

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-8>

УДК 621.38

ОСАДЧУК Олександр
Вінницький національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0001-6662-9141>
e-mail: osadchuk.av69@gmail.com

ДУМЕНКО Денис
Вінницький національний технічний університет
<https://orcid.org/0000-0002-4051-9355>
e-mail: doomdenny@gmail.com

АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОПОТУЖНОГО ФІЛЬТРА НА ТРАНЗИТОРНИХ АНАЛОГАХ ІНДУКТИВНОСТІ ЯК АЛЬТЕРНАТИВИ ФІЛЬТРІВ НА ПОВ'ЯЗАНИХ РЕЗОНАТОРАХ

У статті проаналізовано основні характеристики малопотужних смугопр пропускаючих фільтрів. Розглянуті фільтри на пов'язаних резонаторах та запропоновано використання транзисторних аналогів індуктивності як їх альтернатива. Досліджена зміна основних параметрів компонентів фільтрів при заміні основного елемента на транзистор. Охарактеризовані основні аспекти та досліджений коефіцієнт передачі фільтра з використанням транзисторного аналогу індуктивності. Розглянуто режим роботи малого сигналу транзистора та його основні умови. Проаналізовані умови яким потрібно слідувати при виборі активного елемента. Наведено залежність роботи та параметрів транзисторів від живлення по постійному струмові, його стабільності та безперебійності. Проаналізовано можливість використання несиметричної смужової лінії передачі з діелектричним заповненням.

Ключові слова: активний фільтр; резонатор; індуктивність; транзисторний аналог індуктивності; частота; добротність коливального кола.

OSADCHUK Olexander, DUMENKO Denys
Vinnytsia National Technical University

ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF A LOW-POWER FILTER ON TRANSIENT INDUCTANCE ANALOGS AS AN ALTERNATIVE TO FILTERS ON COUPLED RESONATORS

With the increase in the number of signals in all spectrums and frequency ranges of information transmission, the problem of congestion of the entire transmission band is acute. Accordingly, there is a need to filter signals and select useful ones in order to ensure the effective operation of the radio engineering system. One of the areas of application of transistor analogs of inductance is their use to replace passive inductances in LC filters. This application is due to the fact that the transistor analogue of the inductance, as an active element, has a rather small sensitivity to the spread of the parameters of the passive elements of the circuit, compared to the sensitivity of ordinary LC filters. When using active RC filters based on transistor analogues of inductance, there is also the possibility of matching the resistances of the power source and the load in the frequency band, which further reduces the sensitivity of the active filter.

The article analyzes the main characteristics of low-power bandpass filters. Filters on coupled resonators are considered and the use of transistor analogs of inductance as their alternative is proposed. The change in the main parameters of filter components when replacing the main element with a transistor was studied. The main aspects are characterized and the coefficient of the pre-filter using a transistor analogue of the inductance is investigated. The mode of operation of a small signal transistor and its main conditions are considered. Analyzed conditions that must be followed when choosing an active element. The dependence of operation and parameters of transistors on DC power supply, its stability and uninterrupted power supply is given. The possibility of using an asymmetric strip transmission line with dielectric filling is analyzed.

Keywords: active filter; resonator; inductance; transistor analog of inductance; frequency; Q factor of the oscillating circuit.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Із збільшенням кількості сигналів в усіх спектрах та частотних межах передачі інформації гостро виникає проблема загромождження всієї смуги передачі. Відповідно, виникає необхідність фільтрації сигналів та виділення корисного задля забезпечення ефективної роботи радіотехнічної системи. Одним із напрямків застосування транзисторних аналогів індуктивності є використання їх для заміни пасивних індуктивностей в LC - фільтрах. Таке застосування пов'язане з тим, що транзисторний аналог індуктивності, як активний елемент, має досить малу чутливість до розкидів параметрів пасивних елементів схеми, порівнянно з чутливістю звичайних LC - фільтрів. При використанні активних RC - фільтрів на основі транзисторних аналогів індуктивності також існує можливість узгодження опорів джерела живлення та навантаження в частотній смузі пропускання, що ще більше знижує чутливість активного фільтра [1-4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На даний час постійно проводяться наукові дослідження, що аналізують проблематику та можливості транзисторних структур замінювати каскади фільтруючих елементів відповідно мінімізуючи габарити та покращуючи характеристики готових радіотехнічних пристроїв. Найбільш ґрунтовними дослідженнями серед опублікованих є роботи таких авторів як Davide Colaiuda, Alfiero Leoni, Giuseppe Ferri and Vincenzo Stornelli, Arsen A.M.Shakir. Всі вони описують питання, що безпосередньо пов'язані з фільтруючими властивостями транзисторних структур та індивідуальними особливостями їх застосування [1, 3, 4, 5].

А оскільки тенденція використання транзисторних структур тільки зростає, то ми потребуємо і подальших досліджень цієї проблематики.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття

Незважаючи на значну кількість досліджень у цій сфері проблема все ще є актуальною і потребує подальшого дослідження та виявлення нових застосування транзисторних структур як керованих фільтруючих каскадів чи покращення існуючих. Оскільки кожне застосування тієї чи іншої транзисторної структури є унікальним, то проблема потребує подальших досліджень й виявлення найкращих шляхів реалізації впровадження таких структур.

Формулювання цілей статті

Метою статті є аналіз характеристик малопотужного фільтра та транзисторних аналогів індуктивності як альтернативі фільтрів на пов'язаних резонаторах, та способів їх застосування. Аналіз параметрів, які б задовольняли відповідний режим роботи транзистора.

Виклад основного матеріалу

Смугопропускаючі фільтри є важливою складовою низки електронного обладнання, де є необхідним виокремлення та аналіз сигналу в певному діапазоні частот [2]. Із необхідністю створення точно керованих фільтрів виникає потреба в використанні транзисторних структур як керовані фільтри, або як цілі каскади, що замінюють звичайні пасивні елементи. Детальний розгляд параметрів різних типів смугопропускаючих фільтрів [3], показує, що в дециметровому діапазоні в якості вузькосмугових фільтрів з необхідними параметрами можливо використати фільтри на пов'язаних резонаторах, виду рис. 1.

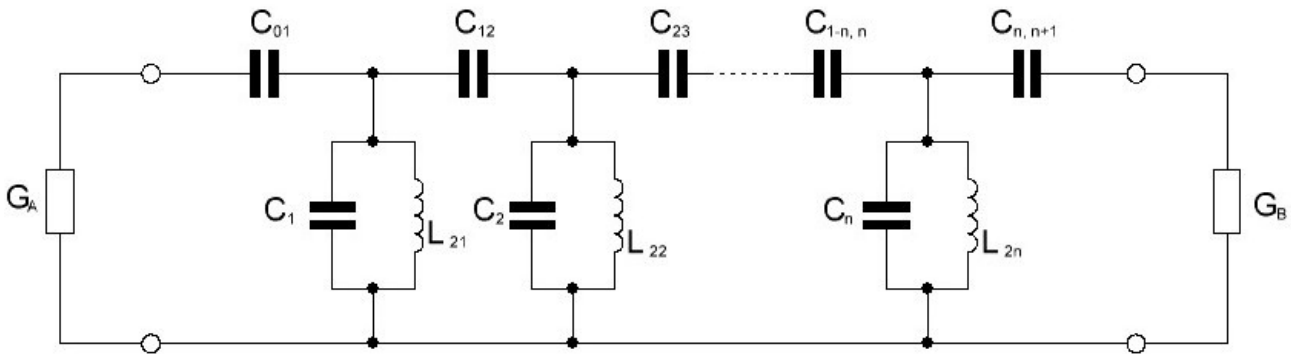


Рис. 1. Фільтри на пов'язаних резонаторах

Елементарна ланка цього фільтра, що застосовується в якості індуктивності L_m транзисторний аналог буде мати вигляд рис. 2.

Припускаючи, що втрати в реактивностях $C_{01}, C_{12}, C_{21}, C_{23}$ малі – будемо вважати, що на центральній частоті опір активний і близький до R_L [4]. В цьому випадку коефіцієнт передачі фільтра буде рівний

$$K = \frac{4G_A G_B}{(G_A + G_B - G_L)^2}, \quad (1)$$

Враховуючи, що фільтр на вході і на виході навантажений лінією передачі з характеристичним опором $Z_0 = 50 \text{ Ом}$,

$$G_A = G_B = 0,02, \quad (2)$$

Нехай на резонансній частоті фільтра потрібно отримати підсилення $K_0 = 3$ Дб. З формули для коефіцієнту передачі знаходимо необхідну величину $R_L = -71,4$ Ом.

При виборі активного елементу – транзистора, виходимо з наступних умов [5]:

1. Для розгляду температурного діапазону транзистор повинен бути кремнієвий.
2. Гранична частота транзистора повинна бути більше робочої частоти фільтра f_0 в 1,5 разів, тобто $f_0 = f_\alpha / 1,5$ [4].

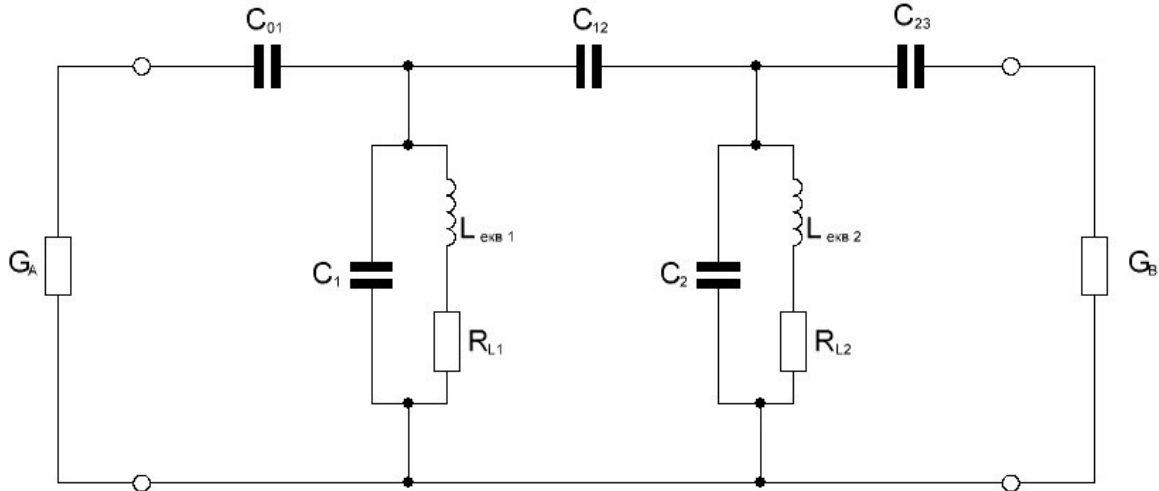


Рис. 2. Транзисторний аналог фільтрів на пов'язаних резонаторах

Електричну схему фільтра, разом із колами живлення можна представити у вигляді рис 3.

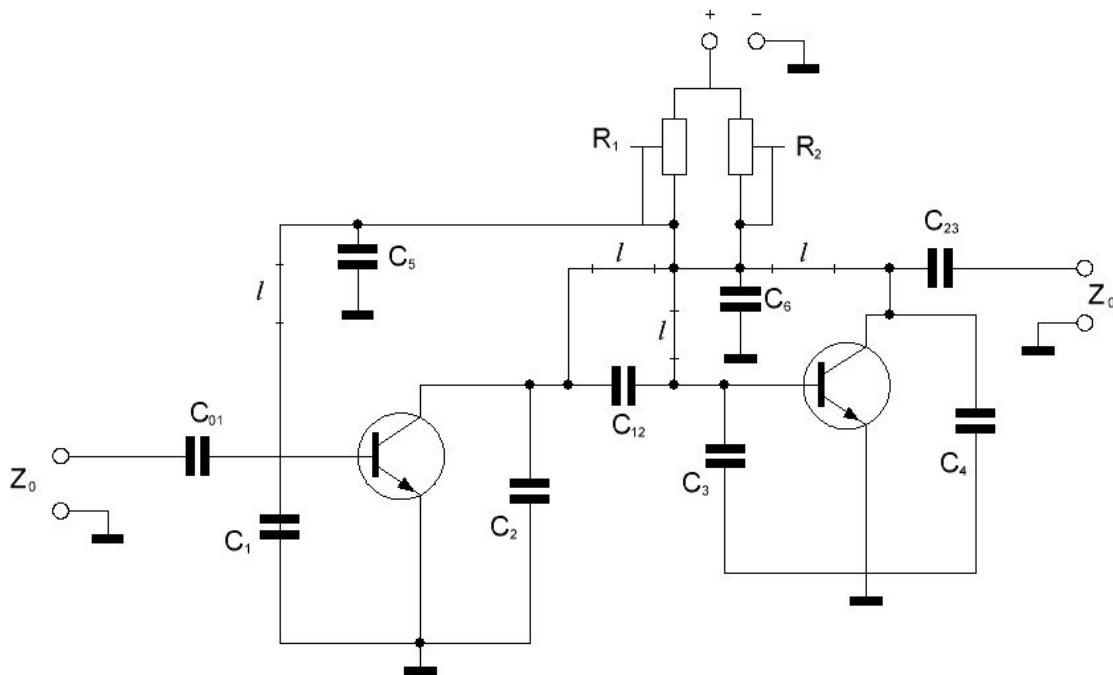


Рис. 3. Електрична схема фільтра, разом із колами живлення

На даній схемі розв'язка сигнальних кіл та живлення здійснюється за допомогою ємкостей C_5, C_6 . Резистори R_1, R_2 забезпечують режим живлення за постійним струмом [6].

Режим живлення даної схеми за постійним струмом може бути визначений напругами, що прикладаються до емітерного і колекторного переходу [8]. Умовою роботи транзистора в режимі малого сигналу вважається дотримання умови

$$U_m < \frac{1}{3} U_0, \quad (3)$$

де U_m - амплітуда сигналу;

U_0 - постійна напруга на переході.

Враховуючи, що $U_{EB} < U_{KB} = U_0$, умову можна записати у вигляді

$$U_m < \frac{1}{3} U_{EB}, \quad (4)$$

В номінальному режимі роботи напруга сучасних малопотужних НВЧ транзисторів складає порядку 0,3 – 0,6 В.

Таким чином, максимальна потужність НВЧ сигналу, при якому буде забезпечуватися режим малого сигналу рівна

$$P_{\max} = \frac{U_m^2}{2Z_0} = \frac{\left(\frac{1}{3} U_{EB}\right)^2}{2Z_0} = 10^{-4} \text{ Вт}, \quad (5)$$

Де $Z_0 = 50$ Ом – характеристичний опір лінії передачі.

Враховуючи, що номінальний рівень вхідної потужності, визначений технічними характеристиками на малопотужні фільтри на рівні 10^{-5} Вт, тому схема буде працювати в режимі «малого сигналу».

В якості лінії передачі обираємо несиметричну смугову лінію з діелектричним заповненням.

Дроселі представляють високоомні відрізки смугової лінії передачі довжиною $l < \lambda/4$.

В якості ємностей зв'язку C_{01}, C_{12}, C_{23} використовуємо розрив смугової лінії. Величина розриву d визначається виразом:

$$d = \frac{t}{\pi} \ln \left[\operatorname{cth} \left(\frac{\lambda \xi}{2t} \cdot \frac{X_{C_{01}}}{1 - X_{C_{01}}^2} \right) \right], \quad (6)$$

де t – ширина смуги лінії передачі.

Враховуючи, що необхідна підстройка смуги пропускання коефіцієнта підсилення, нерівномірності АЧХ в якості ємностей C_1, C_2, C_3, C_4 використовують підстроювальні конденсатори.

Ємності C_5, C_6 для задовільної розв'язки повинні перевищувати 1000 пФ, тому використовуємо навісні конденсатори ємністю 4700 пФ.

Як показали дослідження регулюючи ємності $C_1 - C_4, C_{01}, C_{12}, C_{22}$ та режим живлення по постійному струму можна отримати підсилення в смузі пропускання понад 10 Дб та смугу пропускання по нульовому рівню 10 МГц, розв'язку на частотах $f_0 \pm 16,5$ МГц не менше 30 Дб, та на частотах $f_0 \pm 66$ МГц близько 60 Дб.

В робочій точці практично відсутня нестабільність резонансної частоти від напруги живлення. Нестабільність коефіцієнта підсилення складає 0,005 Дб/мВ.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В результаті проведеного аналізу можна зробити висновок, що використання транзисторних аналогів індуктивності здатна суттєво покращити характеристики одноконтурних фільтрів та є чудовою альтернативою для використання у фільтрах на пов'язаних резонаторах. А також варто підкреслити, що використання транзисторних аналогів індуктивності робить можливість застосування таких фільтрів в діапазонах надвисоких частот, де вже основні обмеження будуть пов'язані з характеристиками конкретного обраного транзистора.

Розглянуті фільтри на пов'язаних резонаторах та запропоновано використання транзисторних аналогів індуктивності як їх альтернатива. Досліджена зміна основних параметрів компонентів фільтрів при заміні основного елемента на транзистор. Охарактеризовані основні аспекти та досліджений коефіцієнт передачі фільтра з використанням транзисторного аналогу індуктивності. Розглянуто режим роботи малого сигналу транзистора та його основні умови. Проаналізовані умови яким потрібно слідувати при виборі активного елемента. Наведено залежність роботи та параметрів транзисторів від живлення по постійному струмові, його стабільності та безперебійності. Проаналізовано можливість використання несиметричної смугової лінії передачі з діелектричним заповненням.

Література

1. M. Kumngern Electronically tunable universal filter and quadrature oscillator using low-voltage differential difference transconductance amplifiers / M. Kumngern, P. Suksaibul, F. Khateb, T. Kulej, // IEEE Access, vol. 10, pp. 68965-68980, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3186435>
2. Осадчук В. С. Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 183 с.
3. Arsen Mohammede Study of finfet transistor: critical and literature review in finfet transistor in the active filter / Arsen Ahmed Mohammede, Zaidoon Khalaf Mahmood // 3C TIC. Cuadernos de desarrollo aplicados a las TIC, Issue 12(1), pp. 65-81. – DOI: <https://doi.org/10.17993/3ctic.2023.121.65-81>
4. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов та ін. — Вінниця : ВНТУ, 2011. — 336 с.
5. O. Faruqe, M.T. Amin, Active Inductor with Feedback Resistor Based Voltage Controlled Oscillator Design for Wireless Applications / INTL JOURNAL OF ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS, 2018, VOL. 65, NO. 1, PP. 57-64
6. Осадчук О. В. Математичне моделювання генератора НВЧ на основі транзисторної структури з від'ємним опором / О. В. Осадчук, А. О. Семенов // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – № 4, Ч. 1, Т. 2. – С. 256–259.
7. Guacci, M. On the Origin of the COSS-Losses in Soft-Switching GaN-on-Si Power HEMTs /; Guacci, M. Heller, M.; Neumayr, D.; Bortis, D.; Kolar, J.W.; Deboy, G.; Ostermaier, C.; Haberlen, O. // IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron. 2019, v.7, pp. 679–694. DOI: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2018.2885442>.
8. S. Diao and Y. Wang and C. Wang and F. Lin and C. H. Heng, VCO Design for Low-Power, High-Efficiency Transmitter Applications, in 2014 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology, Hefei, China, 2014, pp. 1-4.

References

1. M. Kumngern Electronically tunable universal filter and quadrature oscillator using low-voltage differential difference transconductance amplifiers / M. Kumngern, P. Suksaibul, F. Khateb, T. Kulej, // IEEE Access, vol. 10, pp. 68965-68980, 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3186435>
2. V. S. Osadchuk Generators of electric oscillations based on transistor structures with negative resistance: monograph / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, A. O. Semenov. – Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2009. – 183 p.
3. Arsen Mohammede Study of finfet transistor: critical and literature review in finfet transistor in the active filter / Arsen Ahmed Mohammede, Zaidoon Khalaf Mahmood // 3C TIC. Cuadernos de desarrollo aplicados a las TIC, Issue 12(1), pp. 65-81. – DOI: <https://doi.org/10.17993/3ctic.2023.121.65-81>
4. Functional nodes of radio measuring devices based on reactive properties of transistor structures with negative resistance: monograph / V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk, A. O. Semenov, et al. — Vinnytsia: VNTU, 2011. — 336 p.
5. O. Faruqe, M.T. Amin, Active Inductor with Feedback Resistor Based Voltage Controlled Oscillator Design for Wireless Applications / INTL JOURNAL OF ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS, 2018, VOL. 65, NO. 1, pp. 57-64
6. O. V. Osadchuk Mathematical modeling of a microwave generator based on a transistor structure with negative resistance / O. V. Osadchuk, A. O. Semenov // Bulletin of the Khmelnytskyi National University. – 2005. – No. 4, Part 1, Volume 2. – P. 256–259.
7. Guacci, M. On the Origin of the COSS-Losses in Soft-Switching GaN-on-Si Power HEMTs /; Guacci, M. Heller, M.; Neumayr, D.; Bortis, D.; Kolar, J.W.; Deboy, G.; Ostermaier, C.; Haberlen, O. // IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron. 2019, v.7, pp. 679–694. DOI: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2018.2885442>.
8. S. Diao and Y. Wang and C. Wang and F. Lin and C. H. Heng, VCO Design for Low-Power, High-Efficiency Transmitter Applications, in 2014 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology, Hefei, China, 2014, pp. 1-4.