запропоновані алгоритми знаходження статистичних оцінок характеристик мікрохвильових пристроїв.

Ключові слова: параметри включення, математична модель, матриця розсіювання, статистичні оцінки.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ УСТРОЙСТВ, ВКЛЮЧЕННЫХ В РЕАЛЬНЫЕ ТРАКТЫ**О. Н. Кузьменко**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: kuzmenko-oksana@i.ua

Включение микроволновых устройств в реальные тракты как правило сопровождается искажением их характеристик, которые невозможно определить опытным путем. Для прогнозирования этих искажений предлагается использовать методологию имитационного моделирования на основе рандомизации нагрузок, подключенных к устройству в составе тракта. На основании аппарата матричного анализа и теории вероятности, представлены модели СВЧ-устройств и рандомизированных нагрузок, ориентированных на реализацию процесса имитационного моделирования. Для повышения эффективности процесса имитационного моделирования предложены алгоритмы нахождения оценок характеристик СВЧ-устройств.

Ключевые слова: параметры включения, математическая модель, матрица рассеяния, статистические оценки.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. На сьогодні, не зважаючи на існування величезної кількості наукових робіт, присвячених проектуванню мікрохвильових пристроїв (МП), питання щодо залежності характеристик МП від опорів включення (опорів, перерахованих до плечей МП у складі реальних систем), залишається поза увагою дослідників. При цьому вважається, що до плечей МП під час теоретичного дослідження підключені навантаження, що збігаються з опорами трактів стандартної вимірювальної апаратури при подальшому експериментальному дослідженні та налаштуванні (ці опори дорівнюють 50 чи 75 Ом і не містять реактивної складової) [1, 2]. Така методологія теоретичного дослідження та налаштування призводить до того, що в процесі встановлення мікрохвильових пристроїв до надвисокочастотних (НВЧ) трактів реальних радіоелектронних систем нерідко доводиться стикатися із ситуацією, за якої вказані пристрої не проявляють належних властивостей [3], хоча за результатами попередніх вимірювань та налаштувань їх функціональні характеристики (ФХ) повністю відповідають заданим вимогам. Це обумовлено залежністю характеристик МП від параметрів трактів, у складі котрих ці МП функціонують [4, 5].

На сьогодні представлені роботи, в яких описані методи визначення характеристик МП у складі трактів із дійсним [1, 2, 6] і комплексним [7–11] характером опорів включення. Спільною особливістю цих робіт є можливість визначення характеристик МП при фіксованих значеннях опорів включення, у той час, коли практично відсутні роботи, присвячені визначенню цих характеристик в умовах неповної або неточної інформації стосовно значень опорів

включення. Але, оскільки на етапі проектування інформація про опори включення є маловідомою чи невідомою взагалі [4], виникає необхідність подальшого розвитку дослідження залежності характеристик МП від опорів включення в умовах неповної інформації щодо останніх. На даний час представлена лише одна робота, присвячена дослідженню залежності характеристик МП від опорів включення у зазначених вище умовах [12], проте запропоноване розв'язання описаної задачі носить не узагальнюючий характер, оскільки досліджується вплив опорів включення на ФХ вузького класу МП.

Наведене обумовлює мету роботи, спрямованої на теоретичний аналіз і прогнозування ФХ МП, включених до реальних трактів в умовах неповної та неточної інформації щодо опорів включення.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Методологічні основи дослідження залежності ФХ МП від опорів включення у [4] запропоновано формулювати як задачі імітаційного моделювання (ІМ), згідно з яким на стадії проектування неповнота та неточність інформації щодо параметрів включення долається їх рандомізацією. При цьому задача моделювання МП виявляється пов'язаною з реалізацією відповідного процесу ІМ, може бути розділена на окремі складові та передбачає:

- розроблення моделі МП з урахуванням можливості підключення до його плечей довільних і в загальному випадку комплексних навантажень;
- визначення методики та відповідних алгоритмів задавання параметрів включення;
- забезпечення достатнього рівня надійності отриманих результатів;
- розроблення методики, спрямованої на раціональну та ефективну організацію процесу ІМ.

Об'єктом математичного моделювання вважаємо лінійний МП з довільною кількістю N однорідних ліній передачі (ЛП), що утворюють його плечі. У кожній ЛП вибрана єдина референсна площина, місце розміщення якої визначає відповідне плече МП та відносно якої визначаються елементи відповідної матриці.

На рис. 1 показано одне i -е плече багатополусного МП (багатополусника, $2 \times N$ -полусника), причому $i \in [1, N]$; N – загальна кількість плечей. Вважатимемо, що лінії передачі (ЛП), які утворюють плечі цього багатополусника, не містять дисипативних утрат, тобто їх хвильовий опір Z_{0i} не містить реактивної складової – активна величина ($Z_{0i} = r_{0i}$).

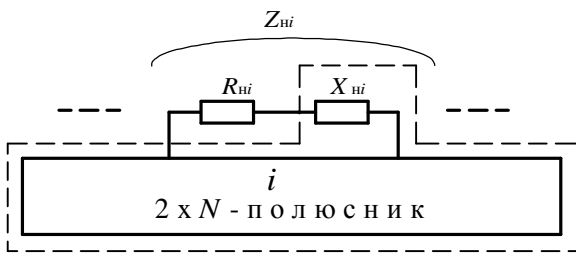


Рисунок 1 – $2 \times N$ -полусник, навантажений на комплексні імпеданси (пунктирна лінія вказує границі псевдопристрою)

Навантаження Z_{ni} відображають параметри (опори) включення, перераховані до референсних площин відомими методами [1]. У загальному випадку Z_{ni} – комплексні величини:

$$Z_{ni} = \text{Re}\{Z_{ni}\} + j\text{Im}\{Z_{ni}\} = R_{ni} + jX_{ni} = R_{ref\ i} + jX_{ref\ i}, \quad (1)$$

при цьому вважатимемо, що $R_{ni} \geq 0, R_{ref\ i} \geq 0$

Відомо чимало методів опису МП у термінах матричних моделей, у тому числі з урахуванням комплексного характеру навантажень [7–11]. Але на сьогодні найуживанішим є метод, що базується на матриці розсіювання потужності (*power scattering matrix*), яка пов'язана з уведенням у 1965 році К. Курокава (К. Kurokawa) [11] поняття хвиль потужності (*power waves*).

Характерною рисою опису МП у термінах матриці розсіювання потужності $S^{(m)}$ є залежність елементів цієї матриці саме від референсних імпедансів $Z_{ref\ i}$, що на методологічному рівні узгоджує теорію ЛП із теорією кіл.

Урахування параметрів навантажень на підставі матриці $S^{(m)}$ відбувається, зазвичай, на рівні матриць теорії кіл, наприклад, матриці імпедансів або передачі. При цьому «первісна» матриця розсіювання, що отримана при виконанні умов узгодження імпедансів, має бути відповідним чином перетворена [10], причому нівелюються (виключаються) параметри навантажень. Останнє дозволяє при подальших перетвореннях матриць ввести та врахувати параметри включення, перераховані, звичайно, до референсних площин.

За умови використання матриці імпедансів перехід до матриці розсіювання потужності реалізується співвідношенням [10]:

$$S^{(m)} = \mathbf{F} \times [\mathbf{Z} - \mathbf{Z}_{ref}^\dagger] \times [\mathbf{Z} + \mathbf{Z}_{ref}]^{-1} \times \mathbf{F}^{-1}, \quad (1)$$

де \mathbf{I} – одинична матриця; † – позначка, що визначає операцію Ермітового спряження;

$$\mathbf{Z}_{ref} = \text{diag}[Z_{ref\ 1}, Z_{ref\ 2}, \dots, Z_{ref\ N}]$$

Враховуючи правила операцій над матрицями, співвідношення (1) можна подати як

$$S^{(m)} = \mathbf{F} \times [\mathbf{Z} \times \mathbf{R}_{ref}^{-1} - \mathbf{I}] \times [\mathbf{Z} \times \mathbf{R}_{ref}^{-1} + \mathbf{I}]^{-1} \times \mathbf{F}^{-1} \quad (2)$$

$$\mathbf{X}_{ref} = \text{diag}[jX_{ref\ 1}, jX_{ref\ 2}, \dots, jX_{ref\ N}];$$

$$\mathbf{R}_{ref} = \text{diag}[R_{ref\ 1}, R_{ref\ 2}, \dots, R_{ref\ N}];$$

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z} + \mathbf{X}_{ref}.$$

Подальше перетворення (2) приводить до співвідношення

$$S^{(m)} = [\mathbf{Z}_{norm} - \mathbf{I}] \times [\mathbf{Z}_{norm} + \mathbf{I}]^{-1} \quad (3)$$

причому нормування матриці \mathbf{Z} здійснюється відносно активних складових $R_{ref\ i}$ референсних імпедансів.

Наведені результати показують:

1. За умови, що всі референсні імпеданси не містять реактивної складової матриця розсіювання потужності співпадає з узагальненою матрицею розсіювання [10].

2. Використання матриці розсіювання потужності пов'язане з формуванням артефакту у вигляді віртуального пристрою (псевдопристрою), який «поглинає» реактивні складові референсних імпедансів (див. (3) і рис. 1), при використанні активних складових як нормувальних величин, тобто на методологічному рівні можна вважати, що ФХ включеного до реального тракту МП, співпадатимуть з ФХ псевдопристрою. Це суттєво спрощує алгоритмізацію процесу ІМ, але слід пам'ятати, що основою введення матриці розсіювання потужності та категорії псевдопристрою є комплексно спряжене узгодження в плечах багатополусника.

Методика та відповідні алгоритми задавання параметрів включення базуються на аналізі організаційних засад розроблення та використання МП, з урахуванням матричної моделі МП. Цим вимогам задовольняє подання параметрів включення у вигляді відповідного двополусника, параметри якого визначені в термінах тої чи іншої матриці, тобто параметри включення можна визначити модулем і фазою (або активною та реактивною складовою) відповідного навантаження, коефіцієнтом відбиття Γ від нього електромагнітної хвилі, що поширюється у ЛП, або коефіцієнтом стоячої хвилі (КСХН – K_U), який відповідає модулю вказаного коефіцієнта відбиття. За умови, що МП проектується як складова широкого вжитку параметри тракту проектувальнику невідомі. При цьому вимоги до стабільності ФХ МП відносно параметрів включення доречно сформулювати у вигляді

обмежень, що накладаються на ці параметри для запобігання неприпустимого спотворення ФХ, наприклад, у вигляді: ФХ пристрою мають задовольняти технічним вимогам при його включенні в тракт де у кожному плечі КСХН навантаження не перевершує максимального значення $K_{U_{max}}$, при довільній фазі включення.

Математично наведені вимоги відносно i -го плеча МП можна подати як

$$p(K_{U_i}) = \begin{cases} 0, & \text{при } K_{U_i} < K_{U_{max i}}, \\ 1, & \text{при } K_{U_i} \geq K_{U_{max i}}, \end{cases} \quad (4)$$

$$p(y_i) = \begin{cases} 1, & \text{при } 0 \leq y_i \leq 2p, \\ 0, & \text{при } y_i > 2p \end{cases},$$

тобто для значень K_U (а отже і $|\Gamma|$) слід прийняти найпростіше розподілення (e – розподілення), а для фази Γ – прямокутне (рівномірне) розподілення ймовірностей в усьому діапазоні її можливого змінення. При цьому слід мати на увазі, що активна складова навантаження для пасивних пристроїв не може бути від’ємна. За умови пасивного тракту під час реалізації алгоритму генерації параметрів слід мати на увазі обмеження $\text{Re}\{\Gamma_i\} \geq 0$, яке задовольнятиметься при $-\frac{p}{2} \leq y_i \leq \frac{p}{2}$. Зважаючи на періодичність тригонометричних функцій, це не обмежує наведені вище вимоги.

За результатами ІМ з використанням моделі параметрів включення виду (4) проектувальник МП отримує інформацію, яка надає йому можливість обґрунтовано вибрати допуск, що характеризує вплив на ФХ пристрою параметрів включення, та задовольнити вказаним вимогам. З другого боку інформація, що міститься у сформульованих вимогах, дозволяє проектувальнику РЕС уже на початкових етапах проектування обґрунтовано вибрати характеристики тракту, до якого планується включити відповідний пристрій.

Надійність результатів ІМ характеризує ступінь довіри до отриманих статистичних показників ФХ досліджуваного МП (математичного сподівання, дисперсії, середньоквадратичного відхилення тощо) і пов’язана з реалізацією відомих [13] алгоритмів визначення довірчих інтервалів відповідних статистичних показників. Статистичні показники та їх довірчі інтервали залежать як від моделі параметрів включення, так і від значень L ФХ МП. При цьому, чим ширшим є інтервал змінення L , тим більшу варіативність потерпають відповідні довірчі інтервали.

На рис. 2, як приклад, наведені залежності довірчого інтервалу I математичного сподівання $M[L]$ величини L від кількості реалізацій K чисельного експерименту при різних первісних значеннях L (тобто тих значеннях, які мають місце при підключенні до МП узгоджених навантажень), а саме при $L = 0$ дБ – крива 1; $L = 3$ дБ – крива 2; $L = 10$ дБ – крива 3, за умови, що $K_{U_{max 1}} = K_{U_{max 2}} = 2$ при $-\frac{p}{2} \leq y_i \leq \frac{p}{2}$; $i = 1, 2$.

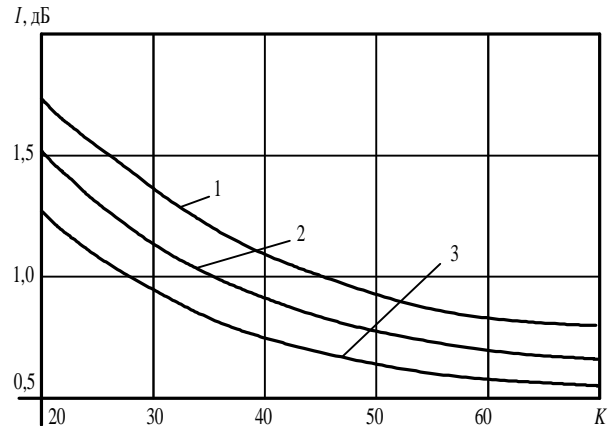


Рисунок 2 – Залежність довірчого інтервалу математичного сподівання величини L від кількості реалізацій чисельного експерименту при первісних значеннях: $L = 0$ дБ – крива 1; $L = 3$ дБ – крива 2; $L = 10$ дБ – крива 3

$$(K_{U_{max 1}} = K_{U_{max 2}} = 2 \text{ при } -\frac{p}{2} \leq y_i \leq \frac{p}{2}; i = 1, 2)$$

З рис. 2 видно, що збільшення кількості експериментів, звичайно, зменшує величину довірчого інтервалу, але на цю величину суттєво впливає і первісне значення L . Указане зменшення довірчого інтервалу практично припиняється при $K > 60$, однак величина I залишається більшою для менших значень величини L .

Останнє положення підтверджується даними наведеними на рис. 3, де показана залежність величини довірчого інтервалу I математичного сподівання величини L від значення самої величини затухання L , яке вносить МП в узгоджений тракт, при кількості реалізацій чисельного експерименту 20 (крива 1), 30 (крива 2) та 40 (крива 3).

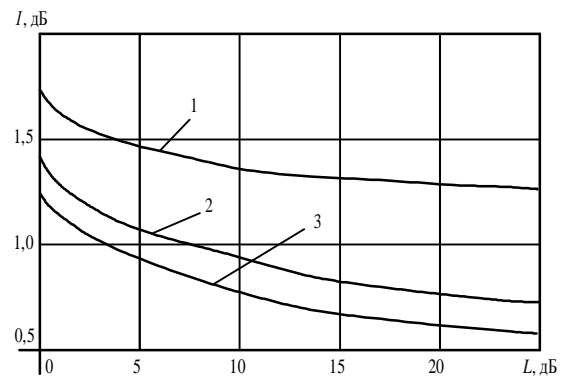


Рисунок 3 – Залежність довірчого інтервалу математичного сподівання величини L від первісних значень величини L , при кількості реалізацій чисельного експерименту: 20 (крива 1), 30 (крива 2) та 40 (крива 3)

$$(K_{U_{max 1}} = K_{U_{max 2}} = 2 \text{ при}$$

$$-\frac{p}{2} \leq y_i \leq \frac{p}{2}; i = 1, 2)$$

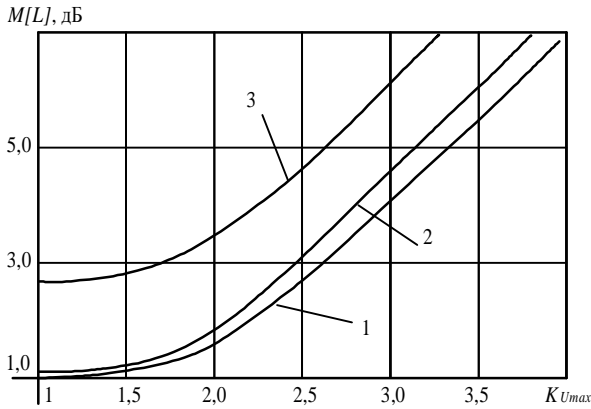


Рисунок 4 – Залежність від параметрів включення математичного сподівання мінімальних утрат у смузі пропускання смуго-пропускного фільтру з двома (крива 1), трьома (крива 2) і п'ятьма (крива 3) резонаторами

$$(K_{U_{max1}} = K_{U_{max2}} = 2 \text{ при } -\frac{P}{2} \leq y_i \leq \frac{P}{2}; i=1, 2)$$

Наведені дані приводять до висновку, що, наприклад, при ІМ частотного фільтру, параметри ФХ якого змінюються в широких межах, отримання прийняттого значення довірчого інтервалу при різних значеннях частоти потребуватиме суттєво різної (до десятків разів) кількості реалізацій відповідного чисельного експерименту. При цьому підвищення ефективності процесу ІМ без зниження надійності його результатів можна досягти за рахунок варіативності вказаної кількості експериментів на підставі визначеного критерію або використання відповідного алгоритму.

Для розв'язання вказаної задачі розрахунку математичного сподівання M та середньоквадратичного відхилення σ пропонується проводити на підставі рекурентних співвідношень, які не важко отримати на підставі матеріалів, наведених в [13], а саме

$$M_{k+1} = \frac{kM_k + y_{k+1}}{k+1}; \quad (5)$$

$$s_{k+1} = \sqrt{\frac{k}{k+1} \left[s_k^2 + \frac{(y_{k+1} - M_k)^2}{k+1} \right]}, \quad (6)$$

де $M_0 = 0$; $s_0 = 0$; y_k, y_{k+1} – значення ФХ МП при k -му та $(k+1)$ -му чисельному експерименті відповідно; M_k, s_k – визначені за результатами оброблення вибірки з k елементів математичне сподівання та середньоквадратичне відхилення ФХ відповідно; M_{k+1}, s_{k+1} – ті ж самі величини, але визначені за результатами вибірки з $(k+1)$ -го елемента.

Використання співвідношень (5) і (6) дозволяє забезпечити прийнятні значення довірчих інтервалів при варіативності значень ФХ МП. Для цього достатньо розрахунку вказаних інтервалів проводити одночасно з нарощуванням кількості реалізацій чисельного експерименту (починаючи, наприклад, з K -ї реалізації на кожному кроці або з періодичністю m реалізацій).

Як приклад на рис. 4 наведено результати ІМ смуго-пропускного металодіелектричного фільтру [14] з двома, трьома та п'ятьма резонаторами, а саме залежність від параметрів включення математичного сподівання $M [L]$ мінімальних утрат у смузі пропускання фільтру.

Параметри включення задавалися співвідношенням (4), при цьому, значення $K_{U_{max}}$ змінювалося в діапазоні від 1 до 4 ($K_{U_{max1}} = K_{U_{max2}} = K_{U_{max}}$). Первісна інформація щодо ФХ фільтру була отримана за результатами відповідних експериментальних досліджень.

Висновки. Використання методології імітаційного моделювання для дослідження МП дозволяє на ранніх стадіях проектування прогнозувати можливе спотворення їх ФХ, що обумовлене комплексними параметрами навантажень, які виявляються підключеними до пристрою при включенні його до НВЧ тракту радіоелектронних систем.

Математичне моделювання МП з огляду на реалізацію процесу ІМ полягає у визначенні його ФХ за умови підключення до плечей довільних комплексних навантажень та визначенні законів розподілення параметрів включення. Запропонована модель параметрів включення дозволяє отримати інформацію щодо можливих спотворень ФХ пристрою при його включенні до НВЧ тракту, на входах якого КСХН не перевершує деякого максимального значення, а фаза коефіцієнту відбиття приймає будь-які значення в діапазоні від 0 до 2π .

Розроблені алгоритми реалізації ІМ дозволяють забезпечити рівномірний рівень надійності отриманих результатів при різних значеннях ФХ пристроїв. Наведені результати ІМ металодіелектричних смуго-пропускних фільтрів показують ефективність запропонованої методики.

Подальший розвиток досліджень використання методів ІМ під час проектування МП доцільно спрямувати на розвинення математичного моделювання МП та параметрів включення з використанням експериментальних даних, а також на визначення можливих спотворень ФХ пристроїв різних класів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Синтез четырехполосников и восьмиполосников на СВЧ / А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич. – М.: Связь, 1971. – 388 с.
2. Матей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи, т. 1. – М.: Связь, 1971. – 439 с.
3. Кузьменко О.Н., Мирских Г.А. Имитационное моделирование СВЧ-фильтров на основе экспериментальных данных // Материалы 22-ой Международная Крымская конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 10–14 сентября 2012 г., г. Севастополь: в 2 т. – Т. 1. Севастополь:

Вебер, 2012. – С. 559–560.

4. Кузьменко О.Н., Мирских Г.А. Имитационное моделирование СВЧ устройств, включенных в несогласованные тракты // *Материалы 21-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии»*, 12–16 сентября 2011 г., г. Севастополь: в 2 т. – Т. 1. Севастополь: Вебер, 2011. – С. 440–441.

5. Кузьменко О.М., Мірських Г.О. Вплив на характеристики частотно-вибіркових мікрохвильових пристроїв параметрів включення // *Вісник НТУУ «КПІ»*. Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2012. – Вип. 49. – С. 129–135.

6. Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование / Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.

7. Prof. Niknejad. Scattering parameters // *EECS*. – University of California, Berkeley, 2008. – 242. – 43 pp.

8. Marks R.B., Williams D.F. A General Waveguide Circuit Theory // *J. Res. Natl. Inst. Stan.* – 1992. – Vol. 97. – PP. 543–562.

9. Microwave measurements division, Jarvis Drive, Morgan Hill. *Arbitrary impedance Application Note*; CA 95037–2809, 2002. – 12 pp.

10. Janusz A. Dobrowolski. *Microwave network design using scattering matrix*. – Artech house, 2010. – 269 p. – ISBN 13:978–1–60807–129-6.

11. Kurokawa K. *Power Waves and the Scattering Matrix* // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* – 1965. – Vol. MTT-13, № 2. – PP. 194–202.

12. Лебедь Б.М., Мирских Г.А., Лаврович В.А. Статистический анализ затухания ферритовых полосовых фильтров при произвольных нагрузках // *Электронная техника. Серия 1. – Электроника СВЧ*. – 1982. – Вып. 4. – С. 16–18.

13. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения: Учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.

14. Filters-Components-Modules for Communication Equipment // *Catalog № 081E2. "Murata"*. July, 2010. – 78 с.

SIMULATION OF SHF DEVICES SWITCHED IN THE REAL CHANNELS

O. Kuzmenko

National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute»

prosp. Peremogy, 37, Kiev, 03056, Ukraine. E-mail: kuzmenko-oksana@i.ua

The switching of SHF devices into the real channels is usually accompanied by distortion of their functional characteristics that can not be detected by direct experimental studies of these devices. To predict these distortions the methodology of simulation modelling based on randomized loads connected to the device within the channel is proposed. The materials presented concern to the issue of implementation of simulation models of SHF devices and randomized loads. The offered algorithm for estimation of the characteristics of SHF devices allows for efficiency improvement of simulation modelling.

Key words: switching parameters, mathematical model, scattering matrix, statistical estimations.

REFERENCES

1. *Synthesis of SHF quadrupoles and octopoles* / A.L. Feldshteyn, L.R. Yavich. – М.: Sviaz', 1971. – 388 p. [in Russian]

2. Matthew D.L., Young L., Jones E.M.T. *SHF filters, matching circuits and communication circuits*. Vol.1. – М.: Sviaz', 1971. – 439 p. [in Russian]

3. Kuzmenko O.N., Mirskih G. A Simulation of microwave filters based on experimental dates. // *Proceedings of the 22th International Crimean Conference. "Microwave and Telecommunication Technology"*. Sevastopol, 10–14 September 2012: In 2 vol. – Vol. 1. – Sevastopol: Weber, 2012. – PP. 440–441. [in Russian]

4. Kuzmenko O.N., Mirskih G.A. Simulation of SHF devices switched in unmatched tracts // *Proceedings of the 21th International Crimean Conference. "Microwave and Telecommunication Technology"*. Sevastopol, 12–16 September 2011: In 2 vol. – Vol. 2. – Sevastopol: Weber, 2011. – PP. 559–560. [in Russian]

5. Kuzmenko O.M., Mirskih G.O. Influence of inclusion parameters on the microwave devices characteristics // *Transactions of NTU "KPI". Radiotechnics. Radiodevice engineering*. – 2012. – Iss. 49. – PP. 129–135. [in Ukrainian]

6. Fusco V. SHF circuits. *Analysis and automated design*. – М.: Radio and sviaz', 1990. – 288 p. [in Russian]

7. Prof. Niknejad Scattering parameters // *EECS*. – University of California, Berkeley, 2008. – 242. – 43 p.

8. Marks, R.B., Williams D.F. A General Waveguide Circuit Theory // *J. Res. Natl. Inst. Stan.* – 1992. – Vol. 97. – PP. 543–562.

9. Microwave measurements division, Jarvis Drive, Morgan Hill. *Arbitrary impedance Application Note*; CA 95037–2809, 2002. – 12 p.

10. Janusz A. Dobrowolski. *Microwave network design using scattering matrix*. – Artech house, 2010. – 269 p.

11. Kurokawa K. *Power Waves and the Scattering Matrix* // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* – 1965. – Vol. MTT-13, № 2. – PP. 194–202.

12. Lebed' B.M., Mirskih G.A., Lavrovich V.A. Statistical analysis of the decay of ferrite bandpass filters with arbitrary loads // *Electronic Engineering. Series 1 – Microwave Electronics*. – 1982. – № 4. – PP. 16–18.

13. Wentzel E.S., Ovcharov L.A. *Probability theory and its engineering applications*. – М.: Vysshaja Shkola, 2000. – 480 p.

14. Filters-Components-Modules for Communication Equipment // *Catalog № 081E2. "Murata"*. July, 2010. – 78 p.

Стаття надійшла 11.11.2012.

Рекомендовано до друку
к.т.н., доц. Мосьпаном В.О.

