

РЕАЛІЗАЦІЯ КОМП'ЮТЕРНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ДИСКРЕТНИХ НВЧ ФАЗООБЕРТАЧІВ З КОМУТУЮЧИМИ МЕМС ЕЛЕМЕНТАМИ В ІНТЕГРАЛЬНОМУ ВИКОНАННІ

© Оборжицький В. І., 2004

Наведено результати комп'ютерного проектування двох основних різновидів НВЧ фазообертачів (з комутованими лініями передачі та відбивного типу) на базі вимикачів, реалізованих за технологією мікроелектромеханічних систем (МЕМС) з електростатичною активацією. Під час розробки програмного забезпечення для синтезу електричних параметрів перемикачів та одноступінчастих фазообертачів використано методики, які забезпечують узгодження на вході, заданий фазовий дискрет, враховують вплив неоднорідностей. За результатами комп'ютерного моделювання пристроїв з ємнісними та метал-контактними МЕМС вимикачами, ввімкненими паралельно чи послідовно в лінію передачі, зроблено деякі висновки про особливості застосування таких елементів у схемах фазообертачів.

The results of computer design of two main types of microwave phase shifters (switched- lines and reflective type) based on electrostatically activated microelectromechanical system (MEMS) switches. The electrical parameters of single pole multi-throw switches and single-stage reflective phase shifters calculation methods which provide for input matching, prescribed phase difference and take into account branching discontinuity effect were used in software. Some conclusions about properties of devices with capacitive and metal-to-metal MEMS switches were made in the result of computer simulation.

Вступ. Застосування мікроелектромеханічних систем (МЕМС) під час реалізації пристроїв керування амплітудою та фазою надвисокочастотного (НВЧ) сигналу відкриває великі можливості в галузі інтегральної електроніки НВЧ. Комутуючі МЕМС елементи, які входять до їх складу, характеризуються низькими значеннями ємності і опору контакту, порівняно з параметрами р-і-п-діодів та польових транзисторів, що дозволяє розробляти пристрої дискретного керування з покращеними частотними властивостями.

Розроблені для НВЧ діапазону МЕМС вимикачі з електростатичною активацією насамперед різняться типом конструкції і можуть бути зараховані [1] до консольно-балкових чи з фіксованою мембраною (рис.1). Обидві модифікації вимикачів виготовляються як з контактом ємнісного типу, так і з контактом металевого (резистивного) типу. Більшість ємнісних МЕМС вимикачів описуються такими еквівалентними параметрами [2,3]: ємністю C_d в активованому нижньому положенні (0.8-3пФ); ємністю C_u в нормальному верхньому положенні (30-50фФ). Вимикачі метал-контактного типу мають дуже малий контактний опір R_d (1-2 Ом), а також малу ємність C_u [4].

Ще одна суттєва конструктивна особливість МЕМС вимикачів полягає у способі їх під'єднання до лінії передачі НВЧ, на основі якої розробляється пристрій. Послідовне з'єднання з лінією вимикачів як мембранного, так і консольного типу досить просто реалізується в конструкціях на базі мікросмужкових ліній [3,4], а паралельне з'єднання здебільшого використовується в копланарних пристроях [2].

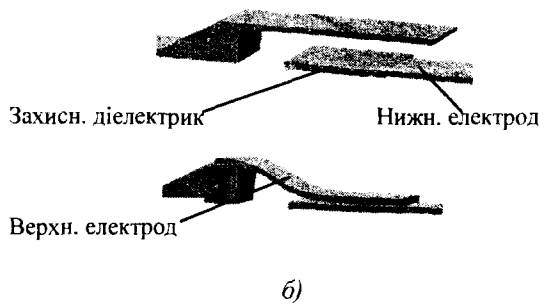


Рис. 1. Основні типи МЕМС вимикачів:
а) мембранний; б) консольно-балковий у двох станах

Вказані вище відмінності еквівалентних параметрів та способів під'єднання МЕМС вимикачів приводять до відмінностей в електричних характеристиках НВЧ пристроїв з такими елементами, зокрема і дискретних фазообертачів. Останні в свою чергу різняться схемною реалізацією. До найпоширеніших належать прохідні фазообертачі на комутованих відрізках ліній, а також відбивні фазообертачі, які є основою прохідних мостового чи шлейфного типу. Під час розробки цих пристроїв виникає необхідність у виборі відповідного типу вимикача, який би дозволяв задовольнити вимоги технічного завдання. Отримані комп'ютерним проектуванням результати досліджень з виявлення властивостей фазообертачів, реалізованих на базі основних різновидів МЕМС вимикачів, значно полегшують такий вибір.

Комп'ютерне проектування здійснюється в два етапи. Перший з них передбачає проведення синтезу електричних параметрів основних вузлів пристрою (хвильових опорів, нормованих довжин відрізків ліній передачі). На другому етапі на основі синтезованих параметрів за допомогою комп'ютерного моделювання розраховуються частотні характеристики пристрою загалом у мікросмушковому виконанні. Для синтезу та моделювання фазообертачів вибрано дві найхарактерніші групи еквівалентних параметрів МЕМС вимикачів: перша з $C_d = 1 \text{ пФ}$, $C_u = 40 \text{ фФ}$ (ємнісний тип); друга з $R_d = 1 \text{ Ом}$, $C_u = 1.75 \text{ фФ}$ (розроблений в [5] метал-контактний тип). При цьому розглядалися структури з паралельним і послідовним під'єднанням таких елементів у конструкціях інтегральних схем фазообертачів, виготовлених на базі мікросмушкових ліній з GaAs підкладкою товщиною 75 мкм. Моделювання здійснювалось за допомогою програмного комплексу Microwave Office [6] в смузі частот до 40 ГГц, в якій надається перевага застосуванню МЕМС компонентів порівняно з іншими типами ключів.

Фазообертачі на комутованих відрізках ліній. У конструкціях таких фазообертачів відрізки лінії передачі з різною довжиною розміщені між виходами двох однакових багатоканальних перемикачів (див. рис. 2). Завдяки комутації відповідних виходів цих перемикачів забезпечується проходження НВЧ сигналу по одному з відрізків, довжина якого забезпечує бажане значення фазового зсуву.

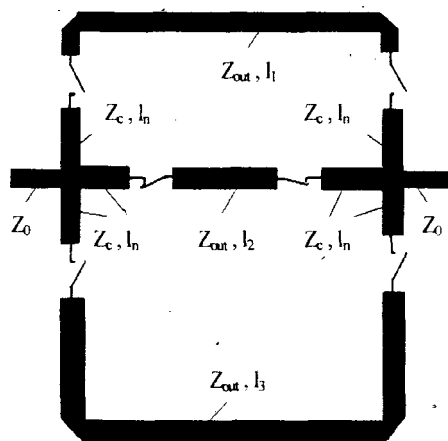


Рис. 2. Треступінчастий фазообертач на комутованих лініях

Для розрахунку електричних параметрів перемикачів доцільно скористатися методом синтезу [7], який дозволяє забезпечити узгодження на вході перемикача та врахувати вплив неоднорідності розгалуження ліній у його структурі. Кожна вихідна гілка перемикача містить відрізок лінії передачі з хвильовим опором Z_c , довжиною l_n (нормованою до довжини хвилі) і додаткову реактивну провідність B_a . Ці елементи утворюють трансформуючий чотириполюсник, який фактично і забезпечує вхідне узгодження та розв'язку між входом і закритим виходом. Параметри Z_c , l_n , B_a залежать від вибору значення деякого параметра m , меншого чи рівного параметру якості K [8] двополюсника, утвореного хвильовим опором Z_{out} вихідної лінії (комутованого відрізка фазообертача) та з'єднанням вимикачів. Мінімальне внесене загасання і максимальна розв'язка перемикача досягаються за умови, коли m дорівнює K , але при цьому значення реактивності B_a відрізняється від нуля. Оскільки додаткові реактивні елементи та відрізки ліній передачі впливають на частотні властивості схеми і можуть звужити робочу смугу частот, то під час синтезу доцільно зменшувати параметр m до рівня, при якому відпадає потреба в B_a .

За результатами синтезу та моделювання перемикачів з *послідовно* під'єднаними різнотипними МЕМС вимикачами встановлено такі спільні властивості:

- а) узгодження на вході досягається при малих значеннях параметра m , а це призводить до великих значень Z_c , які перевищують хвильовий опір вхідної лінії Z_0 ;
- б) хвильовий опір вихідних ліній Z_{out} не повинен перевищувати значення опору Z_0 ;
- в) довжина трансформуючої секції l_n під час синтезу не виходить за межі 0.1 від довжини хвилі;
- г) схема перемикача чутливіша до зміни еквівалентних параметрів МЕМС вимикачів у нормальному (верхньому, див. рис.1) стані;
- д) зі зростанням частоти рівень розв'язки зменшується.

Для випадку *паралельного* під'єднання різнотипних МЕМС вимикачів можна відмітити:

- а) зменшення під час синтезу параметра m приводить до зменшення хвильового опору Z_c ;
- б) синтез перемикачів можливий при значеннях Z_{out} як більших, так і менших за Z_0 ;
- в) довжина відрізка l_n під час синтезу виходить рівною чи більшою за 0.25 від довжини хвилі;
- г) параметри схеми чутливіші до зміни еквівалентних параметрів МЕМС вимикачів в активному (нижньому, див. рис.1) стані;
- д) при збільшенні числа виходів перемикача звужується його частотна смуга.

До основних відмінностей перемикачів з різними групами МЕМС вимикачів, ввімкнених *послідовно*, можна зарахувати те, що при збільшенні числа виходів перемикача з ємнісними вимикачами зростає Z_c і важко забезпечити $B_a=0$. У результаті звужується робоча смуга частот. У випадку метал-контактних вимикачів подібна проблема не виникає. Ще одна відмінність полягає в рівні розв'язки: для схем з ємнісними елементами вона майже вдвічі менша, ніж у випадку схем з метал-контактними вимикачами, для яких розв'язка перевищує 30дБ і це забезпечує їм низький рівень внесеного загасання (0.1–0.3дБ).

Основна відмінність перемикачів з різними типами паралельно під'єднаних МЕМС елементів також полягає в рівні розв'язки, яка не перевищує 20дБ для ємнісних вимикачів і досягає 35дБ для метал-контактних елементів. При цьому забезпечується низьке (0.1–1дБ) внесене загасання, але у вузькій частотній смузі.

На основі перемикачів з отриманими внаслідок синтезу параметрами розроблено та проведено дослідження фазообертачів на комутованих лініях передачі з різними групами МЕМС вимикачів і різними способами їх під'єднання до лінії. Необхідність у таких дослідженнях пояснюється можливістю проектування малогабаритних багатоступінчастих фазообертачів з дуже низьким рівнем втрат порівняно широкій частотній смузі.

На рис.3 та рис. 4 показані частотні характеристики, які були отримані внаслідок моделювання двоступінчастих фазообертачів з різницею фазовим зсувом 180° на частоті синтезу 33ГГц, побудованих на ємнісних та метал-контактних МЕМС вимикачах. У разі послідовного їх під'єднання в кожному стані внесене загасання не перевищує 0.5дБ в тій самій смузі частот, що і у відповідного перемикача. У цій смузі коефіцієнт стоячої хвилі за напругою (КСХН) не більший, ніж 2. З результатів моделювання видно, що в характеристиках внесеного загасання з'являються

“провали”, зумовлені резонансами, які збуджуються під впливом закритого каналу фазообертача [9]. Нижній “провал” на рис.3,а виникає під час поширення сигналу коротшим шляхом, а його положення залежить від розміру довшого відрізка лінії. Для верхнього “провалу” в області 38ГГц все навпаки. Рівень таких “провалів” безпосередньо залежить від рівня розв’язки перемикачів. З рис. 4, б видно, що у випадку метал-контактних вимикачів “провали” практично не помітні, оскільки розв’язка перемикача перевищує 30дБ.

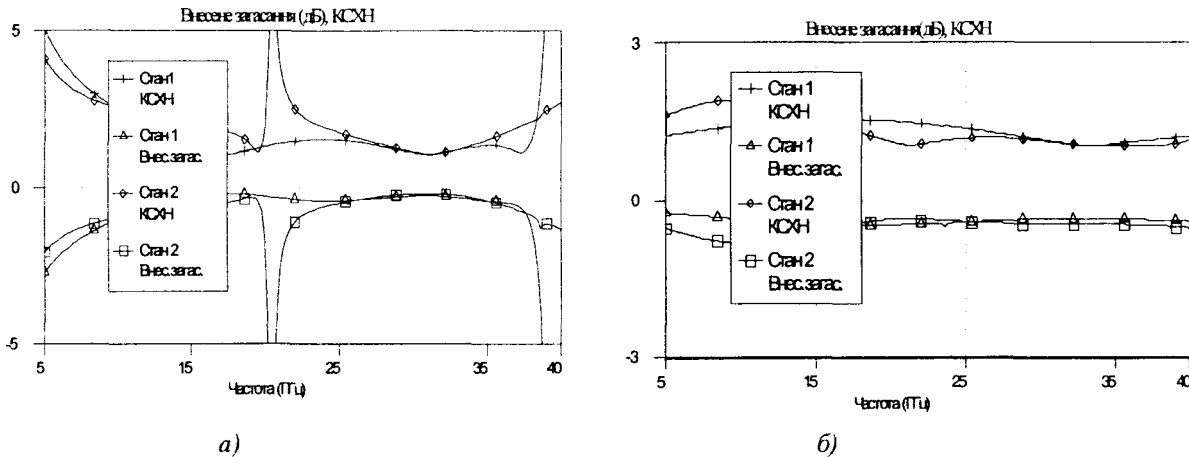


Рис. 3. Результати моделювання внесеного загасання і КСХН для двох станів фазообертачів з послідовно під’єднаними а) ємнісними та б) метал-контактними МЕМС вимикачами

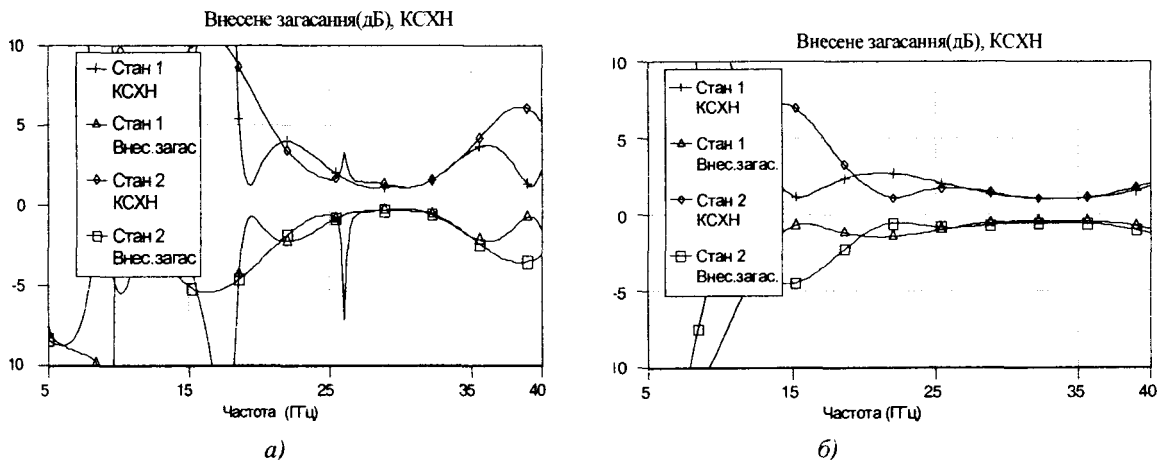


Рис. 4. Результати моделювання внесеного загасання і КСХН для двох станів фазообертачів з паралельно під’єднаними а) ємнісними та б) метал-контактними МЕМС вимикачами

Фазообертачі з перемикачами на основі паралельно під’єднаних МЕМС вимикачів характеризуються, як і у випадку відповідних перемикачів, дуже вузькою частотною смугою. З рис.4 видно, що в цій смузі внесене загасання фазообертачів з різними вимикачами не перевищує 1дБ, а КСХН не виходить за межі 2. Верхній резонанс закритого каналу фазообертача з ємнісними вимикачами (див. рис. 4,а) відсутній, оскільки він лежить за межами робочої смуги частот. Якихось суттєвих переваг пристроїв з певною групою паралельних МЕМС вимикачів не спостерігається.

На рис. 5 показано результати моделювання фазообертача на базі триканальних перемикачів (див. рис. 2). До його складу входять три відрізки ліній, завдяки яким на частоті 33ГГц забезпечуються фазові дискрети $-180^{\circ}/0^{\circ}/+180^{\circ}$. У схемі використано послідовно під’єднані метал-контактні вимикачі. Внесене загасання таких фазообертачів не перевищує 0.8дБ, а втрати для всіх трьох станів в діапазоні частот коливаються в межах 0.2дБ. КСХН в цьому діапазоні не перевищує 2.

Криві на рис. 5, 6, які відповідають фазовому зсуву сигналу в кожному з трьох станів схеми, достатньо лінійні. При використанні в таких багатоступінчастих фазообертачах ємнісних МЕМС вимикачів виникають резонанси закритих каналів, і це звужує їх робочу смугу частот. Наведені результати моделювання повністю відповідають результатам досліджень подібних пристроїв [4,10], що підтверджує ефективність методу синтезу [7].

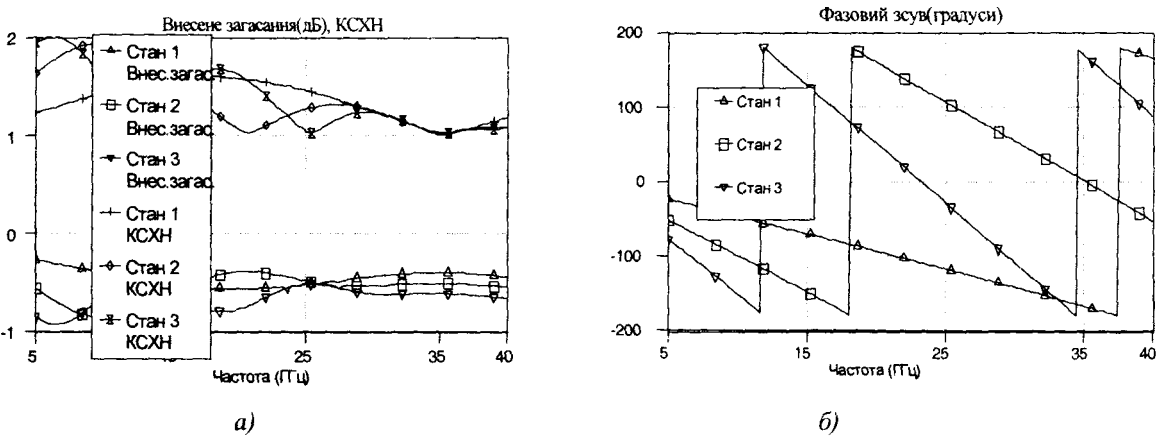


Рис. 5. Результати моделювання (а) внесеного загасання, КСХН та (б) фазового зсуву для трьох станів фазообертача з триканальними перемикачами

Фазообертачі відбивного типу. Під час синтезу одноступінчастих відбивних фазообертачів (ОВФ), які є основною складовою частиною дискретних прохідних фазообертачів, враховують умови оптимізації за фазою і втратами. Під цим розуміють можливість забезпечення стабільного в смузі частот фазового дискрету, тобто різниці фаз коефіцієнтів відбиття на вході фазообертача в двох станах комутуючого елемента, а також можливість забезпечення однакового рівня втрат в обох станах ключа. З цією метою в схему ОВФ (див. рис. 6) вводиться реактивний чотириполюсник, утворений відрізком лінії з хвильовим опором Z_c , нормованою довжиною l_n та ідеальним трансформатором, своєю чергою утвореним під'єднанням до лінії з Z_c відрізка вхідної лінії з хвильовим опором Z_0 [8].

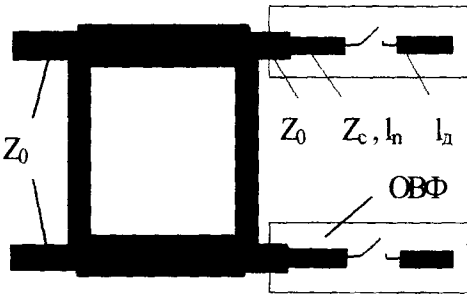
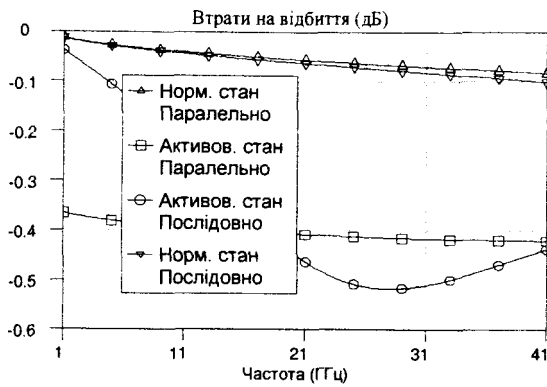


Рис. 6. Фазообертач мостового типу на базі ОВФ

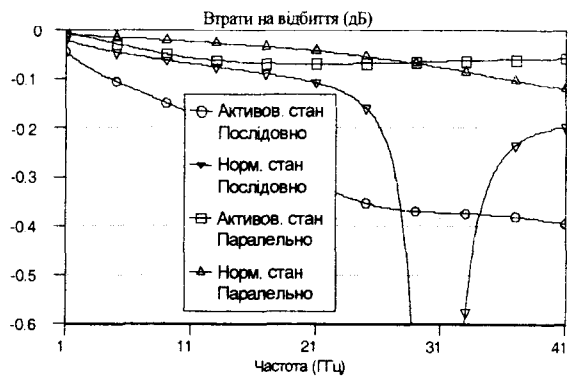
Синтез ОВФ доцільно здійснювати за методикою [11], яка дозволяє вводити в схему додаткові реактивності чи відрізки ліній передачі для отримання необхідних значень параметрів чотириполюсника. У випадку, коли роль комутуючого елемента виконують МЕМС вимикачі, під час синтезу слід врахувати таке:

- а) оскільки в еквівалентних параметрах вимикачів частково (метал-контактні) чи повністю (ємнісні) відсутні активні складові, то виконати умову оптимізації за втратами не вдається і значення опору Z_c приймається довільним;
- б) завдяки високому значенню параметра якості K МЕМС вимикачів для розрахунку довжини l_n , коефіцієнта трансформації і через нього опору Z_0 можуть бути використані співвідношення [11], отримані з умови забезпечення частотної стабільності фазового дискрету ОВФ на р-і-п діодах;

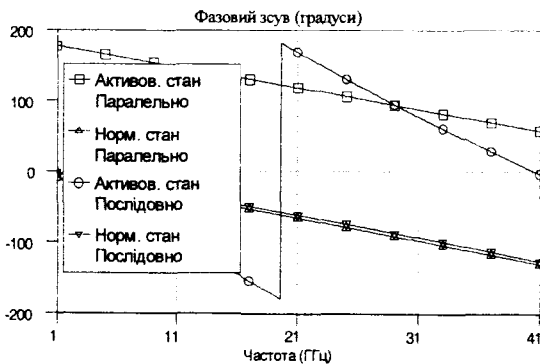
в) введення в схему додаткової реактивності дозволяє одержати бажані значення Z_c та Z_0 чи синтезувати схему без трансформатора, тобто забезпечити $Z_c = Z_0$.



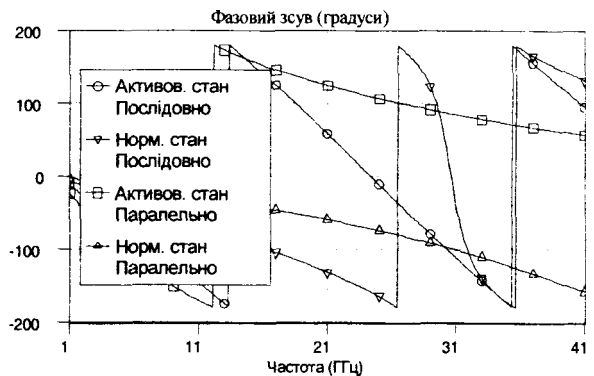
а)



б)



в)



г)

Рис. 7. Результати моделювання втрат на відбиття і фазового зсуву ОВФ з а), в) метал-контактним та б), г) ємнісним MEMS вимикачем

Синтез відбивних фазообертачів та їх моделювання здійснювали для вказаних вище параметрів діелектричної підкладки. Як і в попередньому випадку, розглядали варіанти використання тих самих різновидів MEMS вимикачів. На рис. 7 показано частотні характеристики, отримані шляхом моделювання ОВФ з фазовим дискретом 180° на частоті синтезу 30 ГГц при послідовному та паралельному під'єднанні вимикачів. За результатами досліджень можна зробити такі висновки:

а) при використанні метал-контактних вимикачів не забезпечується оптимізація за втратами (див. рис. 7,а), оскільки в нормальному стані вимикачі суто реактивні. Рівень втрат ОВФ з ємнісними вимикачами в обох станах практично однаковий;

б) спроба забезпечити $Z_c = Z_0$ за допомогою додаткового відрізка лінії передачі у деяких випадках, особливо при великих значеннях фазового дискрету, може привести до півхвильової довжини цього відрізка і в результаті до виникнення паразитного резонансу при закритому (паралельне ввімкнення) чи відкритому (послідовне ввімкнення) ключі, як це видно з рис. 7,б у випадку ємнісного вимикача;

в) для обох типів MEMS вимикачів забезпечується оптимізація за фазою в достатньо широкій смузі частот. Фазові характеристики ОВФ зберігають лінійність, за винятком області паразитного резонансу, як на рис. 7,г.

На базі описаних вище ОВФ можуть бути реалізовані прохідні фазообертачі мостового чи шлейфного типу. На рис.8 показано результати моделювання мостового фазообертача з фазовим дискретом 180° . У схемі використано квадратний (шлейфний) міст, синтезований за методом [12], який дозволяє врахувати вплив неоднорідності трійникових розгалужень.

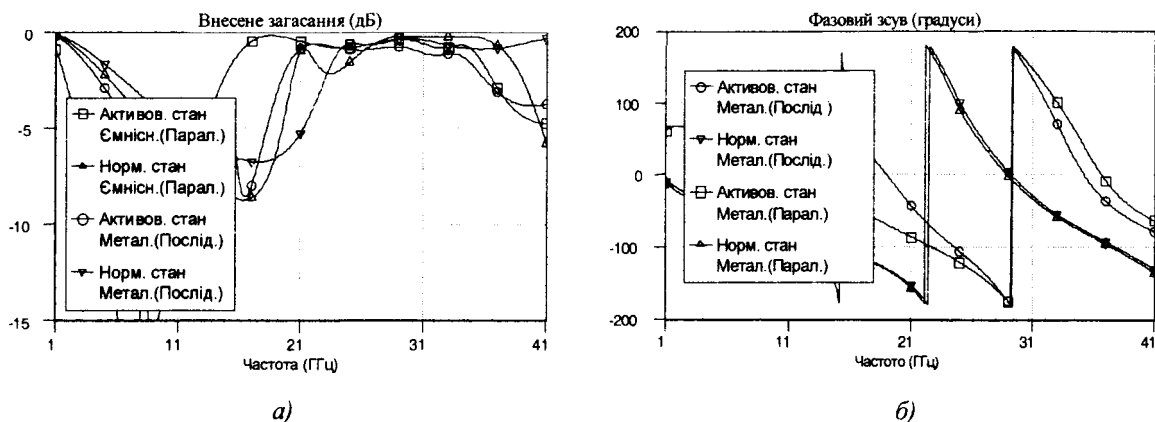


Рис. 8. Результати моделювання а) внесеного загасання і б) фазового зсуву мостових фазообертачів з різними типами МЕМС вимикачів при різному їх під'єднанні

З отриманих результатів видно, що рівень втрат в обох станах фазообертача як з ємнісними, так і з метал-контактними вимикачами не перевищує 1дБ при достатньо хорошому узгодженні. На відміну від фазообертача на комутованих лініях у мостового фазообертача спосіб під'єднання вимикачів відчутно не впливає на ширину частотної смуги. Насамперед вона залежить від властивостей самого моста, вузькосмуговість якого приводить до погіршення характеристик фазообертача, особливо в області нижніх частот (див. рис. 8,а). Крім того порушується лінійність фазових характеристик та частотна стабільність фазового дискрету, як це видно з рис. 8,б.

Висновки. Використання в дискретних фазообертачах МЕМС вимикачів дозволяє зменшити внесене загасання до рівня 0.1–0.5дБ в широкій смузі частот, особливо в конструкціях фазообертачів з комутованими лініями передачі. Але в цьому випадку можуть виникати резонанси закритого каналу, які спотворюють частотну характеристику. Тому необхідно вибирати перемикачі з високим рівнем розв'язки, який залежить як від типу МЕМС вимикачів, так і від способу їх під'єднання до лінії. Винятково хороші параметри пристроїв забезпечують вимикачі метал-контактного типу, які мають дуже малі значення ємності нормального стану та опору активованого стану. При цьому такі МЕМС елементи краще під'єднувати послідовно. Ємнісні МЕМС вимикачі доцільно застосовувати з паралельним під'єднанням, коли потрібно одержати високий рівень розв'язки та низькі значення хвильових опорів відрізків ліній у неширокій частотній смузі.

У конструкціях відбивних фазообертачів можна використовувати обидва різновиди МЕМС вимикачів при різних способах їх під'єднання, але при цьому ємнісні елементи забезпечують краще вирівнювання втрат в обох станах. Частотна смуга прохідних фазообертачів відбивного типу, а також лінійність їх фазових характеристик більшою мірою залежить від властивостей разв'язуючого пристрою.

Результати досліджень підтверджують ефективність та доцільність застосування запропонованих методів синтезу при комп'ютерному проектуванні фазообертачів.

1. D. Peroulis, S. P. Pacheco, K. Sarabandi and L. P. B. Katehi, "Electromechanical considerations in developing low-voltage RF MEMS switches," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-51, No.1, – pp. 259–270, Jan. 2003. 2. J. B. Muldavin and G. M. Rebeiz, "30 GHz tuned MEMS switches," 1999 *MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.* 99.4, vol. 4, – pp. 1511–1514. 3. J. Papapolymerou, K. L. Lange, C. L. Goldsmith, A. Malczewski and J. Kleber, "Reconfigurable double-stub tuners using MEMS switches for intelligent RF front-ends," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-51, No.1, – pp. 271–278, Jan.2003. 4. J. B. Hacker, R. E. Mihailovich, M. Kim and J. F. DeNatale, "A Ka-band 3-bit RF MEMS true-time-delay network," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-51, No. 1, pp. 305–308, Jan. 2003. 5. В. Д. Разевиг, Ю. В. Попанов, А. А. Курушин. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office. Под ред. В. Д. Разевига. - М., СОЛОН-Пресс, 2003, – 496 с. 6. R. E. Mihailovich, M. Kim, J. B. Hacker, E. A. Sovero, J. Studer, J. A. Higgins and J. F. DeNatale, "MEM relay for reconfigurable RF circuits," *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.*, vol. 11, – pp. 53–55, Feb. 2001. 7. R

Оборжицький. Особливості синтезу електричних параметрів багатоканальних НВЧ перемикачів // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2004. – №508. – С. 207–215. 8. Хижа Г. С., Вендик Т. Б., Серебрякова Е. А. СВЧ фазовращатели и переключатели: Особенности создания на р-и-п диодах в интегральном исполнении. – М.: Радио и связь, 1984. – 184 с. 9. I. Bahl and P. Bhartia, *Microwave Solid State Circuit Design*. New York: Wiley, 1988, pp. 892–896. 10. G. Tan, R. E. Mihailovich, J. B. Hacker, J. F. DeNatale and G. M. Rebeiz, "Low-loss 2- and 4-bit TTD MEMS phase shifters based on SP4T switches," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-51, No. 1, – pp. 297–304, Jan. 2003. 11. Оборжицький В., Самсонюк О. Особливості синтезу дискретних відбивних НВЧ фазообертачів // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2001. – №428. – С. 137–140. 12. Оборжицький В. І. Синтез двошлейфного моста на базі смужкових ліній передачі з врахуванням впливу неоднорідностей // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". – 2002. – №443. – С. 124–126.

УДК 681.513

А.Ю. Нога

Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра ПЗ

АЛГОРИТМИ КЛАСИФІКАЦІЇ ДИНАМІЧНИХ СИТУАЦІЙ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ

© Нога А. Ю. 2004

Розглянуто алгоритм самоорганізації, оснований на методі потенційних функцій, використання теорії функціональних систем Анохіна для теорії і практики ІнС. Наведено структурну схему класифікатора.

The algorithm of self-organisation based on potential function method is considered. The structural sheme of classifier is given.

Вступ. Одним з перспективних напрямів синтезу інтелектуальних систем (ІнС) є симбіоз експертних систем, методів самоорганізації, прийняття рішень, адаптивного управління і оцінювання, а також алгоритмів формування мети, об'єднаних в межах функціональної структури П.К. Анохіна [1].

У межах концепції синтезу ІнС сучасна складна система управління розробляється як функціональна система з властивим їй пристосовним ефектом. Відмінна риса будь-якого результату, який сприяє досягненню мети, це те, що він зважає на принцип саморегуляції і володіє однаковими вузловими механізмами, а саме: аферентним синтезом мети, ухваленням рішення до дії, аферентною програмою дії, акцептором дії, зворотною аферентацією про параметри результату і звіренням параметрів отриманого результату з параметрами, що прогнозуються акцептором дії.

Сучасна система управління, що реалізовує вищезазначені механізми, – це ІнС, тобто об'єднана інформаційним процесом сукупність технічних засобів і програмного забезпечення, що працює у взаємозв'язку з людиною або автономно, здатна на основі апріорної інформації і поточних вимірювань за наявності мотивації синтезувати мету, виробляти рішення про дію і знаходити раціональні способи досягнення мети.

Основними перевагами використання теорії функціональних систем Анохіна для теорії і практики ІнС, є універсальна архітектура функціональних систем, а також вигострені еволюцією механізми функціональних систем.

Синтез мети здійснюється з урахуванням інформації про зовнішнє середовище, власному стані ІнС, мотивації і за наявності пам'яті. Потім динамічна експертна система оцінює, яка є в основі ухвалення рішення, а також здійснюється прогноз для акцептора дії. Після вироблення рішення реалізується управління.