

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2
ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФІЛЬТРІВ
ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ

Фільтр – це пристрій, що дозволяє обмежити частотний спектр сигналу або виділити сигнали в межах певної смуги частот (смуги пропускання). Кожний фільтр характеризується *частотою зрізу*, яка вимірюється за умови, що потужність вихідного сигналу фільтра зменшилася на -3 дБ (або 50%) у порівнянні з потужністю вхідного сигналу (рис. 2.1). Тому *частоту зрізу* називають *частотою половинної потужності*.

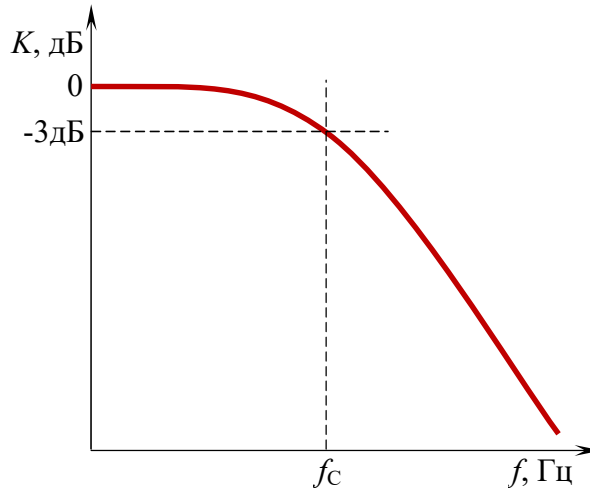


Рис. 2.1. Визначення частоти зрізу на амплітудно-частотній характеристиці

Ідеальні фільтри не послабляють сигнал у смугі пропускання і повністю виключають проходження сигналу в смугі затримки, маючи нескінченно велику крутизну амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) на частоті зрізу.

Аналогічні параметри реальних фільтрів кінцеві й залежать як від застосовуваних елементів схеми, так і від схемотехнічних рішень.

По розташуванню смуги пропускання в частотному спектрі фільтри бувають: фільтри нижніх частот (ФНЧ), фільтри верхніх частот (ФВЧ), смугові фільтри (СФ) фільтри, що загороджують (ЗФ), гребінчасті фільтри (ГФ) або богато-смугові.

Ідеальний *фільтр нижніх частот* має нульовий коефіцієнт передачі на частотах вище частоти зрізу, на частотах нижче частоти зрізу пропускає сигнал без ослаблення (рис. 2.2).

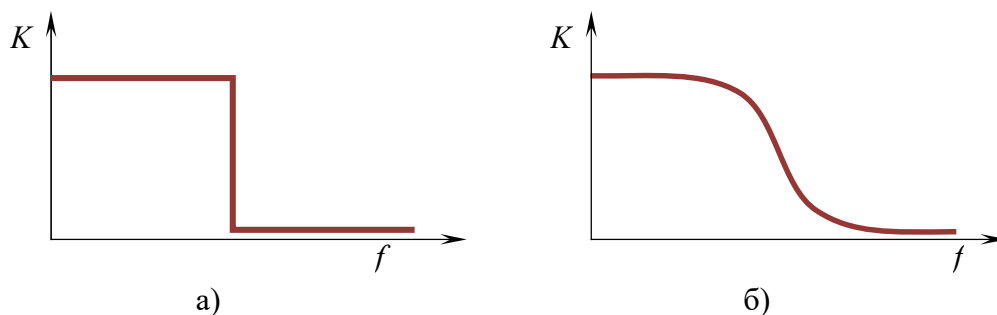


Рис. 2.2. Амплітудно-частотна характеристика ФНЧ:
а) ідеального, б) реального

Ідеальний *фільтр верхніх частот* не впливає на амплітуди сигналів, що мають частоту вище частоти зрізу, і не пропускає більш низькочастотні сигнали, ніж частота зрізу (рис. 2.3).

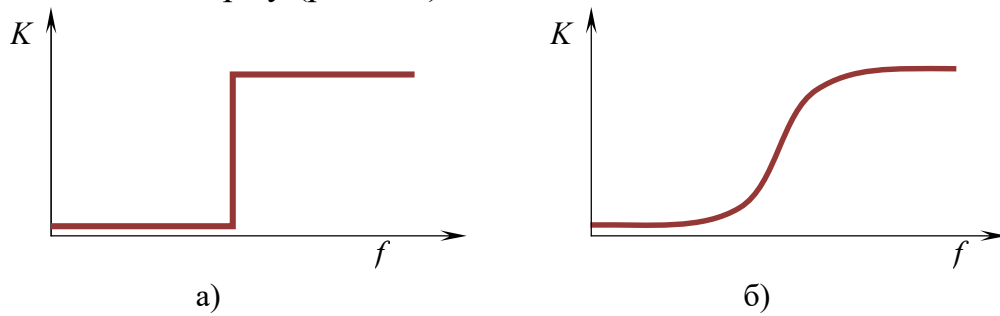


Рис. 2.3. Амплітудно-частотна характеристика ФВЧ:
а) ідеального, б) реального

Ідеальний *смугопронускаючий фільтр* (смуговий) не послабляє сигнали, частота яких знаходиться в інтервалі між його нижньою і верхньою частотами зрізу. Для інших частот його коефіцієнт передачі дорівнює нулю (рис. 2.4).

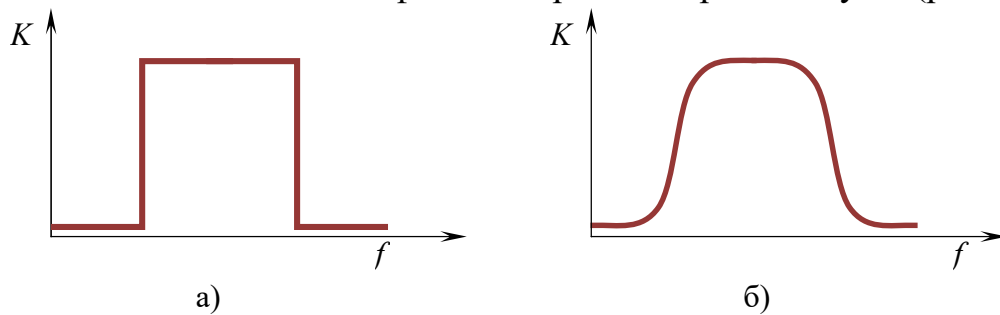


Рис. 2.4. Амплітудно-частотна характеристика смугового фільтра:
а) ідеального, б) реального

Ідеальний *смугозагороджувальний фільтр* (режекторний) має коефіцієнт передачі, що дорівнює нулю, для частот, що лежать в інтервалі між його нижньою й верхньою частотами зрізу. Сигнали всіх інших частот він пропускає без ослаблення (рис. 2.5).

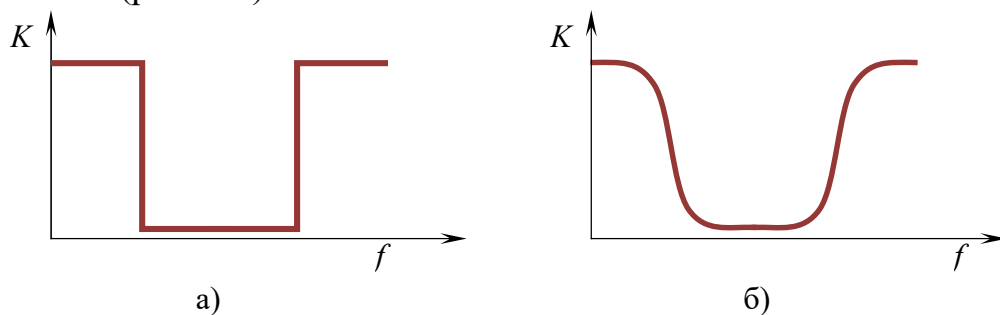


Рис. 2.5. Амплітудно-частотна характеристика режекторного фільтра:
а) ідеального, б) реального

За типом застосовуваної елементної бази розрізняють пасивні й активні фільтри.

Пасивні фільтри реалізуються на основі пасивних елементів – резисторів, конденсаторів і котушок індуктивності. Такі фільтри прості в реалізації, не вимагають джерел живлення елементів фільтрів, реалізуються в широкому діапазоні частот (від інфразвукових частот до ультракороткохвильового діапазону

радіочастот), мають більший динамічний діапазон.

В *активних фільтрах* присутній один або кілька активних компонентів (транзистор або операційний підсилювач). Активні фільтри здатні підсилювати сигнали, що проходять через них, по потужності за рахунок енергії зовнішнього джерела.

По типу передатної функції фільтри бувають *лінійні й нелінійні*.

По типу імпульсної характеристики фільтри бувають із *нескінченною* (рекурсивний фільтр) і з *кінцевою* (нерекурсивний фільтр) характеристикою.

Однією з основних величин, що фігурують в аналізі фільтрів сигналів, є дБ.

Децибел – логарифмічна одиниця рівнів, загасань і посилень.

Децибел – це безрозмірна одиниця, що застосовується для виміру відносини фізичних величин другого порядку (енергетичних: потужність, енергія) і першого порядку (напруга, сила струму). Іншими словами, децибел – це відносна величина, що призначена для виміру відношення двох інших величин, причому до отриманого відношення застосовується логарифмічний масштаб.

Спочатку дБ використовувався для оцінки відношення потужностей, і в канонічному, звичному змісті величина, що виражена в дБ, припускає логарифм відношення двох *потужностей* і обчислюється за формулою:

$$\text{дБ} = 10 \lg \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}},$$

де $P_{\text{вих}}$ – вимірювана потужність на виході пристрою (підсилювача, фільтра);

$P_{\text{вх}}$ – потужність на вході пристрою (опорна потужність).

Відповідно, перехід від дБ до відношення потужностей здійснюється за формулою:

$$\frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}} = 10^{0,1 \cdot \text{дБ}},$$

а потужність $P_{\text{вих}}$ може бути знайдена при відомій опорній потужності $P_{\text{вх}}$ за виразом:

$$P_{\text{вих}} = P_{\text{вх}} \cdot 10^{0,1 \cdot \text{дБ}}$$

Неенергетичні величини повинні бути перетворені в енергетичні. Так, згідно із законом Джоуля-Ленца $P = U^2/R$ або $P = I \cdot R$. Відповідно

$$\text{дБ} = 10 \lg \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}} = 10 \lg \frac{U_{\text{вих}}^2 R_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}^2 R_{\text{вих}}}.$$

В досить розповсюдженому, випадку, якщо обидві напруги $U_{\text{вих}}$ і $U_{\text{вх}}$ вимірювалися при тому самому опорі ($R_{\text{вих}} = R_{\text{вх}}$) або співвідношення опорів по тій або іншій причині не важливе, можна користуватися короткими виразами для струму й напруги

$$\text{дБ} = 20 \lg \frac{I_{\text{вих}}}{I_{\text{вх}}},$$

$$\text{дБ} = 20 \lg \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}}.$$

Пасивні фільтри

При реалізації пасивних фільтрів слід урахувувати, що на їхніх елементах розсіюється енергія сигналу. Тому необхідно враховувати ослаблення корисного сигналу в смузі пропускання пасивного фільтра, яке збільшується при збільшенні числа ланок фільтра. При цьому ослаблення корисного сигналу в смузі пропускання більше у фільтрів, реалізованих на резисторах і конденсаторах, ніж у фільтрів, реалізованих на котушках індуктивності й конденсаторах. Тому багатоланкові пасивні фільтри реалізують в основному на котушках індуктивності й конденсаторах.

Структури схем фільтрів

По своїй структурі схеми фільтрів підрозділяються на фільтри Г-, Т- і П-структур. Найпростішим фільтром є Г-образний (рис. 2.6). Модель фільтра при цьому складається із двох схемних елементів Z_1 і Z_2 . Параметр Z позначає опір схемного елемента фільтра сигнальним струмом.

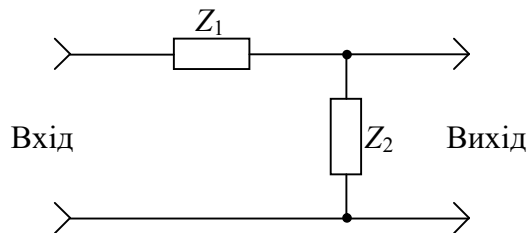


Рис. 2.6. Модель Г-образного фільтра

Перехід до інших структур фільтрів здійснюється за рахунок додавання в схему Г-образного фільтра додаткового елемента.

Модель Т-образного фільтра складається із трьох схемних елементів: двох елементів $Z_1/2$, і одного елемента Z_2 (рис. 2.7).

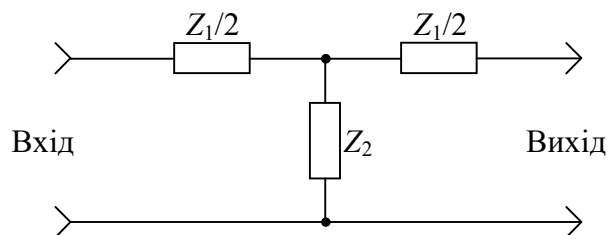


Рис. 2.7. Модель Т-образного фільтра

При зміні схеми їх з'єднання можна одержати модель фільтра П-структури (рис. 2.8). Модель П-образного фільтра складається із трьох схемних елементів: одного елемента Z_1 і двох елементів $2Z_2$.

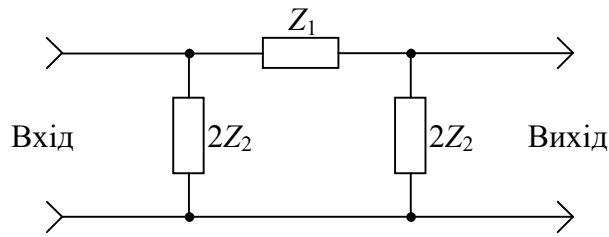


Рис. 2.8. Модель П-образного фільтра

Одна з відмінностей фільтрів Т- і П- структур полягає в характері їх вхідних і вихідних опорів і залежності їх від частоти, що необхідно враховувати при проектуванні конкретних електронних пристроїв.

Відзначені типи фільтрів можуть застосовуватися як у вигляді первинної, простої структури, так і у вигляді кола, складеного з декількох простих структур, кількість яких залежить від необхідної селективності фільтра.

Фільтри на основі резисторів і конденсаторів

Фільтри, що побудовані на основі резисторів (R) і конденсаторів (C) умовно називають RC -фільтрами. Вони мають порівняно невисоку селективність через використання у своєму складі тільки одного елемента, опір якого залежить від частоти сигнальних струмів – конденсатора. У той же час RC -фільтри прості в реалізації, мають малі габарити та є дешевими. Це дозволяє використовувати їх у багатьох випадках, коли не потрібна висока селективність і сигнал має досить велику енергію, тому що необхідно враховувати втрати на активному опорі резистора.

Застосовують RC -фільтри в основному в діапазонах інфразвукових і звукових частот, іноді й на більш високих частотах. У малопотужних джерелах живлення електронної апаратури їх використовують для фільтрації випрямленої напруги. У підсилювачах вони застосовуються в колах міжкаскадних зв'язків, у колах корекції амплітудно-частотної характеристики. В цих же діапазонах частот RC -фільтри використовують у системах управління для фільтрації сигналів від датчиків стану об'єктів управління.

RC-фільтри нижніх частот

Для реалізації RC -фільтрів нижніх частот у якості Z_1 використовують резистор R , а в якості Z_2 використовують конденсатор C (рис. 2.6). Частота зрізу для фільтра розраховується за формулою:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (2.1)$$

Для ФНЧ Г-структури номінальні величини параметрів резистора й конденсатора виходять безпосередньо з формули. При реалізації ФНЧ Т- і П-структур, номінальні величини параметрів резисторів і конденсаторів у схемі визначають, враховуючи коефіцієнти номінальних величин схемних елементів щодо вихідної Г-структури.

RC-фільтри верхніх частот

Для реалізації *RC*-фільтрів верхніх частот у якості Z_1 використовують конденсатор C , а в якості Z_2 використовують резистор R (рис. 2.6). Частота зрізу при цьому розраховується по формулі (1). Визначення номінальних величин параметрів резисторів і конденсаторів для ФВЧ різних структур проводиться аналогічно ФНЧ. Тобто при реалізації ФВЧ Т- і П-структур, номінальні величини параметрів резисторів і конденсаторів у схемі визначають, враховуючи коефіцієнти номінальних величин схемних елементів щодо вихідної Г-структури.

Фільтри на основі котушок індуктивності й конденсаторів

Фільтри, що побудовані на основі котушок індуктивності й конденсаторів умовно називають *LC*-фільтрами. Вони мають більш високу селективність в порівнянні з *RC*-фільтрами через використання у своєму складі двох елементів, опір яких залежить від частоти сигнальних струмів – конденсатора й котушки індуктивності. *LC*-фільтри мають менше загасання в смузі пропускання й більше загасання у смузі затримки в порівнянні з *RC*-фільтрами.

Застосовують *LC*-фільтри, в основному, в ультразвуковому й радіочастотному діапазонах, у яких вони мають прийнятні габарити. Хоча в тих випадках, коли *RC*-фільтри не забезпечують необхідною селективністю, *LC*-фільтри використовують і в діапазоні звукових частот.

Частотна вибірковість (селективність) *LC*-фільтрів дозволяє з їхньою допомогою вирішувати проблеми частотного поділу каналів у багатоканальних системах зв'язку. Це необхідно, зокрема, для реалізації частотного ущільнення каналів зв'язку при здійсненні телекерування складними територіально-розподіленими технологічними об'єктами. При використанні телекерування по каналах радіозв'язку *LC*-фільтри дозволяють забезпечити необхідну завадостійкість.

При реалізації *LC*-фільтрів слід враховувати їхні деякі специфічні особливості. Це більш висока трудомісткість виготовлення і більша вартість котушок індуктивності в порівнянні з резисторами й конденсаторами. До того ж *LC*-фільтри, що використовують котушки індуктивності з феромагнітними сердечниками мають менший динамічний діапазон через свою нелінійність. Для виключення паразитних зв'язків і наведень котушки індуктивності фільтрів необхідно екранувати.

Для *LC*-фільтрів типу К послідовні й паралельні плечі (рис. 2.6) є зворотними двополосниками й для них

$$Z_0^2 = Z_1 Z_2. \quad (2.2)$$

Параметр

$$Z_0 = \sqrt{Z_1 Z_2}, \quad (2.3)$$

має розмірність опору, називається характеристичним опором фільтра і є для такого типу фільтра постійною величиною.

При підстановці в (2.3) виразів опору котушки індуктивності й конденсатора змінному струму, одержимо

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2.4)$$

LC-фільтри нижніх частот

Для реалізації LC-фільтрів нижніх частот у якості Z_1 використовують котушку індуктивності L , а в якості Z_2 використовують конденсатор C (рис. 2.6). Частота зрізу для фільтра розраховується за формулою

$$f_c = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}. \quad (2.5)$$

З (2.4) і (2.5) витікає, що індуктивність котушки фільтра

$$L = \frac{Z_0}{\pi \cdot f_c}, \quad (2.6)$$

а ємність конденсатора фільтра

$$C = \frac{1}{\pi \cdot Z_0 \cdot f_c}. \quad (2.7)$$

Для ФНЧ Г-структури номінальні величини індуктивності котушки і ємності конденсатора розраховують безпосередньо по формулах (2.6) і (2.7), з обліком необхідного характеристичного опору (при виконанні справжньої роботи величина характеристичного опору задається).

При реалізації ФНЧ Т- і П-структур, номінальні величини параметрів котушок індуктивності й конденсаторів у схемі визначають, враховуючи коефіцієнти номінальних величин схемних елементів щодо вихідної Г-структури для схеми фільтра відповідної структури (рис. 2.7, рис. 2.8).

LC-фільтри верхніх частот

Для реалізації LC-фільтрів верхніх частот у якості Z_1 використовують конденсатор, а в якості Z_2 використовують котушку індуктивності (рис. 2.6). Частота зрізу для фільтра розраховується за формулою

$$f_3 = \frac{1}{4\pi\sqrt{LC}}. \quad (2.8)$$

З (2.4) і (2.8) витікає, що індуктивність котушки фільтра

$$L = \frac{Z_0}{4\pi \cdot f_c}, \quad (2.9)$$

а ємність конденсатора фільтра

$$C = \frac{1}{4\pi \cdot Z_0 \cdot f_c}. \quad (2.10)$$

Для ФВЧ Г-структури номінальні величини котушки індуктивності і ємності конденсатора розраховуються по формулах (2.9) і (2.10) з врахуванням необхідного характеристичного опору (при виконанні справжньої роботи величина характеристичного опору задається).

При реалізації ФВЧ Т- і П-структур, номінальні величини параметрів котушок індуктивності й конденсаторів у схемі визначають, враховуючи коефіцієнти номінальних величин схемних елементів щодо вихідної Г-структури. При цьому необхідно враховувати правила визначення параметрів конденсаторів і котушок індуктивності при їхньому послідовному й паралельному з'єднанні для збереження незмінними значення розрахункових параметрів елементів вихідної Г-структури.

Розрахувати параметри RC -фільтру

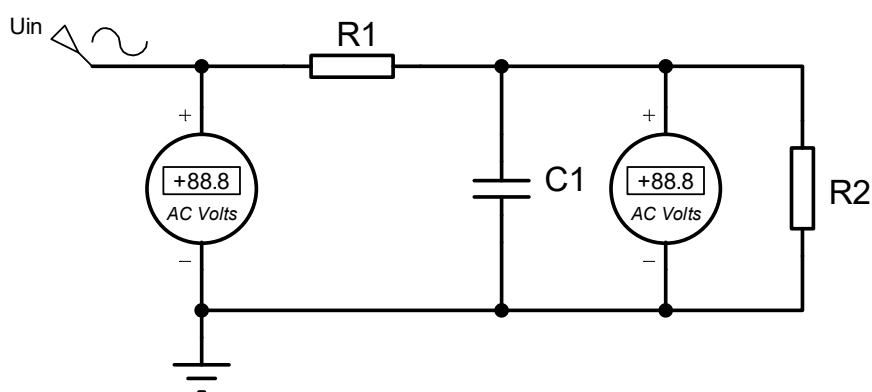


Рис. 2.9. Схема для дослідження властивостей RC -фільтра Г-типу