

параметрів по інтерфейсу RS-232. Розроблена термінальна програма дозволяє візуально вивчати процес регулювання і робить більш легким відлагодження регулятора дослідним шляхом.

Для адаптації запропонованого терморегулятора під конкретні технологічні умови необхідно внести мінімальні зміни в програму. В основному вони будуть торкатися типу використовуваного термодавача. В такому випадку необхідно згенерувати характеристичну таблицю давача і вставити її в проект регулятора. А налагодження ПІД-параметрів буде здійснюватися засобами термінальної програми.

1. Густав Олссон, Джангуидо Пиани. *Цифровые системы автоматизации и управления*. – СПб.: Невский диалект, 2001. – 557 с. 2. Куо Б. *Теория и проектирование цифровых систем управления: Пер. с англ.* – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с. 3. Датчики для измерения температуры в промышленности / Г.В. Сасонов, А.И. Киц, О.А. Кюздени, В.И. Лах, И.Ф. Паляныця, Б.И. Стаднык. – К.: Наукова думка, 1972. 4. Фишер Дж.Э., Гетланд Х.Б. *Электроника – от теории к практике: Пер. на рус.* – М.: Энергия, 1980. 5. Бондарев В.Н., Трёстер Г., Чернега В.С. *Цифровая обработка сигналов: методы и средства: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд.* – Харьков: Конус, 2001. – 398 с. 6. Шуп Т. *Прикладные численные методы в физике и технике: Ш 96 / Пер. с англ. С.Ю.Славянова; Под ред. С.П. Меркурьева.* – М.: Высш. школа, 1990. – 255 с. 7. Borland C++ Builder 6. *Для профессионалов / В.А. Шамис.* – СПб.: ПитерЮ, 2004. – 798 с. 8. Шикин А.В., Боресков А.В. *Компьютерная графика. Полигональные модели.* – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. – 464 с. 9. CY27143, CY27243, CY27443, CY27543, CY27643 PSoCTM Mixed Signal Array Preliminary Data Sheet. – 2003.

УДК 621.3.049.77.017

М.В. Лобур, Т.В. Свірідова

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра систем автоматизованого проектування

МЕХАНІЧНА МОДЕЛЬ РАДІОЧАСТОТНОГО ФІЛЬТРА

© Лобур М.В., Свірідова Т.В., 2004

**Наведено мікроелектромеханічні пристрої для радіочастотних систем (RF MEMS).
Описано використання MEMS резонаторів. Наведені висновки та рекомендації.**

**In this paper mechanical model of micromechanical devices used in RF filters presented,
modelling and simulation carried out in electrical and mechanical domains**

Вступ. Беспровідний зв'язок призвів до інтенсивного підвищення зацікавленості щодо розробок в цій галузі, а саме зростанню замовників з військової промисловості – це мікрохвильові та міліметрові схеми та системи тощо. Розроблені пристрої широко застосовуються у комунікаційних системах – мобільних телефонах, радіо. Одним із революційних напрямків у радіочастотних пристроях є використання мікроелектромеханічних (МЕМС) компонентів, які за рахунок інтеграції в своїй структурі механічних складових та використання технології виготовлення інтегральних схем ІС дозволяють мініатюризувати кінцевий пристрій.

У свою чергу мікроелектромеханічні системи – це один із результатів прогресу цього десятиліття. Мета цієї технології полягає у проектуванні “систем”, розміри якої дорівнюють декілька мікрон. Такі пристрої можуть бути використані як у системах доставки товарів, так і в телекомунікаційних системах, що знаходяться на цей період часу в стадії розвитку. Їх невеликий розмір, високий фактор добротності надає унікальні переваги.

Отже, радіочастотні МЕМС – це справжня революція у радіочастотних пристроях. Вони проектується та виробляються, використовуючи ІС технологію, сумісну з методами пакетної обробки даних.

Загальні положення. Як вже було сказано, останні демонстрації віброуючих частин мікро-механічних резонаторів з частотним діапазоном УКВ та добротністю більше ніж десятки сотень підняли зацікавленість до досліджень архітектури зв'язку, з використанням високодобротних пасивних пристроїв. Більша частина зацікавленості полягає у використанні сумісних із ІС мікро-електромеханічних систем (МЕМС) для полегшення інтеграції на кристалі високодобротних пасивних елементів із активною електронікою, що дасть змогу суттєво зменшити розмір.

Як приклад наведений на рис. 1 фрагмент МЕМС структури, яка складається із низки мікро-механічних резонаторів з рухомих електродами.

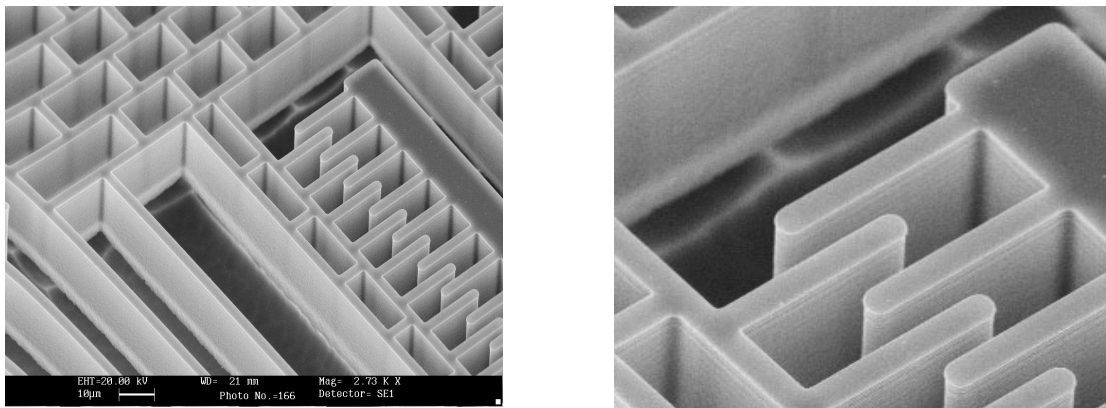


Рис. 1. Приклад мікро-механічного фільтра

На рис. 2 подано схемне зображення мікро-механічного резонатора та показано основну конфігурацію, що призводить до збудження. Як показано, цей пристрій складається із балки, що фіксована з двох сторін. І балка, і електрод виготовлені із провідних матеріалів, з домішками полікристалічного кремнію, резонатор приводиться в дію прикладанням змінної напруги до рухомого і нерухомого електродів, в результаті чого структура починає вібрувати, коли власна частота збігається із частотою резонансу на виході отримується крива, показана на рис. 3.

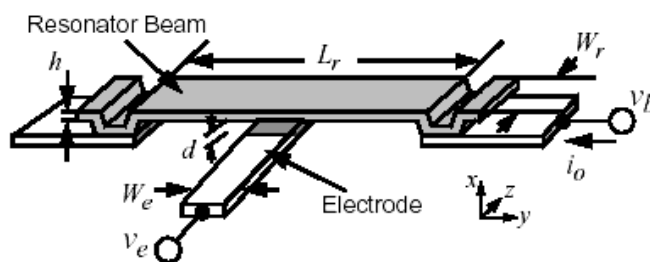


Рис. 2. Схемне зображення резонатора

Отже, частота резонансу вібрації f_0 балки (рис. 2) може бути визначена за допомогою рівняння Ейлера–Бернуллі.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_r}{m_r}} \cong 1.03 \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{h_{eff}}{L_r^2} (1 - g(V_P))^{1/2}}, \quad (1)$$

де k_r и m_r – ефективна жорсткість та маса балки відповідно при даному положенні; E , ρ – модуль Юнга та густина матеріалу, відповідно; Lr визначає довжину на рис. 1; h_{eff} – ефективна товщина, яка моделює вплив топографії поверхні балки при виготовленні; i функція g моделює дію зміщення постійного струму, яка додається до механічної жорсткості балки, дозволяючи здійснювати контроль над частотою. З (1) видно, що геометрія відіграє значну роль у регулюванні частоти резонансу, і, на практиці, досягнення визначеного частотного інтервалу топології при заданих розмірах. Взагалі, частота резонансу механічного резонатора збільшується, оскільки його розміри зменшуються.

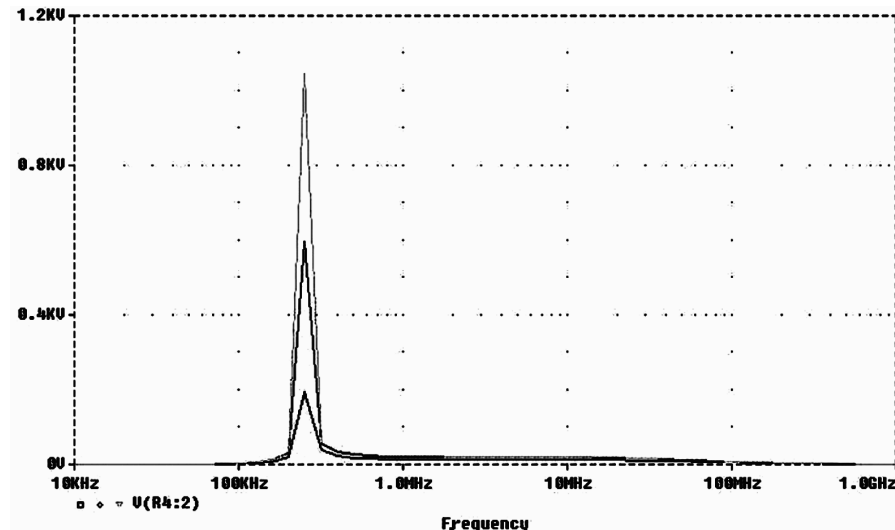


Рис. 3. АЧХ фільтра

Як показано на рис. 2, цей пристрій має два електричні входи, e і vb , які прикладені на електрод і балку, відповідно. При такій конфігурації, різниця напруг ($v_e - v_b$), що ефективно прикладена вздовж ємності електрода-резонатора, генеруючи силу між фіксованим електродом та рухомою балкою, і описується таким рівнянням.

$$F_d = \frac{\partial E}{\partial x} = \frac{1}{2}(v_e - v_b)^2 \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{2}(v_e^2 - 2v_e v_b + v_b^2) \frac{\partial C}{\partial x}, \quad (2)$$

де x – переміщення (в напрямку, показаному на рис. 1) і $(\partial C/\partial x)$ є зміною ємності у резонатор-електроді на одиницю деформації. При використанні резонатора як елемента або напруження зміщення постійного струму V_p , прикладеного до провідної балки, в той час, коли сигнал $v_i = V_i \cos \omega_i t$ прикладено на основний електрод. В цій конфігурації вираз (2) спрощується до

$$F_d = \frac{\partial C}{\partial x} \left(\frac{V_p^2}{2} + \frac{V_i^2}{4} \right) - V_p \frac{\partial C}{\partial x} V_i \cos \omega_i t + \frac{\partial C}{\partial x} \frac{V_i^2}{4} \cos 2\omega_i t. \quad (3)$$

Перший доданок у (3) являє силу постійного струму без резонансу, яка статично згинає балку, але має невеликий вплив на вихідний сигнал. Другий член – це сила на частоті вхідного сигналу, підсилена напругою зміщення постійного струму V_p , і – головний вхідний компонент, що використовується у застосуваннях фільтра. Коли $\omega_1 = \omega_0$ (частота резонансу) – ця сила призводить до резонансу балки, створюючи змінну в часі ємність між електродом і резонатором, та викликає вихідний струм $i_o = V_p (\partial C/\partial x) (\partial x/\partial t)$.

Третій член в (3) – це член, що призводить до вібрації балки при $\omega_1 = (1/2)\omega_0$. Якщо V_p є дуже великим щодо V_i , цей член є малим, але може мати негативний вплив на смугу пропускання, коли є присутні завади. У цих випадках мікромеханічний фільтр на частоті $(1/2)\omega_0$ може бути необхідний.

Результати моделювання наведені на рис. 4 і представляють поведінку балки, жорстко закріпленої з двох сторін при прикладанні напруги 10 В, довжина балки 200 мкм, ширина 10 мкм.

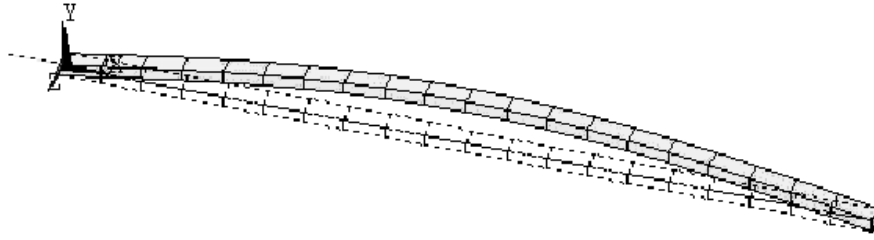


Рис. 4. Результати моделювання

На рис. 5 показано результати тразієнтного в часі аналізу балки, при якому проводилося дослідження поведінки балки при прикладанні напруги живлення 10 В.

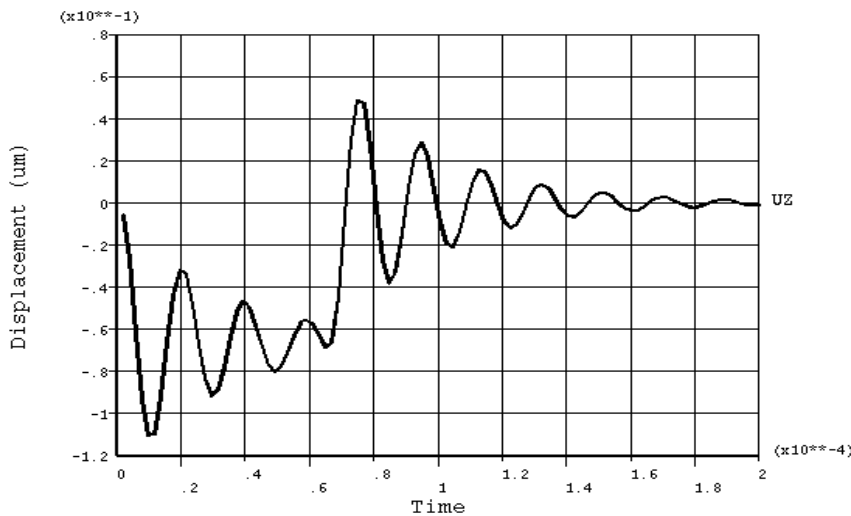


Рис. 5. Результати зміни значення переміщення в часі.

Висновок. MEMS пристрої володіють декількома характеристиками, які роблять їх привабливими для використання у комунікаційних системах. Їх низькі характеристики втрат роблять їх унікальними серед доступної сьогодні технології. Використання MEMS при проектуванні радіочастотних систем покращує функціонування таких систем та зменшує втрати. Наведена у статті математична модель мікрорезонатора дозволить спростити процес проектування мікроелектромеханічних складових радіочастотних систем та підвищити точність результатів моделювання.

1. Kun Wang, Clark T.-C.Nguyen. High-order medium frequency micromechanical electronics filters // *IEEE J. of Microelectromechanical Systems*. – Dec. 1998. – Vol. 8, № 4. – P. 534–557. 2. Lin L., Howe R.T., Pisano A.P. Micromechanical filters for signal processing // *IEEE J. of Microelectromechanical Systems*. – Sept. 1998. – Vol. 7, № 3. – P. 286–294. 3. <http://www.mems.ru> 4. Lobur M., Napieralski A., Sviridova T. Application of CFDRC software for modeling of chosen microstructures // *Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: Proceeding of the International Conference TCSET'2002*. – Lviv, 2002. – P. 172–175. 5. Fedder G.K. Structured Design Methods for MEMS: Essential Tools for Rapid MEMS Development // *NSF sponsored workshop on Structured Design Methods for MEMS*. – 12–15 November 1995.