

УДК 621.317.07.089

## ВИБІРКОВИЙ ПІДСИЛЮВАЧ ЧАСТОТИ КОМУТАЦІЇ ВИСОКОЧУТЛИВОГО РАДІОМЕТРА З ТЕМПЕРАТУРНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ АЧХ

Яненко О. П., Вірченко Л. А.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: [op291@meta.ua](mailto:op291@meta.ua)

Відмічено, що вимірювання низькоінтенсивних мікрохвильових сигналів різноманітних фізичних тіл і біологічних об'єктів пов'язано з необхідністю забезпечення високої чутливості, яка може сягати  $10^{-14}$  -  $10^{-15}$  Вт. Авторами статті проведені дослідження вибіркового (селективного) фільтра - підсилювача частоти комутації високочутливого модуляційного радіометра, як одного із елементів, що мають значний вплив на чутливість і точність вимірювання, та розроблені рекомендації щодо підвищення стабільності його параметрів.

Розглянуті особливості роботи каналу перетворення модуляційного радіометра та визначена роль вибіркового підсилювача частоти комутації в забезпеченні такої чутливості. Отримані та проаналізовані вхідні та вихідні сигнали вибіркового підсилювача, їх взаємозв'язок та вплив на чутливість радіометра.

Обґрунтовано необхідність застосування компенсації впливу температури на характеристики фільтру з урахуванням температурних коефіцієнтів елементів схеми. Проведено моделювання вибіркового підсилювача з фільтром третього порядку, отримана амплітудно-частотна характеристика та зона її можливого зміщення за максимальної робочої температури.

Розроблена структурна та принципова схема вибіркового підсилювача з автоматичним врахуванням температурних впливів, внаслідок введення зворотного зв'язку та з корекцією АЧХ фільтра. Визначені основні параметри смужкового фільтра, побудованого за схемою зі зворотними зв'язками. Запропоновано в якості елемента корекції АЧХ використання каналу польового транзистора, з'єднаного послідовно з опорами частотоформуєчих ланцюгів фільтра третього порядку.

Визначено технічні вимоги щодо моделювання та розробки вибіркового підсилювача, які надають можливість реалізації у практиці. Проведені дослідження можуть бути використані для побудови високочутливого радіометричної системи для вимірювання низькоінтенсивних сигналів в таких сферах діяльності, як біологія та медицина.

**Ключові слова:** радіометрія; чутливість; вибіркового підсилювач; температурна стабільність; амплітудно-частотна характеристика.

### Вступ. Постановка задачі

Вимірювання низькоінтенсивних мікрохвильових сигналів різноманітних фізичних тіл і біологічних об'єктів за допомогою радіометрів пов'язано з необхідністю забезпечення високої чутливості радіометричних вимірювальних систем (РВС), яка може сягати, наприклад, в мікрохвильовому діапазоні  $10^{-14}$  -  $10^{-15}$  Вт [1]. Рівень випромінювання людини водночас знаходиться в межах  $10^{-13}$  -  $10^{-14}$  Вт. Не менш важливим є підтримка стабільності чутливості радіометра в часі, причому незалежно від виду інформаційного сигналу, який може бути в радіо-, оптичному або акустичному діапазоні.

Чутливість є важливим параметром у вимірювальних системах, оскільки за низької чутливості рівень слабого вимірюваного сигналу виявляється порівняним з рівнем власних шумів підсилювачів, фільтрів та інших елементів пристроїв, через що стає непомітним на їх фоні. Тому стабільність елементів фільтрів також не можна ігнорувати

через те, що при зміні їх номінальних значень порушуються налаштування, режим роботи пристрою та якість його роботи. На номінальні значення елементів тракту вимірювальних пристроїв найпомітніше впливає значення температури навколишнього середовища.

В таких високочутливих вимірювальних системах як радіометри, зміна параметрів елементів вимірювальних трактів під дією температури навколишнього середовища, може різко приводити до зменшення чутливості та точності вимірювання сигналів об'єктів вимірювання.

Зміна коливань температури зовнішнього середовища (збільшення) може сягати  $25-35^{\circ}\text{C}$ , а внутрішня температура екранованих блоків радіометричного каналу  $45-50^{\circ}\text{C}$ . При цьому навіть пасивні елементи вимірювальних схем, резистори та конденсатори, змінюють значення в достатньо значних межах. Так, наприклад, температурних коефіцієнтів опору (ТКО) МЛТ, які зазвичай використовуються для побудови схем, за вказаної тем-

ператури, складає  $\pm 1200 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ , а ємність конденсаторів типу SMD Y5V може змінюватися до 80 %, X7R на 10 %, ємність конденсаторів NPO практично не змінюється [2, 3].

Залежно від вибору конденсатора можна уникнути його впливу і припустити, що на характеристики системи впливають параметри резисторів.

Виходячи з наведеного вище, можна констатувати, що зміна температури призводить до відхилення значень параметрів елементів схем від номінальних, а отже й до зміни характеристик пристроїв.

Тому проведення дослідження із забезпечення стабільності вихідних параметрів особливо високочутливих радіометричних систем є своєчасним і актуальним. До таких систем можна віднести і високочутливі радіометри.

Авторами статті проведені дослідження вибіркового (селективного) фільтра-підсилювача частоти комутації високочутливого модуляційного радіометра, як одного із елементів, що мають значний вплив на чутливість і точність вимірювання, та розроблені рекомендації щодо підвищення стабільності його параметрів.

#### Особливості роботи вибіркового підсилювача частоти комутації високочутливого радіометра в процесі перетворення сигналів

Побудова структурних схем високочутливих РВС зазвичай виконується з використанням компенсаційного, кореляційного та модуляційного методів перетворення вхідних сигналів [4, 5].

Модуляційні методи найбільш часто використовувалися завдяки їх простоті, надійності та можли-

вості забезпечення високої чутливості та точності вимірювання.

Високочутливі модуляційні РВС будуються за схемою супергетеродинного перетворення вхідних сигналів, в якому підсилення сигналу проводиться у вхідному каскаді, на проміжній частоті та частоті модуляції (комутації). Виконання радіометричного каналу за такою схемою дозволяє отримати високу стабільність і рівень підсилення, однак температурний вплив навколишнього середовища залишається.

Важливим елементом радіометричного каналу є вибіркового (смугового) фільтр – підсилювач, який забезпечує виділення частоти комутації, підсилення напруги модуляції та придушення низькочастотних шумів і завад.

Структурна схема високочутливої радіометричної системи модуляційного типу з гетеродинним перетворенням вхідного сигналу представлена на рис. 1.

Розглянемо процеси перетворення сигналів та взаємозв'язок вибіркового фільтра – підсилювача частоти комутації з іншими елементами радіометричного каналу.

Під час вимірювання на вхідну антену радіометра X1 може поступати шумовий або монохроматичний сигнал типу:

$$u_0(t) = U_0 \sin \omega t, \quad (1)$$

де  $U_0$ ,  $\omega$  – амплітуда і частота вхідного сигналу відповідно.

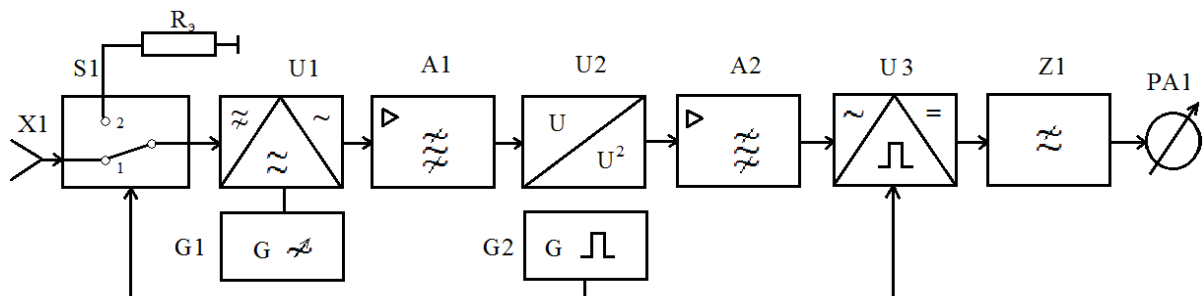


Рис. 1. Схема радіометричної системи модуляційного типу, де: X1 – вхідна антена;  $R_e$  – еквівалент антени; S1 – комутатор (модулятор); U1 – змішувач; G1 – гетеродин; A1 – підсилювач проміжної частоти; U2 – квадратичний детектор; A2 – вибіркового фільтра підсилювач частоти комутації; U3 – синхронний детектор; Z1 – фільтр нижніх частот; PA1 – індикатор; G2 – генератор частоти комутації.

Комутатор S1 по чергові перемикається в положення 1 або 2 і навпаки, імпульсним сигналом (меандром), приєднуючи антену і еквівалент антени до радіометричного каналу.

Процедура проходження вимірювального сигналу радіометричним каналом добре описана авторами [1, 5], а тому, в нашому дослідженні, обмежимося розглядом сигналів починаючи з квадратично-

го детектора, який приєднаний до входу вибіркового фільтра – підсилювача частоти комутації.

В положенні 1 комутатора S1 на вхід квадратичного детектора U2 надходить сигнал

$$u_1(t) = S_{\Sigma} [u_0(t) + u_w(t)], \quad (2)$$

де  $S_{\Sigma}$  – сумарний коефіцієнт перетворення вхідного

сигналу  $u_o(t)$  до входу детектора U2;  $u_w(t)$  – напруга власних шумів радіометричного каналу.

Перемикання комутатора S1 в положення 2 призводить до появи на вході детектора U2 тільки напруги власних шумів

$$u_2(t) = S_2 u_w(t). \quad (3)$$

Таким чином, за період комутації імпульсним сигналом прямокутної форми на вході квадратичного детектора присутній сигнал

$$u_3(t) = S_2 \{ [u_o(t) + u_w(t)] F_1 + u_w(t) F_2 \}, \quad (4)$$

де  $F_1$ ,  $F_2$  – параметри комутуючої функції (меандру); а

$$F_1(t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\Omega t}{2n-1},$$

$$F_2(t) = \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\Omega t}{2n-1}. \quad (5)$$

Таким чином, враховуючи властивості комутуючої функції, описані в [6], характеристику квадратичного детектора та вхідний сигнал (4), на виході детектора отримуємо:

$$u_4(t) = \frac{aU_o^2}{2} \left[ \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\Omega t}{2n-1} \right] + a u_w^2(t), \quad (6)$$

де  $a$  – коефіцієнт перетворення радіометричного каналу з урахуванням квадратичного детектора;  $U_o^2, \Omega$  – амплітуда (потужність) вхідного сигналу і частота комутуючої функції.

Оскільки постійна складова рівняння (6) не проходить на вхід фільтра – підсилювача через роздільну емність, то на його виході отримуємо сигнал:

$$u_5(t) = aK_1 \left[ \frac{U_o^2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\Omega t}{2n-1} + \Delta u_w^2(t) \right], \quad (7)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт передачі селективного підсилювача частоти комутації;  $\Delta u_w^2(t)$  – дисперсія напруги шумів і завад, які потрапляють у смугу пропускання селективного фільтра.

Виділена напруга (7) подається на синхронний детектор, на другий вхід якого надходить опорний сигнал частоти комутації  $\Omega$

$$u_6(t) = U_2 (F_1 - F_2) = \left\{ \left[ \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\Omega t}{2n-1} \right] - \left[ \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\Omega t}{2n-1} \right] \right\} U_2, \quad (8)$$

де  $U_2$  – амплітуда опорної низькочастотної комутуючої напруги.

В результаті перемноження сигналу (7) на опорну комутуючу напругу (8) на виході синхронного детектора U2 фільтром нижніх частот (ФНЧ) Z1 виділяються постійні складові, які пропорційні потужності вхідного сигналу та потужності низькочастот-

них шумів і завад, що потрапили в смугу пропускання вибіркового фільтра підсилювача A2

$$u_7(t) = u_5(t)u_6(t) = 2aK_1K_2K_3 \left[ \frac{U_2U_o^2}{\pi^2} + \frac{U_2}{\pi} \Delta U_w^2(\Delta F) \sum_1^i (\Omega \pm \Omega_i) \right], \quad (9)$$

де  $K_2, K_3$  – коефіцієнт передачі синхронного детектора та відповідно ФНЧ Z1;  $\Delta U_w^2$  – дисперсія шумів та завад, що попадають в смугу пропускання  $\Delta F$  підсилювача A2 та ФНЧ Z1.

На рис. 2 представлений розподіл шумів, які проходять через вибіркового підсилювач.

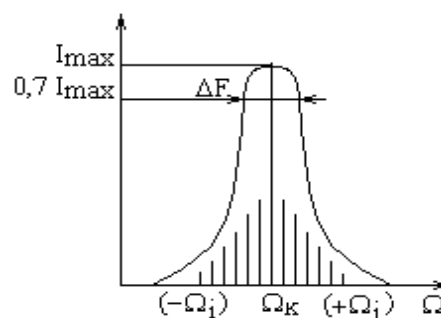


Рис. 2. Розподіл інтенсивності складових термодинамічних флуктуацій, наближених до частоти комутації, друга складова рівняння (9)

Перша складова рівняння (9) – постійна напруга, пропорційна потужності вхідного вимірюваного сигналу, а друга – змінна напруга шуму та завад, що пройшла через смуговий фільтр системи каналу перетворення РВС. Паразитні шумові складові, присутні в рівнянні (9) викликають повільну флуктуацію показчика індикатора і погіршують чутливість радіометра.

Підвищення чутливості може досягатися декількома шляхами. По-перше, зменшення рівня термодинамічних флуктуацій внаслідок застосування оптимальних конструкторських і технологічних рішень (екранування, застосування малошумливих елементів і вузлів та ін.) [7], по-друге, збільшенням кількості відліків та часу вимірювання, що природно знижує швидкодію РС [4], і по-третє, за рахунок звуження смуги пропускання вибіркового фільтра A2.

Найбільш раціональним, на наш погляд, є зниження потужності термодинамічних флуктуацій шляхом зменшення смуги пропускання вибіркового фільтра частоти комутації  $\Delta F$  в підсилювачі A2, вибираючи його в межах 10-100 Гц.

У той же час, як показали дослідження [8], великий вплив на чутливість радіотехнічних пристроїв має температура, під дією якої змінюються параметри підсилювачів, фільтрів, частота генераторів тощо. Тому розробка та дослідження схеми

вибіркового підсилювача частоти комутації та можливих варіантів стабілізації вихідних параметрів радіометра при зміні температури є актуальною задачею.

### Моделювання та синтез схеми вибіркового підсилювача частоти комутації високочастотного радіометра. Вибір схеми

Фільтр багаторазового зворотного зв'язку звичай використовує операційний підсилювач як інтегратор [9]. Отже, залежність передавальної функції від параметрів операційного підсилювача більша, ніж у реалізації Саллена-Кея. Складно сформулювати якісні високочастотні секції через обмеження коефіцієнта підсилення розімкненого контуру операційного підсилювача.

Принципове правило полягає в тому, що коефіцієнт підсилення операційного підсилювача у розімкненому циклі повинен бути принаймні на 20 дБ ( $\times 10$ ) вище амплітудної характеристики на резонансній (або граничній) частоті, включаючи пік, спричинений добротністю фільтра. Пік через  $Q$  викликає амплітуду  $A_0$

$$A_0 = KQ, \quad (10)$$

де  $K$  – коефіцієнт підсилення схеми,  $Q$  – добротність фільтра.

Кілька послідовних ланцюгів фільтрів зворотного зв'язку (33) інвертують фазу сигналу. Це еквівалентно додаванню результуючого зсуву фази на  $180^\circ$  до фазового зсуву самого фільтра. На рис. 3 представлена схема секції смугового фільтра із множинним ЗЗ.

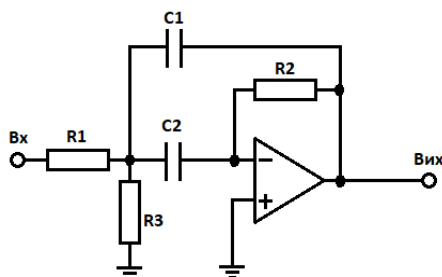


Рис. 3. Смуговий фільтр зі зворотними зв'язками (Multiple Feedback Band-Pass Filter)

Основні параметри смугового фільтра, побудованого за схемою рис. 3, можна розрахувати, за формулами [9,10]:

-центральна частота

$$f_0 = \frac{1}{\pi C} \sqrt{\frac{R_1 + R_3}{R_1 R_2 R_3}}; \quad (11)$$

-коефіцієнт підсилення на центральній частоті:

$$A_0 = R_2 / (2R_1); \quad (12)$$

-добротність:

$$Q = \pi f_0 R_2 C; \quad (13)$$

-смуга пропускання:

$$\Delta F = 1/(\pi R_2 C). \quad (14)$$

У фільтрах з множинним ЗЗ передбачена можливість незалежного регулювання добротності  $Q$ , підсилення  $A_0$  і центральної частоти  $f_0$ . Ширина смуги пропускання і коефіцієнт підсилення не залежать від значення  $R_3$ . З цієї причини резистор  $R_3$  можна використовувати для зміни центральної частоти фільтра без впливу на смугу пропускання або коефіцієнт підсилення. При малих значеннях  $Q$  фільтр може працювати і без резистора  $R_3$ , проте в цьому випадку  $Q$  виявляється пов'язана з  $A_0$  співвідношенням  $-A_0 = 2Q^2$  і при спробах регулювати частоту буде спостерігатись зміна добротності, що є значним недоліком.

Зміна спектральної щільності потужності теплового шуму, розрахованого за функцією Найквіста (при 293 К) має прямо пропорційну залежність від  $\Delta F$ , яка на кожні 50 Гц збільшується на  $2 \cdot 10^{-19}$  Вт.

Коефіцієнт перетворення (трансформації) спектра при виділенні корисного сигналу характеризує відношення смуги пропускання вибіркового підсилювача  $\Delta F$  до смуги частот на його вході  $\Delta f$ , спектр якої описується (7), можна записати як:

$$K_{\text{прс}} = \frac{\Delta F}{\Delta f} < 1. \quad (15)$$

Коефіцієнт перетворення спектра прямо пропорційний до величини смуги фільтра, збільшення смуги на 50 Гц супроводжується збільшенням коефіцієнта перетворення спектра на 0,1 % від смуги.

### Особливості програми Multisim для моделювання вибіркового фільтра-підсилювача

Multisim – це емулятор схем, розроблений компанією National Instruments, що дозволяє об'єднати етап розробки електронних пристроїв та їх тестування.

Завдяки набору віртуальних пристроїв, інтерактивному SPICE-моделюванню, аналізу електричних кіл та моделюванню їх режимів роботи розробник має зручний інструмент, здатний на етапі розробки спрогнозувати характеристики роботи пристрою, виявити помилки та значно пришвидшити розробку [11].

База даних компонентів налічує більше 1200 SPICE-моделей компонентів від відомих виробників: Texas Instruments, Linear Technology та інші. Також є можливість створення та редагування власних SPICE-моделей. Віртуальні прилади представлені: мультиметром, генератором сигналів, осцилографами, вимірювачами частотних характеристик (Бодє Плоттер), спектральним аналізатором, пробником та ватметром.

Наявні три основні режими аналізу даних:

- 1) DC-аналіз, кола на постійному струмі (для резистивних схем, в яких конденсатори замінюють розривом, котушки індуктивності – замиканням, нелінійні компоненти замінюють

ють їх опором на постійному струмі в робочій точці);

- 2) АС-аналіз на змінному струмі (базується на побудові частотних характеристик);
- 3) Transient-аналіз перехідних процесів (дозволяє визначити форму вихідного сигналу).

Окрім розглянутої програми для моделювання вибіркового фільтра-підсилювача, застосовані деякі положення та елементи посібника з проектування радіоелектронних пристроїв [12].

#### Технічні вимоги щодо моделювання та розробки вибіркового підсилювача:

1. Вхідний сигнал 10-20 мВ.
2. Центральна частота 1кГц.
3. Смуга пропускання 90Гц.
4. Коефіцієнт підсилення 50-100 раз.
5. Амплітуда вихідного сигналу до 1В.

#### Розрахунок параметрів та моделювання вибіркового фільтра 3-го порядку

В результаті моделювання та проведеного розрахунку за табличними значеннями полюсів з характеристикою Бесселя для 3-го порядку,

за формулами, наведеними у [9,10], авторами отримано принципову схему смугового фільтра (рис. 4).

Амплітудно-частотну характеристику розробленого фільтра, за температури 20<sup>0</sup> С наведено на рис. 5 (графік 1).

Найбільш важливі параметри, отримані при моделюванні вибіркового фільтра-підсилювача (рис. 4) відповідають заданим технічним вимогам і складають:

1. Центральна (резонансна) частота 1 кГц;
2. Підсилення у смузі пропускання: 42.8 дБ;
3. Смуга пропускання: 91 Гц.

Оскільки важливою вимогою для високочутливого радіометра є температурна стабільність параметру «чутливість», то наступним етапом розробки вибіркового фільтра-підсилювача було проведено моделювання зміщення АЧХ фільтра за максимальної робочої температури 50<sup>0</sup> С (рис. 5, графік 2). При цьому враховувались зміни температурних відхилень тільки резисторів схеми фільтра. Отримана температурна зміна значень опорів схеми одиначної ланки фільтра, з урахуванням їх ТКО склала 4-5 Ом, а зміщення АЧХ при цьому отримали на 17 Гц (графік 2).

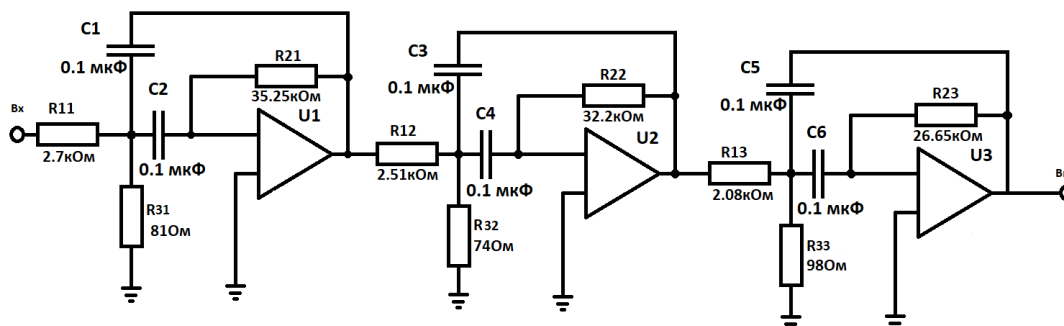


Рис. 4. Принципова схема вибіркового фільтра 3-го порядку із множинним зворотним зв'язком (Multiple Feedback Band-Pass Filter)

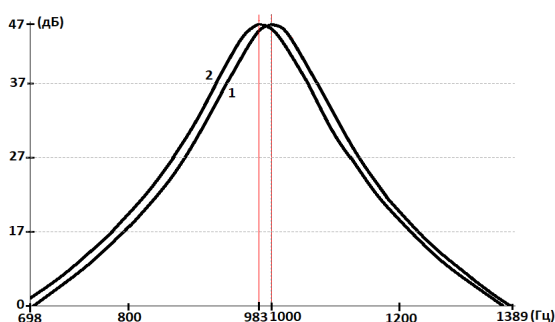


Рис. 5. АЧХ фільтра 3-порядку за різних значень робочої температури

Враховуючи складність схеми фільтра 3-ого порядку (рис. 4), сумарна втрата чутливості радіометричного каналу за рахунок зміщення АЧХ ви-

біркового підсилювача частоти комутації може сягати до 10 дБ, що стає причиною непрацездатності РВС, наприклад при вимірюванні випромінювання біооб'єктів.

#### Вибірковий підсилювач частоти комутації високочутливого радіометра з температурною компенсацією АЧХ

В результаті проведеного моделювання, розрахунків та досліджень авторами запропонована схема вибіркового фільтра-підсилювача з компенсацією температурних впливів на чутливість радіометричної системи (рис. 6).

У склад схеми входять трикаскадний фільтр-підсилювач А1, А2, А3 і ланцюг зворотного зв'язку в складі детектора U1, підсилювача А4 та схеми співпадіння А5.



На другий вхід схеми співпадиння подається напруга порівняння (опорна), яка зазвичай відповідає максимальному значенню на виході схеми вибіркового фільтра-підсилювача, в нашому випадку 1 В.

Вихід схеми А5 підключений до входів регулюючих елементів трьох каскадного фільтра – підсилювача.

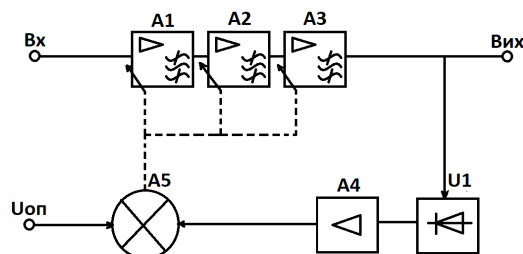


Рис. 6. Блок-схема фільтра-підсилювача з температурною компенсацією АЧХ

Принципова схема реалізації автоматичним налаштуванням центральної частоти для усунення

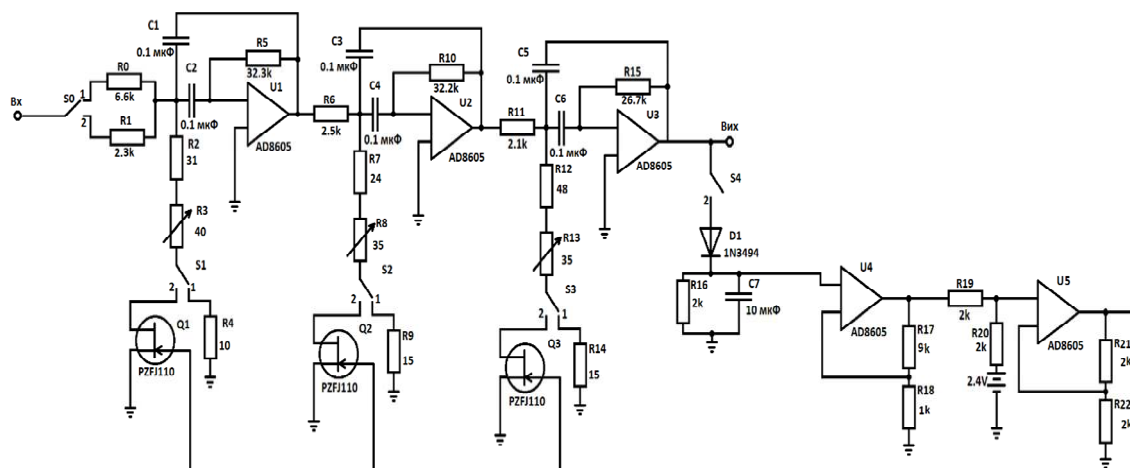


Рис. 7. Принципова схема температурно незалежного активного смугового фільтра з автоматичним під налаштуванням АЧХ

## Висновки

1. Розглянуті особливості роботи каналу перетворення модуляційного радіометра та визначена роль вибіркового підсилювача частоти комутації в забезпеченні високої чутливості.

2. Розроблена схема вибіркового фільтра третього порядку на частоту комутації 1 кГц і досліджена його амплітудо-частотна характеристика.

3. Проведено дослідження температурної стабільності вибіркового фільтра-підсилювача високочутливого радіометра. Моделюванням з використанням програми Multisim показано, що за максимальної робочої температури і допустимих значень ТКО тільки резисторів можливе зміщення АЧХ фільтра на 17 Гц і втрата чутливості до 10 дБ.

впливу температурної нестабільності представлена на рис. 7.

Процес температурної компенсації та впливу на чутливість вимірювання проводиться наступним чином. Керуюча напруга знімається з вихідного тракту активного фільтра, випрямляється детектором U1, після чого підсилюється в A4, порівнюється з опорною напругою та подається на затвор польового транзистора. Польові транзистори увімкнено послідовно з резисторами, що регулюють центральну частоту.

Схема може працювати як у звичайному режимі (без компенсації, перемикачі в положенні 1) та в режимі автокомпенсації зміни центральної частоти під впливом підвищення температури (перемикачі в положенні 2). Налаштування схеми проводиться за нормальної температури 20° С.

Зміна температури у той або інший бік призводить до зміни вихідної напруги та порушення рівноваги в колі зворотного зв'язку.

Виділене різницеве значення напруги подається на затвори польових транзисторів до встановлення втраченої рівноваги та забезпечення необхідної чутливості.

4. Запропоновано структурну та принципову схеми вибіркового підсилювача з автоматичним врахуванням і нейтралізацією температурних впливів, введенням зворотного зв'язку, елементів порівняння та корекції АЧХ фільтра.

5. Побудовані АЧХ вибіркового фільтра за нормальної та підвищеної температури.

6. Запропоновано в якості елемента корекції АЧХ використання каналу польового транзистора, з'єднаного послідовно з опорами частотоформуючих ланцюгів фільтра третього порядку.

7. Проведені дослідження у подальшому можуть бути науковим підґрунтям для побудови високочутливої радіометричної системи для вимірю-

вання низькоінтенсивних сигналів в біології та медицині.

#### Література

- [1] Ю. А. Скрипник, А. Ф. Яненко, В. Ф. Манойлов, Ю. Б. Гимпилевич, *Микроволновая радиометрия физических и биологических объектов*. Житомир, Украина: Волынь, 2003.
- [2] И. Б. Бондаренко, *Электрорадиоэлементы. Часть 1. Резисторы*. СПб, РФ: НИУ ИТМО, 2012.
- [3] Е. Звонарев, “(КОМПЭЛ). Пассивные компоненты компании YAGEO”, *Новости электроники*, № 16, с. 15-21, 2009.
- [4] Н. А. Есепкина, Д. В. Корольков, Ю. В. Парийский, *Радиотелескопы и радиометры*. Москва, СССР: Наука, 1972.
- [5] В. П. Куценко, Ю. О. Скрипник, М. Ф. Трегубов, К. Л. Шевченко, О. П. Яненко, *Методы и средства сверхвысокочастотной радиометрии*. Донецьк, Україна: ІПШ «Наука і освіта», 2011.
- [6] Ю. О. Скрипник, Измерительные устройства с коммутационно-модуляционными преобразователями. Киев, СССР: Вища школа, 1975.
- [7] А. Ван дер Зил, Шум. Источники, описание, измерение. Сов. Радио, 1973.
- [8] А. В. Безруков, Измерение шумов радиоприемных устройств. Москва, СССР: Связь, 1971.
- [9] Б. Картер и Р. Манчини, *Операционные усилители для всех*. пер.с англ. А. Н. Рабодзея. Москва, РФ: Додэка-XXI, 2011.
- [10] MT-220 Mini Tutorial Analog Devices-Multiple Feedback Filters - One Technology Way • P.O. Box 9106 • Norwood, MA 02062-9106, U.S.A
- [11] Кирина М., Фомина К. Программа схемотехнического моделирования Multisim, 2010. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://docplayer.com/19166-Opisanie-programmy-multisim-kirina-m-fomina-k-str-1-iz-33-programma-shemotehnicheskogo-modelirovaniya-multisim.html> (дата звернення 01.10.2021).
- [12] Т. В. Молодечкина, В. Ф. Алексеев, М. О. Молодечкин, Физические основы проектирования радиоэлектронных средств: учеб.-метод. комплекс для студентов специальности 1-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование РЭС». В 2 ч., Ч. 2. Новополюцк: ПГУ, 2013.

УДК 621.317.07.089

**А. Ф. Яненко, Л. А. Вирченко**

*Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского”, Киев, Украина*

#### ИЗБИРАТЕЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ КОММУТАЦИИ

#### ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО РАДИОМЕТРА С ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ АЧХ

Отмечено, что измерение низко интенсивных микроволновых сигналов различных физических тел и биологических объектов связано с необходимостью обеспечения высокой чувствительности, которая может достигать  $10^{-14}$ - $10^{-15}$  Вт. Авторами статьи проведены исследования выборочного (селективного) фильтра-усилителя частоты коммутации высокочувствительного модуляционного радиометра, как одного из элементов, имеющих значительное влияние на чувствительность и точность измерения, и разработаны рекомендации по повышению стабильности его параметров.

Рассмотрены особенности работы канала преобразования модуляционного радиометра и определена роль избирательного усилителя частоты коммутации в обеспечении такой чувствительности. Получены и проанализированы входные и выходные сигналы избирательного усилителя, их взаимосвязь и чувствительность радиометра. Обоснована необходимость применения компенсации воздействия температуры на характеристики фильтра с учетом температурных коэффициентов схемы.

Проведено моделирование избирательного усилителя с фильтром третьего порядка, получена амплитудно-частотная характеристика и зона возможного смещения при максимальной рабочей температуре. Разработана структурная и принципиальная схема избирательного усилителя с автоматическим учетом температурных воздействий за счет ввода обратной связи и коррекцией АЧХ фильтра. Предложено в качестве элемента коррекции АЧХ использование канала полевого транзистора, соединенного последовательно с опорами частоты формирующих цепей фильтра третьего порядка.

**Ключевые слова:** радиометрия; чувствительность; избирательный усилитель; температурная устойчивость; амплитудно-частотная характеристика.

**O. P. Yanenko, L. A Virchenko**

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

**SELECTIVE HIGH-SENSITIVITY RADIOMETER SWITCHING FREQUENCY AMPLIFIER WITH FREQUENCY RESPONSE TEMPERATURE COMPENSATION**

**Problems.** It is noted that the measurement of low-intensity microwave signals of various physical bodies and biological objects is associated with the need to provide high sensitivity, which can reach  $10^{-14}$  -  $10^{-15}$  watts. The authors of the article studied the selective (selective) filter-amplifier of the switching frequency of the high-sensitivity modulation radiometer as one of the elements that have a significant impact on the sensitivity and accuracy of measurement, and developed recommendations for improving the stability of its parameters.

**The purpose of the research.** The peculiarities of the modulation radiometer conversion channel operation are considered and the role of the selective switching frequency amplifier in providing such sensitivity is determined.

The input and output signals of the selective amplifier, their relationship and the effect on the sensitivity of the radiometer were obtained and analyzed. The necessity of application of compensation of influence of temperature on characteristics of the filter taking into account temperature coefficients of elements of the scheme is proved.

**Conclusions.** Modeling of a selective amplifier with a third-order filter was performed, the amplitude-frequency characteristic and the zone of its possible displacement at the maximum operating temperature were obtained.

The structural and schematic diagram of the selective amplifier with automatic consideration of temperature influences, due to the introduction of feedback and correction of the frequency response of the filter has been developed.

The main parameters of the bandpass filter built on the feedback circuit are determined. The use of a field-effect transistor channel connected in series with the resistors of the frequency-forming circuits of the third-order filter is proposed as an element of frequency response correction.

The technical requirements for modeling and development of a selective amplifier are determined, which provide opportunities for implementation in practice. The research can be used to build a highly sensitive radiometric system for measuring low-intensity signals in areas such as biology and medicine.

**Keywords:** radiometry; sensitivity; selective amplifier; temperature stability; amplitude-frequency characteristic.

*Надійшла до редакції  
22 жовтня 2021 року*

*Рецензовано  
26 листопада 2021 року*