

УДК 534.24

Резонатор на біжучих поверхнево акустичних хвилях

Плешка Т.Є., к.т.н., доц. Жовнір М.Ф.

Вступ

Фільтруючі пристрої – невід'ємна частина практично будь-якої складної радіоелектронної системи. У залежності від частотного діапазону вони будуються на базі дискретних або розподілених компонентах [1, 2].

В теперішній час в діапазоні десятків мегагерц – одиниць гігагерц широко застосовуються фільтри на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ), що використовують резонансні властивості зустрічно-штирових перетворювачів ПАХ [3, 4]. Однак, у вузькосмугових фільтрах на ПАХ виникають труднощі забезпечення рівномірності вершини амплітудно-частотної характеристик.

У даній роботі запропонована конструкція та математична модель смугового фільтра на базі кільцевого резонатора (КР) поверхневих акустичних хвиль з врахуванням інтегральних погонних втрат.

Моделювання смугового фільтра на основі кільцевого ПАХ-резонатора

На Рис. 1 зображена топологічна модель смугового фільтра, яка містить кільцевий ПАХ-резонатор та два ПАХ-хвилеводи, що пов'язані з кільцевим резонатором у протилежних

точках [5]. Зв'язок між резонатором та хвилеводами описується коефіцієнтами розподілу, які характеризують розподіл енергії сигналу у спрямованому відгалужувачі, утвореному в місці зближення кільцевого резонатора і хвилеводів.

Вхідним є плече 1, вихідним – плече 4, плечі 2 і 3 працюють на узгоджене навантаження. Коефіцієнти розподілу в площинах 0–0' і I–I' позначимо відповідно k_1 і k_2 . Вони залежать від відстані між КР і пов'язаними з ним хвилеводами. Кільцевий резонатор характеризується параметрами: α – погонні інтегральні втрати; l – ефективна довжина резонатора, причому $l = \pi(r + R)$, де r і R – відповідно внутрішній і зовнішній радіус кільцевого резонатора.

Розглянемо випадок, коли вихідні плечі пристрою працюють на узгоджене навантаження. Нехай через плече 1 до площини 0–0' надходить хвиля A з амплітудою, що дорівнює одиниці. Амплітуди всіх хвиль, що циркулюють у фільтрі, нормуються по відношенню до амплітуди хвилі A , початкову фазу хвилі A вважаємо рівною нулю.

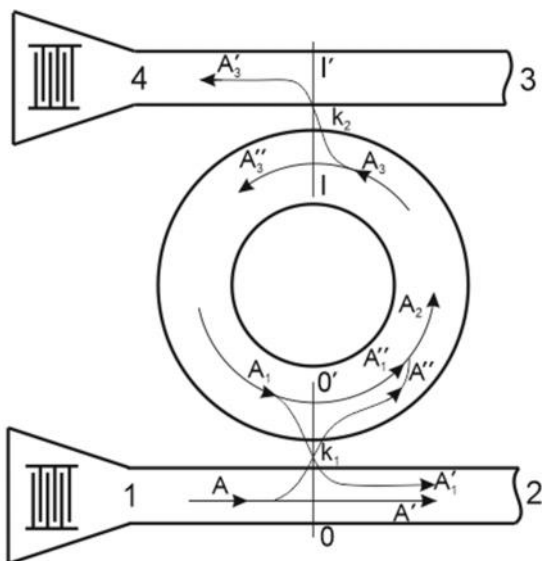


Рис. 1. Топологічна модель смугового фільтра на основі кільцевого ПАХ-резонатора

Тоді вираз для хвилі A в площині $0-0'$ має вигляд $A = \sin \omega t$. При проходженні хвилею A площини $0-0'$ вона поділяється на хвилю A' , що поступає в напрямку плеча 2, і хвилю A'' , що відгалужується в резонатор. В площині $0-0'$ хвиля $A'' = k_1 \sin \omega t$ якщо вважати фазовий зсув при переході з хвилеводу в КР незначним. З іншого боку, до площини $0-0'$ в стаціонарному режимі по кільцевому резонатору поширюється хвиля $A_1 = A_{m1} \sin(\omega t + \phi_1)$. Пройшовши площину $0-0'$, хвиля A_1 , розділяється на хвилі A_1' і A_1'' , що йдуть відповідно в напрямку плеча 2 і по кільцевому резонатору. Їх амплітуди визначаються з співвідношень:

$$(A_{m1})^2 = (A_{m1}')^2 + (A_{m1}'')^2; \quad (1)$$

$$A_{m1}' = k_1 A_{m1}. \quad (2)$$

Із (1) та (2) знаходимо $A_{m1}'' = A_{m1} \sqrt{1 - k_1^2}$, а фаза хвилі з амплітудою A_{m1}'' дорівнює ϕ_1 , (вважаємо фазовий зсув при переході з КР у хвилевід незначним).

Таким чином, по кільцевому резонатору вправо від $0-0'$ поширюється хвиля A_2 , що є сумою двох хвиль A_1' і A_1'' . У площині $0-0'$ вона описується виразом $A_{m2} \sin(\omega t + \phi_2)$, де A_{m2} і ϕ_2 визначаються з формул додавання двох гармонічних коливань:

$$A_{m2} = \sqrt{A_{m1}^2(1 - k_1^2) + k_1^2 + 2A_{m1}(1 - k_1^2)^{1/2} k_1 \cos \phi_1} \quad (3)$$

$$\text{tg} \phi_2 = \frac{(A_{m1} \sqrt{1 - k_1^2} \sin \phi_1)}{A_{m1} \sqrt{1 - k_1^2} \cos \phi_1 - k_1} \quad (4)$$

Вираз для хвилі A_2 в площині $I-I'$ з урахуванням втрат у резонаторі і фазових набігань матиме вигляд:

$$A_3 = A_{m3} \exp\left(\frac{-\alpha l}{2}\right) \sin\left(\omega t + \phi_2 - \frac{\omega \beta l}{V} \frac{l}{2}\right) \quad (5)$$

де $\beta = V/V_B$ – коефіцієнт уповільнення хвилі у резонаторі; V – швидкість ПАХ на підкладці; V_B – швидкість ПАХ у резонаторі; l – ефективна довжина кільцевого резонатора.

У площині $I-I'$ хвиля A_3 ділиться на дві хвилі A_3' і A_3'' з амплітудами:

$$A_{m3}' = k_2 A_{m3} = k_2 A_{m3} \exp(-\alpha l / 2), \quad (6)$$

де $A_{m3} \exp(-\alpha l / 2)$ – амплітуда хвилі A_2 з урахуванням втрат на половині довжини кільцевого резонатора, тобто

$$A_{m3} = A_{m2} \sqrt{1-k_2^2} = A_{m2} \sqrt{1-k_2^2} \exp\left(\frac{-\alpha l}{2}\right) \quad (7)$$

Тоді співвідношення для хвилі A_3'' має вигляд:

$$A_3'' = E_{m2} \sqrt{1-k_2^2} \exp\left(\frac{-\alpha l}{2}\right) \times \sin\left(\omega t + \phi_2 - \frac{\omega \beta l}{2V}\right) \quad (8)$$

Хвиля A_3'' продовжує поширюватися у напрямку до площини 0–0' і з урахуванням втрат і фазових набігань описується виразом:

$$A_3'' \exp\left(\frac{-\alpha l}{2}\right) \sin\left(\omega t + \phi_2 - \frac{\omega \beta l}{2V}\right) = A_{m2} \sqrt{1-k_2^2} \exp\left(\frac{-\alpha l}{2}\right) \times \sin\left(\omega t + \phi_2 - \frac{\omega \beta l}{2V}\right) \quad (9)$$

У стаціонарному режимі хвиля A_3'' в площині 0–0' представляє собою хвилю

$$A_1'' = A_{m1} \sin(\omega t + \phi_2) = A_{m2} \sqrt{1-k_2^2} \exp\left(\frac{-\alpha l}{2}\right) \sin\left(\omega t + \phi_2 - \frac{\omega \beta l}{2V}\right)$$

Прирівнюючи амплітуди і фази лівої і правої частин останньої рівності з урахуванням (3) і (4), при $k_1 = k_2 = k$ отримуємо систему рівнянь, з яких можна визначити A_{m1} і ϕ_1 :

$$A_{m1} = \sqrt{A_{m1}^2(1-k^2) + k^2} + 2A_{m1} \sqrt{1-k^2} k \cos \phi_1 \times \exp(-\alpha l) \sqrt{1-k^2} \quad (10)$$

$$\phi_1 = \frac{\arctg(A_{m1} \sqrt{1-k^2} \sin \phi_1}{(A_{m1} \sqrt{1-k^2} \cos \phi_1 + k_1) - \frac{\omega \beta l}{2V}}$$

Система рівнянь (10) розв'язується методом послідовних наближень.

Розрахунки фільтра на основі кільцевого резонатора проводилися при коефіцієнті уповільнення $\beta = 1,03$, ефективній довжині КР $l = 0,05$ м при різних значеннях коефіцієнтів ділення k і згасання α . Результати розрахунку перехідного затухання L_{14} між плечима 1 і 4 фільтра при різних значеннях втрат в резонаторі αl і фіксованому коефіцієнті розподілу $k = k_1 = k_2 = 0,5$ представлено на Рис. 2.

Залежність L_{14} має вигляд періодичної функції частоти f з різко вираженими максимумами. Такі характеристики властиві гребінчастим фільтрам. Отриманий результат можна пояснити тим, що досліджувана конструкція подана в вигляді лінійного ланцюга з затримкою і зворотним зв'язком. Як видно, зі зменшенням втрат значно знижується загасання у смузі пропускання фільтра, в той час як в смузі загородження його рівень залишається практично незмінним і визначається в основному значенням k .

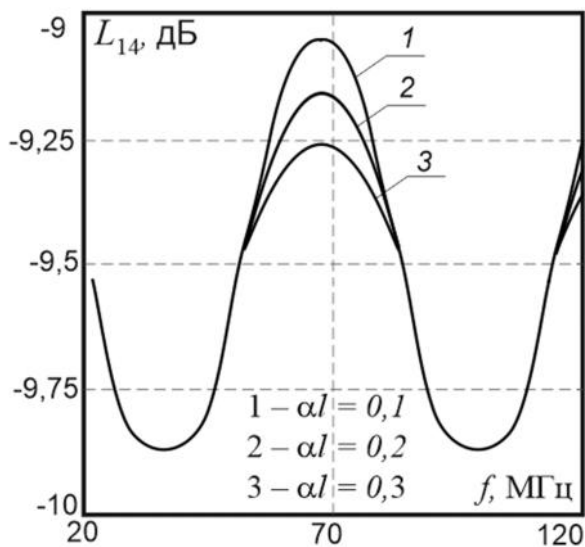


Рис. 2. Графіки залежності перехідного затухання від частоти при різних втратах

Характеристики L_{14} фільтра для різних коефіцієнтів розподілу k при фіксованих втратах $\alpha l = 0,3$ зображені на Рис. 3.

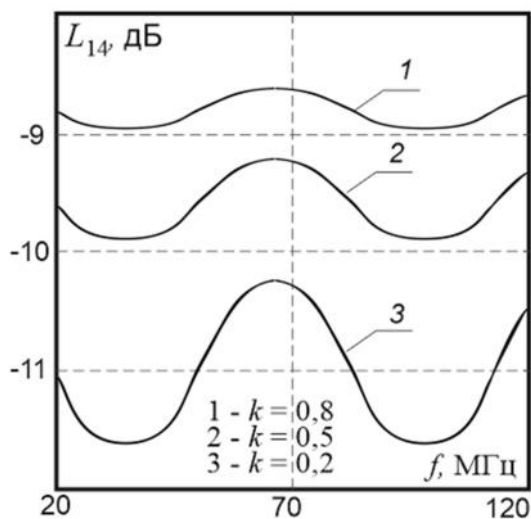


Рис. 3. Графіки залежності перехідного затухання від частоти резонатора при фіксованих втратах і різних коефіцієнтах розподілу

Як впливає з приведених графіків, зі зменшенням k

збільшується перепад між значеннями загасання в смугах пропускання і загородження, що свідчить про зростання добротності кільцевого резонатора. Однак вся характеристика переміщається в область більших значень загасання, що необхідно враховувати при проектуванні фільтрів.

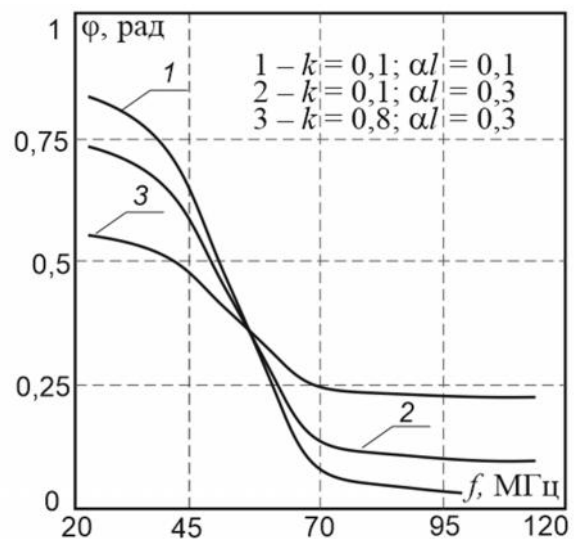


Рис. 4. Фазочастотні характеристики фільтра при різних значеннях k і αl

Можливість застосування фільтра для зсуву фази в частотних дискримінаторах систем автопідстроювання частоти показано на Рис. 4. На ньому з точністю до постійної складової $2\pi n$ представлено фазочастотні характеристики для одної із резонансних частот для різних значень k і αl . В області резонансної частоти характеристики мають максимальну крутизну. Зниження втрат у фільтрі і зменшення k , що ведуть до збільшення добротності кільцевого резонатора, викликають її подальше підвищення. Описану конструкцію фільтра допустимо

застосовувати також у схемах побудови стабілізованих ПАХ-генераторів шляхом вибору необхідних значень k і α [6].

Висновки

Переваги ПАХ-пристроїв обумовлено їх малою вагою і габаритами, температурною стабільністю, придатністю мікроелектронної технології для їх виготовлення. Оскільки центральна частота і форма частотної характеристики визначаються топологією, вони не вимагають складних налаштувань в апаратурі і мають довготривалий час безперебійного функціонування.

В результаті чисельних розрахунків отримано ряд графіків, які можуть бути використані при проектуванні фільтрів на основі кільцевих резонаторів ПАХ.

Література

1. Современная теория фильтров и их проектирование / Под ред. Г. Темеша, С. Митра. – М.: Мир, 1977. – 408 с.

2. Диэлектрические резонаторы / Под ред. М. Е. Ильченко. – М.: Радио и связь, 1989. – 328 с.
3. Орлов В. С., Бондаренко В. С. Фильтры на поверхностных акустических волнах. – М.: Радио и связь, 1984. – 272 с.
4. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1990. – 416 с.
5. Плешка Т. Є., Жовнір М. Ф. П'єзоелектричні хвилеводи для вимірювальних перетворювачів на поверхневих акустичних хвилях / Матеріали X-ої наук.-практ. конф. «Перспективні напрямки сучасної електроніки». – НТУУ «КПІ». – Київ. -2016. – С. 94-100.
6. Дворников А.А., Огурцов В.И., Уткин Г.М. Стабильные генераторы с фильтрами на ПАХ. – М.: Радио и связь, 1983. – 136 с.