

УДК 621.372.852.21

**ПРОЕКТУВАННЯ МЕМС ФАЗООБЕРТАЧІВ НВЧ ДІАПАЗОНУ ДЛЯ ТЕЛЕВІЗІЙНОГО ЗВ'ЯЗКУ****А. С. Антоненко, М. Д. Гераїмчук**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»  
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: ehnaton1990@gmail.com

Представлено радіочастотні МЕМС фазообертачі, їх характеристики і значення в системі бездротового зв'язку. Також розглядаються різні типи радіочастотних фазообертачів з використанням різних пристроїв, таких як PIN діодів. Разом з тим у статті представлено типи аналізу для перевірки роботи радіочастотного фазообертача в графічному вигляді, аби показати, як напруга притягання впливає на кінцеве відхилення перемикача. Запропоновано структурно-функціональні схеми фазообертачів дискретизованих гармонічних сигналів. Також показано доцільність використання діелектричних матеріалів у фазообертачах НВЧ і проведено теоретичне дослідження характеристик інтегральних ліній передачі на багат шарових діелектричних основах. Будучи реалізовані в сучасній інтегральній схемній елементній базі, такі схеми можуть знайти різноманітне застосування.

**Ключові слова:** радіочастотний МЕМС фазообертач, модуль Юнга, ізоляція, внесені втрати, електростатичний заряд.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕМС ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ СВЧ ДИАПАЗОНА  
ДЛЯ ТЕЛЕВИЗИОННОЙ СВЯЗИ****А. С. Антоненко, М. Д. Гераїмчук**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»  
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: ehnaton1990@gmail.com

Представлены радиочастотные МЕМС фазовращатели, их характеристики и значения в системе беспроводной связи. Также рассматриваются различные типы радиочастотных фазовращателей с использованием различных устройств, таких как PIN диодов. Вместе с тем в статье представлены типы анализа для проверки работы радиочастотного фазовращателя в графическом виде, чтобы показать, как напряжение притягивания влияет на конечное отклонение переключателя. Предложены структурно-функциональные схемы фазовращателей дискретизированных гармонических сигналов. Также показано целесообразность использования диэлектрических материалов в фазовращателях СВЧ и проведено теоретическое исследование характеристик интегральных линий передач на многослойных диэлектрических основах. Будучи реализованы в современной интегральной схемной элементной базе, такие схемы могут найти разнообразное использование.

**Ключевые слова:** радиочастотный МЕМС фазовращатель, модуль Юнга, изоляция, внесенные потери, электростатический заряд.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Під МЕМС-пристроями мається на увазі інтегровані мікроелементи або системи з розмірами від мікрометрів до міліметрів, що об'єднують електричні і тримірні механічні компоненти, що виготовлені за технологією сумісними з технологіями мікросхем. Технологія МЕМС продемонструвала універсальність застосування в біології, природознавстві в аерокосмічній і телекомунікаційній галузях науки своїми унікальними і хорошими характеристиками. Зокрема, останнім часом, динамічний розвиток персональних пристроїв зв'язку привели частоту сигналу до міліметрового і надвисокочастотного (НВЧ) діапазону.

Клас радіочастотний МЕМС включає пасивні компоненти (ключі, ємності, елементи індуктивності, резонатори), схемо-технічні вузли (частотні фільтри, генератори, фазообертачі, лінії затримки) і активні пристрої і системи (фазовані антенні решітки, перемикачі матриць, приймально-передавальні блоки мобільних засобів зв'язку і т.д.). В основному сучасні МЕМС-структури виготовляють методами об'ємної або поверхневої мікрообробки, а також за допомогою вико профільної технології. При об'ємній мікрообробці тримірна структура, що складається з гнучких консолей (кантилеверів), отворів, канавок і мембран, як правило формується шляхом видалення певних ділянок підкладки (як правило, кремнієвої). При цьому використовується ізотопне (для створення закруглених поглиблень),

анізотропне (для отримання V – образних канавок, пірамід і виямок) або глибоке іонне травлення (для отримання прямокутних карманів). В деяких випадках тримірну структуру створюють шляхом з'єднання декількох підкладок з створенням вертикальних зв'язків на атомарному рівні (метод нарощування).

Радіочастотний фазообертач (РЧ) є мережею двох портів (рис. 1) за умови, що різниця фаз між вихідним сигналом і вхідним сигналом можна керувати за допомогою керуючого сигналу, як правило, зміщенням постійного струму [1]. Останні розробки в області технології радіочастотних МЕМС, показали себе з найкращого боку, так як радіочастотні МЕМС на основі таких пристроїв, як перемикачі, котушки індуктивності, датчики тиску і температури вимагають істотного зниження потужності постійного струму для телекомунікаційних просторів на основі радіолокаційних систем. В цілому феритові фазообертачі мають низькі внесені втрати і можуть працювати на істотно більш високих ступенях, але мають складні характеристики і мають високу вартість виготовлення. У той час, як напівпровідникові фазообертачі з використанням PIN діодів є менш дорогими і меншими за розмірами, ніж феритові, їх застосування було обмеженим через високі внесені втрати. Тому інші види фазообертачів з використанням мікромеханічних систем (МЕМС), можуть бути використані для подолання вищевказаних обмежень.



Рисунок 1 – Мережа двох портів радіочастотного фазообертача

Сучасні РЧ МЕМС-ключі (комутатори НВЧ-сигналів) можуть бути контактними («метал-метал») або з ємністю замикання ланцюга. В кінці 2007 року був запропонований новий клас контактних ключів для діапазону міліметрових хвиль – типу «рідина-метал» складає від нуля (DC) до 6-40 ГГц. Вони більш чутливі до температурних і механічних (ударів і вібрацій) впливів. Частотний діапазон ємнісних ключів складає 6-120 ГГц. Ключі типу «рідина-метал» розраховані на частоти 20-100 ГГц. Вони відрізняються малими втратами в замкнутому стані (1,3 дБ на частоті 40 ГГц) і підвищеною потужністю комутованого сигналу.

Фазообертачі з низькими внесеними втратами, низькою потужністю керування з постійною надійністю і низькою собівартістю є ключем до розробки антен полегшеної ваги. Існують дві основні конструкції фазообертачів: аналогового і цифрового наближення. Аналогові фазообертачі здійснюють безступінчастий зсув фази від  $0^{\circ}$  до  $360^{\circ}$  і побудовані з використанням діодів. Цифрові фазообертачі забезпечують дискретний набір фазових затримок і зазвичай будуються за допомогою перемикачів. Існують дві вимоги до фазообертачів: (1) постійність фази від частоти і (2) лінійність фази в залежності від частоти. Як правило конструкції фазообертачів використовуються для обробки сигналів в радіолокації і застосовуються для контрольно-вимірювальних систем високої точності, і краще за все вони побудовані з використанням комутованих мереж або завантажених технологічних ліній. Лінійні конструкції фазообертачів переважно використовуються в часовій затримці фазованих антенних решіток (ФАР) і були найкраще побудовані з використанням керованих ліній затримки [2].

В цій статті в основному концентрується увага на проектуванні радіочастотних фазообертачів з зсувом елементарної комірки за допомогою періодичного розміщення шунтуючих перемикачів МЕМС на спільному хвилеводі передачі. Радіочастотний перемикач страждає від деяких обмежень, таких як обмеження швидкості роботи, більш високі напруги спрацювання і деякі проблеми надійності. Ці проблеми можуть бути подолані за допомогою процесу мініатюризації.

Метою роботи є дослідження можливості створення керованого за допомогою МЕМС хвилевідного фазообертача С діапазону і створення на його базі перетворювача поляризації з колової на лінійну і навпаки.

Для досягнення даної мети в статті розглянуто наступні основні задачі:

- дослідження особливостей розповсюдження електромагнітних хвиль в середині структури фазообертача, що містить МЕМС;

- дослідження основних характеристик різних конструкцій резонансних фазообертачів на МЕМС структурах з активним середовищем;
- проведення теоретичного розрахунку найбільш використовуваних конструкцій і надання оцінки їх практичного застосування;
- розробка і створення діючих макетів частотних фазообертачів на основі МЕМС, що містять електро-керовані перемикачі на діелектричній основі, а також дослідження їх характеристик.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Перемикачі і їх компоненти продемонстрували виняткову продуктивність при радіочастотах міліметрових хвиль, при цьому вони мають низькі внесені втрати, високу ізоляцію і низьку керовану потужність. МЕМС перемикач може бути сконструйований для фазового зсуву, шляхом перемикання між двома різними напрямками сигналу, як показано на рис. 2, або може бути використаний, як розподілений ємнісний перемикач, в якому вимикач змінює ефективну ємність лінії передачі. Поєднання технології МЕМС в унікальній конструкції з новим діелектричним матеріалом в основі в результаті дає легкий, недорогий фазообертач із значно меншими витратами на виробництво. Перевага використання нових діелектричних матеріалів є те, що вони можуть дати безперервну зміну фази. Фазообертачі на PIN діодах можуть генерувати зрушення фази шляхом перемикання сигналу між двома різними напрямками, довжинами  $l_0$  і  $l_0+1$ , як показано на рис. 2. Фазовий зсув відповідає шляху затримки  $\beta l$ , де  $\beta$  – це константа середовища в якому відбувається затримка сигналу.

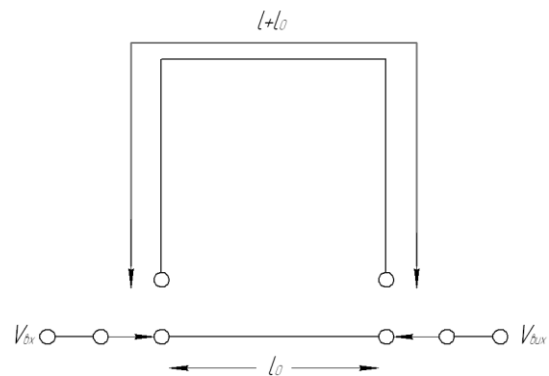


Рисунок 2 – Схематичне зображення МЕМС перемикача (PIN діод), як лінія зсуву фази

Різні типи МЕМС перемикачів можуть бути класифіковані за наступними серіями: резистивний перемикач (метал-метал) або ємнісний шунтований перемикач (метал-діелектрик-метал), другий зазвичай використовується для високочастотних додатків через його більш низьку напругу спрацювання і високу швидкість перемикання в порівнянні з комутованою серією. Ці фазообертачі в цілому складаються з  $180^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $22,5^{\circ}$ ,  $11,25^{\circ}$  фазообертачів розташованих каскадно. Різниця між довжинами шляхів поширення радіочастотних сигналів визначається фазовим зрушенням.

МЕМС фазообертачі мають низькі втрати продуктивності через конструкцію мосту, який ефективно

запобігає витoku струму. Однак, незважаючи на ці переваги, зниження напруги спрацювання, як і раніше є ключовим питанням для MEMS структур. Так як висота MEMS мосту є щонайменше 3 мкм, як правило така величина мосту потрібна, щоб зменшити паразитну ємність мостів, це призводить до напруги спрацювання 100 В (матеріал мосту - метал). Напруга спрацювання може бути зменшена шляхом зменшення висоти мосту або необхідно застосовувати матеріали мосту з відносно низьким модулем пружності, наприклад таким, як полімер [4].

Керовані MEMS-конденсатори необхідні для створення переналаштовуваних частотних фільтрів, керованих напругою генераторів (КНГ) в складі систем фазової синхронізації і т.д. Використання для цього напівпровідникових компонентів (варикапів) приводить до суттєвого обмеження системи по допустимому рівню потужності. Крім цього ці компоненти не сумісні з технологією виробництва мікросхем. MEMS-вариктори позбавлені подібних недоліків. Вони можуть бути виконані у вигляді: паралельно розташованих пластин зі змінюючою відстанню між ними; сегментів типу «метелик», що приймають декілька кутових положень відносно осі; зустрічно-штирьової структури зі змінним перекриттям, у вигляді сукупності конденсаторів каліброваної ємності з MEMS-ключами, що керуються двійковим кодом. У першому випадку верхня пластина являє собою пружину, відстань між якою і нижню пластину змінюється за допомогою електростатичних сил, викликаних прикладених до пластин напругою.

Найбільш характерна тенденція розвитку РЧ MEMS – відмова від поверхневого монтування окремих компонентів схеми і перехід до створення замовлю вальної системи на кристалі (SoC), що збирається в вакуумний і волого-захисний корпус. Технологічно можливості виготовлення MEMS-вузлів характеризуються найбільшим розміром оброблюваної кременевої пластини (на сьогоднішній день – до 200x200 мм) і мінімальною товщиною одиничного шару (зараз – 0,1 – 10 мкм).

Будь-який вузол РЧ MEMS містить актуатор - мікромеханізм, що перетворює керований сигнал в рух, і якір – закріплений на одному кінці консолі (балку, кантилевер), рухоме коромисло або мембрану. При реалізації РЧ MEMS більше значення має якість актуатора. При кількісній його оцінці враховуються такі параметри, як лінійність, похибка, відтворюваність характеристик, розрізняюча здатність, гістерезис, порогове значення напруги спрацювання, власний шум, механічна несуча здатність, розмах переміщення, чутливість до керованого впливу, вид і тривалість перехідної характеристики, енергія споживання, необхідний для керування рівень сигналу, зносостійкість.

Ємнісний шунтований перемикач складається з тонкого металевого мосту, що дотикається до центрального електрода хвилеводу, який рухається з упередженою наругою постійного струму.

Тонкий шар діелектрика, такий, як кремній, покладений на нижній електрод, щоб зменшити доти-

кання і забезпечити ізоляцію між металевим мостом і нижнім електродом. Рис. 3 являє собою принципову схему перемикаючого мосту. Коли нижній електрод зміщується до металевого мосту під дією постійного струму, тоді значення електростатичної сили набуває величини при, якій металева мембрана притягуються вниз у напрямку нижнього електрода, як показано на рис. 3.

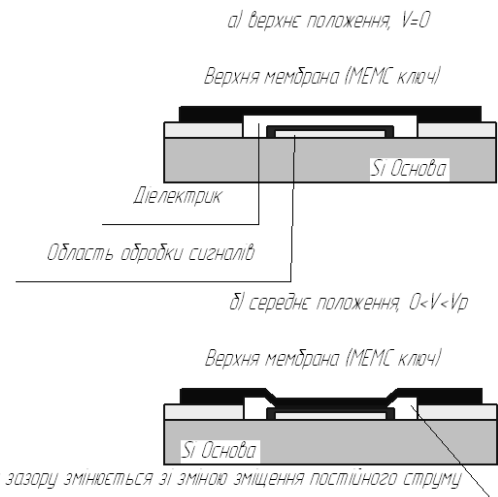


Рисунок 3 – Принципова схема комутатора у (а) верхньому положенні і (б) нижньому положенні

Проектування хвилевідних ліній, що виготовлені з позолоченим діелектричним шаром, мають великий опір (10 кОм\*см) Si-основи. Чотири MEMS мости з позолоченим діелектриком з'єднані з заземленими площинами хвилевідних ліній, за допомогою стаціонарних якорів [5]. На рис. 4 і рис. 5 зображений вид в поперечному розрізі і вид зверху елементарної комірки. Довжина 'l', ширина 'w' і товщина 't' з мініатюрним мостом, є основним ключем для розробки фазообертачів. Діелектрик Si3N4 діє, як ізолятор між центральними хвилевідними лініями і MEMS мостами. Розміри були обрані таким чином,

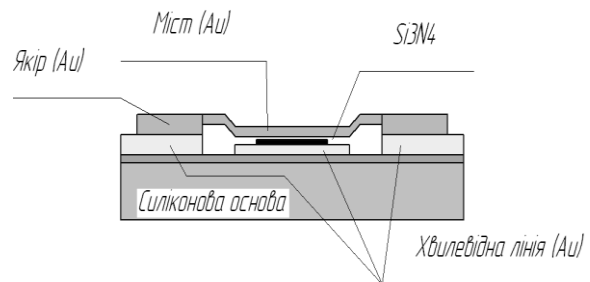


Рисунок 4 – Унікальна комірка фазообертача

щоб отримати характеристику імпедансу 70 Ом, коли лінія передачі знаходиться в ненавантаженому стані.

Однак, коли напруга зсуву збільшується, система стає нестійкою, і міст раптово руйнується, коли відхилення сягає однієї третини висоти зазору. Ця напруга, яка призводить до точки нестійкості, називається напругою спаду. Прикладена напруга зсуву між MEMS мостом і нижнім електродом змінює висоту MEMS мосту, які, в свою чергу, змінює роз-

поділену ємність мосту. Це призводить до зміни в імпедансі навантаженої лінії передачі і зміни фазової швидкості, що в свою чергу викликає фазовий зсув.

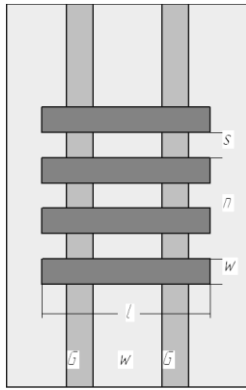


Рисунок 5 – Унікальна комірка – вид зверху

Статичний аналіз допомагає обчислити значення керуваної напруги (в вольтах), необхідної для реалізації неробочого стану. Таким чином напруга притискання може бути отримана за допомогою математичного рівняння [6],

$$V_p = \left( \frac{8k}{27\varepsilon_0 W \omega g_0^3} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

$$k = \frac{32Et^2\omega}{L^3} + \frac{8\sigma(1-\nu)t\omega}{L}, \quad (2)$$

де,  $V$  – напруга спрацювання;  
 $k$  – стала прогину балки;  
 $\varepsilon_0$  – діелектрична проникливість середовища –  $8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  
 $W$  – ширина центрального провідника в лінії розповсюдження електропередачі;  
 $\omega$  – ширина мініатюрної балки;  
 $g_0$  – висота повітряного зазору між, центральною лінією передачі і МЕМС мостом;  
 $E$  – модуль Юнга, для золота – 75 ГПа;  
 $t$  – товщина МЕМС мосту;  
 $l$  – довжина МЕМС мосту.

Напруга спрацювання може бути зменшена шляхом зменшення висоти мосту або застосуванням матеріалів мосту з відносно низьким модулем пружності, таким як полімер. Тим не менш, зменшення висоти МЕМС мосту не є бажаним для зменшення напруги керування, так як низька висота робить виготовлення складним, при цьому існує необхідність, щоб зберегти висоту мосту якомога більшою, щоб збільшити виробниче поле. Зазвичай напруга спрацювання повинна бути не менше 50 вольт [7].

Модальний аналіз допомагає розрахувати величину власних частотних коливань променя. Модальний аналіз є вивченням динамічних властивостей конструкцій при коливальному зрушенні. Власні значення використовуються для визначення власних частот або власних частот коливань, а власні вектори визначають форми коливальних мод. Модальний аналіз допомагає в обчисленні значення цих механічних резонансних частот коливань променя [3].

Спрощені розрахункові рівняння,

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (3)$$

$$m = 0,35(l\omega t)\rho, \quad (4)$$

де,  $f_0$  – власна частота коливань (в Гц);  
 $k$  – стала прогину балки;  
 $m$  – маса балки (в кг);  
 $l$  – довжина балки;  
 $\omega$  – ширина балки;  
 $t$  – товщина балки;  
 $\rho$  – густина золота 19 320 кг/м<sup>3</sup>.

Таким чином, на різних частотах ми можемо отримати різні режими вібрації балки за допомогою модального аналізу.

Аналіз перехідних процесів дозволяє обчислити значення часу (в нс) необхідний мініатюрній балці, щоб пройти повний перехідний стан вгору і вниз. Аналіз перехідних процесів відомий, як динамічний відгук системи. Це крива зміщення (нм) в залежності від часу (нс). З цього впливає принцип Д'Аламбера в якості основного керуючого рівняння [8],

$$m \frac{d^2 y}{dx^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = F_e = \frac{\varepsilon_0 A V_s^2}{2(g_0 - x)}, \quad (5)$$

$$b = \left( \frac{3}{2\pi} \right) \left( \frac{\mu A^2}{g_0^3} \right), \quad (6)$$

де,  $m$  – маса балки (рівняння [4]);  
 $k$  – стала прогину балки (рівняння [2]);

$$V_s = 1,25V_p,$$

$A$  – площа контактної поверхні ( $W\omega$ );  
 $E$  – модуль Юнга, для золота – 75 ГПа;  
 $\rho$  – густина золота 19 320 кг/м<sup>3</sup>;  
 $\mu$  – коефіцієнт в'язкості –  $1,218 \cdot 10^{-5}$  Па·с;  
 $x$  – зміщення балки.

Таким чином ми можемо отримати графік зміщення (нм) в залежності від часу (нс), за допомогою аналізу перехідних процесів, як показано на рис. 6.

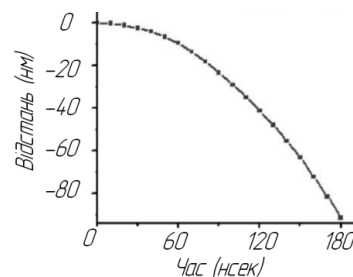


Рисунок 6 – Графік залежності зміщення від часу

Порівняння усереднених параметрів МЕМС- і напівпровідникових (на основі р-і-п-діодів і польових транзисторів) ключів (табл. 1) показує, що МЕМС-ключі помітно перевершують напівпровідникові по максимальному значенню робочої частоти, коефіцієнту перекриття по ємності і максимальній комутованій потужності. Але вони поступаються

напівпровідником ключам за часом спрацювання. В той же час їх швидкодія на два-три порядки вище, ніж у традиційних електромеханічних комутаторах.

Таблиця 1 – Параметри радіочастотних МЕМС і напівпровідникових ключів

Параметри	МЕМС-ключ	p-i-n діоди і польові транзистори
Ємність в закритому стані, фФ	1-6	40-100
Активний опір в закритому стані, Ом	0,5-2	2-6
Коефіцієнт перекриття по ємності	40-500	10-15
Гранична частота, ГГц	20-80	1-4
Потужність споживання, мВт	0,05-0,1	0,05-100
Потужність комутації, Вт	<1	<10
Рівень $P_{IP3}$ , дБмВт	66-80	27-45
Час спрацювання, мкс	1-300	0,001-0,1

МЕМС-індуктивності мають приблизно ті ж параметри (індуктивність, добротність і власна резонансна частота), що і зовнішні навісні елементи. Добротність  $Q_s$ , що виконана за технологією об'ємної мікрообробки (рис. 7), з частотою власного резонансу від 6 до 18 ГГц лежить в межах 6–28 при значенні індуктивності порядку 1 нГн. За допомогою технології поверхневої мікрообробки реалізується і котушки індуктивності у вигляді витків соленоїда, який знаходиться над підкладкою [9–10].

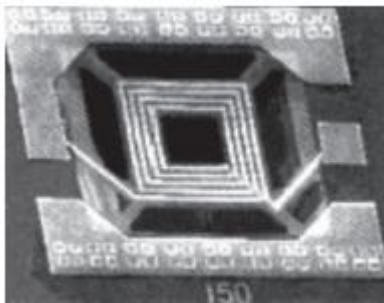


Рисунок 7 – Мікрофотографія МЕМС-індуктивності об'ємної конструкції

Особливістю РЧ МЕМС-компонентів міститься в надзвичайно малих відстанях між провідниками, що несуть НВЧ сигнал, в необхідності ретельного звіту механічних і електрофізичних властивостей використовуваних матеріалів, в тісному зв'язку тримірної конструкції з технологічними можливостями її виготовлення, в необхідності звіту багатьох параметрів електродинамічної взаємодії поблизу розташованих вузлів і провідників. Тому роль спеціального програмного забезпечення засобів розробки МЕМС-вузлів не можна недооцінювати. Найбільш відомі програмні пакети проектування РЧ МЕМС-пристроїв (ANSYS, SUGAR, FEMLAB, CST Microwave Studio) підтримують аналіз електростатичних ефектів дво- і тримірному неоднорідному середовищі з втратами, розрахунок термомеханічних па-

раметрів і перехідних процесів з урахуванням гістерезису, теплових деформацій, пружних ефектів; ефектів, зв'язаних з упаковкою виробу в корпусі; перерахунок явищ від рівня електромагнітних полів до рівня спотворення форми і у зворотній бік, а також тримірний електродинамічний аналіз полів в неоднорідному середовищі з втратами. В пакет як правило входить модуль розробки структурних і принципових схем з використанням поведінкових моделей електромеханічних і НВЧ-пристроїв а також типових радіоелементів. Ясна річ, необхідні також бібліотеки параметрів матеріалів; редактори пошарового опису топології двомірних підсистем і об'єднання їх в тримірну структуру; емулятор доступних технологічних процесів з введенням багатьох його параметрів. Проектування МЕМС-вузла «з нуля» в середньому значенні близько семи днів. Уточнювальні ітерації потребують ще від декількох хвилин до декількох днів. При такому підході повний цикл проектування пристроїв на основі МЕМС-вузла займає близько трьох місяців.

**ВИСНОВКИ.** В цій статті ми розглянули різні типи радіочастотних МЕМС фазообертачів. Також переконались в тому, що радіочастотні МЕМС фазообертачі є кращими за інші фазообертачі в плані, встановлення, розмірів, необхідної потужності та внесених втрат. Також видно, як застосовані ефекти, стабілізують напругу живлення при відхиленні приводу та різницю між статичним, модальним та аналізом перехідних процесів. Ключем до розробки недорогих, легких фазообертачів є низькі внесені втрати, низька потужність приводу і низька собівартість виробництва фазообертачів. Таким чином, структура з декількома МЕМС мостами може виступати в якості фазообертача, коли прикладена напруга буде менша за напругу притискання балки.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Vijay K., Vinoy K. and Bose K. «RF MEMS and their applications», Pennsylvania State University, USA, – 387 p.
2. Gabriel M. «RF MEMS: Theory, Design and Technology», John Wiley & Sons Ltd, Chapters 1, 9 and 10, 2003. – 512 p.
3. Chakraborty A. and Chatterjee S. «Design of Miniaturized RF MEMS Based Single-Bit Phase Shifter», *Comsol conference*, Bangalore 2011. – pp. 284–288.
4. Zou J., Liu C., Schutt-Aine J., Chen J. and Kang S. «Development of wide tuning range MEMS tunable capacitors for wireless communications systems», in *IEDM Tech. Dig.*, Dec. 2000, pp. 403–406.
5. Barker N. and Rebeiz G. «Optimization of distributed MEMS phase shifters», in *IEEE MTT-S Int. Dig.*, Jun. 1999, pp. 299–302.
6. Borgioli A., Liu Y., Nagra A. and York R., «Low-loss distributed MEMS phase shifter», *IEEE Microw. Guided Wave Lett.*, – Jan. 2000. – Vol. 10, no. 1. – pp. 7–9.
7. Rodwell M., et al., «Active and nonlinear wave propagation devices in ultrafast electronics and optoelectronics», *Proc. IEEE*. – Jul. 1994. – Vol. 83, no. 7. – pp. 1037–1059.

8. Koul S. and Bhat B. *Microwave and Millimeter Wave Phase Shifters: Vol. II Semiconductor and Delay Line Phase Shifters*, Artech House, Boston, MA, 1991. – P. 939–945.

9. Rebeiz G. *RF MEMS: Theory, Design and Technology*. – Wiley / IEEE Press, 2003. – 142 p.

10. Los Santos H.J. *de RF MEMS Circuit Design for Wireless Communications*. – Artech House, London, Great Britain. – 2003. – 261 p.

#### DESIGN OF MEMS PHASE SHIFTER RAM BAND FOR TV SERVICES

**A. Antonenko, M. Geraimchuk**

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

prosp. Peremogy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: ehnton1990@gmail.com

**Purpose.** The article describes the RF MEMS phase shifters of performance and value in the wireless communication system. Also it discusses the various types of RF phase shifters using various devices such as PIN diodes. However, the article presents the types of analysis to test the radio frequency phase shifter graphically to show how the extended voltage deviation influences on the final switch. **Methodology.** Also it is shown the feasibility of using the dielectric materials in the microwave phase shifter and the theoretical study of the characteristics of integral transmission lines in multilayer dielectric substrates. The structural and functional schemes of phase shifters of the sampled harmonic signals are proposed. **Results.** The amplitude of the output signal and phase shift between input and output signals in such schemes is frequency, signal conversion is performed linearly without distortions of amplitude and frequency, i.e. schemes do generate harmonics. The resulting circuits do not require additional filtering of output signals. **Originality.** As can be seen, the proposed structural and functional scheme of phase shifters of sampled harmonic signals is intended for operation in a wide range of frequencies and amplitudes change of the input signal without changing the circuit parameters. **Practical value.** The resulting circuits do not require additional filtering of output signals and allow relatively easy to implement the signal conversion. Being implemented on the modern integrated circuit element base, such schemes may find large usage. References 10, table 1, figures 7.

**Key words:** RF MEMS phase shifter, Young's modulus, isolation, insertion loss, electrostatic charge.

#### REFERENCES

1. Vijay, K., Vinoy, K., Bose, K., (2003), *RF MEMS and their applications*, Pennsylvania State University, USA.

2. Gabriel, M., (2003), *RF MEMS: Theory, Design and Technology*, John Wiley & Sons Ltd, New York, USA.

3. Chakraborty, A., Chatterjee, S., (2011), "Design of Miniaturized RF MEMS Based Single-Bit Phase Shifter", *Comsol conference*, Bangalore, 2011, pp. 521–526.

4. Zou, J., Liu, C., Schutt-Aine, J., Chen, J., Kang, S., (2000), "Development of wide tuning range MEMS tunable capacitors for wireless communications systems," *IEDM Tech. Dig.*, Dec. 2000, pp. 403–406.

5. Barker, N., Rebeiz, G., (1999), "Optimization of distributed MEMS phase shifters", *IEEE MTT-S Int. Dig.*, Jun. 1999, pp. 299–302.

6. Borgioli, A., Liu, Y., Nagra, A., York, R. (2000), "Low-loss distributed MEMS phase shifter", *IEEE Microw. Guided Wave Lett.*, vol. 10, no. 1, pp. 7–9.

7. Rodwell, M., et al. (1994), "Active and nonlinear wave propagation devices in ultrafast electronics and optoelectronics", *Proc. IEEE*, vol. 83, no. 7, pp. 1037–1059.

8. Koul, S., Bhat, B. (1991), *Microwave and Millimeter Wave Phase Shifters: Vol. II Semiconductor and Delay Line Phase Shifters*, Artech House, Boston, MA, USA.

9. Rebeiz, G. (2003), *RF MEMS: Theory, Design and Technology*, Wiley/IEEE Press, New York, USA.

10. Los Santos, H.J., (2003), *RF MEMS Circuit Design for Wireless Communications*, Artech House, London, Great Britain.

Стаття надійшла 02.09.2016.