

О. В. Осадчук<sup>1</sup>  
Я. О. Осадчук<sup>1</sup>  
С. В. Ліхашорський<sup>1</sup>

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ НЕСТАБІЛЬНОСТІ В АКТИВНИХ НВЧ ФІЛЬТРАХ ТА МЕТОДИ ЇЇ ЗМЕНШЕННЯ

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Досліджено методи зменшення температурної нестабільності в активних НВЧ фільтрах. Проаналізовано вплив температури на параметри активного НВЧ фільтра. Представлено також результати експериментальних досліджень температурних характеристик НВЧ фільтрів. В проектуванні цифрових систем, особливо сучасних, які працюють з тактовою частотою або використовують радіоканал в мікрохвильовому та УВЧ діапазоні, зазвичай існує проблема підвищення надійності або зменшення загальних розмірів зі збереженням високих електричних параметрів. Вимоги до мініатюризації мікрохвильового обладнання поставили завдання створення схем фільтрів, які придатні для інтегрального виробництва. На відміну від низькочастотних активних фільтрів, під час побудови мікрохвильових фільтрів необхідно враховувати реактивні властивості транзисторів. Тому в дослідженнях різних ланцюгів смугових активних мікрохвильових фільтрів використовують прохідні явища в транзисторі. Показана можливість їх температурної та динамічної стабілізації шляхом зміни струму емітера біполярного транзистора. Запропоновано різні схемотехнічні рішення реалізації цього методу. Як показали експериментальні дослідження з підвищенням температури, спостерігається зменшення коефіцієнта переносу фільтра на квазірезонансній частоті. Експериментальні дослідження показали, що для стабілізації коефіцієнта передачі росту температури, необхідно підвищення струму емітера, що може бути досягнуто загальним підвищенням напруги живлення. Таким чином, для термостабілізації АЧХ НВЧ-фільтра необхідно одночасно зі зміною температури регулювати струм транзисторного випромінювача. Величина регулювання струму випромінювача за зміни температури від  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$  становить 3—4 порядки для кремнієвих транзисторів малої потужності.*

**Ключові слова:** активний НВЧ фільтр, температурна нестабільність, реактивні властивості транзисторів, квазірезонансна частота.

### Вступ

Темпи технічного прогресу в електронній промисловості значною мірою залежать від створення приладів і пристроїв нового покоління. Саме цим, насамперед, зумовлена необхідність використання принципово нових конструкцій і технологічних прийомів для забезпечення високої ефективності, надійності і довговічності електронних приладів і систем, що створюються на їх базі [1]—[3]. Удосконалення електронних приладів НВЧ та їх широке застосування забезпечують вагомий внесок в інтенсифікацію майже всіх галузей економіки. Вимоги до мініатюризації НВЧ апаратури висунули задачу створення фільтруючих ланцюгів, придатних для інтегрального виготовлення [4].

На відміну від низькочастотних активних фільтрів, під час побудови НВЧ фільтрів необхідно враховувати інерційні властивості транзисторів [5]. Тому проведені дослідження різних схем смугопропускаючих активних НВЧ фільтрів, що використовують прогонові явища в транзисторі. Показана можливість їх температурної та динамічної стабілізації шляхом зміни струму емітера транзистора. Запропоновано схеми, які реалізують цей метод.

Сучасні системи зв'язку, такі як програмовані радіоприймачі та приймачі GPS, вимагають надмірно малих високочастотних фільтрів та генераторів з надзвичайно хорошою тимчасовою тепловою стійкістю, високими резонансними коефіцієнтами якості та чудовими характеристиками РЧ-збігу [6]. Пристрої з дискретною об'ємною акустичною хвилею, такі як кварцові резонатори, стали

переважним вибором для таких застосувань, оскільки монокристалічний кварц має кілька привабливих властивостей матеріалу [6]—[9]. Це п'єзоелектричний матеріал з низькими втратами (з високим  $Q$ ) з нульовим температурним коефіцієнтом для вибраних кристалів. Крім того, його хімічно інертна поверхня робить кварц кандидатом для стабільних частотних операцій. Однак сучасна технологія виготовлення кварцових резонаторів не забезпечує прямолінійного способу зменшення розміру і, таким чином, збільшення частоти роботи в діапазоні НВЧ [9]. Крім того, інтегрувати великі масиви точно налаштованих конструкцій з високочастотною радіочастотною електронікою та вакуумувати упаковку отриманого чіпу на рівні пластин неможливо за допомогою сучасних технологій. Полікремнієва поверхнева технологія мікрооброблення дозволила створити на мікросхемі УВЧ-резонатори з високими значеннями  $Q$ . Однак ці пристрої мають досить великий прохідний опір в НВЧ діапазоні [8], [9].

*Метою роботи є дослідження методів зменшення нестабільності в активних НВЧ фільтрах та аналіз впливу температури на параметри активного НВЧ фільтра, а також експериментальне підтвердження теоретичних досліджень температурних характеристик НВЧ фільтра.*

### Результати досліджень

Наявність напівпровідникового елемента в активних НВЧ фільтрах обумовлює значні зміни квазірезонансної частоти  $f_0$ , коефіцієнта передачі на цій частоті  $k_0$  і ширини смуги пропускання  $\Delta f$  у порівнянні з нестабільністю цих параметрів у пасивних фільтрів.

Застосування різних методів і схем стабілізації активних НВЧ фільтрів дозволяє зменшити ці зміни, в той час, як температурна стабілізація параметрів пасивних фільтрів (особливо коаксіальних об'ємних фільтрів) викликає значні конструктивні труднощі.

Розглянуті методи дослідження та стабілізації параметрів активних смугопр пропускаючих НВЧ фільтрів (АСПФ), що базуються на використанні інерційних властивостей транзисторів.

Експериментальні дослідження активних смугопр пропускаючих фільтрів в НВЧ діапазоні, робота яких основана на використанні інерційних властивостей транзисторів показали, що зі зміною температури спостерігається зміна квазірезонансної частоти, смуги пропускання і коефіцієнта передачі фільтра. Припустимо, що зміна параметрів фільтра за рахунок впливу його пасивних елементів незначна і розглянемо причини температурної нестабільності параметрів в наслідок зміни реактивних властивостей транзистора.

В активних смугопр пропускаючих НВЧ фільтрах (АСПФ) використовують повний опір  $Z$  ланцюга емітер-колектора транзистора увімкненого зі спільним колектором (рис. 1), яке можна виразити активною  $R_L$  і реактивною  $X_L$  складовими

$$Z_L = R_L + jX_L. \quad (1)$$

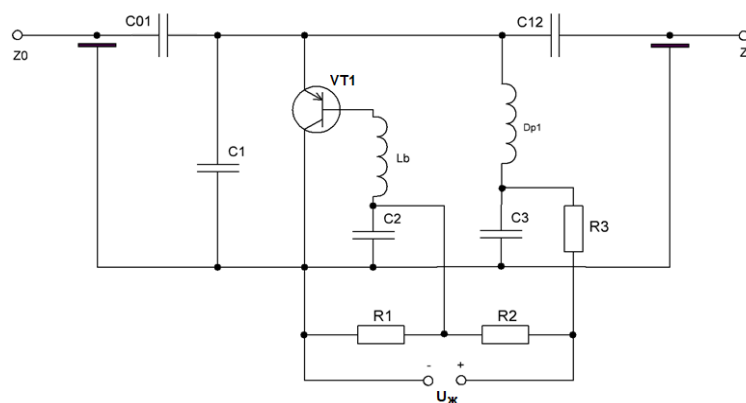


Рис. 1. Принципова схема взаємного активного НВЧ фільтра

Температурна нестабільність транзистора впливає на параметри АСПФ внаслідок зміни величин  $R_L$  і  $X_L$ . Активна  $R_L$  і реактивна  $X_L$  складові повного опору  $Z_L$  залежать від фізичних параметрів транзистора.

$$R_L = \frac{r_e}{1 + (\omega C_e r_e)} - \frac{(DK - NM)\alpha_2 - (NK + DM)(1 - \alpha_1)}{K^2 + M^2}; \quad (2)$$

$$X_L = \frac{1}{1 + j\omega C_e r_e} \cdot \frac{\alpha_0 e^{-j m \omega / \omega_\alpha}}{1 + j \omega / \omega_\alpha}, \quad (3)$$

де  $\alpha_0$  — коефіцієнт передачі транзистора на низькій частоті;  $\omega$  — кутова частота;  $\omega_\alpha = 2\pi f_\alpha$  — гранична кутова частота транзистора;  $m$  — коефіцієнт, який визначає поле в базі транзистора.

Таким чином, величина температурної нестабільності АСПФ залежить від впливу температури на фізичні параметри транзистора. Однією з основних причин температурної нестабільності транзисторів є температурна залежність зворотного струму колекторного переходу. Ця залежність для практичних розрахунків германієвих транзисторів апроксимується експонентою 3.

Дифузійна ємність емітерного переходу залежить від температури через параметри  $r_e$  і  $f_\alpha$ :

$$C_{e0} = \frac{0,25}{r_e 2\pi f_\alpha}. \quad (4)$$

Ємність колекторного переходу незначно залежить від температури, тому в розрахунку температурних залежностей вхідного опору індуктивного НВЧ транзистора ємність колекторного переходу вважаємо постійною.

Коефіцієнт передачі по струму транзистора, увімкненого за схемою зі спільною базою  $\alpha$  залежить від температури. Тепер, коли з'ясовано поведінку елементів еквівалентної схеми від температури, можна розрахувати залежність складових повного опору  $R_L$  і  $X_L$  від температури. Однак, для розрахунку величини ємності емітерного переходу  $C_{e0}$  і  $C_{ed}$ , коефіцієнта передачі  $\alpha$  і граничної частоти транзистора  $f_\alpha$  необхідні знання параметрів напівпровідникового матеріалу, з якого виготовлений транзистор. Це не завжди виконується в умовах високих рівнів інжекції носіїв заряду.

Простішим методом є експериментальне визначення залежності  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  від температури (рис. 2, рис. 3) з розрахунком необхідних залежностей (рис. 4). Для проведення вищеописаних вимірювань використовувався випробувач високочастотних транзисторів Л2-43.

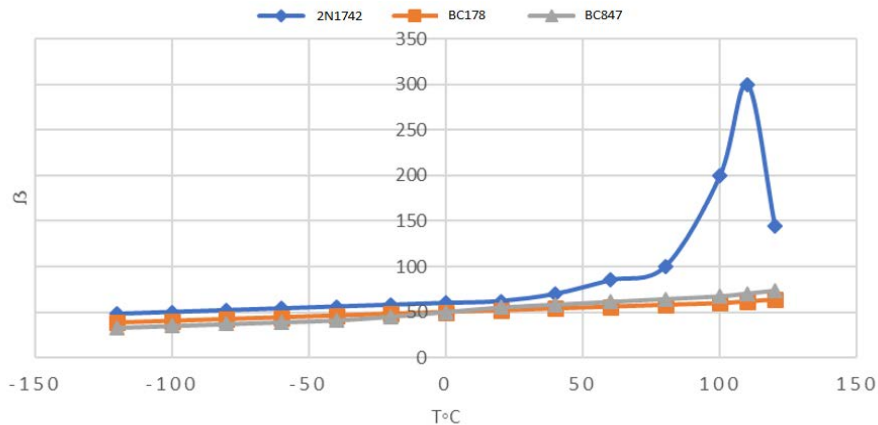


Рис. 2. Експериментальні залежності коефіцієнта підсилення  $\beta$  від температури

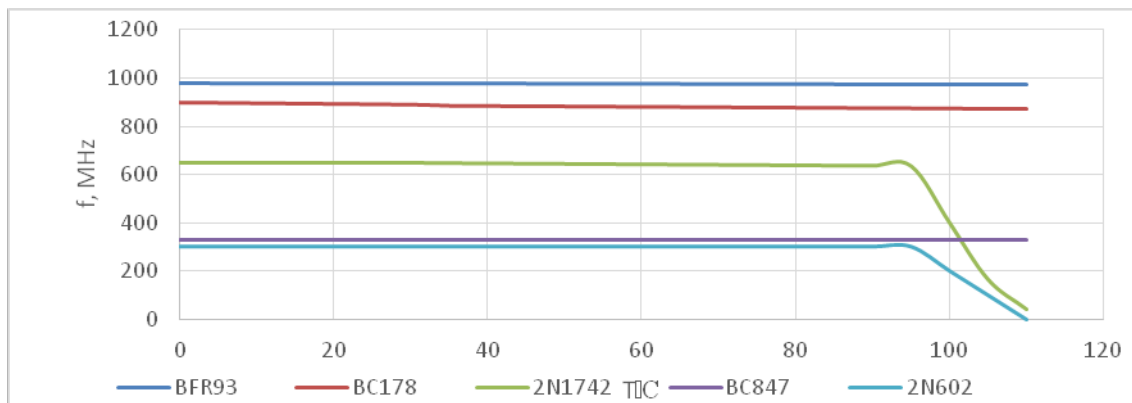
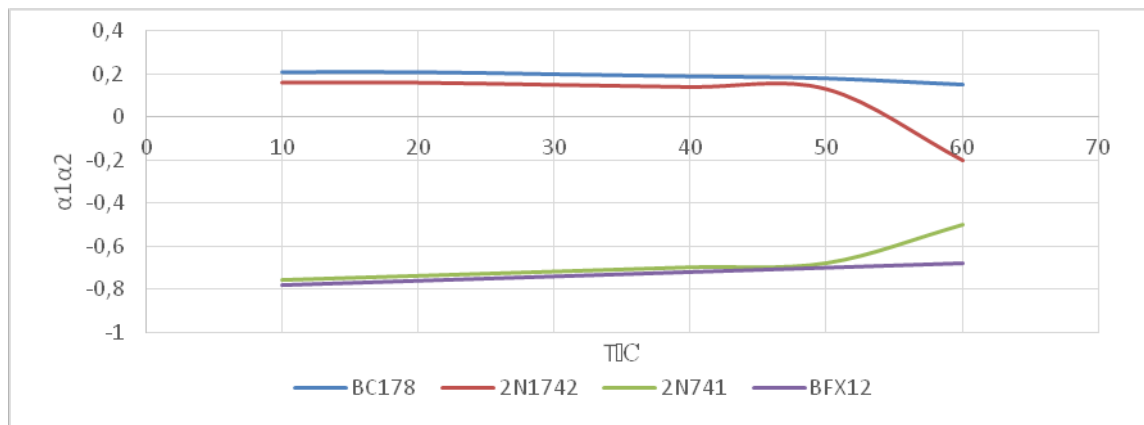
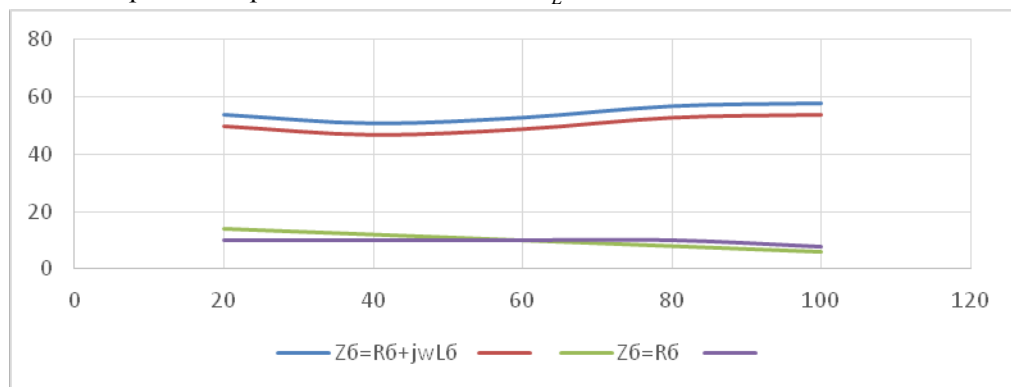


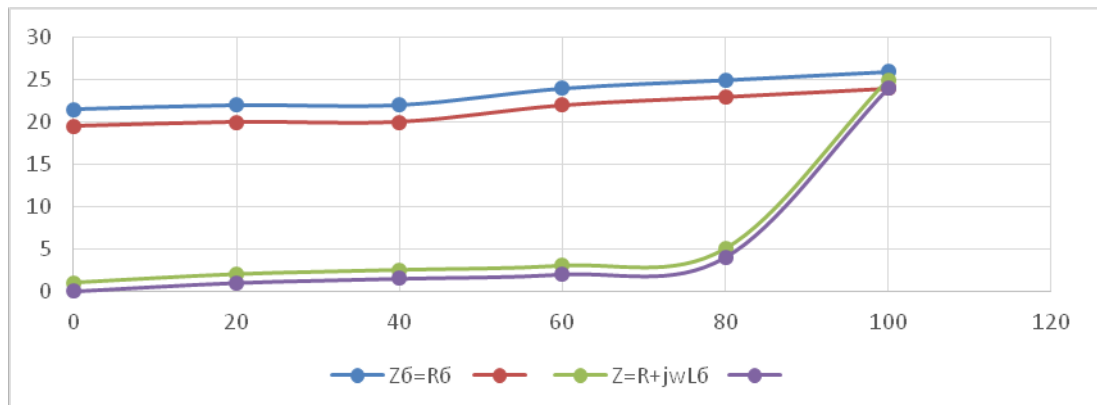
Рис. 3. Експериментальні залежності граничної частоти від температури для різних типів транзисторів

Рис. 4. Розраховані залежності дійсної  $\alpha_1$  і уявної  $\alpha_2$  складових коефіцієнта передачі від температури

З графіка (рис. 5) випливає, що з ростом температури за  $Z_b = R_b + j\omega L_b$  і малих  $R_b < 10$  Ом відбувається незначне зростання реактивної складової  $X_L$ .

Рис. 5. Розраховані і експериментальні залежності реактивної  $X_L$  складової повного опору в ланці емітер-колектор транзистора від температури

На рис. 6 показані залежності реактивної складової  $X_L$  повного опору кола емітер-колектор транзистора від температури для випадків, коли між базою і колектором увімкнені активний  $Z_b = R_b$  і індуктивний  $Z_b = R_b + j\omega L_b$  опір. У разі  $Z_b = R_b$ ,  $X_L$  зі зростанням температури зменшується. Активна складова  $R_L$  зі зростанням температури збільшується (рис. 6) швидше ніж реактивна складова. Це знижує добротність ланцюга емітер-колектор транзистора. Наприклад, якщо  $K_b = 10$  Ом,  $L_b = 10$  мГн,  $I_e = 5$  мА,  $U_b = -5$  В, для транзистора типу 2N1742, температурна нестабільність за температури 60 °С для реактивної складової — 1,93 %/град; для активної складової — 4,7 %/град. Отримані результати показують, що основна температурна нестабільність спостерігається по активній складовій.

Рис. 6. Розраховані і експериментальні залежності активної  $R_L$  складової повного опору ланки емітер-колектор транзистора від температури

З метою поліпшення температурної стабільності АЧХ активних НВЧ фільтрів проведені температурні випробування так званої схеми незваженого НВЧ фільтра рис. 7. На відміну від взаємного АСПФ, незважений фільтр в прямому напрямку підсилює сигнал в смузі пропускання на кілька дБ, а в зворотному — вносить згасання порядку декількох десятків дБ.

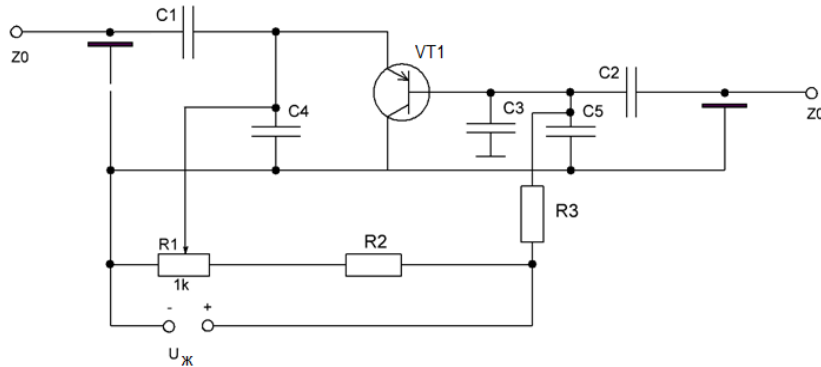


Рис. 7. Схема незваженого НВЧ фільтра без динамічної стабілізації

Застосування цієї схеми має перевагу в разі побудови багатоканальних систем, які мають спільний вхід і розв'язані виходи. У цьому випадку схеми як на рис. 7 можна використовувати без вхідного діляника потужності, подаючи сигнал з вхідних ліній одночасно на всі фільтри. Відмова від вхідного діляника потужності дозволяє зменшити розміри багатоканального блока селекції.

На рис. 8 показані результати температурних випробувань незалежного АСПФ. Як видно з графіків, цей фільтр має кращі температурні характеристики (девіація квазірезонансної частоти не більше 0,3 мГц/град; коефіцієнта передачі на цій частоті — не більше 0,03 дБ/град) ніж взаємний АСПФ. Однак девіація коефіцієнта передачі є також значною.

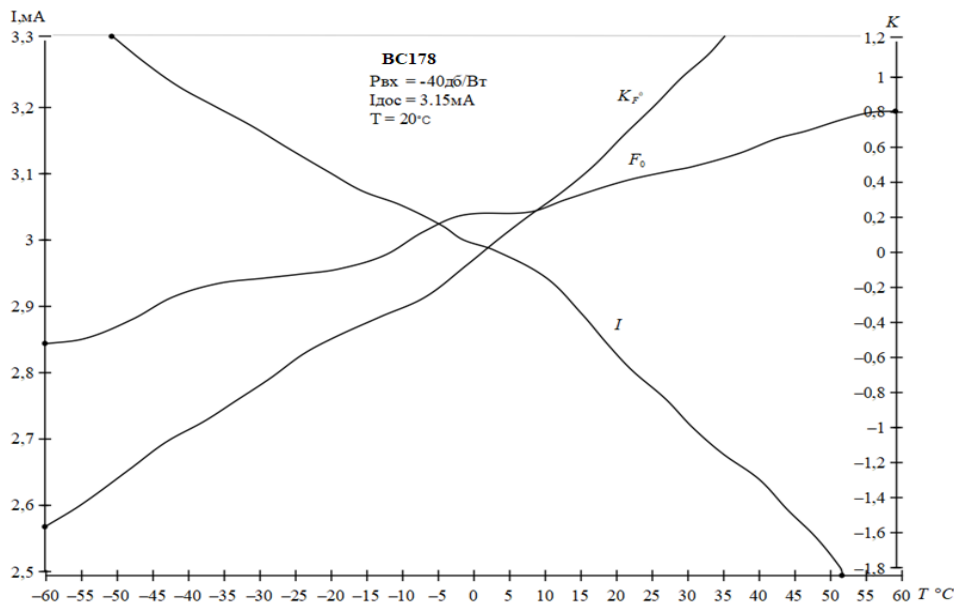


Рис. 8. Експериментальні залежності коефіцієнта передачі квазірезонансної частоти і струму в ланці живлення від температури  $T$  °С

### Висновки

Представлено дослідження методів зменшення температурної нестабільності в активних НВЧ фільтрах. Проведений аналіз впливу температури на параметри активного НВЧ фільтра. Показана можливість їх температурної та динамічної стабілізації шляхом зміни струму емітера біполярного транзистора. Запропоновано різні схемотехнічні рішення реалізації цього методу. Як показали експериментальні дослідження з підвищенням температури, спостерігається зменшення коефіцієнта переносу фільтра на квазірезонансній частоті. Тому, для стабілізації коефіцієнта передачі росту температури, необхідно підвищення струму емітера  $I_e$ , що може бути досягнуто загальним підвищенням напруги живлення. Таким чином, для термостабілізації АЧХ активного смугового НВЧ

фільтра необхідно одночасно зі зміною температури регулювати струм емітера транзистора. Величина регулювання струму емітера у разі зміни температури від  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$  становить 3—4 порядки для малопотужних кремнієвих транзисторів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. С. Осадчук, и О. В. Осадчук, *Реактивні властивості транзисторів і транзисторних схем*. Вінниця, Україна: «Універсум-Вінниця», 1999, 275 с.
- [2] Н. А. Филинюк, *Активные СВЧ фильтры на транзисторах*. Москва: Радио и связь, 1987, 112 с.: ил. (Массовая книга инженера «Электроника»).
- [3] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, А. О. Семенов, і К. О. Коваль, *Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним опором*, моногр. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2011, 336 с. ISBN 978-966-641-405-5.
- [4] М. А. Филинюк, і Л. Б. Ліщинська, *Активні УВЧ і НВЧ фільтри*, моногр. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2010, 396 с.
- [5] В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, і А. О. Семенов, *Генератори електричних коливань на основі транзисторних структур з від'ємним опором*, моногр. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009, 182 с.
- [6] R. L. Kubena, et al., "Next Generation Quartz Oscillators and Filters for VHF-UHF Systems," in *2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2006, pp. 668-671, <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2006.249703>.
- [7] D. Chang, F. Stratton, R. Kubena, and R. Joyc, "Optimized DRIE Etching of Ultra-Small Quartz Resonators," in *Proceedings of the 2003 IEEE International Frequency Control Symposium*, pp. 829-832, 2003.
- [8] F. P. Stratton, et al., "A MEMS-based Quartz Resonator Technology for GHz Applications" in *Proceedings of the 2004 IEEE International Frequency Control Symposium*, pp. 27-34, 2004.
- [9] A. V. Osadchuk, V. S. Osadchuk, and I. O. Osadchuk, "Modern world tendencies in the development of science. Chapters 19. Gas concentration transducers with frequency output signal based on reactive properties of semiconductor structures with negative differential resistance," vol. 2. Published by Sciemcee Publishing. LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, United Kingdom, 2019, pp. 271-285.

Рекомендована кафедрою радіотехніки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 1.06.2021

**Осадчук Олександр Володимирович** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com ;

**Осадчук Ярослав Олександрович** — канд. техн. наук, доцент кафедри радіотехніки, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com ;

**Ліхашорський Сергій Володимирович** — аспірант кафедри радіотехніки, e-mail: lihashorskiy@gmail.com

**O. V. Osadchuk<sup>1</sup>**  
**Ia. O. Osadchuk<sup>1</sup>**  
**S. V. Likhashorsky<sup>1</sup>**

## Investigation of Temperature Instability in Active Microwave Filters and Methods for its Reduction

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

The article presents a study of methods for reducing temperature instability in active microwave filters. The analysis of the effect of temperature on the parameters of an active microwave filter is carried out. The results of experimental studies of the temperature characteristics of microwave filters are also presented. When designing digital systems, especially modern ones that operate with a clock frequency or that use a radio channel in the microwave and microwave range, there is usually a problem of increasing the reliability or reducing the overall size while maintaining high electrical parameters. Requirements for miniaturization of microwave equipment, the task is to create filter circuits that are suitable for integrated production. Unlike low-frequency active filters, when constructing microwave filters, it is necessary to take into account the inertial properties of transistors. Therefore, studies of various stripe active microwave filter circuits exploit reactive phenomena in the transistor. The possibility of their temperature and dynamic stabilization by changing the emitter current of a bipolar transistor is shown. Various circuit solutions for the implementation of this method are proposed. As experimental studies have shown, with increasing temperature, there is a decrease in the filter transfer coefficient at the quasi-resonant frequency. Experimental studies have shown that in order to stabilize the transfer coefficient of temperature rise, an increase in the emitter current is necessary, which can be achieved by a general increase in the supply voltage. Thus, for thermal stabilization of the frequency response of the microwave filter, it is necessary to regulate the current of the transistor emitter simulta-

neously with the temperature change. The magnitude of the emitter current adjustment when the temperature changes from  $-60^{\circ}\text{C}$  to  $+100^{\circ}\text{C}$  is 3—4 orders of magnitude for low-power silicon transistors.

**Keywords:** active microwave filter, temperature instability, reactive properties of transistors, quasi-resonant frequency.

**Osadchuk Olexandr V.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Radio Engineering, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com ;

**Osadchuk Iaroslav O.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Radio Engineering, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com ;

**Likhashorskyi Serhii V.** — Post-Graduate Student of the Chair of Radio Engineering, e-mail: lihashorskiy@gmail.com

**А. В. Осадчук<sup>1</sup>**  
**Я. А. Осадчук<sup>1</sup>**  
**С. В. Лихашорський<sup>1</sup>**

## Исследование температурной нестабильности в активных СВЧ фильтрах и методы ее уменьшения

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Исследованы методы уменьшения температурной нестабильности в активных СВЧ фильтрах. Проведен анализ влияния температуры на параметры активного СВЧ фильтра. Также представлены результаты экспериментальных исследований температурных характеристик СВЧ фильтров. При проектировании цифровых систем, особенно современных, работающих с тактовой частотой или использующих радиоканал в микроволновом и СВЧ диапазоне, обычно должна быть решена проблема повышения надежности или уменьшения общих размеров при сохранении высоких электрических параметров. Требования к миниатюризации микроволнового оборудования ставят задачу создания схем фильтров, пригодных для интегрального производства. В отличие от низкочастотных активных фильтров, при построении микроволновых фильтров необходимо учитывать инерционные свойства транзисторов. Поэтому в исследованиях различных цепей полосовых активных микроволновых фильтров используют реактивные явления в транзисторе. Показана возможность их температурной и динамической стабилизации путем изменения тока эмиттера биполярного транзистора. Предложены различные схемотехнические решения реализации этого метода. Как показали экспериментальные исследования, с повышением температуры, наблюдается уменьшение коэффициента переноса фильтра на квазирезонансной частоте. Экспериментальные исследования показали, что для стабилизации коэффициента передачи роста температуры, необходимо повышать ток эмиттера, что может быть достигнуто общим повышением напряжения питания. Таким образом, для термостабилизации АЧХ СВЧ-фильтра необходимо одновременно с изменением температуры регулировать ток транзисторного излучателя. Величина регулировки тока излучателя при изменении температуры от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+100^{\circ}\text{C}$  составляет 3—4 порядка для кремниевых транзисторов малой мощности.*

**Ключевые слова:** активный СВЧ фильтр, температурная нестабильность, реактивные свойства транзисторов, квазирезонансная частота.

**Осадчук Александр Владимирович** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники, e-mail: osadchuk.av69@gmail.com ;

**Осадчук Ярослав Александрович** — канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехники, e-mail: osadchuk.j93@gmail.com ;

**Лихашорський Сергій Владимирович** — аспирант кафедры радиотехники, e-mail: lihashorskiy@gmail.com