

**РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ**<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2018-141-6-119-123>

УДК 621.377.243071

А. С. Антоненко<sup>1</sup>  
М. Д. Гераїмчук<sup>2</sup>**ВПЛИВ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ КОМУТУЮЧИХ  
ЕЛЕМЕНТІВ НВЧ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ  
НА ЄМНІСТЬ СИСТЕМИ**<sup>1</sup>ТОВ ФІРМА «СЕМПАЛ КО ЛТД»;<sup>2</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»

*Описано та проаналізовано інтенсивний розвиток радіотехнічних приладів і систем зв'язку. Покращено характеристики таких приладів за рахунок застосування мікроелектромеханічних систем (МЕМС), для чого використано різноманітні види комутуючих елементів на основі МЕМС. Застосування перетворювачів на основі МЕМС дозволило забезпечити низькі внесені втрати енергії, потужність керування, собівартість виробництва і високу надійність таких пристроїв.*

*Доведено, що однією з найважливіших характеристик таких радіотехнічних приладів і систем зв'язку є шорсткість поверхні комутуючих елементів (ключів), до яких висуваються конкретні вимоги по механічній обробці поверхні комутації, а також товщині нанесеного шару діелектрика на поверхню комутуючих елементів. Доведено, що зі збільшенням шорсткості поверхні відбувається зменшення ємності в нижньому положенні мембрани. Тому для отримання оптимального співвідношення ємностей необхідно забезпечувати шорсткість поверхонь в мікросистемі якомога меншою. Визначено, що основними властивостями діелектричних активних середовищ є механічні та електричні, які пов'язані між собою.*

*Розглянуто залежність між шорсткістю пружних комутуючих елементів та накопичувальною при цьому ємністю, яка виникає між пружним елементом та діелектричною основою. Запропоновані результати дають можливість зрозуміти необхідність виконання пружних елементів з високим ступенем обробки поверхні для забезпечення безперебійного керування системою для прийому вхідних телевізійних сигналів. З використанням запропонованої методики розрахунку МЕМС конструкцій з електромагнітними активними середовищами спроектований і виготовлений макет, як експериментальна установка для дослідження керованого перетворювача поляризації С діапазону на МЕМС структурах.*

**Ключові слова:** НВЧ діапазон, МЕМС-ключ, електростатична сила, діелектричний шар, металева мембрана, шорсткість, телевізійний сигнал.

**Вступ**

Важливими елементами радіотехнічних пристроїв НВЧ діапазону є надвисокочастотні перетворювачі на МЕМС структурах, до яких висуваються все вищі вимоги за електричними характеристиками та іншими параметрами. Як правило, конструкції перетворювачів на МЕМС структурах використовуються для обробки сигналів і застосовуються для контрольно-вимірювальних систем високої точності та у радіолокації.

Обмеженість частотного ресурсу у системах супутникового зв'язку, вимагає нових методів обробки сигналу, які дозволяють в одному частотному діапазоні реалізувати два повноцінних канали зв'язку за рахунок використання сигналів зі взаємно перпендикулярними площинами поляризації хвиль, за допомогою яких здійснюється зв'язок.

Авторами досліджено вплив ключових механічних параметрів системи на його електричні параметри, які здійснюють керування та обробку вхідних сигналів. Керування електричним полем дозволяє: зменшити потужність, що споживається в електричному колі керування; позбутися на-

ведень, що виникають при керуванні магнітним полем; здійснити розв'язку кіл керування з одночасним керуванням електричним і магнітним полем; підвищити швидкодію керування; розширити функціональні можливості керування НВЧ пристроїв [1]—[3].

Мета дослідження полягає в підвищенні швидкодії обробки керуючих сигналів чутливими елементами перетворювача на МЕМС та розширення його функціональних можливостей.

### Результати дослідження

Як показано на рис. 1, в склад модернізованого ключа входить діелектричний шар з нітриту кремнію. Без подачі напруги ключ має високий імпеданс, дякуючи повітряному зазору між нижньою і верхньою металевими пластинами. З подачею напруги електростатичні сили змушують мембрану відхилитися донизу, і, коли різниця потенціалів досягає граничного значення, мембрана займає положення, яке показано на рис. 1б. В цьому положенні мембрана лежить прямо на діелектричній основі, і між ВЧ сигналом і нижньою лінією передачі утворюється ємнісний зв'язок. Цей ємнісний зв'язок переводить ключ в стан з низьким імпедансом між верхнім і нижнім електродами. Відношення імпедансу у ввімкненому і вимкненому станах прямо пропорційне відношенню ємностей у ввімкненому і вимкненому станах. Тонка діелектрична основа також служить для зменшення ефекту залипання між двома металевими шарами, які присутні

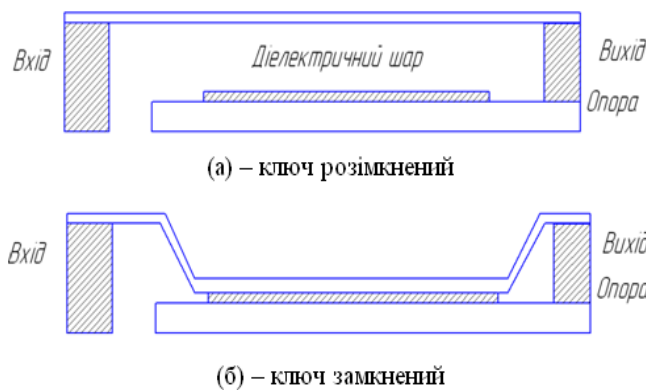


Рис. 1. Мембранний ключ з діелектричним шаром: а – ключ розімкнений; б – ключ замкнений

тні у всіх ключах з безпосереднім з'єднанням металевих контактів.

Коли мембрана замкнена в нижньому положенні, величину ємності можна, нехтуючи крайовими ефектами, оцінити за формулою

$$C_d = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{g_0} \quad (1)$$

Коли мембрана знаходиться у верхньому положенні, ємність системи необхідно визначити з урахуванням діелектричного шару між мембраною і нижнім електродом. Для цього можна скористатися рівнянням

$$C_u = \varepsilon_0 \omega W \left( g_0 + \frac{t_d}{\varepsilon_r} \right)^{-1}, \quad (2)$$

де  $\omega$  — ширина мембрани;  $W$  — ширина центрального провідника компланарного хвилевідного тракту;  $g_0$  — зазор між мембраною і нижньою частиною лінії передачі.

В формулі присутній додатковий член  $t_d/\varepsilon_r$ , що враховує кінцеву товщину  $t_d$  діелектричного шару між мембраною і нижнім електродом, де  $\varepsilon_r$  — відносна діелектрична проникність.

Відношення значень ємності в нижньому і верхньому положенні мембрани можна записати у вигляді

$$\frac{C_d}{C_u} = \left( \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{t_d} \right) \left[ \varepsilon_0 A \left( g_0 + \frac{t_d}{\varepsilon_r} \right)^{-1} + C_f \right]^{-1}. \quad (3)$$

З рівняння (3) видно, що товщина діелектрика впливає на відношення ємностей, тому використання дуже тонкого шару дозволяє досягти високого відношення ємностей. До того ж діелектричний шар повинен без пробою витримувати напругу в діапазоні 5...50 В. На значення ємності в нижньому положенні мембрани здійснює вплив ступінь шорсткості поверхонь діелектричного і металевих шарів. На рис. 2 показано, як шорсткість поверхонь позначається на відношенні ємностей. Вважається, що площа контакту складає 50 % від повної площі.

З рис. 2 видно, що зі збільшенням шорсткості поверхні відбувається зменшення ємності в ниж-

ньому положенні мембрани. Тому для отримання оптимального співвідношення ємностей необхідно забезпечувати шорсткість поверхонь в мікросистемі якомога меншою.

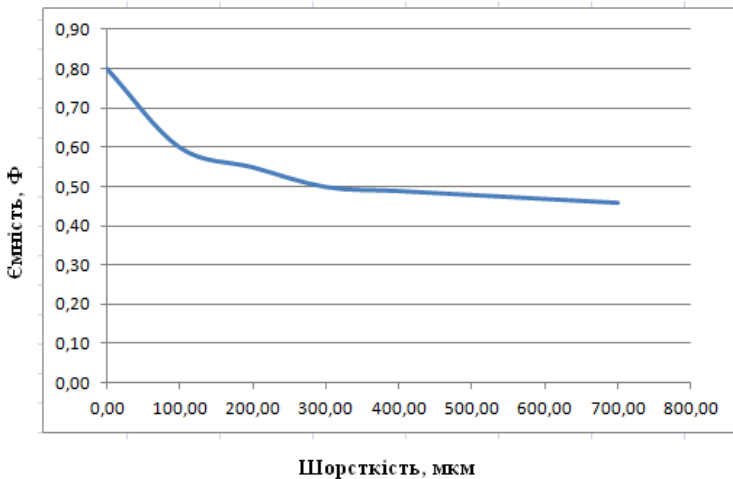


Рис. 2. Залежність ємності в нижньому положенні мембрани від шорсткості шару що лежить зверху

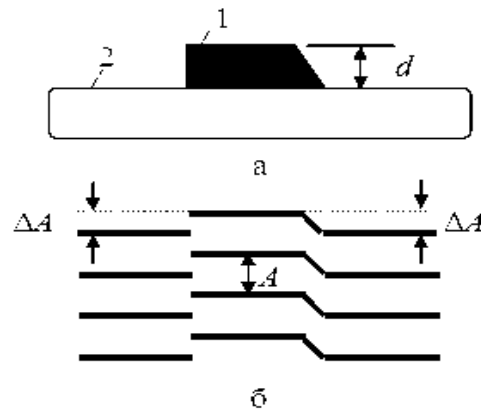


Рис. 3. Вимірювання товщини шарів за зміщенням інтерференційних смуг: а — розташування вимірювального шару 1 на основі 2; б — вигляд інтерференційної картини

Шорсткість поверхні елементів комутації визначалася за допомогою інтерференційного методу, який використовується для вимірювання товщини покриттів. Цей метод заснований на спостереженні двох зміщених одна відносно одної систем інтерференційних смуг. Якщо край півки створює не круту сходінку, а є скошеною (рис. 3а), тоді відповідні інтерференційні смуги не мають розривів (рис. 3б), що дозволяє правильно виміряти їх зміщення. Точність вимірювань залежить від похибки вимірювання величини  $\Delta A/A$  [4].

### Висновки

1. Описане дослідження вимірювання характеристик МЕМС-ключів з діелектричною основою, в якій використовувалися параметри є частотними залежностями втрат і ефективної магнітної проникності електродинамічної структури від керованого поля. Вимірювальна комірка являє собою узгоджений з трактом відрізок МЕМС лінії передачі, діелектрик — шар в нижній частині комутації, а провідник виконано на керамічній підкладці. Для експериментального дослідження можливості застосування МЕМС перемикачів використано діелектричну основу з великим значенням діелектричної проникності.

2. Визначено, що основними властивостями діелектричних активних середовищ є механічні та електричні, які пов'язані між собою. Цей зв'язок характеризується коефіцієнтом електромеханічного зв'язку — одним з найважливіших параметрів п'єзоелектричних матеріалів та пристроїв. Підведена до діелектричної основи механічна енергія у разі прямого п'єзо ефекту витрачається не тільки на пружну деформацію, але й на створення електричної поляризації, що й зумовлює перемикання одного виду сигналу на інший. І навпаки, підведена до основи електрична енергія у разі оберненого п'єзо ефекту витрачається не тільки на електричну поляризацію, але й на пружну деформацію п'єзоелектрика і накопичення пружної енергії.

3. Проведено експеримент, за результатами якого можна допустити ймовірність адекватності роботи досліджуваного приладу. З використанням запропонованої методики розрахунку МЕМС конструкцій з електромагнітними активними середовищами спроектований і виготовлений макет, як експериментальна установка для дослідження керованого перетворювача поляризації С діапазону на МЕМС структурах.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] А. К. Балько и др., «Проектирование монолитного двухканального переключателя СВЧ,» *Радиотехника*, № 2, с. 40-46, 2004.

[2] Л. А. Белов, и Л. М. Житникова, «Микроэлектромеханические компоненты радиочастотного диапазона,» *Электроника, НТБ*, № 8, с. 18-25, 2006.

[3] У. А. Абдулаева, «Расчет и анализ характеристик широкополосных дискретных фазовращателей,» *Электронная техника, серия Электроника СВЧ*, № 5, с. 14, 1983.

[4] В. С. Лукьянов, Н. Н. Валуева, И. В. Егоров и И. М. Кроль, *Методика выполнения измерений параметров шероховатости поверхности по ГОСТ 2789-73 при помощи приборов профильного метода*. Москва, Россия: МИ 41-75, изд-во стандартов, 1975, с. 18.

Рекомендована кафедрою радіотехніки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 8.10.18

**Антоненко Антон Сергійович** — інженер-конструктор, e-mail: ehnaton1990@gmail.com .

ТОВ ФІРМА «СЕМПАЛ КО ЛТД» ;

**Гераймчук Михайло Дем'янович** — д-р техн. наук, професор, професор кафедри приладобудування.

Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»

**A. S. Antonenko<sup>1</sup>**

**M. D. Geraimchuk<sup>2</sup>**

## **Surface Influence of the Surface of Composite Elements of the Microwave Converters on the Immunity of the System**

<sup>1</sup>LLC FIRM “SEMPAL KO LTD”;

<sup>2</sup>NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

*In this article the intensive development of radio engineering devices and communication systems is described and analyzed. The characteristics of such devices have been improved due to the use of microelectromechanical systems (MEMS), which uses various types of switching elements based on MEMS. Application of converters based on MEMS has allowed providing low input energy losses, power management, cost of production and high reliability of such devices.*

*It is proved that one of the most important characteristics of such radio engineering devices and communication systems is the roughness of the surface of the switching elements (keys), to which the specific requirements for the mechanical processing of the switching surface, as well as the thickness of the applied layer of the dielectric on the surface of the commutating elements are put forward. It is proved that with increasing roughness of the surface there is a decrease in the capacity in the lower position of the membrane. Therefore, in order to obtain the optimal ratio of capacities, it is necessary to ensure that the surfaces of the microsystem are roughened as little as possible. It is determined that the main properties of dielectric active media are mechanical and electrical interconnected ones.*

*In the article the dependence between the roughness of elastic commutating elements and the capacitance that arises between the elastic element and the dielectric basis is considered. The proposed results make it possible to understand the necessity of implementing elastic elements with a high degree of surface finish to ensure uninterrupted control of the system when receiving incoming TV signals. Using the proposed methodology for calculating MEMS designs with electromagnetic active media, a model has been designed and manufactured as an experimental setup for studying a controlled C polarization converter on MEMS structures.*

**Keywords:** microwave band, MEMS key, electrostatic force, dielectric layer, metal membrane, roughness, television signal.

**Antonenko Anton S.** — Design Engineer, e-mail: ehnaton1990@gmail.com ;

**Geraimchuk Mykhailo D.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Instrument-Making

А. С. Антоненко<sup>1</sup>  
М. Д. Гераимчук<sup>2</sup>

## Влияние шероховатости поверхности коммутирующих элементов СВЧ преобразователя на емкость системы

<sup>1</sup>ООО ФИРМА «СЕМПАЛ КО ЛТД»;

<sup>2</sup> Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

*Описано и проанализировано интенсивное развитие радиотехнических приборов и систем связи. Улучшены характеристики таких приборов за счет применения микроэлектромеханических систем (МЭМС), для чего использованы различные виды коммутирующих элементов на основе МЭМС. Применение преобразователей на основе МЭМС позволило обеспечить низкие вносимые потери энергии, мощность управления, себестоимость производства и высокую надежность таких устройств.*

*Доказано, что одной из важнейших характеристик таких радиотехнических приборов и систем связи является шероховатость поверхности коммутирующих элементов (ключей), к которым предъявляются конкретные требования по механической обработке поверхности коммутации, а также толщины нанесенного слоя диэлектрика на поверхность коммутирующих элементов. Доказано, что при увеличении шероховатости поверхности происходит уменьшение емкости в нижнем положении мембраны. Поэтому для получения оптимального соотношения емкостей необходимо обеспечивать как можно меньшую шероховатость поверхностей в микросистеме. Определено, что основными свойствами диэлектрических активных сред являются связанные между собой механические и электрические.*

*Рассмотрена зависимость между шероховатостью упругих коммутирующих элементов и накопительной при этом емкостью, которая возникает между упругим элементом и диэлектрической основой. Предложенные результаты дают возможность понять необходимость изготовления упругих элементов с высокой степенью обработки поверхности для обеспечения бесперебойного управления системой при приеме входящих телевизионных сигналов. С использованием предложенной методики расчета МЭМС конструкций с электромагнитными активными средами спроектирован и изготовлен макет, как экспериментальная установка для исследования управляемого преобразователя поляризации С диапазона на МЭМС структурах.*

**Ключевые слова:** СВЧ диапазон, МЭМС-ключ, электростатическая сила, диэлектрический слой, металлическая мембрана, шероховатость, телевизионный сигнал.

*Антоненко Антон Сергеевич* — инженер-конструктор, e-mail: ehnaton1990@gmail.com;

*Гераимчук Михаил Демьянович* — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры приборостроения