

УДК 621.315.62

<sup>1</sup>А.В. Рудик, к.т.н.  
<sup>1</sup>В.А. Рудик  
<sup>2</sup>О.О. Семенова, к.т.н.  
<sup>2</sup>А.О. Семенов, к.т.н.

## АНАЛІЗ ЗМІНИ ХАРАКТЕРИСТИК ФІЛЬТРА ТОУ

<sup>1</sup>Національний університет водного господарства та природокористування, andrey05011971@mail.ru  
<sup>2</sup>Вінницький національний технічний університет, semenov79@ukr.net

*В статті показано, що для ефективного розділення корисного сигналу і завади з частотами відповідно 100 Гц та 50 Гц найкраще використовувати активний фільтр, реалізований за схемою Тоу. Проаналізовано залежність коефіцієнта придушення завади смугопротискального фільтра від розкиду параметрів всіх елементів схеми і доведено, що найбільший вплив на коефіцієнт придушення завади має точність пасивних елементів схеми  $C1$ ,  $C2$ ,  $R1$  та  $R3$ . З'ясовано, що для отримання максимального коефіцієнта придушення завади смугопротискального фільтра важливим є використання пасивних елементів з мінімальними значеннями температурних коефіцієнтів опору та ємності, при цьому максимальні значення коефіцієнта придушення завади отримують при температурі навколишнього середовища  $+(15...25)^{\circ}\text{C}$ .*

**Ключові слова:** смугопротискальний фільтр, схема Тоу, частотна характеристика, передавальна функція, коефіцієнт придушення завади, розкид параметрів, температурна нестабільність.

### Вступ

Вибірковий пошук підземних комунікацій можливий при використанні в якості робочого сигналу такого сигналу, який утворюється випрямлячем на станції катодного захисту. Як відомо, двопівперіодний випрямляч при випрямленні змінного струму з частотою 50 Гц створює змінну напругу пульсації з частотою 100 Гц. Це дозволяє виконати частотне розділення корисного сигналу та завади.

В більшості практичних випадків для спрощення вимірювальних приладів, тобто для збільшення їх надійності, зменшення ваги та здешевлення, достатнім є послаблення завади з частотою 50 Гц у 100 разів (40 дБ). Однак при практичній реалізації приладу на точність його характеристик суттєво впливає розкид параметрів елементів схеми, а при роботі в польових умовах – температура навколишнього середовища.

Метою статті є аналіз впливу розкиду параметрів елементів схеми фільтра та температури навколишнього середовища на ефективність розділення корисного сигналу і завади з частотами відповідно 100 Гц та 50 Гц.

### Постановка задачі

В статті необхідно:

- 1) показати, що для ефективного розділення корисного сигналу і завади з частотами відповідно 100 Гц та 50 Гц найкраще використовувати активний фільтр, реалізований за схемою Тоу;
- 2) проаналізувати залежність коефіцієнта придушення завади смугопротискального фільтра від розкиду параметрів всіх елементів схеми;
- 3) з'ясувати залежність коефіцієнта придушення завади смугопротискального фільтра від температури і визначити температурний діапазон, в якому цей коефіцієнт набуває максимальних значень.

### Розв'язок задачі

Побудова селективного фільтра, який би забезпечив різницю коефіцієнтів передачі на частотах 50 Гц та 100 Гц на 40 дБ, є доволі складною задачею. Використання пасивних фільтрів на LC-елементах неможливе через дуже низькі частоти сигналів, а використання RC-фільтрів обмежено необхідністю використання схем п'ятого або шостого порядку.

Тому активні RC-фільтри широко застосовуються в таких галузях, як телефонія, системи передачі даних, телебачення, радіомовлення та системи якісного відтворення звуку. Вони передусім використовуються на низьких частотах, де використовувати котушки індуктивності

неможливо через їх надмірні габарити та низьку якість. На існуючих активних елементах частотний діапазон може бути від нуля до сотень кГц. Для досягнення поставленої мети найкраще підходить активний фільтр, реалізований за схемою Тоу (рис.1). Теоретичне виведення передавальних функцій для такої схеми викладено в роботі [1]. Така схема є бікватратним колом, реалізованим на трьох операційних підсилювачах (ОП).

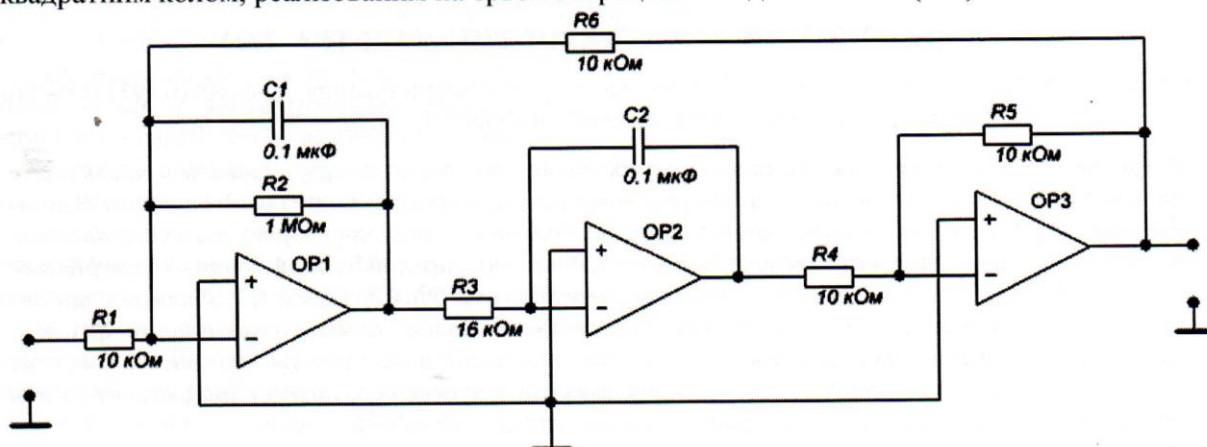


Рис.1. Смугопропускальний фільтр, реалізований за схемою Тоу

Дослідження схеми на зміну параметрів при розкиді параметрів елементів схеми доцільно проводити тільки за “найгіршим” випадком, тобто коли всі елементи схеми мають максимальне відхилення тільки в один бік.

Для даного пристрою прийемо точність елементів рівною 10%. Дослідження звичайного підсилювача на ОП, який не містить реактивних елементів, а реактивні параметри самого операційного підсилювача в даному діапазоні частот ще не мають істотного значення, проводити немає потреби, тому що коефіцієнт підсилення є регульованою величиною, тобто такий розкид не може погіршити характеристики приладу в цілому. З іншого боку, дослідження смугового фільтра має за мету показати вимоги до точності підбору елементів схеми фільтра. Тому в даній роботі дослідження на найгірший випадок буде присвячено власне смугопропускальному фільтру.

Аналіз будемо проводити для двох крайніх випадків:

- в першому значення параметрів всіх елементів схеми зменшимо на 10%;
- в другому значення параметрів всіх елементів схеми збільшимо на 10%.

Розрахунок величини модуля коефіцієнта передачі при величині номіналів елементів на 10% меншій, ніж розраховано:

- коефіцієнт передачі для частоти 50 Гц:  $K_{-10\%}(50 \text{ Гц}) = 0.772$ ;
- коефіцієнт передачі для частоти 100 Гц:  $K_{-10\%}(100 \text{ Гц}) = 3.752$ .

Тоді коефіцієнт придавлення завади з частотою 50 Гц дорівнює

$$d_{\text{дБ}} = 20 \cdot \lg \left( \frac{0.772}{3.752} \right) = -13.733 \text{ дБ}.$$

Проведемо розрахунок величини модуля коефіцієнта передачі при величині номіналів елементів на 10% більшій, ніж розраховано:

- коефіцієнт передачі для частоти 50 Гц:  $K_{+10\%}(50 \text{ Гц}) = 1.523$ ;
- коефіцієнт передачі для частоти 100 Гц:  $K_{+10\%}(100 \text{ Гц}) = 4.142$ .

Тоді коефіцієнт придавлення завади з частотою 50 Гц дорівнює

$$d_{\text{дБ}} = 20 \cdot \lg \left( \frac{1.523}{4.142} \right) = -8.691 \text{ дБ}.$$

Порівняно з коефіцієнтом придавлення завади з частотою 50 Гц при точних значеннях номіналів елементів  $d_{\text{дБ}} = 20 \cdot \lg \left( \frac{1.012}{101.478} \right) = -40.024 \text{ дБ}$  видно сильну залежність коефіцієнта фільтрації завади від розкиду параметрів елементів схеми.

Подальше дослідження передавальної функції на розкид параметрів елементів схеми показує, що основний вплив дає розкид параметрів елементів C1, C2, R1 та R3.

При точному значенні параметрів елементів схеми C1, C2, R1 та R3 і розкиді  $-10\%$  у інших елементів схеми отримаємо такі результати:

- коефіцієнт передачі для частоти 50 Гц:  $K_{-10\%}(50 \text{ Гц}) = 1.181$ ;
- коефіцієнт передачі для частоти 100 Гц:  $K_{-10\%}(100 \text{ Гц}) = 100.864$ ;

– коефіцієнт придушення завади:  $d_{\text{дБ}} = 20 \cdot \lg\left(\frac{1.181}{100.864}\right) = -38.63 \text{ дБ}$ , що вказує на покращення коефіцієнта фільтрації.

При точному значенні параметрів елементів схеми C1, C2, R1 та R3 і розкиді  $+10\%$  у інших елементів схеми отримаємо такі результати:

- коефіцієнт передачі для частоти 50 Гц:  $K_{+10\%}(50 \text{ Гц}) = 0.963$ ;
- коефіцієнт передачі для частоти 100 Гц:  $K_{+10\%}(100 \text{ Гц}) = 99.938$ ;

– коефіцієнт придушення завади:  $d_{\text{дБ}} = 20 \cdot \lg\left(\frac{0.963}{99.958}\right) = -40.324 \text{ дБ}$ , що також вказує на покращення коефіцієнта фільтрації.

Схема моделі смугопропускального фільтра в моделювальному редакторі Electronics Workbench v.5.12 наведена на рис. 2.

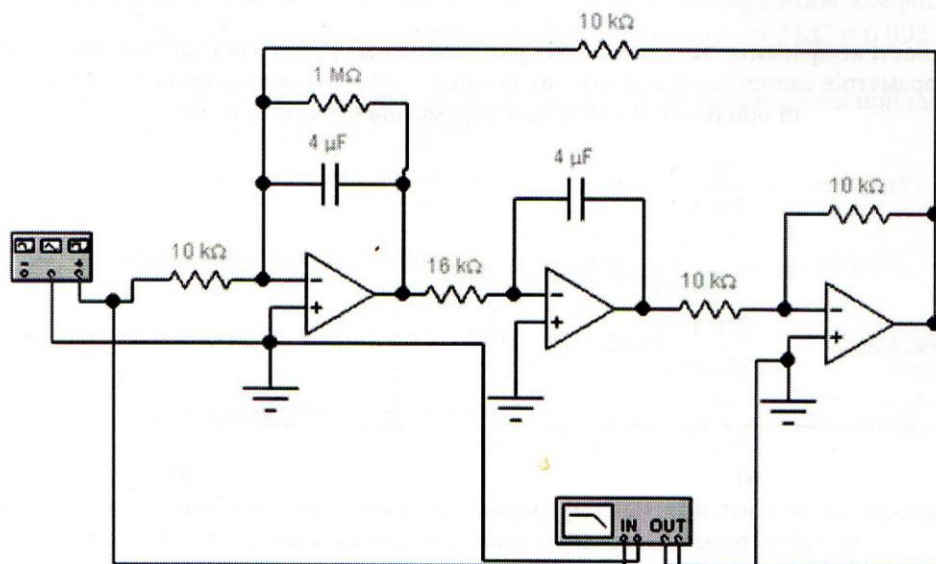


Рис. 2. Схема моделі смугопропускального фільтра в моделювальному редакторі EWB v.5.12

Графічна залежність зміни коефіцієнта передачі фільтра від частоти при різних величинах розкиду параметрів всіх елементів смугопропускального фільтра наведена на рис. 3.

Ті самі залежності, однак при розкиді всіх параметрів елементів схеми, крім C1, C2, R1 та R3, наведені на рис. 4. Як видно з порівняння наведених залежностей, при точних значеннях параметрів елементів схеми C1, C2, R1 та R3 відмінності між характеристиками значно менші.

З проведеного дослідження видно, що схема фільтра є дуже чутливою до розкиду параметрів елементів схеми, тому при виробництві потребує окремого регулювання та налаштування.

Залежності коефіцієнта придушення завади від розкиду параметрів елементів схеми показані на рис. 5 та рис. 6. На рис. 5 показана залежність при розкиді всіх параметрів елементів схеми, а на рис. 6 – всіх параметрів елементів схеми, крім C1, C2, R1 та R3. Всі вищевказані залежності приводяться для доведення твердження про точний підбір номіналів елементів C1, C2, R1 та R3. Таким чином, після аналізу вищевказаних залежностей стає очевидним рішення про точний підбір параметрів елементів або про застосування підстроювальних резисторів в якості елементів регулювання, що спростить регулювання даного блоку, однак зменшить надійність приладу за рахунок ускладнення схеми та меншої надійності

підстроювальних резисторів.

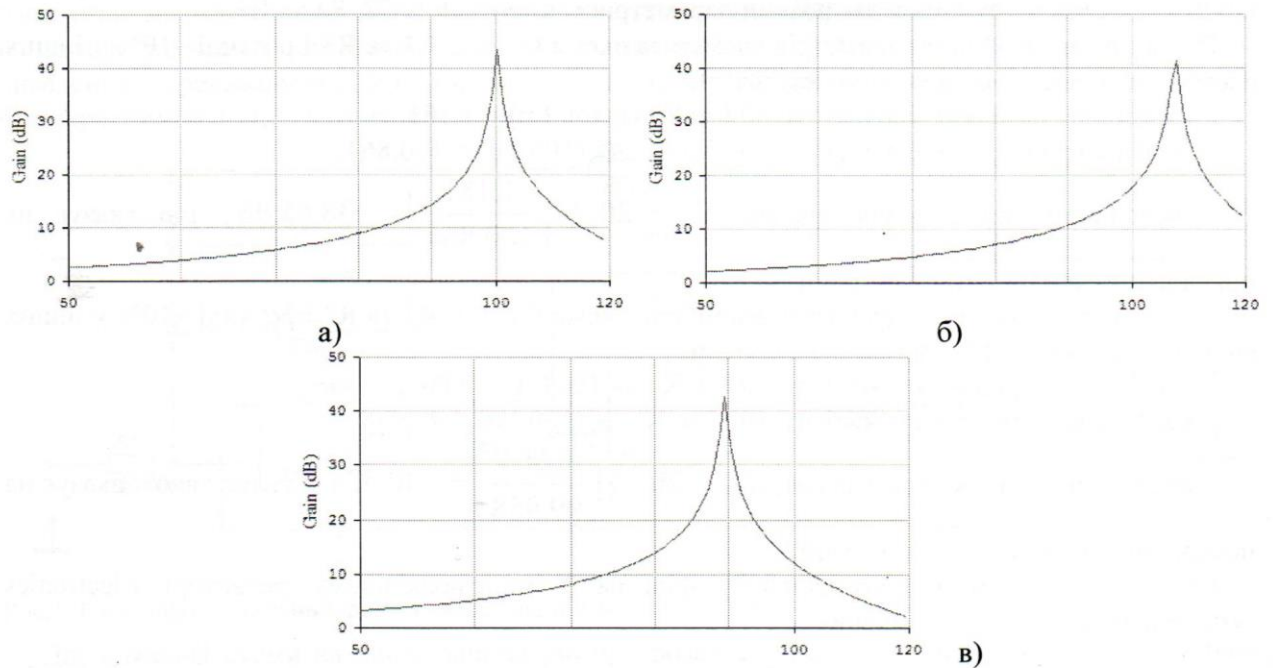


Рис. 3. Залежності коефіцієнта передачі смугопропускального фільтра від частоти при точних значеннях всіх параметрів елементів схеми (а), при розкиді  $-10\%$  всіх параметрів елементів схеми (б) та при розкиді  $+10\%$  всіх параметрів елементів схеми (в)

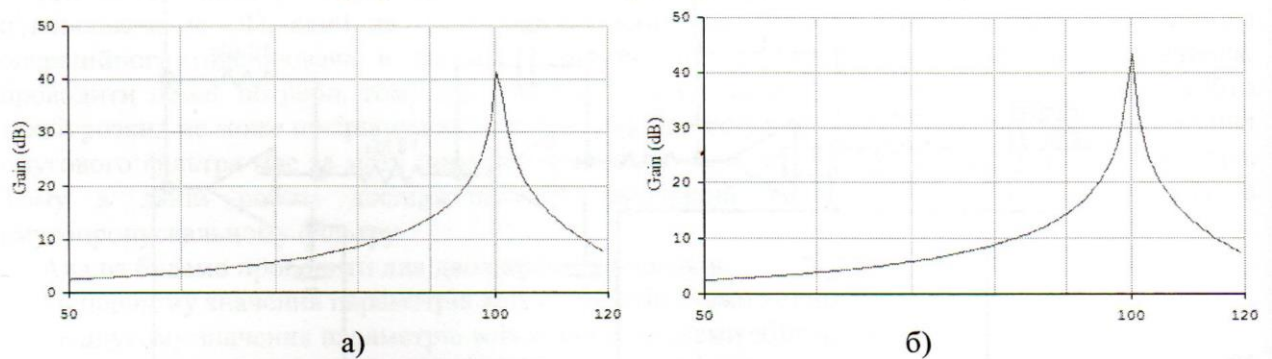


Рис. 4. Залежності коефіцієнта передачі смугопропускального фільтра від частоти при розкиді  $-10\%$  (а) та  $+10\%$  (б) всіх параметрів елементів схеми, крім C1, C2, R1 та R3

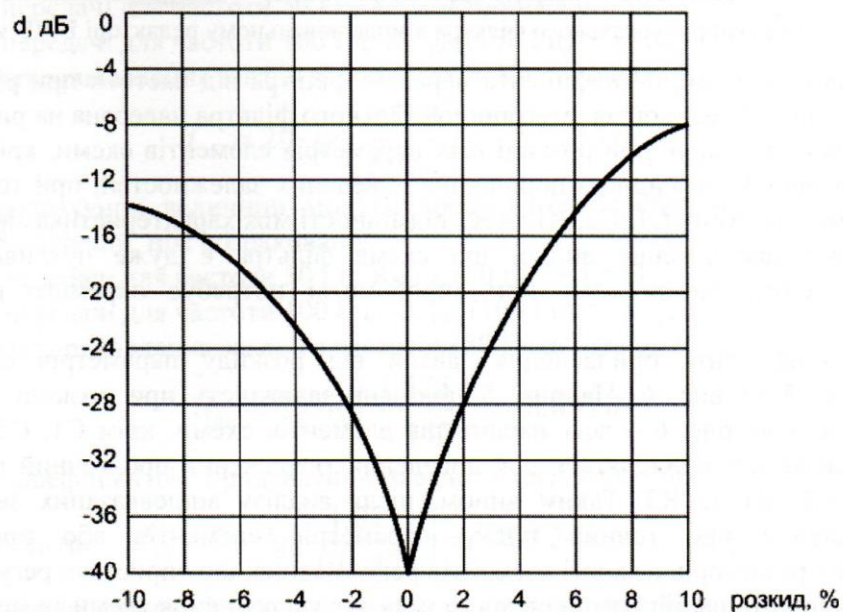


Рис. 5. Залежність коефіцієнта придушення завади смугопропускального фільтра від розкиду всіх



Рис. 6. Залежність коефіцієнта придушення завади смугопрпускового фільтра від розкиду всіх параметрів елементів схеми, крім С1, С2, R1 та R3

Далі проведемо дослідження зміни характеристик пристрою при зміні температури навколишнього середовища. Дане дослідження має на меті виявити вплив температури на характеристики пристрою та внести пропозиції щодо зменшення такої залежності. Тому що більшість переносних пристроїв працюють в діапазоні робочих температур від  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ , то дослідження будемо проводити саме для цього діапазону.

Залежність коефіцієнтів передачі від частоти для смугопрпускового фільтра при зміні температури навколишнього середовища наведені на рис. 7. При дослідженні враховується, що в схемі пристрою використовуються резистори марки С2-22 з температурним коефіцієнтом опору  $\text{ТКО} = 0.07\% / ^{\circ}\text{C}$  та конденсатори з температурним коефіцієнтом ємності  $\text{ТКЕ} = 0.0033\% / ^{\circ}\text{C}$  (група ТКЕ ПЗ3).

За результатами проведеного дослідження розрахуємо значення коефіцієнтів придушення завади при різних температурах навколишнього середовища:

– при температурі навколишнього середовища  $-10^{\circ}\text{C}$ :  $d_{\text{дБ}} = 20 \lg \left( \frac{1.022}{32.459} \right) = -30.042 \text{ дБ};$

– при температурі навколишнього середовища  $0^{\circ}\text{C}$ :  $d_{\text{дБ}} = 20 \lg \left( \frac{1.035}{46.112} \right) = -32.981 \text{ дБ};$

– при температурі навколишнього середовища  $+20^{\circ}\text{C}$ :  $d_{\text{дБ}} = 20 \lg \left( \frac{1.012}{101.478} \right) = -40.024 \text{ дБ};$

– при температурі навколишнього середовища  $+40^{\circ}\text{C}$ :  $d_{\text{дБ}} = 20 \lg \left( \frac{1.091}{45.254} \right) = -32.357 \text{ дБ}.$

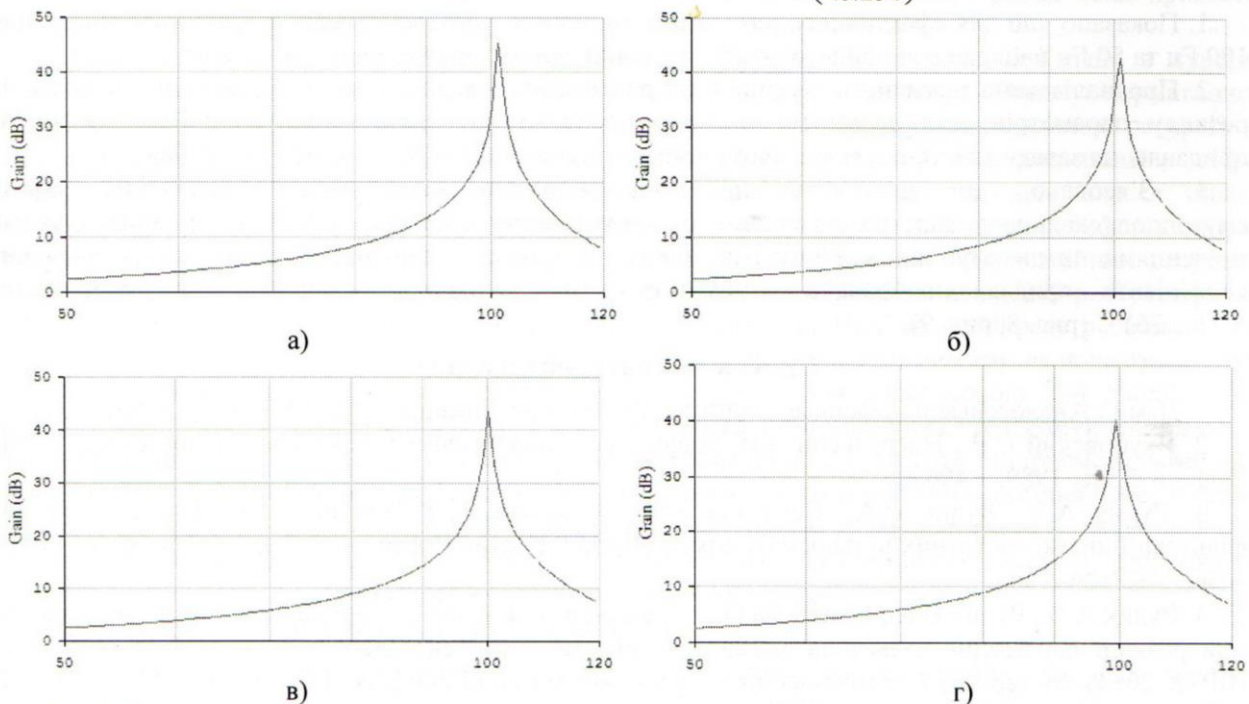


Рис. 7. Залежності коефіцієнта передачі смугопрпускового фільтра від частоти при температурі навколишнього середовища  $-10^{\circ}\text{C}$  (а),  $0^{\circ}\text{C}$  (б),  $+20^{\circ}\text{C}$  (в) та  $+40^{\circ}\text{C}$  (г)

Графічно залежність коефіцієнта придушення завади від температури наведена на рис. 8.

Як видно з вище проведеного аналізу залежності від температури коефіцієнта придушення завади смугопропускального фільтра, температура в значній мірі впливає на цей коефіцієнт. Виправити ситуацію можна при застосуванні конденсаторів з ТКЄ іншої групи, наприклад, М750. Для цього випадку залежність коефіцієнта придушення завади від температури навколишнього середовища наведена на рис. 9.

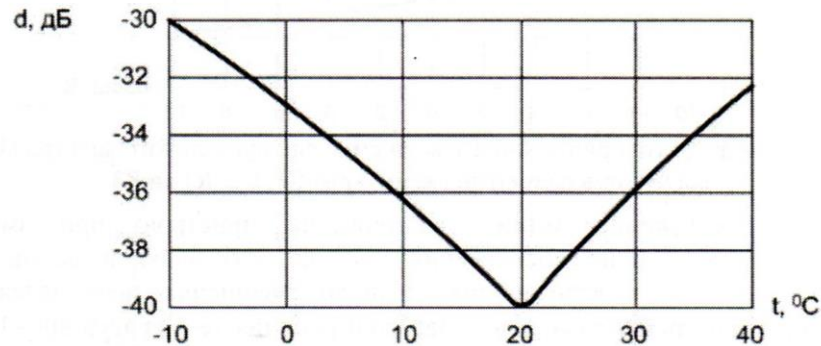


Рис. 8. Залежність коефіцієнта придушення завади смугопропускального фільтра від температури навколишнього середовища

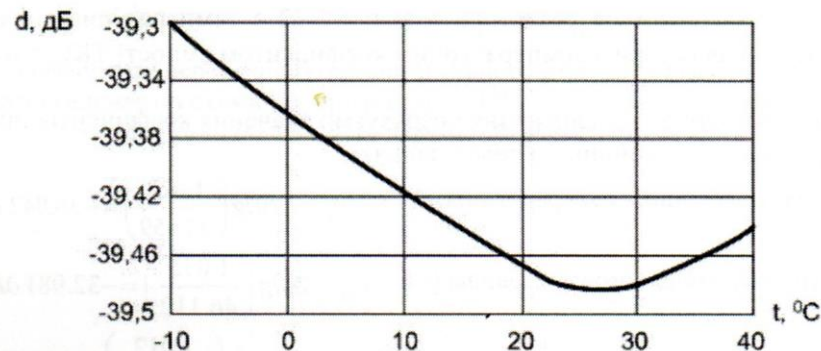


Рис. 9. Залежність коефіцієнта придушення завади смугопропускального фільтра від температури навколишнього середовища для групи ТКЄ конденсаторів М750

### Висновки

1. Показано, що для ефективного розділення корисного сигналу і завади з частотами відповідно 100 Гц та 50 Гц найкраще використовувати активний фільтр, реалізований за схемою Тоу (рис.1).
2. Проаналізовано залежність коефіцієнта придушення завади смугопропускального фільтра від розкиду параметрів всіх елементів схеми і доведено, що найбільший вплив на коефіцієнт придушення завади має точність пасивних елементів схеми С1, С2, R1 та R3 (рис. 5, рис. 6).
3. З'ясовано, що для отримання максимального коефіцієнта придушення завади смугопропускального фільтра важливим є використання пасивних елементів з мінімальними значеннями температурних коефіцієнтів опору та ємності, при цьому максимальні значення коефіцієнта придушення завади отримують при температурі навколишнього середовища  $(15...25)^{\circ}\text{C}$  (рис. 8, рис. 9).

### Список літературних джерел

1. Лэм Г. Аналоговые и цифровые фильтры. Расчёт и реализация. – М.: Мир, 1982. – 592 с.
2. Якубовский С.В., Ниссельсон Л.И. Цифровые и аналоговые микросхемы. Справочник. – М.: Радио и связь, 1989. – 496 с.
3. Рудик А.В., Рудик В.А., Семенова О.О., Семенов А.О. Використання фільтра Тоу для фільтрації низькочастотних вузькосмугових процесів // Вісник Інженерної академії України. – 2014. – №2. – С. 126÷130.
4. Рудик А.В., Рудик В.А., Семенова О.О., Семенов А.О. Аналіз зміни характеристик фільтра Тоу при розкиді параметрів елементів схеми // Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2014). Матеріали 7-ої міжнародної науково-практичної конференції. – Київ, НАУ, 2014. – С. 120÷122.