

УДК 621.372.543.2

А.І. Зазерін, А.Т. Орлов, О.В. Богдан  
НТУУ «КПІ», Київ, Україна

## ТРАНСФОРМАЦІЯ ІМПЕДАНСУ ЯК СПОСІБ РЕАЛІЗАЦІЇ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ НА FBAR

© Зазерін А.І., Орлов А.Т., Богдан О.В., 2013

A.I. Zazerin, A.T. Orlov, O.V. Bohdan

## IMPEDANCE TRANSFORMATION AS A MEAN OF THE FBAR ACTIVE FILTER IMPLEMENTATION

© Zazerin A.I., Orlov A.T., Bohdan O.V., 2013

Описано ефект трансформації імпедансу, що може бути використаний під час проектування активних фільтрів з FBAR резонатором в якості частотозадаючого елемента. Розглянуто структуру та принцип дії гіратора, що забезпечує трансформацію імпедансу. Можливість високочастотної реалізації схеми підтверджено моделюванням структури гіратора на існуючих операційних підсилювачах струму, що керуються напругою (англ. OTA). Робота містить порівняльний аналіз частотних характеристик неідеального гіратора, а також перспективи застосування і модернізації методу.

*Ключові слова: FBAR, активний фільтр, НВЧ гіратор, інверсія імпедансу, OTA.*

This paper describes the effect of impedance transformation, which can be used in the design of active filters with FBAR resonator as frequency control element. The structure and operation principle of gyrator, which provides an impedance transformation function were reviewed in details. The possibility of high-frequency implementation of this solution was confirmed by the simulation using existing operational transconductance amplifiers (OTA). The article includes a comparative analysis of non-ideal gyrator's frequency response and prospects of application and development.

*Key words: FBAR, active filter, microwave gyrator, impedance inversion, OTA*

### Вступ

Функція трансформації імпедансу зазвичай реалізується за допомогою специфічного схемного елемента – гіратора. Як буде показано нижче, вхідний імпеданс такого двопортового перетворювача виявляється обернено пропорційним навантаженню. Враховуючи це, для прикладу, ємнісні ланцюги, являючись навантаженням гіратора, проявлятимуть індуктивні властивості. Цей ефект, відомий як імітація індуктивності, або активний індуктор, сьогодні знайшов застосування в багатьох інтегральних мікросхемах при реалізації частотних фільтрів та генераторів, фазових коректорів, модуляторів тощо [1, 2].

Інтерес дослідників та широкий спектр застосувань гіраторів пов'язаний з низкою значних переваг перед звичними схемотехнічними підходами. Наприклад, індуктивність та опір гіраторної реалізації котушки значно перевищують вказані величини для реальної котушки. Так, активні індуктори можна використовувати для створення індуктивностей у діапазоні від мкГн до МГн, у той час як реальні котушки обмежені десятками нГн і мають паразитні послідовні опори від сотень кОм до декількох КОм. З іншого боку, паразитний опір гіратора здебільшого лежить у діапазоні від

десятків Ом до сотень КОм, залежно від особливостей топології. Використання гіратора в безіндуктивних схемах фільтрації значно покращує характеристики фільтрації порівняно зі звичайними RLC фільтрами.

З погляду застосування гіраторів в активних схемах фільтрації можна виділити доволі низьку чутливість до змін компонентів, характерну для пасивних RLC прототипів. Сучасні дослідження в цій галузі спрямовані також на використання можливості конфігурації характеристик фільтра зміною опору гірації, або регулюванням коефіцієнтів транспровідності складових елементів гіратора [3]. Такими складовими елементами у цій роботі є ОТА.

Метою роботи є розробка елементної бази нового класу активних фільтрів на основі MEMC резонаторів та ОТА в якості активних елементів.

### Теоретична основа

Високочастотна орієнтація сучасних фільтрів вимагає вибору відповідного частото задаючого MEMC елемента, яким в цьому випадку виступає тонкоплівковий резонатор на об'ємних хвилях (FBAR). Перспективна і багатообіцяюча технологія FBAR резонаторів дає високі значення енергоефективності, добротності, коефіцієнта електромеханічного зв'язку і, що найголовніше, вона сумісна зі стандартною кремнієвою технологією [4], [5]. Для моделювання високочастотної поведінки такого резонатора сумісно з гіраторними елементами використовується модернізована модель Баттерворта-Ван-Дайка (англ. BVD) (рис. 1), що характеризується послідовним  $f_s$  і паралельним  $f_p$  резонансами.

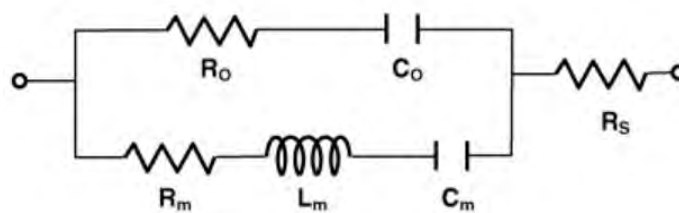


Рис. 1. Модернізована BVD модель резонатора:

$R_m, L_m, C_m$  – акустичні компоненти,  $R_0, C_0$  – статичні опір та ємність резонатора

Простота моделі, у зв'язку з тим, що вона містить тільки зосереджені елементи, робить її вельми придатною для отримання електричних моделей для складніших структур. Ця модель також часто використовується для визначення електричних характеристик об'ємних резонаторів з фактичних вимірювань. Так, у [6] параметри зосереджених компонентів BVD моделі отримуються в результаті вимірювань резонатора.

Імпеданс моделі FBAR резонатора, зображеної на рис. 1, може бути описаний виразом (1). Частотна залежність імпедансу резонатора зображена на рис. 5 (суцільна крива).

$$Z = \frac{\left(R_0 + \frac{1}{sC_0}\right) * \left(R_1 + sL_1 + \frac{1}{sC_1}\right)}{R_0 + R_1 + sL_1 + \frac{1}{sC_0} + \frac{1}{sC_1}} \quad (1)$$

Ідеалізовану модель гіратора можна зобразити двопортним перетворювачем та визначити простими співвідношеннями між струмами та напругами, як показано на рис. 3:

$$V_1 = Ri_2 \quad (2)$$

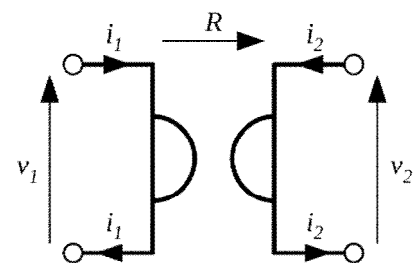


Рис. 3. Модель ідеального двопортного перетворювача-гіратора

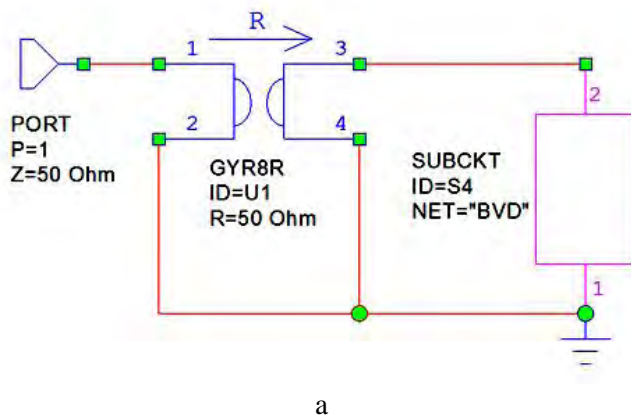
$$V_2 = -Ri_1 \quad (3)$$

де  $R$  визначається як опір гірації.

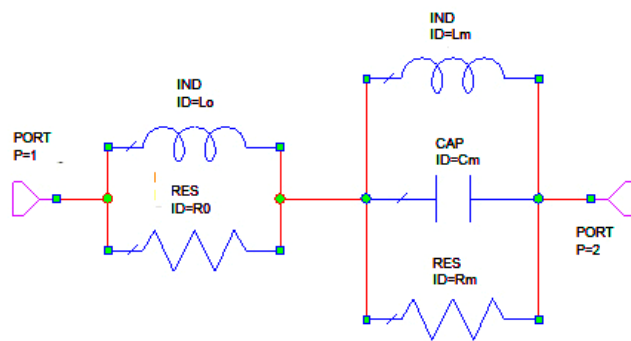
Основна функція такого перетворювача полягає в тому, що при під'єднанні імпедансу навантаження до вихідних портів гіратора, вхідний імпеданс набудатиме вигляду:

$$Z_i = R^2 \frac{1}{Z_L} \quad (4)$$

Тобто відбувається інверсія імпедансу з урахування коефіцієнта гірації  $R^2$ . Якщо імпедансом навантаження виступає імпеданс FBAR резонатора, можна прогнозувати виникнення особливих ефектів, пов'язаних із взаємоперетворенням нулів і полюсів функції передачі. З схемотехнічного погляду модель



а



б

Рис. 4. Схема під'єднання резонатора (а) та модель вхідного імпедансу (б), як результат перетворення

вхідного імпедансу схеми гіратор-резонатор матиме вигляд моделі на рис. 1, оберненої за принципами дуалізму: конденсатор-індуктор, паралельний контур – послідовний контур.

Для підтвердження описаної теорії була проведена симуляція схеми з використанням програмного забезпечення AWR MWO. Схема складалась з ідеального перетворювача-гіратора та підсхеми BVD, що являла собою модель FBAR резонатора (рис.1). Розрахунок вхідного імпедансу мав наслідком інверсію резонансів. Якщо для моделі резонатора послідовний резонанс передував паралельному, то сумісно з гіратором резонанси міняються місцями. Схема під'єднання гіратора та відповідна "обернена" модель вхідного імпедансу зображені на рис. 4. Частотні залежності вхідного імпедансу для резонатора (суцільна крива) та гіратора з під'єднаним резонатором (штрихова крива) відображені на рис. 5

Цей ефект відкриває можливості для розробки нових і вдосконалення наявних схем фільтрації, оскільки різноманітними комбінаціями гіратор-резонатор у відомих сходових та мостових схемах можна досягти зняття певних акустичних та електромагнітних обмежень, що пов'язані з конструктивом тонкоплівкових високочастотних

фільтрів. Зокрема, багатообіцяючою виглядає можливість компенсації статичної ємності резонатора з метою поліпшення характеристик фільтра. Ця можливість виникає при використанні гіратора, в результаті перетворення імпедансу.

### Високочастотна реалізація з неідеальним гіратором

Можливість реалізації схеми перетворення імпедансу на частотах понад 1 ГГц може бути обмежена електричними характеристиками складових елементів реального гіратора. Результати, наведені нижче, підтверджують таку можливість і дозволяють дослідити ефекти, що виникають

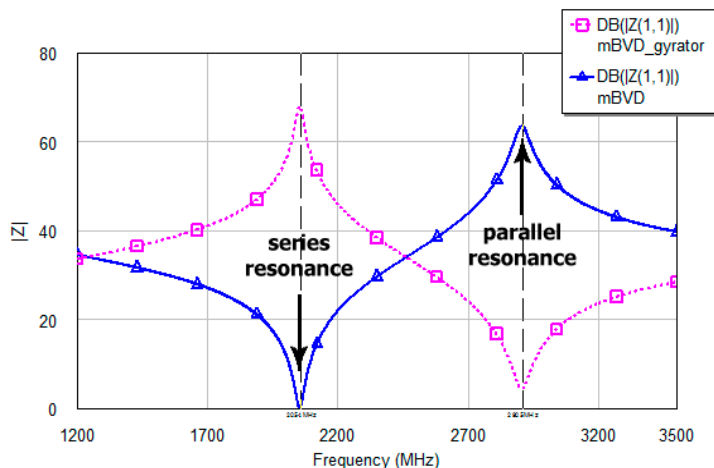


Рис. 5. Частотна залежність імпедансу для невід'єданого резонатора та у разі використання ідеального гіратора

полярних транзисторах, має диференційний вхід та двотактну схему вихідного підсилювача класу А типу «push-pull» (рис. 7). Модель також враховує схемотехнічні вирішення, спрямовані на покращення характеристик лінійності, вихідного імпедансу та енергоспоживання. Особливістю схеми є можливість управління коефіцієнтом транспровідності за допомогою додаткового входу. З іншого боку, подібна ускладненість схеми зумовлює частотні обмеження характеристик.

Результат розрахунку вхідного імпедансу схеми з використанням гіратора на двох

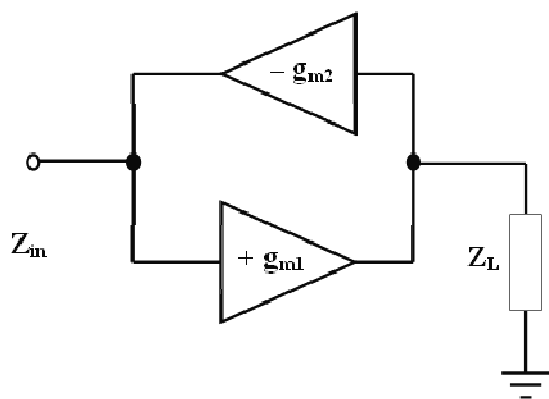


Рис. 6. Реалізація заземленого гіратора за допомогою двох ОТА

трансімпедансних підсилювачах та моделі FBAR резонатора наведено на рис. 8. Суцільна крива ілюструє частотну залежність імпедансу для розрахованого вище ідеального гіратора. Штрихова крива ілюструє частотну залежність імпедансу для гіратора, виконаного на двох ОТА СА3080. При відносній подібності частотних залежностей, можна помітити значну деградацію характеристик на частотах послідовного та паралельного резонансів, що має бути врахованою під час реалізації реальних схем фільтрів.

Серед факторів, що мали вплив на подібний результат, варто виділити ускладненість схеми та паразитні ємності структури. Вибір схемотехнічного вирішення та технології трансімпедансного підсилювача для подібних високочастотних застосувань повинен бути компромісом між високою робочою частотою, високою лінійністю та низьким енергоспоживанням. Частотна характеристика ОТА передусім визначається граничною частотою транзисторів. Сучасна 0.18- $\mu\text{m}$  CMOS технологія дає можливість створення транзисторів з граничною частотою 40 ГГц [7], при цьому зменшуються як каналні затримки, так і паразитні ємності. Використовуючи сучасну технологію та оптимізований дизайн трансімпедансних підсилювачів, можливою стає реалізація активних фільтрів на основі FBAR і гіраторів у діапазоні частот до одиниць ГГц.

через неідеальність гіратора, та їхній вплив на частотні характеристики. Варіант схеми з використанням операційних підсилювачів був відкинтий одразу через значні частотні обмеження наявних пристроїв. На відміну від звичайних операційних підсилювачів, ОТА мають вищі граничні частоти підсилення аж до НВЧ діапазону. Схема заземленого гіратора на двох ОТА з негативним зворотним зв'язком зображена на рис. 6.

У якості моделі трансімпедансного підсилювача обрано схему електричну принципову ІМС Intersil СА3080. Ця схема виконана на бі-

полярних транзисторах, має диференційний вхід та двотактну схему вихідного підсилювача класу А типу «push-pull» (рис. 7). Модель також враховує схемотехнічні вирішення, спрямовані на покращення характеристик лінійності, вихідного імпедансу та енергоспоживання. Особливістю схеми є можливість управління коефіцієнтом транспровідності за допомогою додаткового входу. З іншого боку, подібна ускладненість схеми зумовлює частотні обмеження характеристик.

Результат розрахунку вхідного імпедансу схеми з використанням гіратора на двох трансімпедансних підсилювачах та моделі FBAR резонатора наведено на рис. 8. Суцільна крива ілюструє частотну залежність імпедансу для розрахованого вище ідеального гіратора. Штрихова крива ілюструє частотну залежність імпедансу для гіратора, виконаного на двох ОТА СА3080. При відносній подібності частотних залежностей, можна помітити значну деградацію характеристик на частотах послідовного та паралельного резонансів, що має бути врахованою під час реалізації реальних схем фільтрів.

Серед факторів, що мали вплив на подібний результат, варто виділити ускладненість схеми та паразитні ємності структури. Вибір схемотехнічного вирішення та технології трансімпедансного підсилювача для подібних високочастотних застосувань повинен бути компромісом між високою робочою частотою, високою лінійністю та низьким енергоспоживанням. Частотна характеристика ОТА передусім визначається граничною частотою транзисторів. Сучасна 0.18- $\mu\text{m}$  CMOS технологія дає можливість створення транзисторів з граничною частотою 40 ГГц [7], при цьому зменшуються як каналні затримки, так і паразитні ємності. Використовуючи сучасну технологію та оптимізований дизайн трансімпедансних підсилювачів, можливою стає реалізація активних фільтрів на основі FBAR і гіраторів у діапазоні частот до одиниць ГГц.

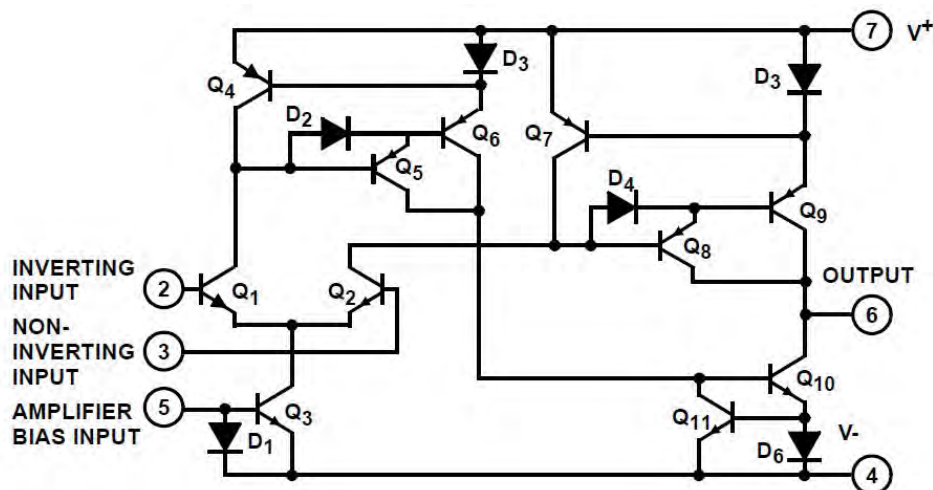


Рис. 7. Схема електрична принципова операційного трансімпедансного підсилювача CA3080

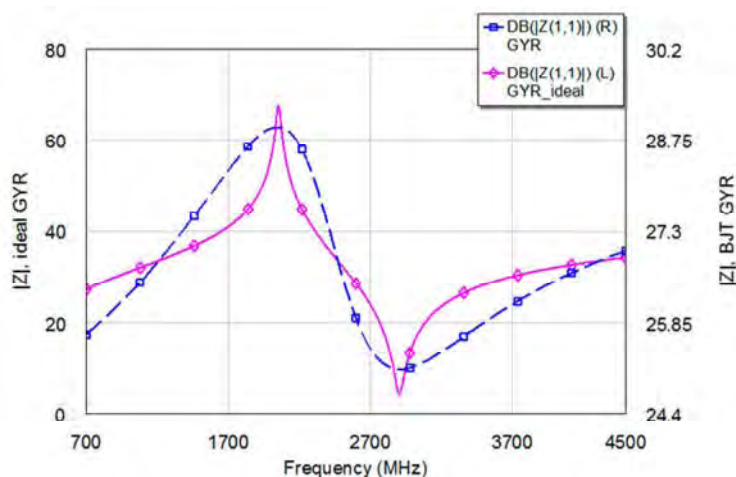


Рис. 8. Частотна залежність вхідного імпедансу з використанням ідеального та неідеального гіратора

### Висновки

Проведено аналіз можливостей реалізації ефекту трансформації імпедансу, що може бути застосований для реалізації активних фільтрів на тонкоплівкових п'єзоелектричних МЕМС резонаторах. Ідея ґрунтується на перетворенні імпедансу FBAR із використанням гіраторів на ОТА для створення нового схемного елемента з еквівалентною схемою, що виходить завдяки інверсії послідовного та паралельного резонансів (рис. 4, б).

Високочастотне моделювання схеми заземленого гіратора з використанням двох ОТА на біполярних транзисторах якісно показало можливість створення нового схемного елемента для активних МЕМС фільтрів. Однак для поліпшення частотних характеристик задіяні трансімпедансні підсилювачі потребують додаткової оптимізації топології та використання транзисторів, створених із використанням сучасних субмікронних кремнієвих технологій.

ОТА підсилювачі, що лежать в основі гіраторів, мають значний потенціал з погляду застосування у високочастотних високоселективних активних фільтрах. Вони роблять проектування фільтрів простішим, та, на відміну від звичайних операційних підсилювачів, мають кращі частотні характеристики. Використання гіраторів та високостабільних високочастотних FBAR забезпечує невисоку чутливість схеми до варіацій компонентів, а оскільки гіратор є

активним, його використання не призводить до додаткових дисипативних втрат у частотних характеристиках фільтра. Можливість регулювання характеристик фільтра зміною коефіцієнта трансповідності, малі габарити та економічна ефективність дають підстави стверджувати про перспективність наведеного методу.

1. Stornelli V., Pantoli L., Leuzzi G. High quality factor L-band active inductor-based band-pass filters, *Journal of Circuits, Systems and Computers*, Volume 22, Issue 03, 2013, 8 p.
2. Pepe D. Millimeter-wave high-Q active inductor in 65nm CMOS, *Electronics, Circuits and Systems (ICECS), 19th IEEE International Conference, 2012*, p. 181–184.
3. Khalaf L., Asir B. Tunable Low Noise Amplifier by Active Inductance Loading for Zigbee 2.4 GHz Band, *Recent advances in electrical and computer engineering, Proceedings of the 12th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering, Cambridge, 2013*, p. 191–195.
4. Cheng W.-W., Dong S.-R., Hah Y. A lowpower, lowphase noise FBAR oscillator, *Integrated Ferroelectrics Journal*, Volume 105, Issue 1, 2009, p. 75–86.
5. Nelson A., Hu J. A 22uW, 2.0GHz FBAR Oscillator. *IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, 2011*, – 4 p.
6. Campanella H., Nouet P., Uranga A., P. de Paco, Barniol N., Esteve J. Automated on-wafer extraction of equivalent-circuit parameters in thin-film bulk acoustic wave resonators and substrate, *Microwave and optical technology letters*, vol. 50, no. 1, 2008, pp. 4–7.
7. Burghartz J.N., Hargrove M., Webster C.S., Groves R.A., Keene M., Jenkins K.A. RF potential of a 0.18-um CMOS logic device technology, *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 47, no. 4, 2000, pp. 864–870.