

Лабораторна робота 2

Тема: Дослідження rc -схем в частотній та часовій областях

Мета роботи:

- 1) набуття навичок дослідження електронних схем в середовищі Multisim;
- 2) вивчення властивостей RC -схем та їх вплив на спотворення аналогових та імпульсних інформаційних сигналів;
- 3) набуття навиків дослідження амплітудно-частотних та фазочастотних характеристик ($AЧХ$ та $\PhiЧХ$) електричних схем за допомогою віртуальних моделей вимірювальної апаратури;
- 4) експериментальне визначення параметрів частотно-залежних RC -схем, за яких забезпечуються допустимі спотворення інформаційних сигналів.

2.1 Основні теоретичні відомості

Прості та складні радіоелектронні схеми при їх аналізі зображають за допомогою еквівалентних схем, що містять в собі резистори, конденсатори, індуктивності, керовані генератори струму та напруги. У таких схемах інерційність, наявність часових та частотних спотворень моделюють за допомогою L та C компонентів. Параметри та можливості використання конкретної схеми можна оцінювати аналізуючи процеси в RC - та RL -колах.

У схемах можуть бути безліч комбінацій резисторів з конденсаторами. Шляхом різних перетворювань згадані комбінації зводяться до двох типів RC -схем: диференціюючих та інтегруючих.

2.1.1. Аналіз схем у часовій та частотній областях.

В імпульсних та цифрових системах одним із важливих параметрів є швидкодія. Для визначення цього параметра використовують тестові сигнали. Порівнюючи реакцію на виході схеми із сигналом, що подається на вхід, визначають необхідні параметри та характеристики схеми. Так роблять не лише при теоретичних розрахунках, але і під час налаштування апаратури.

Для оцінки швидкодії як тестові використовують сигнали, що описуються східчастою функцією, або прямокутні імпульси. При цьому реакція та складні

радіоелектронні схеми при їх аналізі зображають за допомогою еквівалентних схем, що містять в собі резистори, конденсатори, індуктивності, керовані генератори струму та напруги. У таких схемах інерційність, наявність часових та частотних спотворень моделюють за допомогою L - та C -елементів. Електричні кола з елементами, що накопичують енергію (C та L) суттєво відрізняються від кіл, що складаються виключно з резисторів. В останніх з вимкненням незалежних джерел усі напруги і струми миттєво стають рівними нулю. Навпаки, в електричних колах з C - та L -елементами струми і напруги залишаються деякий час навіть після вимкнення незалежних джерел. Ці напруги та струми зменшуються за відповідним для даної схеми законом. Перехідний процес продовжується доти, доки вся накопичена енергія не розсіється на резисторах.

Параметри та можливості використання конкретної схеми можна оцінювати аналізуючи процеси в RC - та RL -колах. У лабораторній роботі досліджуються тільки RC -кола. У схемах можуть бути безліч комбінацій резисторів з конденсаторами.

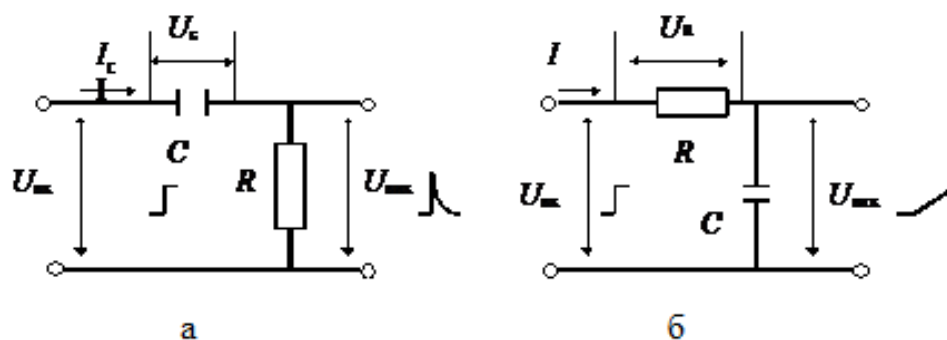


Рис. 2.1 Прості RC -схеми: а – диференціююча; б – інтегруюча

Шляхом різних перетворювань згадані комбінації зводяться до двох типів RC -схем: диференціальна (рисунок 2.1, а) та інтегруючих (рисунок 2.1, б).

Перехідна характеристика схеми, що є реакцією на вхідний сигнал у вигляді одиничного скачка, являє собою характеристику, яка дозволяє визначити тривалість переходу схеми з одного стану в інший і дає можливість оцінити швидкодію. Таким чином схеми досліджують у часовій області, що дозволяє оцінити часові спотворення сигналів.

Для значного класу електричних та електронних схем важливим є оцінка їх спроможності передавати (підсилювати) сигнали у необхідному діапазоні частот, тобто мати необхідну смугу пропускання. Для цього використовують частотні параметри схем, а аналіз проводять у частотній області. У цьому випадку як тестові використовують гармонічні сигнали різної частоти.

Електричні кола, побудовані винятково на ідеальних резисторах, не змінюють співвідношення опорів зі змінюванням частоти вхідного сигналу, а тому мають сталий коефіцієнт передачі напруги. Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) схеми, тобто залежність модуля коефіцієнта передачі по амплітуді від частоти $K_U(\omega)$, у цьому випадку являє собою горизонтальну лінію.

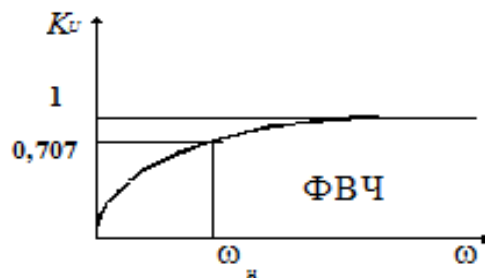


Рис. 2.2 Частотна характеристика диференційної схеми

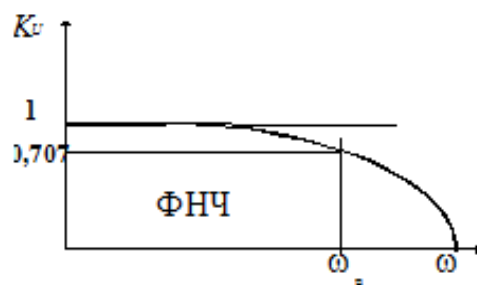


Рис. 2.3 Частотна характеристика інтегруючої схеми

Наявність передбачених та непередбачених (паразитних) ємностей та індуктивностей зумовлює значну залежність коефіцієнта передачі схеми від частоти (рис. 2.2, 2.3).

2.1.2. Перехідна характеристика диференціальних RC- схем.

Тобто перехідний процес залежить від процесу зарядження конденсатора.

При вмиканні конденсатора до джерела з напругою $U_{\text{вх}}$ (рис. 2.4,а) напруга на ньому (заряд конденсатора) змінюється за експонентою (рис. 2.4, б):

$$U_c = U_{\text{вх}}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2.1)$$

Напруга на виході:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} - U_c = U_{\text{вх}} \times e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (2.2)$$

У початковий момент ($t = 0$) напруга на конденсаторі дорівнює нулю, а напруга на виході стрибком досягає максимального значення, яке дорівнює амплітуді вхідного сигналу (рис. 2.4, в). Зразу ж починається зарядження конденсатора зі сталою часу $\tau = RC$. Це дуже важливий момент.

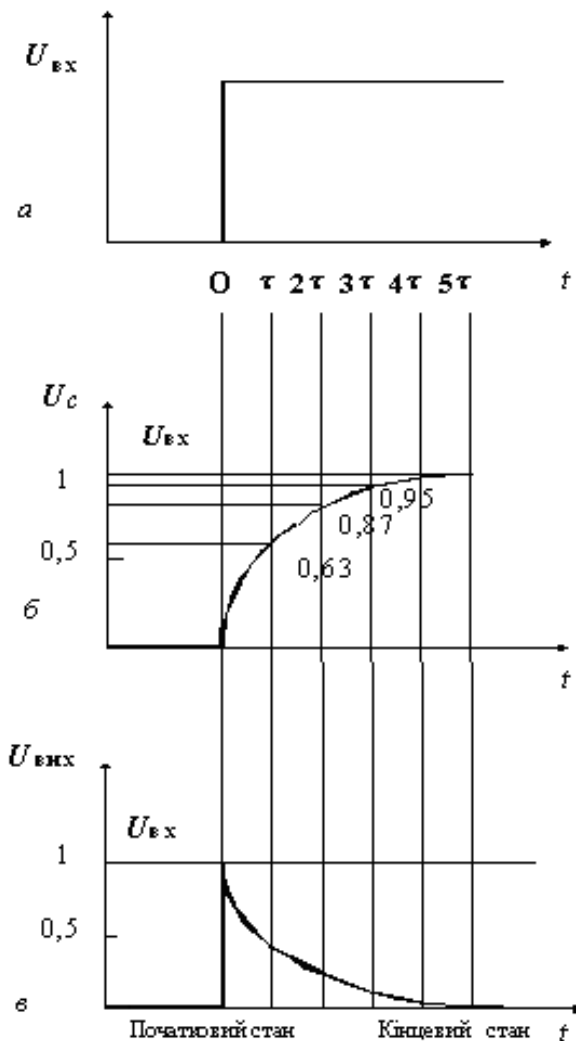


Рис. 2.4 Перехідні процеси в диференційній RC-схемі

Диференціюючі схеми – це схеми, в яких напруга на виході пропорційна похідній напруги входу:

$$U_{\text{вих}} = a \cdot \left(\frac{dU_{\text{вх}}}{dt} \right) \quad (2.3)$$

Розглянемо перехідний процес у такій схемі (див. рисунок 2.1) при подачі на вхід східчастого сигналу амплітудою $U_{\text{вх}}$. Сигнал на виході визначається рівнянням:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} - U_c$$

Через час $t = \tau$ напруга на виході дорівнюватиме:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \times e^{-1}$$

Тобто напруга на виході зменшиться в «e» разів та досягне рівня:

$$U_{\text{вих}} = 0,37 \times U_{\text{вх}} .$$

Напруга на конденсаторі:

$$U_c = U_{\text{вх}} - U_{\text{вих}}$$

$$U_c = 0,63 \times U_{\text{вх}}$$

Через час $t = 2\tau$ напруга на виході зменшиться до рівня:

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}} \times e^{-\frac{2\tau}{\tau}} = U_{\text{вх}} \times e^{-2} = 0,13 \times U_{\text{вх}}$$

$$U_c = 0,87 \times U_{\text{вх}}$$

Через час $t = 3\tau$ перехідні процеси практично закінчуються.

Тривалість перехідних процесів визначають як час зміни напруги $U_{\text{вих}}$ від 0,05 до 0,95, або на рівнях 0,1 та 0,9, що відбувається приблизно за 3τ , або відповідно за 2τ .

Сигнал на виході диференційної схеми суттєво відрізняється за формою від вхідного. Це використовується для диференціювання сигналів будь-якої форми, у тому числі й гармонічних. При цьому розв'язують дві основні задачі перетворювання сигналів: – отримання імпульсів дуже малої тривалості (вкорочення імпульсів), які використовують для запуску керованих перетворювачів електроенергії, тригерів, одновібраторів та інших пристроїв; виконання математичної операції диференціювання (отримання похідної в часі) складних функцій, заданих у вигляді електричних сигналів, що часто зустрічається в обчислювальній техніці, апаратурі авторегулювання та ін.

Операція диференціювання відбувається лише тоді, коли тривалість імпульсу значно перевищує сталу часу $t \gg \tau$.

Такі ж RC - кола використовують у лінійних схемах, зокрема, у підсилювачах. Треба зауважити, що в цьому випадку вимоги до величини τ зовсім інші. Необхідно, щоб інформаційний сигнал при підсиленні зберігав форму, а це можливо коли за час дії імпульсу (t_i) заряд конденсатора суттєво не зміниться. Це відбувається за умови $t_i \ll \tau$. У даному випадку схему (рис. 2.1, а) використовують як елемент міжкаскадного зв'язку, що роз'єднує електричні кола за постійним струмом, але не вносить спотворень під час передачі інформаційних сигналів.

2.1.3. Перехідна характеристика інтегруючих RC -схем.

В інтегруючих колах вихідна напруга пропорційна інтегралу за часом від вхідної напруги:

$$U_{\text{вих}} = a \times \int U_{\text{вх}} dt. \quad (2.4)$$

Відмінності кіл, що інтегрують, від тих, що диференціюють, полягає в тому, що вихідна напруга знімається з конденсатора (рис. 2.1, б). Використовують ці кола для отримання лінійно змінюваних пилкоподібних напруг, а також для реалізації операцій інтегрування.

Для виконання такої операції необхідно, щоб стала часу кола τ була значно більшою від тривалості вхідного імпульсу $\tau \ll t_{i\text{вх}}$, а для синусоїдального сигналу – $RC \gg 1/\omega$.

При подачі на вхід східчастої напруги (рис. 2.5, а) у початковий момент ($t = 0$) вся вхідна напруга прикладена до резистора, а напруга на конденсаторі дорівнює нулю. Конденсатор починає заряджатись зі сталою часу $\tau = RC$. Струм поступово зменшується, що обумовлює зменшення спаду напруги на резисторі (рис. 2.5, б), а на виході ($U_{\text{вих}} = U_c$) напруга зростає до значення $U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}}$ (рис. 2.5, в).

Перехідний процес так само, як і у диференційних ланцюгах оцінюють за 2τ при фіксації на рівні $(1 - 0,9) \times U_{\text{вих}}$, або за 3τ при фіксації на рівні $(0,05 - 0,95) \times U_{\text{вих}}$. Ці величини визначають протяжність перехідного процесу під час переключення схеми, а відтак – і швидкодію пристрою.

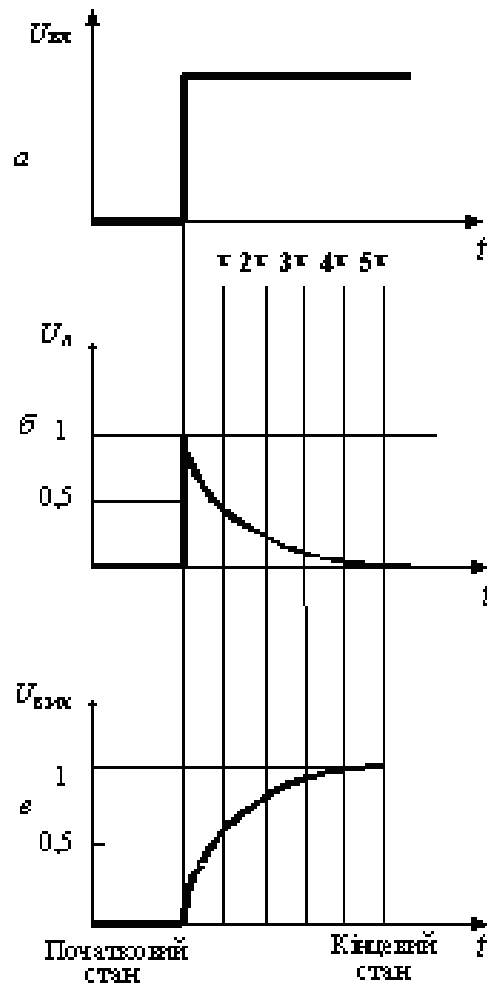


Рис. 2.5 Перехідні процеси в інтегруючій RC-схемі

Коли на вхід інтегруючої схеми поступає періодична послідовність імпульсів прямокутної форми тривалістю t_i , то для їх передачі без суттєвого спотворення необхідно, щоб стала часу була мала ($\tau \ll t_i$). У цьому випадку вихідна напруга відтворює форму вхідних імпульсів, оскільки конденсатор встигає повністю зарядитись за час, який становить дуже малу частку тривалості імпульсу. При цьому тривалість переднього фронту імпульсу буде незначною.

У разі виконання умови інтегрування ($\tau \gg t_i$) у момент надходження імпульсу на вхід схеми вся вхідна напруга прикладена до резистора, а напруга на конденсаторі дорівнює нулю. За час дії імпульсу конденсатор повільно

заряджається, а напруга на ньому повільно збільшується. Але за вказаної умови напруга на конденсаторі не встигає досягти напруги. $U_{\text{вих}}$ По закінченні вхідного імпульсу конденсатор так само повільно розряджається.

Таким чином, на ємнісному виході формуються розтягнуті імпульси, які мають форму експоненційної пилки. Такі спотворення вхідних імпульсів не завжди допустимі. У цьому випадку тривалість переднього фронту вихідного імпульсу може перевищувати тривалість інформаційного імпульсу t_i .

Зрозуміло, що час заряду та розряду конденсатора визначає також мінімальний період вхідних імпульсів і швидкодію.

Схему, показану на рисунку 2.1, б, умовно називають інтегруючим колом. Операція інтегрування відбувається лише за умови $\tau \gg t_{\text{івх}}$. При цьому форма вихідного імпульсу дуже відрізняється від форми вхідного (на вході прямокутний імпульс – на виході експоненційна пилка). Якщо така ж схема має співвідношення $\tau \ll t_{\text{івх}}$, то відбувається лише невелике спотворення вихідного імпульсу (збільшується тривалість переднього та заднього фронтів).

2.1.4. Частотні характеристики диференціюючих RC-схем.

Залежність коефіцієнта передачі RC- та LC-схем від частоти вхідного сигналу зумовлена зміною опорів конденсаторів та індуктивностей. У диференціюючих схемах (рис. 2.1, а) зі збільшенням частоти напруга на виході збільшується, коефіцієнт передачі зростає.

Властивості схеми оцінюють за допомогою АЧХ, яка відображає залежність модуля коефіцієнта передачі від частоти.

Модуль коефіцієнта передачі визначають за формулою:

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega RC}}} \quad (2.5)$$

Смугу пропускання схеми оцінюють на рівні, коли модуль коефіцієнта передачі зменшується в $\sqrt{2}$ рази. У диференційних RC-схемах це відбувається у разі зменшення частоти до

$$\omega = 1/RC = 1/\tau.$$

Таким чином, диференційні RC -схеми пропускають сигнали і частотою $\omega \geq \omega_H$, тобто є фільтрами верхніх частот (ФВЧ) (рис. 2.2).

2.1.5. Частотні характеристики інтегруючих RC -схем.

Інтегруючі схеми зі збільшенням частоти зменшують амплітуду вихідного сигналу, коефіцієнт передачі падає.

Модуль коефіцієнта передачі дорівнює:

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega RC}} \quad (2.6)$$

Якщо частота вхідного сигналу досягає величини $\omega = 1/\tau$, то модуль коефіцієнта передачі зменшується у $\sqrt{2}$ рази. Таки чином, інтегруючі ланцюжки пропускають сигнали із частотою від $\omega = 0$ і до $\omega = \omega_B$, тобто є фільтрами нижніх частот (ФНЧ) (рис. 2.3).

Передача сигналів в області нижніх частот може регулюватись. Ємність розділового конденсатора в підсилювачах беруть достатньої величини, щоб забезпечити необхідний спектр нижніх частот. У спеціальних підсилювачах постійного струму такі конденсатори відсутні.

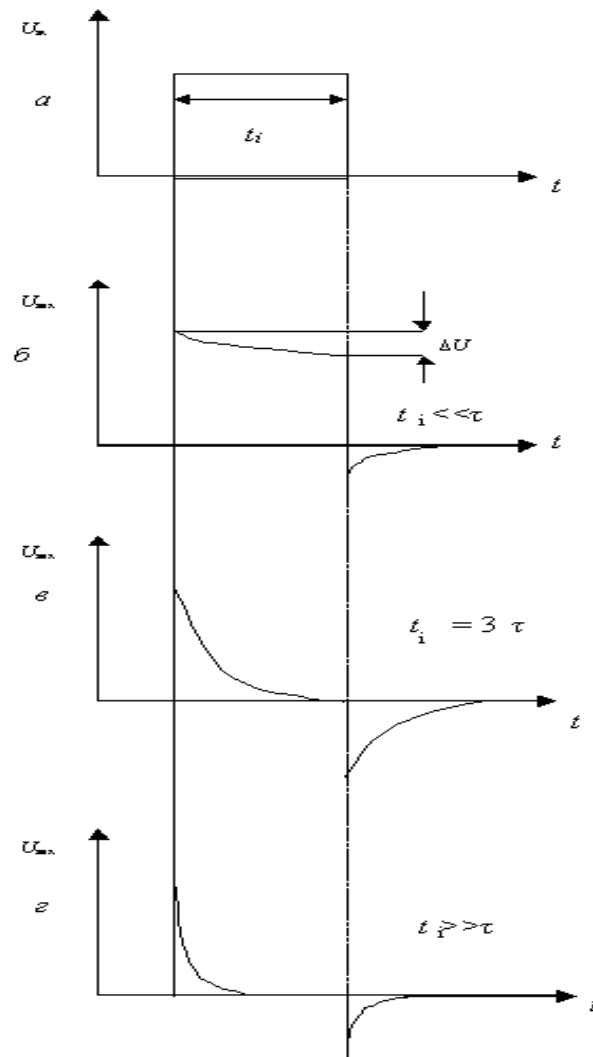


Рис. 2.7 Залежність форми вихідних імпульсів диференційних

RC-схем від співвідношення t_i та τ :

а) вхідний сигнал; б) $t_i \ll \tau_i$; в) $t_i = 3\tau_i$; г) $t_i \gg \tau_i$.

Складнішу задачу розв'язують, щоб забезпечити розширення частотного діапазону в бік високих частот. У схемах завжди є паразитні ємності монтажу, активних та пасивних елементів. Вони зумовлюють обмеження діапазону частот інформаційних сигналів, що передаються на вихід схеми.

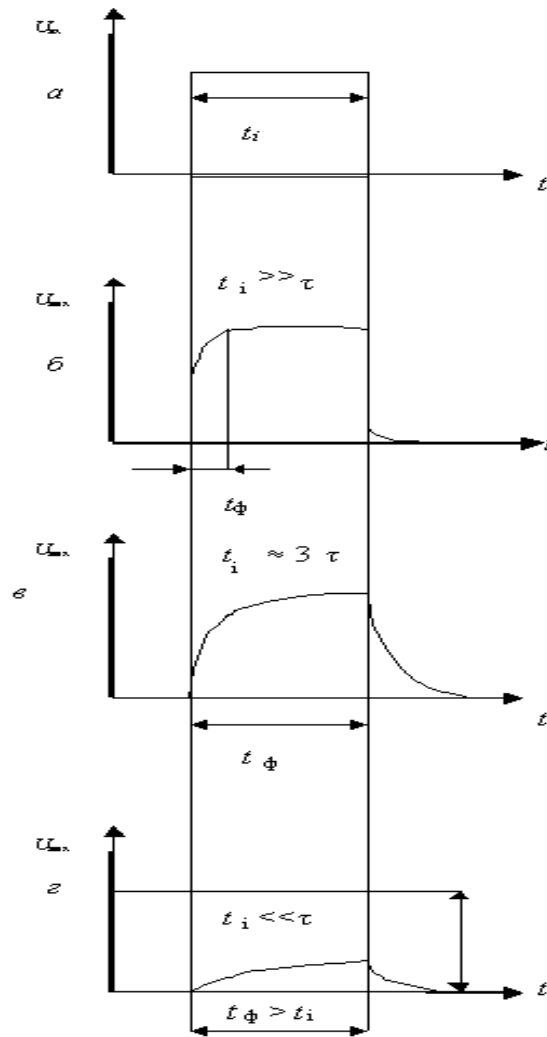


Рис. 2.8 Залежність форми вихідних імпульсів диференційних

RC-схем від співвідношення t_i та τ :

а) вхідний сигнал; б) $t_i \gg \tau$; в) $t_i = 3\tau$; г) $t_i \ll \tau$.

Частотні і перехідні характеристики пов'язані між собою. Розширення частотного діапазону в області верхніх частот обумовлює зменшення тривалості перехідних процесів, збільшення швидкодії схеми, зменшення тривалості переднього фронту імпульсу на виході.

Розширення частотного діапазону в області нижніх частот обумовлює зменшення спаду вершин імпульсів; зменшує спотворення форми імпульсів (рис. 2.7 та 2.8).

2.2 Порядок виконання роботи

2.2.1. Дослідження диференціюючої RC-схеми.

1 Відкрити вікно програми *Multisim* і побудувати схему диференційної RC-схеми (рис. 2.9).

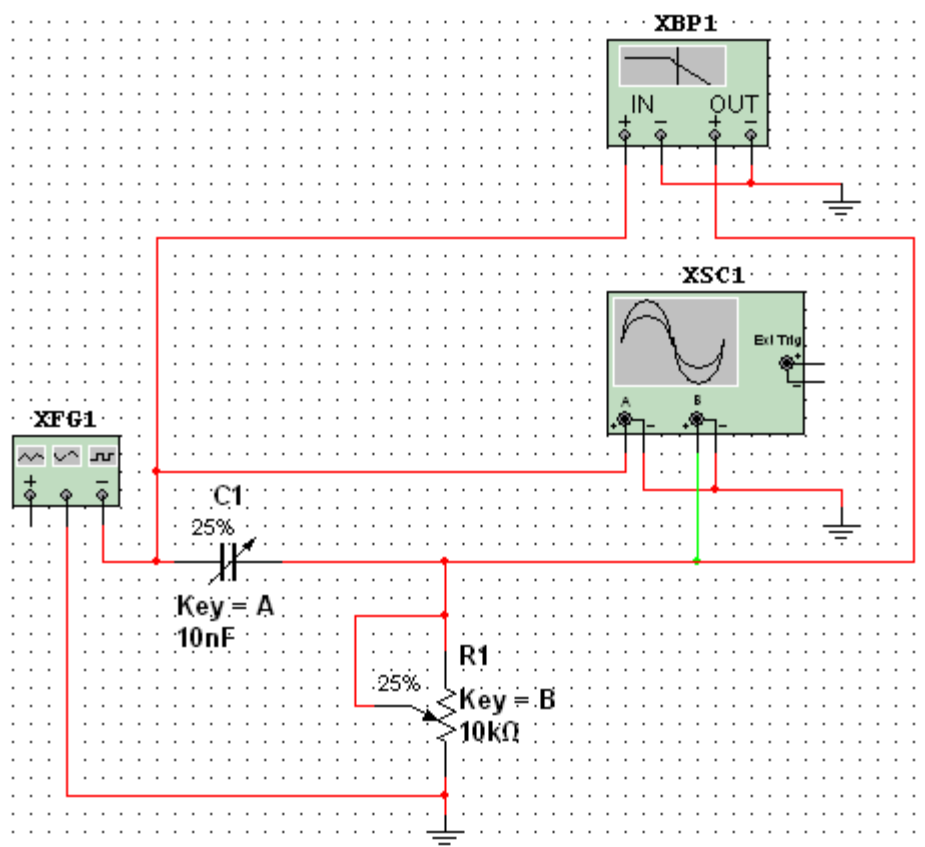


Рис. 2.9 Схема віртуального лабораторного стенда для дослідження диференціюючої RC-схеми

2. Дослідити диференційну RC-схему в частотній області.
3. Встановити у функціональному генераторі режим генерації гармонічних сигналів. Встановити такі параметри сигналу: частота 10 кГц, амплітуда 10 В.
4. Дослідити частотні характеристики диференційної схеми допомогою вимірювача АЧХ та ФЧХ (*Bode Plotter*). У відповідних віконцях встановити: мінімальне послаблення вихідного сигналу $F = 0$ дБ (максимальний коефіцієнт передачі), максимальне послаблення $I = -40$ дБ (мінімальний коефіцієнт передачі), максимальна частота $f = 5$ МГц, мінімальна частота $f = 100$ Гц.
5. Увімкнути моделювання За допомогою візирної лінійки визначити нижню граничну частоту f_n диференційної RC-схеми (частоту, на якій коефіцієнт передачі зменшується до 3 дБ). Вимкнути моделювання.

6. Перевести *Bode Plotter* в режим дослідження ФЧХ. На передній панелі натиснути кнопку «*Phase*». Виставити значення параметрів: $F = 135^\circ$, $I = -45^\circ$. Увімкнути моделювання.

7. Проаналізувати одержану ФЧХ та занести її в протокол. Вимкнути моделювання.

8. Повторити експерименти при одночасному збільшенні опору потенціометра і ємності конденсатора до 50%, а потім до 75% від номінального значення.

9. Результати занести в протокол. Сформулювати висновки.

10 Дослідити диференціюючу *RC*-схему в часовій області. Встановити такі параметри імпульсів генератора: частота 10 кГц (період 100 мкс), заповнення (*Duty cycle*) 50% (тривалість імпульсів 50 мкс), амплітуда 10 В.

11. Виставити мінімальні значення опору потенціометра та ємності конденсатора.

12. Виставити режими осцилографа: тривалість розгортки (*Time base*) 20 мкс/поділ, тип функціональної залежності Y/T , чутливість каналу «*A*» – 20 В/поділ, зміщення по вертикалі осцилограми сигналу каналу «*A*» (*Y position*) 2 под, тип входу каналу *A* «*DC*» (закритий вхід, за змінним струмом), чутливість каналу «*B*» – 10 В/под., зміщення по вертикалі осцилограми сигналу каналу «*B*» (*Y position*) – 1.2 под. Режим синхронізації – запуск вхідними сигналами, тобто сигналами каналу «*A*».

13. Увімкнути моделювання. Зафіксувати та проаналізувати вихідні осцилограми. Користуючись курсорами 1 та 2 визначити величину вихідної напруги на початку і в кінці дії вхідних інформаційних сигналів. Розрахувати у відсотках спад вершини імпульсів.

14. Повторити експерименти при одночасному збільшенні опору потенціометра та ємності конденсатора до 50%, а потім до 75% від номінального значення. Результати занести в протокол.

15. Сформулювати висновки.

2.2.2. Дослідження інтегруючої *RC*-схеми.

1. Побудувати схему інтегруючої RC-схеми (рисунок 2.10). Виставити номінальну ємність конденсатора 10 нФ, та величину зміни ємності (25%). Значення опору потенціометра та встановлені відсотки залишити без змін.

2. Дослідити частотні характеристики інтегруючої RC – схеми. Перевести генератор в режим формування гармонічного сигналу. Виставити амплітуду 10 В. Одержати АЧХ та ФЧХ інтегруючої RC– схеми для значень R і C (25, 50 та 100%). Визначити за допомогою *Bode Plotter* та розрахувати значення верхніх граничних частот.

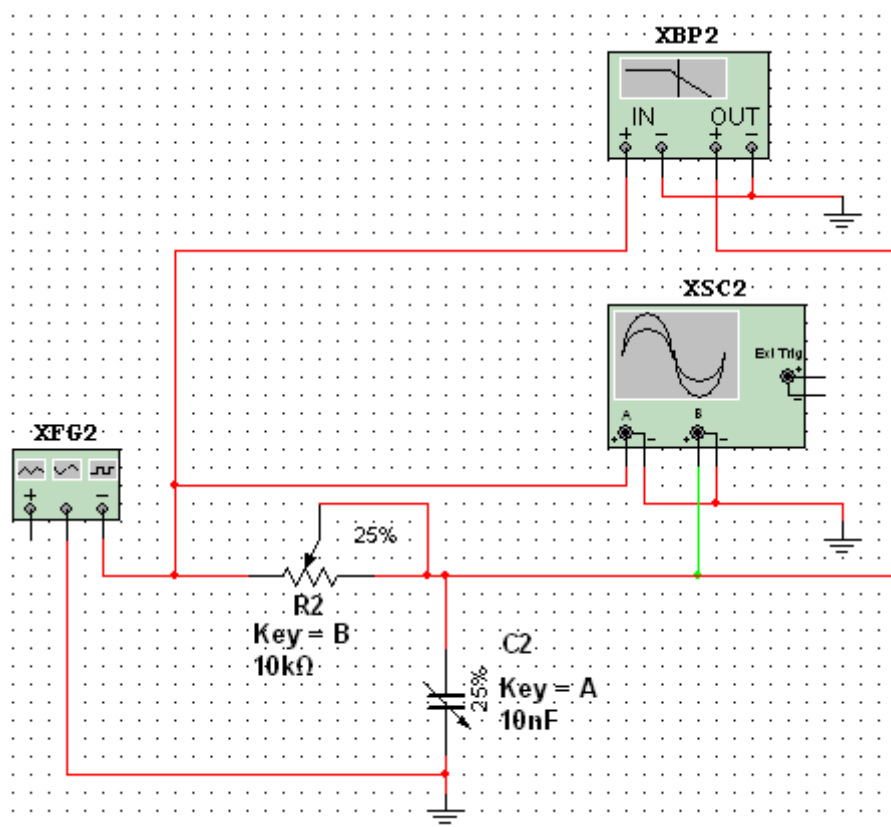


Рис. 2.10 Схема віртуального лабораторного стенда для дослідження інтегруючої RC-схеми

3. Одержані АЧХ та ФЧХ і значення граничних частот занести в протокол. Проаналізувати одержані результати. Зробити висновки.


4. Дослідити перехідні процеси в інтегруючій RC–схемі. Перевести функціональний генератор в режим формування прямокутних імпульсів («—□□»), виставити такі параметри імпульсів: частота 10 кГц, відсотки заповнення 50% (тобто тривалість імпульсів 5 мкс), амплітуда 10 В.

5. Відкрити передню панель осцилографа, та встановити тривалість розгортки 20мкс/под. Решту показників залишити без змін.
6. Увімкнути моделювання. Спостерігати осцилограми вхідних та вихідних імпульсів.
7. Повторити експерименти ще для двох значень опору потенціометра та ємностей конденсатора – 50% та 100% номінального значення.
8. Занести осцилограми в протокол.

2.2.3. Дослідження подвійного Т-подібного мосту.

1. Побудувати схему подвійного Т-подібного мосту (рис. 2.11).
2. Виставити значення опорів в резисторах в межах 1...10 МОм так, щоб $R_1 = R_2 = 2R_3$, і величину ємності конденсаторів в межах 1...10 нФ із співвідношенням $C_1 = C_2 = 0,5C_3$. Це дозволяє розрахувати квазірезонансну частоту за формулою:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} = \frac{1}{2\pi R_3 C_3}.$$

3. Перевести функціональний генератор в режим формування тестового гармонічного сигналу () . Встановити амплітуду коливання 10 В, частоту 10 Гц.
4. Висвітлити передню панель *Bode Plotter*. Виставити діапазон затухань $F = 0$ дБ до $I = -60$ дБ, смугу частот $F = 10$ кГц, $I = 10$ Гц.
5. Увімкнути моделювання.
6. Дослідити АЧХ, результати вимірювань та АЧХ занести в протокол.
7. Вимкнути моделювання.
8. Перевести *Bode Plotter* в режим дослідження фазочастотної характеристики. Дослідити ФЧХ.
9. Зробити висновки.

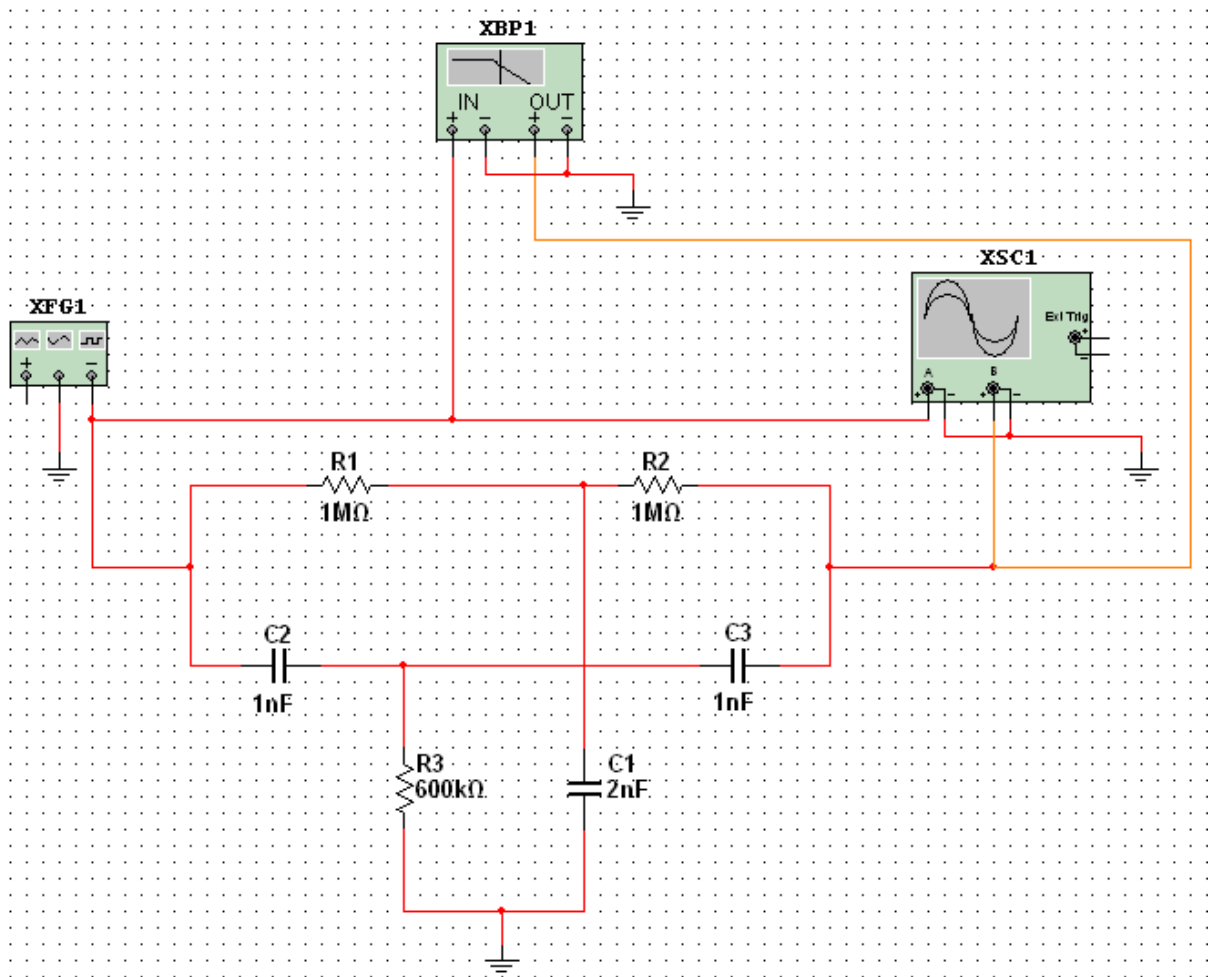


Рис. 2.11 Схема віртуального лабораторного стенда для дослідження подвійного Т-подібного мосту

2.3 оформлення звіту

Зміст повинен містити:

- мету лабораторної роботи;
- принципові електричні схеми віртуальних лабораторних стендів для дослідження *RC*-схем;
- результати розрахунків сталих часу, значень граничних частот та тривалості перехідних процесів для *RC*-схем;
- амплітудно-частотні характеристики досліджуваних *RC*-схем;
- перехідні характеристики досліджуваних *RC*-схем;
- осцилограми імпульсів, одержаних за експериментами ;
- визначення тривалості перехідних процесів та смуги частот;
- висновки.

2.4 контрольні запитання

1. Накресліть та поясніть принципові електричні схеми інтегруючого та диференціюючого RC -кола.
2. Поясніть формування вихідного сигналу диференціюючим RC -колом.
3. Поясніть формування вихідного сигналу інтегруючим RC -колом.
4. Чому диференціюючі RC -схеми є фільтрами верхніх частот?
5. Які елементи електронних схем обмежують частотні властивості пристроїв обробки електричних сигналів
6. Як змінюється перехідна характеристика диференціюючої RC -схеми зі збільшенням ємності конденсатора та зміною опору резистора?
7. Як змінюється перехідна характеристика інтегруючої RC -схеми зі зменшенням ємності конденсатора та зі збільшенням опору резистора?