

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЧЕРНІГІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

## **МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ  
РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ  
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ДЕННОЇ ФОРМИ НАВЧАННЯ СПЕЦІАЛЬНОСТІ  
171 – ЕЛЕКТРОНІКА

ЗАТВЕРДЖЕНО  
на засіданні кафедри  
промислової електроніки  
протокол №11 від  
22.06.2018 р.

ЧЕРНІГІВ – 2018

Моделювання електронних схем. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи для студентів денної форми навчання спеціальності 171 – Електроніка /Укладачі: Гордієнко В.В., Ревко А.С. – Чернігів: ЧНТУ, 2018. – 46 с.

Укладачі: Гордієнко Вячеслав Валентинович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри промислової електроніки  
Ревко Анатолій Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри промислової електроніки

Відповідальний за випуск : Денисов Юрій Олександрович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри промислової електроніки

Рецензент: Приступа Анатолій Леонідович, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри ІВТМтаФ

## Зміст

Вступ.....	4
1 Загальні рекомендації.....	5
2 Завдання на розрахунково-графічну роботу.....	7
3 Оформлення розрахунково-графічної роботи.....	8
4 Теоретичні відомості.....	10
5 Приклад аналізу полосового фільтру.....	18
6 Варіанти завдань на розрахунково-графічну роботу.....	25
Список використаної літератури.....	45
Додаток А.....	46

## Вступ

Дані методичні вказівки призначенні для студентів третього курсу спеціальності 171 – «Електроніка» і слугують для полегшення роботи студентів над розрахунково-графічною роботою (РГР) з дисципліни "Моделювання електронних схем".

Мета виконання РГР :

- закріплення та поглиблення отриманих студентами на лекціях та лабораторних заняттях знань;
- отримання навичок моделювання реальних електронних схем за допомогою стандартних пакетів та розрахунку їх характеристик;
- отримання навичок складання моделей електронних схем різними методами для різних режимів роботи.

Теоретичною основою для виконання РГР слугує навчальна література, курс лекцій і лабораторних робіт, а також знання, отримані студентами при вивченні дисципліни "Алгоритми та методи обчислень", "Програмування та алгоритмічні мови", "Елементна база електронних пристроїв", "Пристрої аналогової електроніки".

РГР виконується на протязі семестру та охоплює основні теми курсу "Моделювання електронних схем". В процесі виконання студент повинен використовувати сучасні програмні пакети PSpice Schematics, Maple та інші, при цьому продовжувати їх поглиблене вивчення.

Завдання на РГР студент отримує на початку семестру. Номер варіанту завдання як правило співпадає з номером прізвища студента в алфавітному списку групи. Індивідуальна принципова схема має два чи три активних елемента. За згодою викладача в якості завдання може використовуватися схема, розроблена студентом при виконанні курсового проекту з дисципліни "Пристрої аналогової електроніки".

На протязі семестру студент повинен продемонструвати проміжні результати своєї роботи в чорновому вигляді в певні строки. В кінці семестру, не пізніше, ніж за тиждень до залікового тижня, оформлена РГР здається на перевірку. Після перевірки роботи назначається дата захисту. За результатами перевірки та бесідою зі студентом викладач виставляє оцінку, яка залежить від своєчасності задачі окремих частин і РГР в цілому.

## 1 Загальні рекомендації

Перед тим, як почати виконання РГР, студент повинен повторити пройдений на лекціях матеріал, котрий відноситься до певної частини РГР, а також можливості пакетів моделювання, які використовуються під час роботи. За необхідністю додатково використовувати рекомендовану літературу.

На початку семестру студент зобов'язаний отримати завдання на РГР у викладача і протягом семестру отримувати консультації по мірі виконання відповідних пунктів завдання. Перелік обов'язкових пунктів приведений нижче. Крім того, студент може збільшити об'єм проведених розрахунків, проводити перевіряюче моделювання за допомогою різних програмних пакетів, розглядати декілька варіантів схем з заміною активних елементів тощо. Такий підхід безумовно заохочується, так як студент в такому випадку отримує більш глибокі знання з дисципліни і вдосконалює навички роботи з програмним забезпеченням.

Робота над РГР повинна бути систематичною. Студент зобов'язаний періодично, в обумовлені строки, звітувати про виконану роботу у відповідності з навчальною робочою програмою курсу.

Під час виконання РГР необхідно дотримуватися правил оформлення, котрі приведені в третьому розділі даних методичних вказівок, не порушувати строки звітування, регулярно відвідувати планові консультації.

Найчастіше студент допускає наступні помилки:

- виконані не всі пункти завдання;
- в наведених схемах не наведені номінали елементів;
- невірно складені моделі схем для різноманітних режимів роботи;
- графіки оформлені невірно, з чого випливає, що студент не розуміє суті виконаної роботи;
- АЧХ і ФЧХ виконані в різних масштабах по вісі частот, що затрудняє їх аналіз;
- при дослідженні впливу елементів схеми на її роботу наведені не сімейства графіків, а окремі графіки для АЧХ і ФЧХ, що затрудняє аналіз;
- в кінцевому результаті присутні власні позначення студента, зміст яких не розкритий;
- висновки зроблені формально і не відповідають виконаній роботі;
- невірно оформлено титульний лист;
- не пронумеровані сторінки РГР.

Перед здачею РГР на перевірку необхідно перевірити її оформлення і ліквідувати ці та інші очевидні помилки.

При захисті РГР студент зобов'язаний відповісти на зауваження викладача, які виникли під час перевірки, показати самостійність

виконання РГР, показати знання відповідних розділів лекційного матеріалу.

Критерії оцінки приведені в навчальній робочій програмі дисципліни "Моделювання електронних схем".

## 2 Завдання на розрахунково-графічну роботу

Отримавши індивідуальне завдання, тобто схему електричну принципову, яка має не менше двох активних елементів, студент повинен виконати наступні обов'язкові пункти завдання:

- замінити нестандартні номінали пасивних елементів на номінали зі стандартних рядів для конденсаторів та резисторів;
- у випадках відсутності в бібліотеках програм моделювання активних компонентів заданих транзисторів та операційних підсилювачей замінити їх на наявні аналоги;
- скласти еквівалентну схему заміщення заданої схеми для роботи на середніх частотах за малого сигналу;
- скласти еквівалентну схему заміщення заданої схеми для роботи на середніх частотах за великого сигналу;
- побудувати амплітудно-частотну (АЧХ) та фазочастотну (ФЧХ) характеристики для коефіцієнтів підсилення за напругою схеми;
- побудувати АЧХ і ФЧХ вхідного опору схеми;
- розглянути вплив параметрів схеми на АЧХ і ФЧХ коефіцієнта підсилення по напрузі;
- отримати вираз для коефіцієнта підсилення за напругою та вхідної провідності;
- зробити висновки по роботі.

Під час дослідження впливу окремих елементів схеми на її роботу по черзі змінюються значення номіналів не менше трьох елементів схеми (чи групи елементів, як, наприклад, у випадку Т – образного мосту). Для кожного елемента схеми розглядаються не менше трьох значень номіналів.

Крім того, в залежності від схеми, студент повинен визначити такі параметри, як частота зрізу, полоса пропускання, добротність та інше.

## **3 Оформлення розрахунково-графічної роботи**

Розрахунково-графічна робота повинна бути оформлена у відповідності до вимог ДСТУ 3008-95 та ЄСКД.

### **3.1 Структура РГР**

Пояснювальна записка до РГР з дисципліни “Моделювання електронних схем” повинна містити:

- титульний лист;
- зміст;
- лист мети та завдання;
- спецчастину;
- висновки;
- список використаної літератури.

### **3.2 Зміст РГР**

#### **Титульний лист**

На титульному листі вказують назву навчального закладу, назву кафедри, назву дисципліни, хто виконав і перевірів роботу, місто та рік. В додатку А приведено приклад оформлення титульного листа.

#### **Зміст**

Приводиться зміст РГР, який повинен містити всі розділи окрім титульного листа з вказуванням сторінок. Спецчастина РГР розбивається на потрібну кількість розділів, що відповідають закінченим етапам виконання роботи. На титульному листі номер сторінки не вказується, але при нумерації сторінок він враховується.

#### **Лист мети та завдання**

На цьому листі приводиться мета РГР, індивідуальне завдання, отримане студентом (схема електрична принципова, номінали елементів), перелік необхідних для виконання пунктів, а також список замін номіналів елементів на номінали з стандартних рядів (з вказуванням ряду) та список замін активних компонентів на їх аналоги, що є в бібліотеках моделей.

#### **Спецчастина**

Містить опис та виконання пунктів завдання РГР, що наведені в розділі 2 (окрім двох перших і останнього). В еквівалентних схемах



заміщення рекомендовано виділяти схеми заміщення активних елементів. Необхідно наводити орієнтовні значення параметрів, якщо невідомі точні значення, а також приводити характеристики нелінійних елементів. Перед побудовою частотних характеристик необхідно привести схему, що містить джерела, що задають, та вимірювальні прилади в пакеті PSpice Schematics (або інших, використовуваних при моделюванні). АЧХ та ФЧХ схеми необхідно приводити в одному масштабі по вісі частот. Коментарі до роботи повинні бути достатніми, щоб викладач міг впевнитись в розумінні студентом суті виконуваної роботи. При побудові топологічної моделі схеми бажано виділяти моделі активних елементів та обов'язково проводити коректне спрощення моделі. Вирази для схемних функцій представляються в загальному вигляді.

### **Висновки**

Проводиться докладний аналіз виконаної роботи, її відповідність меті та завданню. Рекомендується робити частинні висновки після кожного етапу виконання роботи, тоді кінцеві висновки будуть узагальнюючими та достатньо короткими. Студент може відмітити використані їм оригінальні рішення, додаткові розрахунки та перевірки, а також ускладнення, що виникли під час роботи над КР та побажання щодо її вдосконалення.

### **Список використаної літератури**

Перераховується література, що використовувалась при виконанні КР. Бажано, щоб на неї були посилання в тексті роботи.

## 4 Теоретичні відомості

При складанні моделей електронних схем необхідно, по-перше, визначити в якому режимі буде працювати ця схема: в режимі великого чи малого сигналу (лінійний чи нелінійний), на низьких НЧ, середніх СЧ або високих частотах. Далі необхідно вибрати еквівалентні схеми заміщення активних та пасивних компонентів, відповідні даному режимі роботи і з'єднати їх відповідно схемі.

Після складання загальної еквівалентної схеми заміщення необхідно описати її роботу за допомогою лінійних або диференціальних рівнянь, окремо описати всі нелінійні елементи, крім того необхідно привести значення параметрів моделей. Тільки після цього можна проводити чисельний розрахунок поведінки заданої схеми для вибраного режиму роботи.

Питання визначення параметрів моделей для лінійного і нелінійного режимів роботи достатньо складні і розглядаються в лекційному курсі та на лабораторних заняттях. Крім того, в даній роботі не розглядається аналітичний розрахунок електронних схем (це предмет курсу «Аналіз електронних схем»), а лише підготовка до нього. Моделювання роботи схеми проводиться за допомогою стандартних програмних пакетів на персональному комп'ютері.

### 4.1. Моделі транзисторів для малого сигналу

В режимі малого сигналу біполярні (БТ) та польові (ПТ) транзистори, а також IGBT можуть описуватись системами  $H$ ,  $Z$ ,  $Y$  параметрів, які детально розглядаються в літературі та лекційному курсі. Визначення цих параметрів проводиться за відповідними характеристиками ПТ і БТ. Основним недоліком таких еквівалентних схем є наявність в них двох залежних джерел з відповідними коефіцієнтами передачі, які залежать від положення робочої точки активного елемента.

Цей недолік усувається в малосигнальних моделях БТ і ПТ, які мають одне залежне джерело струму або напруги. Так, найвищу точність розрахунків на робочих частотах до 100МГц дає еквівалентна схема заміщення БТ, наведена на рисунку 4.1.

Елементи  $R_B$ ,  $C_{BE}$ ,  $C_{BK}$ ,  $C_{KE}$ ,  $Y_{BE}$ ,  $Y_{BK}$ ,  $Y_{KE}$ ,  $S$  – являються параметрами моделі, їх необхідно визначити для відповідного транзистора за його статичними характеристиками, а також за частотними чи перехідними характеристиками, використовуючи методи математичної апроксимації реальних характеристик з заданою точністю.

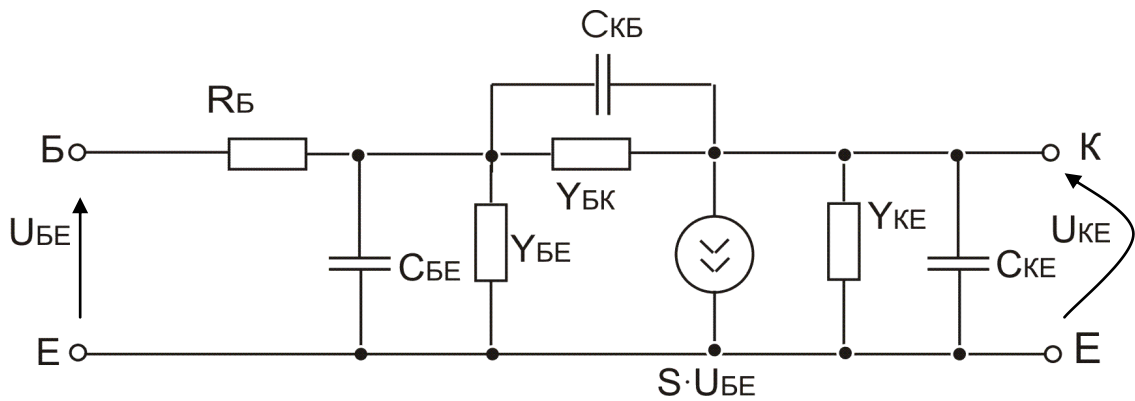


Рисунок 4.1 – Гібридна  $\Pi$  – образна схема заміщення БТ для середніх частот

Дана еквівалентна схема містить внутрішній вузол, що ускладнює аналітичні розрахунки. Оскільки найменшим опором в схемі являється  $R_B$ , значення якого зазвичай складає одиниці Ом, або можна знехтувати, або «розподіливши» його між  $Y_{BE}$  та  $Y_{BK}$ . Внутрішній вузол при цьому зникає, аналітичні розрахунки спрощуються. На низьких частотах немає необхідності враховувати ємності і еквівалентна схема заміщення приймає вигляд, який наведено на рисунку 4.2.

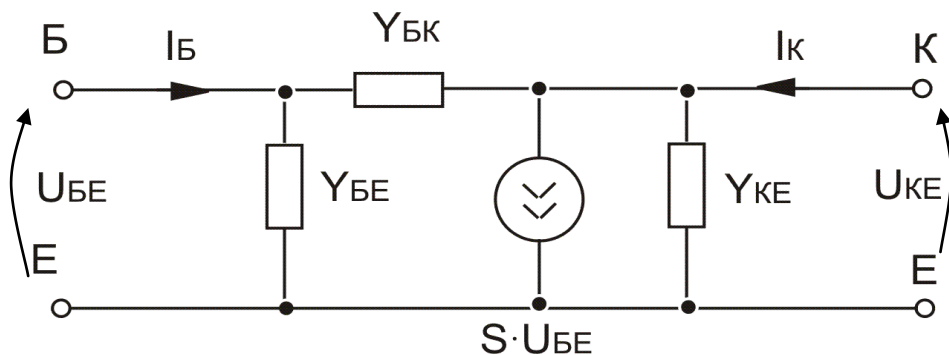


Рисунок 4.2 – Схема заміщення БТ на НЧ

Легко переконатися, що така схема описується наступним рівнянням в матричному вигляді відносно емітерного вузла:

$$\begin{vmatrix} Y_{BE} + Y_{BK} & -Y_{BK} \\ S - Y_{BK} & Y_{BK} + Y_{KE} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} U_{BE} \\ U_{KE} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} I_B \\ I_K \end{vmatrix} \quad (4.1)$$

Для врахування БТ в матричному рівнянні схеми необхідно вкласти його розширену  $[Y]$  матрицю в матрицю провідностей всієї схеми. Якщо потрібна невисока точність розрахунків, можна виключити із еквівалентної схеми (та із матриці провідностей)  $Y_{BK}$ , через яку протікає малий струм. В такому випадку залишається тільки вхідний, вихідний опір і одне залежне джерело струму. Для оціночних розрахунків (поведінки) роботи схеми цього зазвичай достатньо.

Інший поширений варіант еквівалентної схеми заміщення БТ для низьких частот наведений на рисунку 4.3.

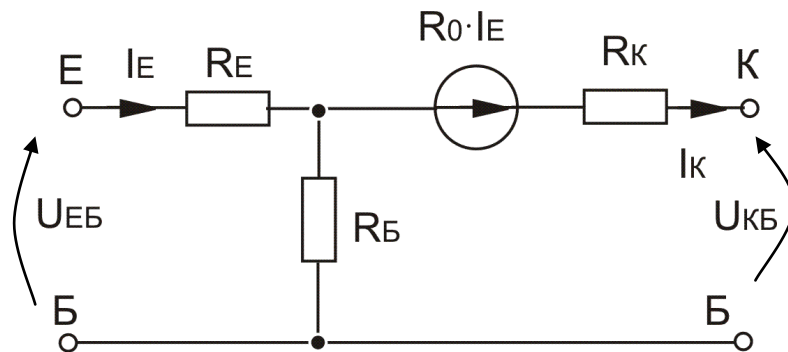


Рисунок 4.3 – Схема заміщення БТ на НЧ по схемі зі спільною базою

З використанням параметрів  $R_E$ ,  $R_K$ ,  $R_B$ ,  $R_0$  дана еквівалентна схема описується матрицею  $Z$ - параметрів за допомогою наступного рівняння:

$$\begin{vmatrix} R_E + R_B & -R_B \\ R_0 - R_B & R_K + R_B \end{vmatrix} \begin{vmatrix} I_E \\ I_K \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} U_{EБ} \\ U_{КБ} \end{vmatrix} \quad (4.2)$$

Необхідно відзначити, що наведені матричні рівняння справедливі у випадку канонічного напрямлення струмів та напруг (як показано на рисунках 4.2 і 4.3). Наведені еквівалентні схеми справедливі для  $n$ - $r$ - $n$  транзисторів. При моделюванні схем з  $p$ - $n$ - $p$  транзисторами змінюється напрямлення залежних джерел  $i$ , відповідно, знак коефіцієнтів передачі в матрицях.

Крім вказаних еквівалентних схем БТ, в літературі наводиться ряд їх аналогів, параметри яких можна отримати по  $Y$  або  $Z$  параметрам наведених схем. Малосигнальні моделі ПТ аналогічні розглянутим вище, але вони простіші, оскільки струм затвору ПТ малий. Так, на СЧ ПТ може бути представлений, як показано на рисунку 4.4.

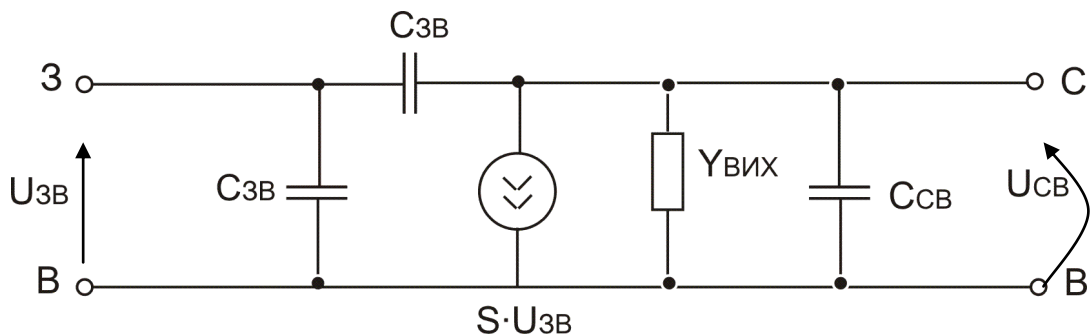


Рисунок 4.4 – Малосигнальна схема заміщення ПТ на НЧ

Оскільки ємність між стоком і витокон ПТ  $C_{CB}$  зазвичай на порядок менша затворних ємностей  $C_{3C}$ ,  $C_{3B}$ , її впливом можна знехтувати. На НЧ із

еквівалентної схеми видаляються всі три ємності і залишаються тільки два елемента. Порядок визначення їх параметрів розглядається в лабораторному курсі. Матриця провідностей, отриманої при цьому схеми, визначається таким чином:

$$\mathbf{Y} = \begin{vmatrix} 0 & 0 \\ S & Y_{\text{вих}} \end{vmatrix} \quad (4.3)$$

В першому наближенні IGBT можна також представити еквівалентною схемою, показаною на рисунку 4.4. Параметри моделі IGBT визначаються в лабораторному курсі.

## 4.2. Моделі транзисторів для великого сигналу

При аналізі роботи БТ в режимі великого вхідного сигналу використовуються нелінійні динамічні моделі Еберса-Молла, Гумеля-Пуна, моделі, які управляються зарядом і т.д. Вони детально розглядаються в лекційному курсі. Такі моделі зазвичай містять 3-4 нелінійних джерел струму, що управляються.

Наприклад, передаточна модель Еберса-Молла для БТ, наведена на рисунку 4.5.

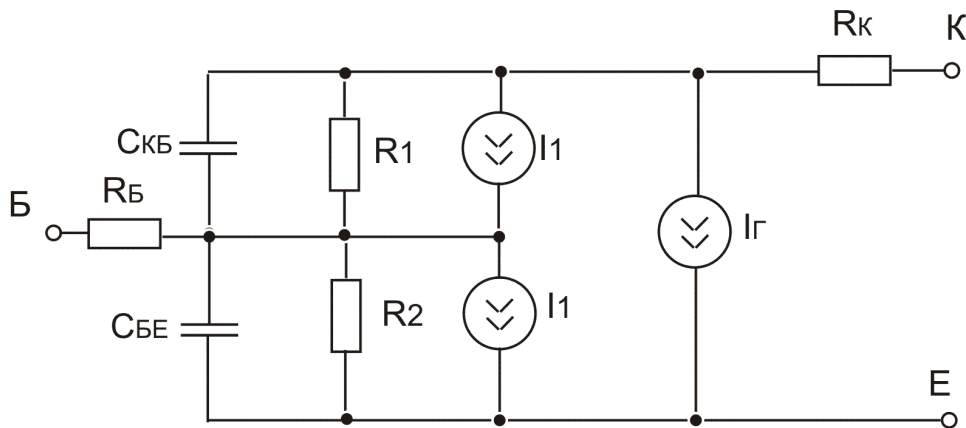


Рисунок 4.5 – Динамічна еквівалентна схема заміщення n-p-n транзистора

Тут  $C_{КБ}$ ,  $C_{ЕБ}$  – сума бар’єрної та дифузійної ємностей відповідно колекторного та емітерного р-n- переходів,

$R_1$ ,  $R_2$  – опори витоку цих же переходів,

$R_B$  – об’ємний і контактний опір області бази,

$R_K$  – об’ємний і контактний опір області колектора та емітера,

$I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_G$  – залежні нелінійні джерела струмів, вирази для яких наведені нижче.

$$I_H = \begin{cases} I_1 = I_{01} \cdot \left( \exp \frac{U_K}{m_K \cdot \varphi_T} - 1 \right), \\ I_2 = I_{02} \cdot \left( \exp \frac{U_E}{m_E \cdot \varphi_T} - 1 \right), \\ I_\Gamma = \beta_H \cdot I_2 - \beta_n \cdot I_1. \end{cases} \quad (4.4)$$

В останні рівняння входять параметри моделі  $I_{01}$ ,  $I_{02}$ ,  $m_E$ ,  $m_K$ ,  $\beta_n$ ,  $\beta_H$ . Фізичний зміст цих параметрів, приблизне значення всіх компонентів еквівалентної схеми, загальна методика визначення цих значень розглядаються в лекційному курсі.

Глобальна динамічна модель БТ для СЧ крім еквівалентної схеми, опис її компонентів значень констант повинно мати диференціальні рівняння (в даному випадку - два), що описують роботу реактивних елементів (конденсаторів), а також рівняння, які зв'язують струми та напруги на зовнішніх клеммах БТ. Вони складаються по відомим законам Ома та Кірхгофа. Записувати такі рівняння студент повинен самостійно для будь-якої еквівалентної схеми.

Під час роботи над курсовою роботою допускається використовувати інші динамічні моделі БТ, якщо студент може розповісти фізичний зміст їх компонентів і описати математичними рівняннями.

Не дивлячись на різноманітний вибір польових транзисторів (з управляючим р-n переходом, з ізольованим затвором, із затвором Шоткі, та інші), еквівалентні схеми заміщення для них найчастіше використовують однакові (рисунок 4.6), однак вирази, котрі описують елементи схем суттєво відрізняються один від одного.

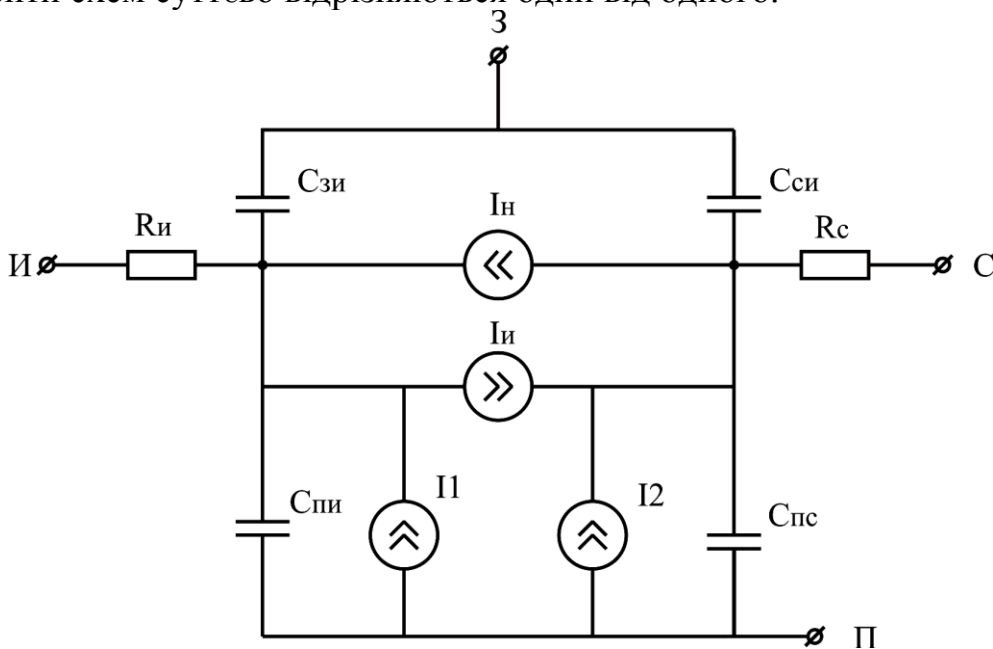


Рисунок 4.6 – Динамічна еквівалентна схема заміщення ПТ для СЧ

В даній схемі приведені елементи, які враховують вплив підложки на роботу ПТ. Це  $C_{пд}$ ,  $C_{пв}$  – сума бар’єрної та дифузійної ємкостей відповідно переходів підложка – витік та підложка – джерело, а також залежні джерела струму  $I_1$   $I_2$ , які моделюють ВАХ ідеального p-n переходу експоненціальної залежності. Якщо точність розрахунків невелика, впливом підложки можна знехтувати, еквівалентна схема спрощується, число диференціальних рівнянь скорочується з чотирьох до двох.

Оскільки єдиної ВАХ для різних видів ПТ немає, то в якості опису джерел  $I_n$   $I_i$  використовується частинно-нелінійна апроксимація ВАХ, що відповідає виду ПТ.

Наприклад, для ПТ із вбудованим каналом n – типу, вираз для джерела  $I_n$ , котрий моделює роботу при нормальному включенні, має вигляд:

$$I_n = \begin{cases} 0, \text{ при } U_{вд} < 0, \\ 0, \text{ при } U_{зд} < U_{пор}, \\ B[(U_{зд} - U_{пор}) \cdot U_{вд} - \frac{U_{вд}^2}{2}](1 + \lambda \cdot U_{вд}) \text{ при } U_{зд} - U_{пор} \geq U_{вд}, \\ \frac{B}{2}(U_{зд} - U_{пор})^2 \cdot (1 + \lambda \cdot U_{вд}) \text{ при } U_{зд} - U_{пор} \leq U_{вд}. \end{cases} \quad (4.5)$$

В цьому прикладі  $U_{вд}$ ,  $U_{зд}$  – відповідно, напруга між витіком і джерелом,  $U_{пор}$  – порогова напруга, тобто напруга на затворі, при якому струм витіку ще вважається рівним нулю, (1мкА)  $\beta$ ,  $\lambda$  – параметри апроксимації.

Аналогічною системою рівнянь описується джерело  $I_n$ , що моделює роботу ПТ при інверсному включенні. Ємності між затвором і витіком, затвором і джерелом ( $C_{зв}$ ,  $C_{зд}$ ) вважаються постійними, вони не залежать від напруги на зовнішніх клеммах. Об’ємні опори областей джерела і витіку враховують тільки для потужних ПТ у випадках протікання великих струмів.

Математична модель ПТ додатково включає диференціальні рівняння, які описують перезарядку ємностей, а також рівняння, котрі зв’язують струми та напруги на зовнішніх клеммах.

Необхідно пам’ятати, що із різноманітності еквівалентних схем різних елементів, котрі приводяться в даному курсі та в літературі, необхідно вибирати саме такі, які відповідають режиму роботи схеми, яка розглядається (про що сказалось вище), і потрібної точності моделювання. Надмірна точність уявлення компонентів призводить не тільки до підвищення точності розрахунків, але й до підвищення складності і часу аналізу.

### 4.3 Моделі операційних підсилювачів

При складанні моделей електронних схем з операційними підсилювачами (ОП), які працюють в лінійному режимі, зазвичай враховується, що вхідний опір  $R_{вх} \neq \infty$ , вихідний опір  $R_{вих} \neq 0$ , коефіцієнт підсилення ОП  $K_U \neq \infty$ . Відповідна еквівалентна схема заміщення приведена на рисунку 4.7 а). При перебудові залежного джерела напруги в залежне джерело струму схема набуде вигляду, приведенного на рисунку 4.7 б).

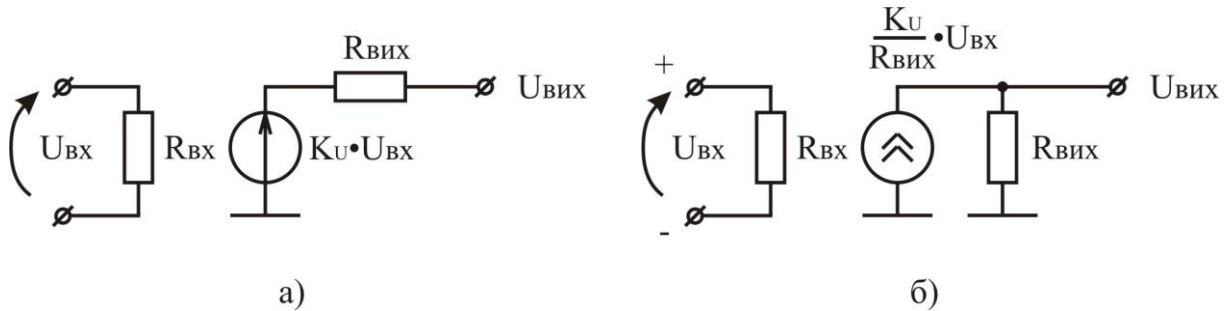


Рисунок 4.7 – Еквівалентні мало сигнальні схеми заміщення ОП

Дані схеми заміщення використовуються також при моделюванні роботи типових схем включення ОП зі зворотнім зв'язком та з реактивними елементами в операторній області.

При моделюванні роботи схем з ОП, що працюють в динамічному режимі при великому сигналі, можна використовувати схему заміщення, приведену на рисунку 4.8.

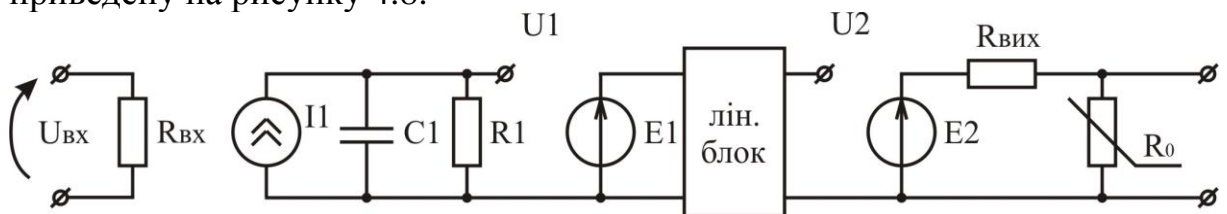


Рисунок 4.8 – Еквівалентна схема заміщення ОП при великому сигналі

На рисунку:

$R_{вх}$  – вхідний опір ОП при диференціальному включенні,

$R_{вих}$  – вихідний опір ОП,

$R_0$  – нелінійний опір, що дозволяє обмежити рівень вихідної напруги, характеристика якого приведена на рисунку 4.9 а),

$I1$  – залежне джерело, у сукупності з конденсатором  $C1$  моделює підсилення ОП та кінцеву швидкість наростання вихідної напруги. Його характеристика приведена на рисунку 4.9 б),

$R1 \cdot C1$  – ланцюг, що моделює першу точку перегину АЧХ ОП  $\omega_1$ ,



лін. блок – лінійний блок, використовується за необхідності моделювання АЧХ ОП на високих частотах, являє собою сукупність RC-ланцюжків,

$E1=U1$ ,  $E2=U2$  – джерела, що вводяться в схему для того, щоб наступний вузол не був навантаженням попереднього.

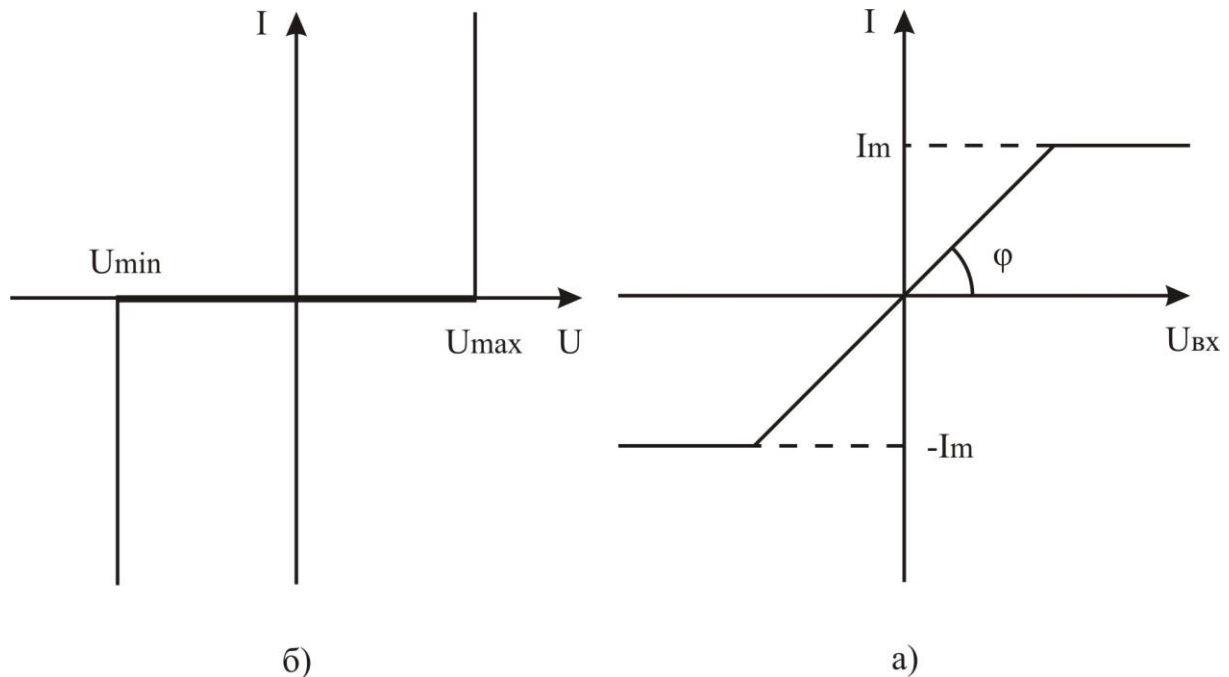


Рисунок 4.9 – Характеристики нелінійного опору  $R_0$  (а) та нелінійного джерела  $I_1$  (б)

При цьому

$$I_m = C_1 \cdot \frac{dU_{вих}}{dt}, \quad (4.6)$$

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{K_U}{R_1}, \quad (4.7)$$

$$\omega_1 = R_1 \cdot C_1. \quad (4.8)$$

Таким чином, параметри елементів еквівалентної схеми легко визначаються, так як  $R_{вх}$ ,  $R_{вих}$ ,  $\omega_1$ ,  $K_U$ ,  $\frac{dU_{вих}}{dt}$ ,  $U_{max}$ ,  $U_{min}$  є довідниковими величинами.

## 5 Приклад аналізу полосового фільтру

В якості прикладу розглянемо схему високочастотного полосового фільтру на ОП, приведеного на рисунку 5.1.

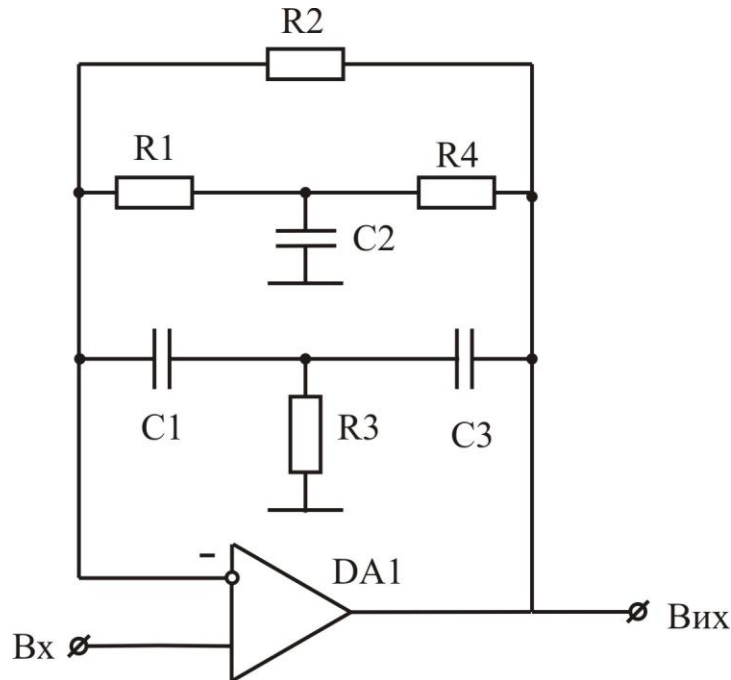


Рисунок 5.1 – Схема полосового фільтру з двійним Т-мостом

Нехай дано такі номінали елементів:

$R_1, R_4 - 1\text{кОм};$

$R_2, R_3 - 100\text{кОм};$

$C_1, C_3 - 1\text{нФ};$

$C_2, C_4 - 100\text{нФ};$

DA1 – Lm318.

В даному випадку всі номінали пасивних елементів відповідають стандартним рядам, модель ОП знаходиться в бібліотеці, тобто нема потреби змінювати параметри схеми. Однак, студент може відмітити, що параметри Т-моста не є рекомендованими, (тобто  $R_3 \neq \frac{R_1}{2}$ ,  $C_2 \neq 2 \cdot C_1$ ), в результаті понижується добротність фільтру. Крім того, додатково можна побудувати АЧХ фільтру з рекомендованим відношенням та показати його перевагу за якістю фільтрації.

При складанні еквівалентної схеми заміщення фільтру для лінійного режиму роботи будемо використовувати еквівалентну схему ОП, приведену на рисунку 4.7 а) або б), при цьому студент повинен окремо пред'явити вибраний варіант. Пасивні елементи покажемо у вигляді елементарних моделей, що відповідає робочому частотному діапазону. У такому випадку відповідна малосигнальна модель фільтру має вигляд:

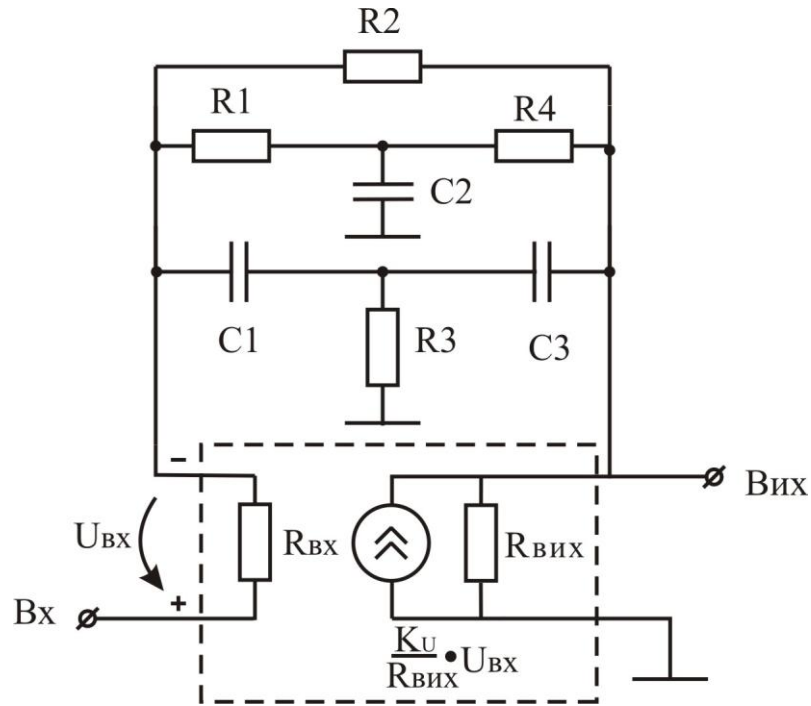


Рисунок 5.2 – Малосигнальна схема заміщення фільтра для СЧ

На рисунку штрих пунктиром виділена схема, що використовується для заміщення ОП. Її параметри повинні бути наведені в роботі. Значення  $R_{вх}$ ,  $R_{вих}$ ,  $K_U$  беруться з відповідних довідників, або знаходяться студентом самостійно за методиками, які розглядаються в лабораторному курсі з даної дисципліни.

Для виконання наступного пункту завдання використовується еквівалентна схема заміщення ОП в режимі великого сигналу, наведена на рисунку 4.8. Моделі пасивних компонентів залишаються простими. Відповідна еквівалентна схема зображена на рисунку 5.3.

Штрих пунктиром виділена схема заміщення ОП. Лінійний блок використовувати не обов'язково, оскільки робочі частоти такого фільтра складають десятки кГц. В додаток до такої схеми необхідно привести характеристики нелінійних елементів  $I_{11}$ ,  $R_0$  (див. рисунок 4.9), а також розрахунок параметрів моделі ОП, методика котрого приведена вище та їх фізичний зміст.

При використанні схем заміщення пасивних та активних елементів студент може змінювати їх (як в даному випадку), обґрунтувавши своє рішення. Оскільки точне визначення параметрів динамічних моделей транзисторів важке, необхідно приводити діапазони значень, котрі вони не можуть мати. Параметри ОП студент в змозі визначити точно.

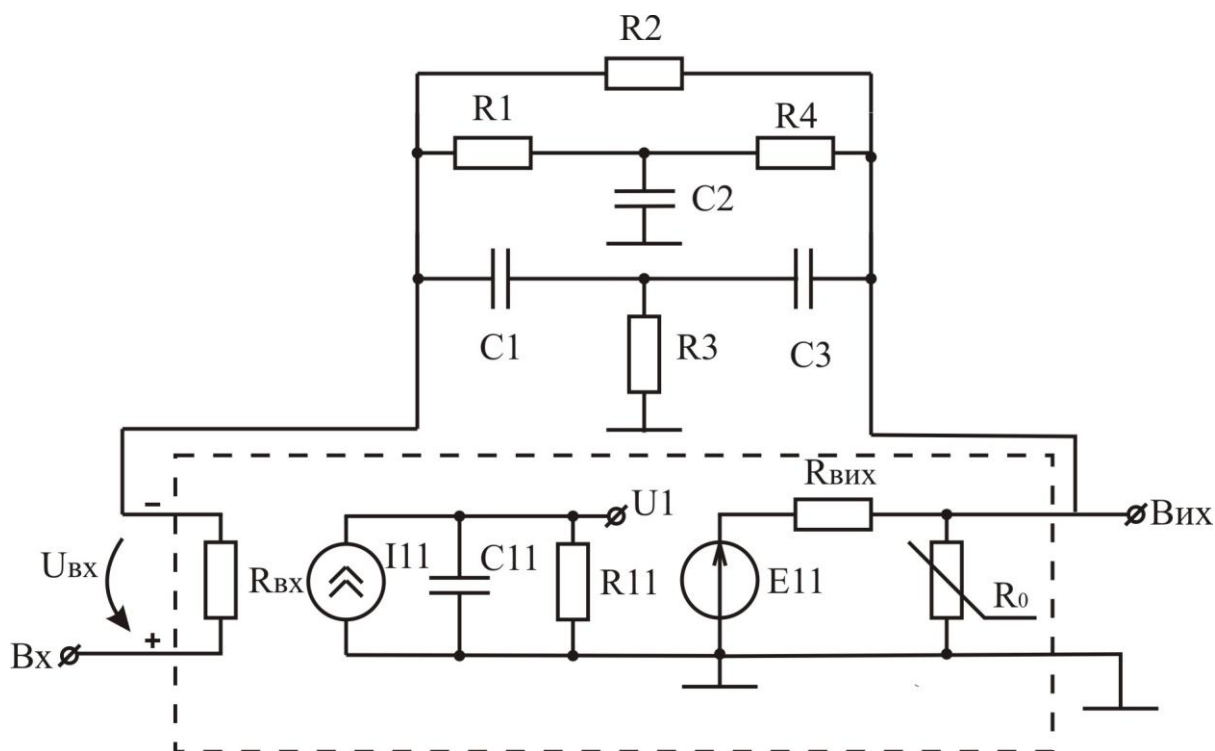


Рисунок 5.3 – Еквівалентна схема фільтра для великого сигналу

Визначення параметрів моделей – це важлива складова частина КР, оскільки вона являється ланцюгом, що зв'язує лекційний і лабораторний курси.

Для моделювання фільтра в програмі PSpice будемо схему з урахуванням джерел, що задаються та вимірюючих пристроїв, котрі показані на рисунку 5.4.

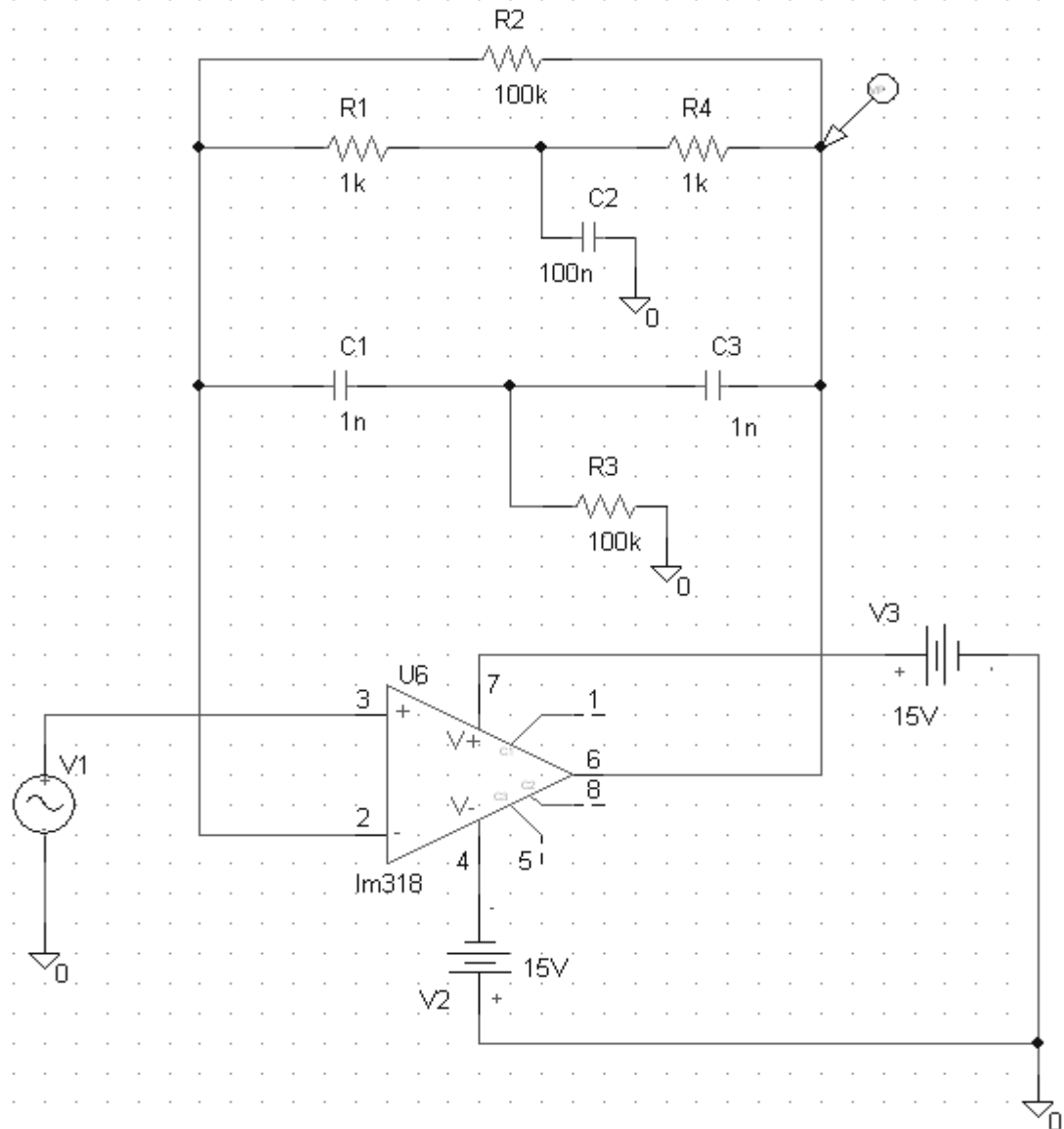


Рисунок 5.4 – Схема моделювання прибору в програмі PSpice

Дослідження амплітудно-частотних (АЧХ) та фазочастотних (ФЧХ) характеристик підключимо на вхід схеми генератор синусоїдальної напруги з амплітудою вихідного сигналу 1 В. Для отримання АЧХ будемо ставити маркер Voltage/Level, а для ФЧХ – маркер Phase of Voltage. При дослідженні АЧХ вхідної провідності на вході схеми послідовно з генератором включимо струмовий датчик (на схемі не вказаний) – резистор опором 1 Ом, на який поставимо маркер Voltage Differential, а для ФЧХ поставимо маркер Phase of Voltage одразу після струмового датчика. Далі послідовною зміною трьох довільних елементів побудуємо сімейство АЧХ і ФЧХ та визначимо їх вплив на роботу схеми.

В результаті моделювання отримуємо АЧХ і ФЧХ заданої схеми, які приведені на рисунках 5.5, 5.6.

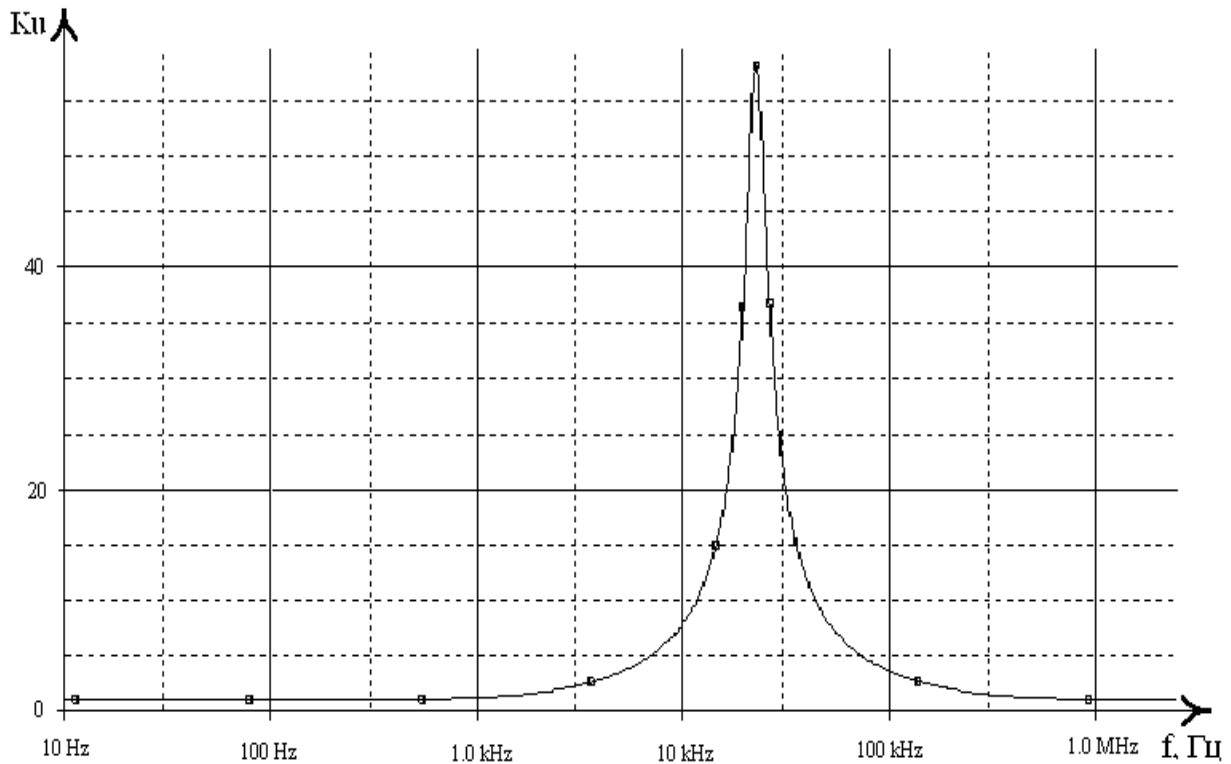


Рисунок 5.5 – АЧХ заданої схеми

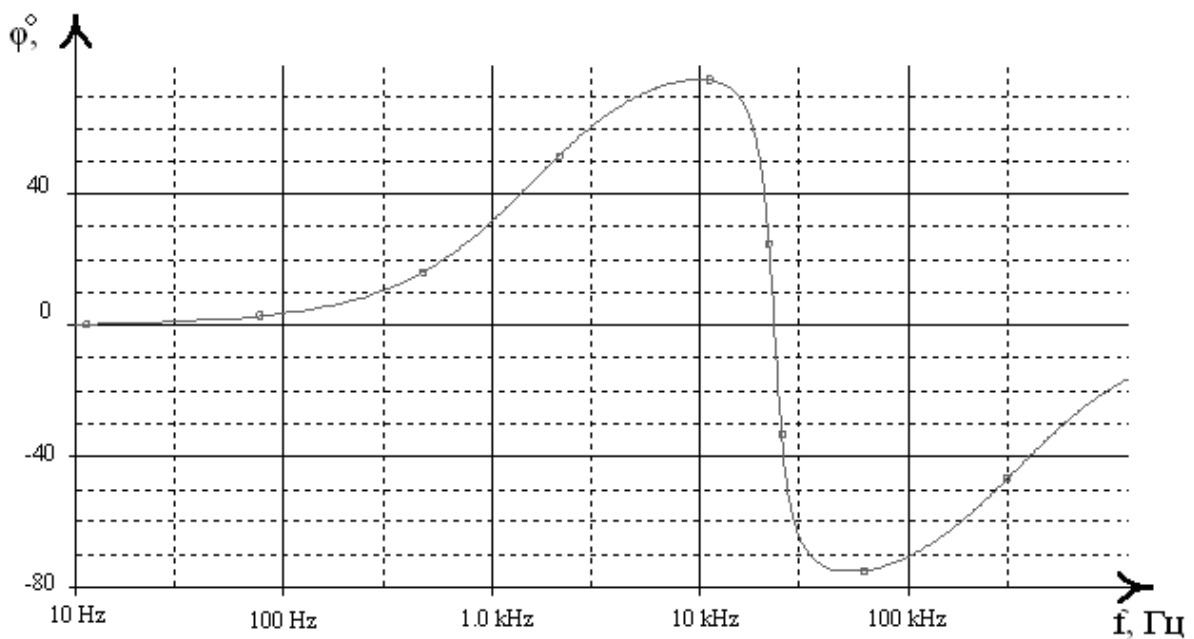


Рисунок 5.6 – ФЧХ заданої схеми

На початковому етапі моделювання можна встановити діапазон частот, в якому АЧХ і ФЧХ дуже не змінюються і навести ці характеристики тільки в робочому діапазоні. В цьому випадку необхідно вказати значення характеристик  $\omega \rightarrow 0$  та  $\omega \rightarrow \infty$ . Крім того, можна навести АЧХ і ФЧХ в різних масштабах. При побудові ФЧХ необхідно пам'ятати,

що  $\text{tg}(\alpha)=\text{tg}(\alpha\pm\pi)$ , програма може неправильно розглядати фазовий зсув схеми і допускати розриви першого роду в графіку ФЧХ. Початковий фазовий зсув студент повинен оцінити за схемою, використовуючи знання, отримані в курсах “Теорія автоматичного управління” та “Аналогова схемотехніка”. Графік ФЧХ повинен бути неперервним. АЧХ допускається будувати в звичайному або логарифмічному масштабах.

В даному випадку характеристики приводяться для частот від 0 до 1МГц.

$$\text{При цьому } K_U(0) = 1; K_U(\omega) \Big|_{\omega \rightarrow \infty} = 0; \phi(0) = 0; \phi(\omega) \Big|_{\omega \rightarrow \infty} = -\pi.$$

Оскільки дана схема представляє собою полосовий фільтр, для неї можна визначити добротність  $Q$ , резонансну частоту  $\omega_{\text{рез}}$ , та полосу пропускання  $\Delta f$ . Як видно з АЧХ даний фільтр має  $\omega_{\text{рез}}=22,560\text{Гц}$ , ширина смуги пропускання  $\Delta f=(25,639-20,012)=5,627\text{кГц}$ . Тоді добротність даного фільтра  $Q= f_0/\Delta f=22,260 \cdot 10^3/5,627 \cdot 10^3=4,01$ , що говорить про те, що даний фільтр є низько добротним, а також має коефіцієнт підсилення за напругою на частоті  $f_0=22,560\text{кГц}$ :  $K_U = 58.201$ .

За отриманими даними студент може зробити висновки про якість фільтру та області його використання.

Аналогічно обов'язково побудувати частотні характеристики вхідного опору схеми (або провідності – по вибору студента). Також, можна зробити висновки про якість схеми за значенням опору на різних частотах та її вплив на роботу попередніх каскадів.

Процес дослідження впливу параметрів схеми на її роботу аналогічні раніше описаному.

Наприклад, розглянемо вплив резистора  $R_2$  на роботу фільтра. Відповідні сімейства АЧХ і ФЧХ наведені на рисунках 5.7, 5.8.

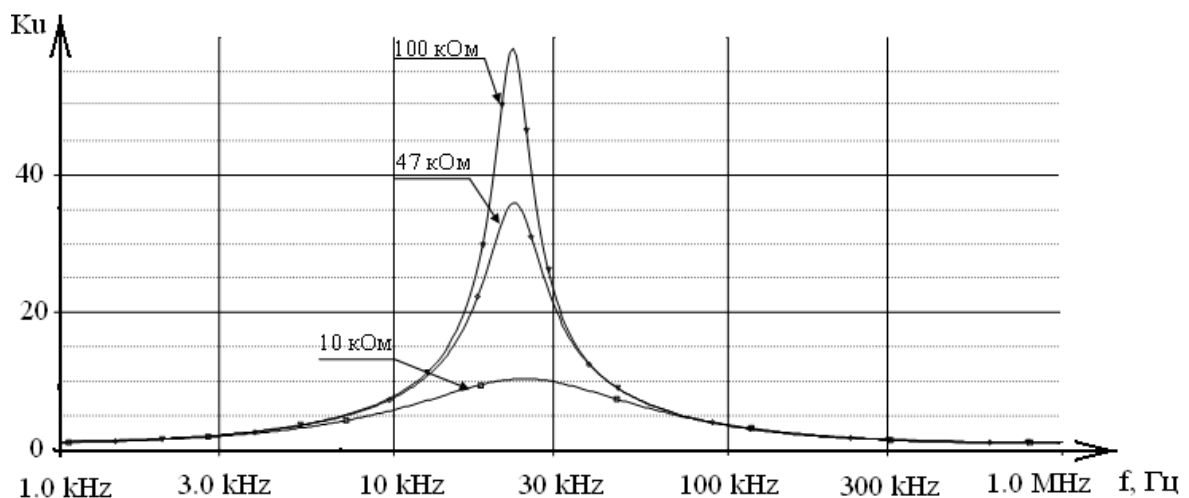


Рисунок 5.7 – Сімейство АЧХ фільтру при зміні  $R_2$

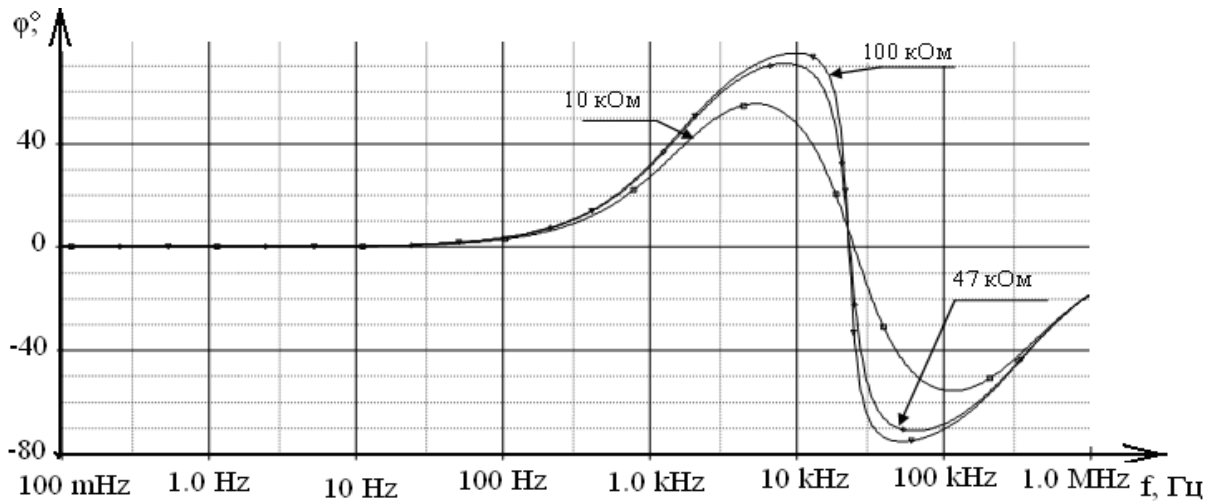


Рисунок 5.8 – Сімейство ФЧХ фільтру при зміні  $R_2$

На сімействах першим графіком відповідає  $R_2=100\text{k}\Omega$ , другим  $R_2=47\text{k}\Omega$ , третім  $R_2=10\text{k}\Omega$ . В даному випадку характеристики АЧХ приводяться для частот від 1кГц до 1МГц, а ФЧХ від 0 до 1МГц.

За отриманими залежностями студент повинен розрахувати резонансні частоти, добротність, зміна коефіцієнта передачі та фазового зсуву, в залежності від зміни параметра  $R_2$ , і зробити відповідні висновки про вплив на працездатність схеми.

Як вказано в завданні, таку процедуру обов'язково повторити ще для двох параметрів (або групи параметрів) схеми, зробити висновки і за можливістю запропонувати оптимальне значення цих параметрів.

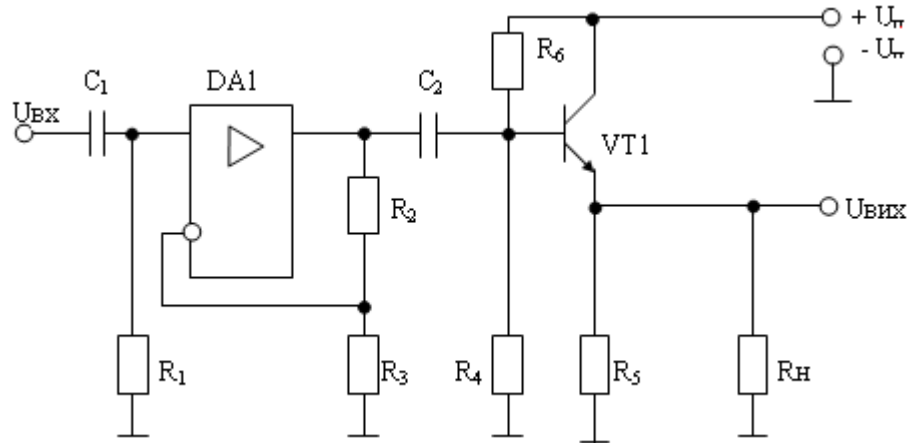
Зміст висновків по РГР, порядок оформлення роботи, здачі на перевірку і захисту описані вище, у відповідних розділах даних "Методичних вказівок".



## 6 Варіанти завдань на розрахунково-графічну роботу

### Варіант №1

#### “Двухкаскадна схема підсилення з ФНЧ на вході”

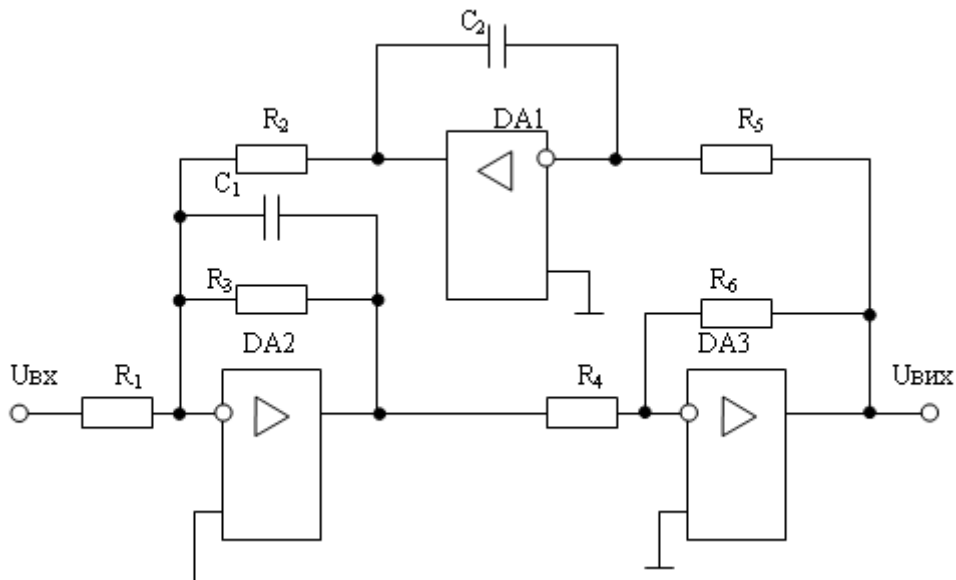


#### Параметри схеми:

$C_1$  - 0,1 мкФ;  $R_2$  - 70 кОм;  $R_5$  - 33 кОм; DA1 - К140УД20;  
 $C_2$  - 0,1 мкФ;  $R_3$  - 32 кОм;  $R_6$  - 17 кОм; VT1 - КТ127А1.  
 $R_1$  - 17 кОм;  $R_4$  - 70 кОм;  $R_н$  - 100 кОм;

### Варіант №2

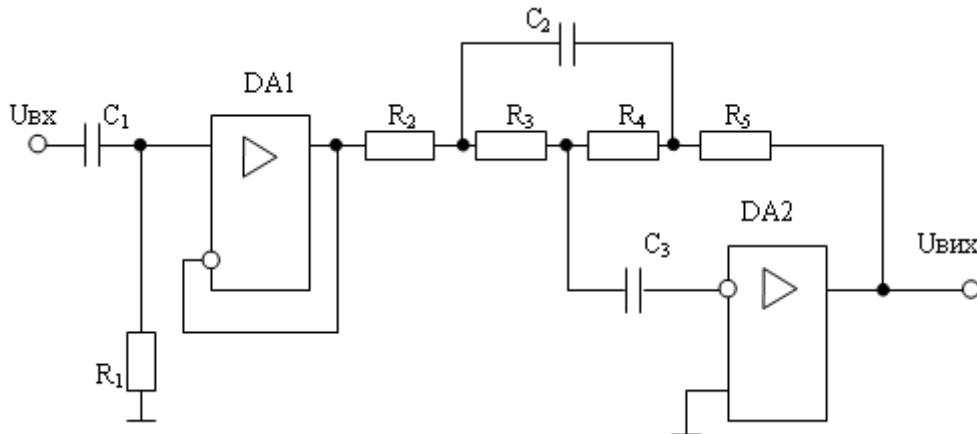
#### “Схема біквдратного смуго-пропускаючого фільтра”



#### Параметри схеми:

$C_1$  - 2,5 нФ;  $R_2$  - 18 кОм;  $R_5$  - 16 кОм; DA1, DA2, DA3 - К574УД3.  
 $C_2$  - 2,5 нФ;  $R_3$  - 330 кОм;  $R_6$  - 16 кОм;  
 $R_1$  - 56 кОм;  $R_4$  - 16 кОм;

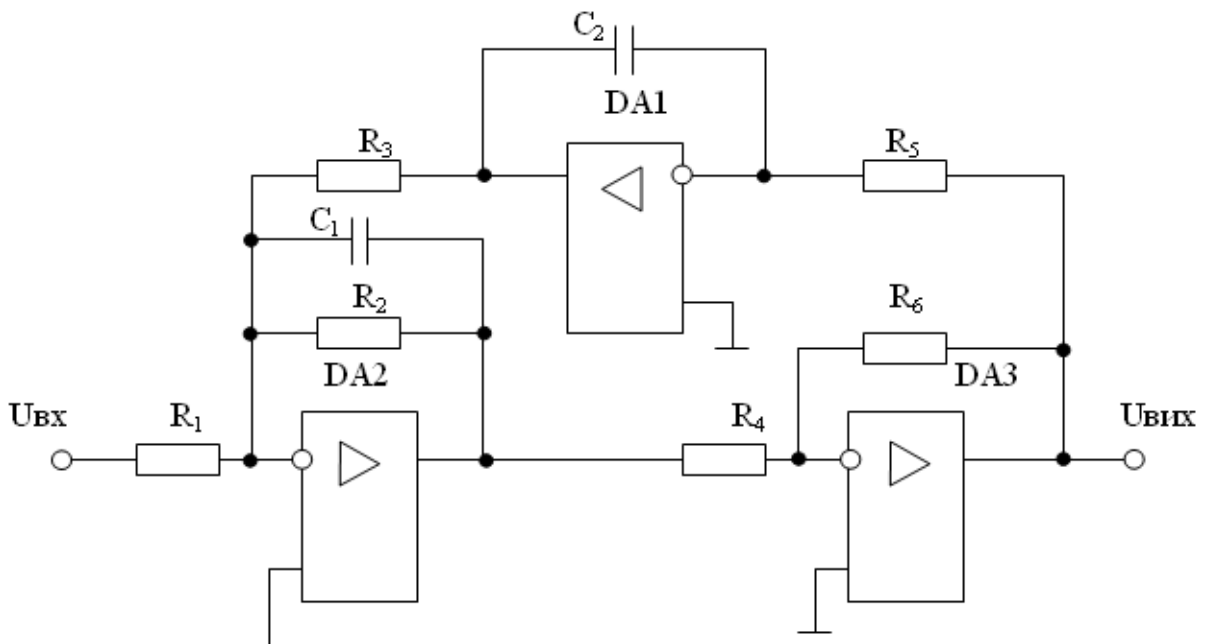
**Варіант №3**  
**“Фільтр високих частот (ФВЧ) з повторювачем на вході”**



**Параметри схеми:**

$C_1$  - 0,22 мкФ;     $R_1$  - 56 кОм;     $R_4$  - 50 кОм;    DA1,DA2-140УД14.  
 $C_2$  - 47 нФ;     $R_2$  - 3,6 кОм;     $R_5$  - 3,6 кОм;  
 $C_3$  - 22 нФ;     $R_3$  - 50 кОм;

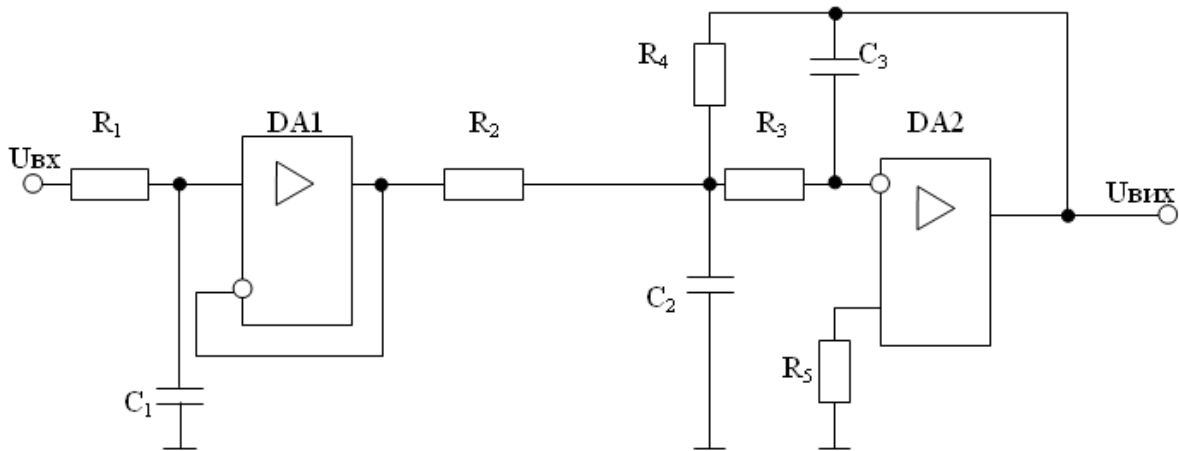
**Варіант №4**  
**“Схема біквдратного смуго-пропускаючого фільтра”**



**Параметри схеми:**

$C_1$  - 3,7 нФ;     $R_2$  - 100 кОм;     $R_5$  - 2300 Ом;    DA1,DA2,DA3 – 140УД17.  
 $C_2$  - 3,7 нФ;     $R_3$  - 2.3 кОм;     $R_6$  - 2300 Ом;  
 $R_1$  - 1000 Ом;     $R_4$  - 2300 Ом;

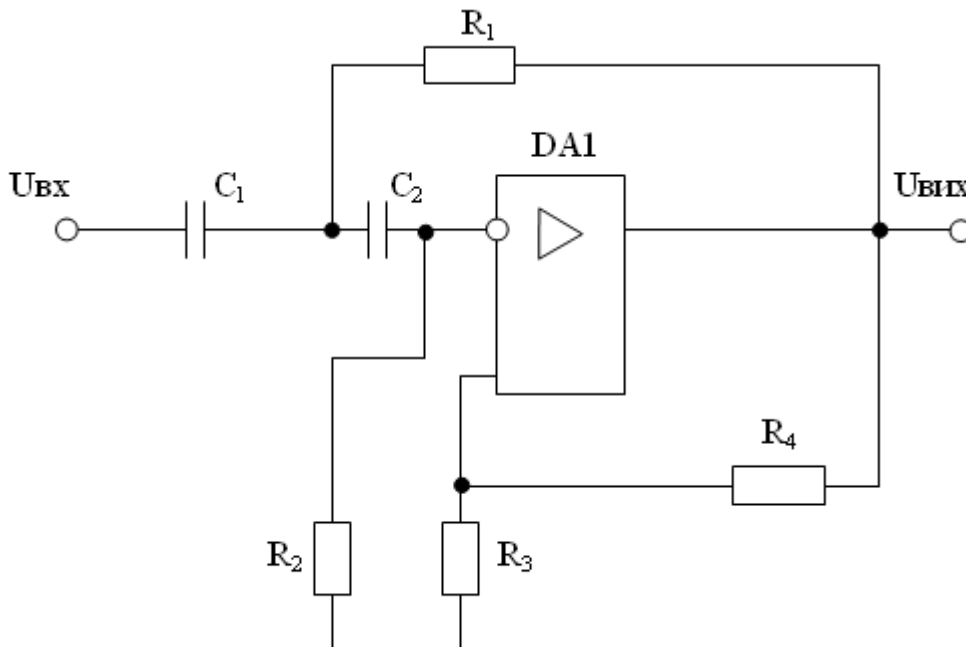
**Варіант №5**  
**“ФНЧ - фільтр низьких частот”**



**Параметри схеми:**

$C_1 - 0,01 \text{ мкФ};$	$R_1 - 16 \text{ кОм};$	$R_4 - 64 \text{ кОм};$
$C_2 - 0,01 \text{ мкФ};$	$R_2 - 64 \text{ кОм};$	$R_5 - 32 \text{ кОм};$
$C_3 - 1,25 \text{ нФ};$	$R_3 - 32 \text{ кОм};$	$DA1, DA2 - K140УД 10.$

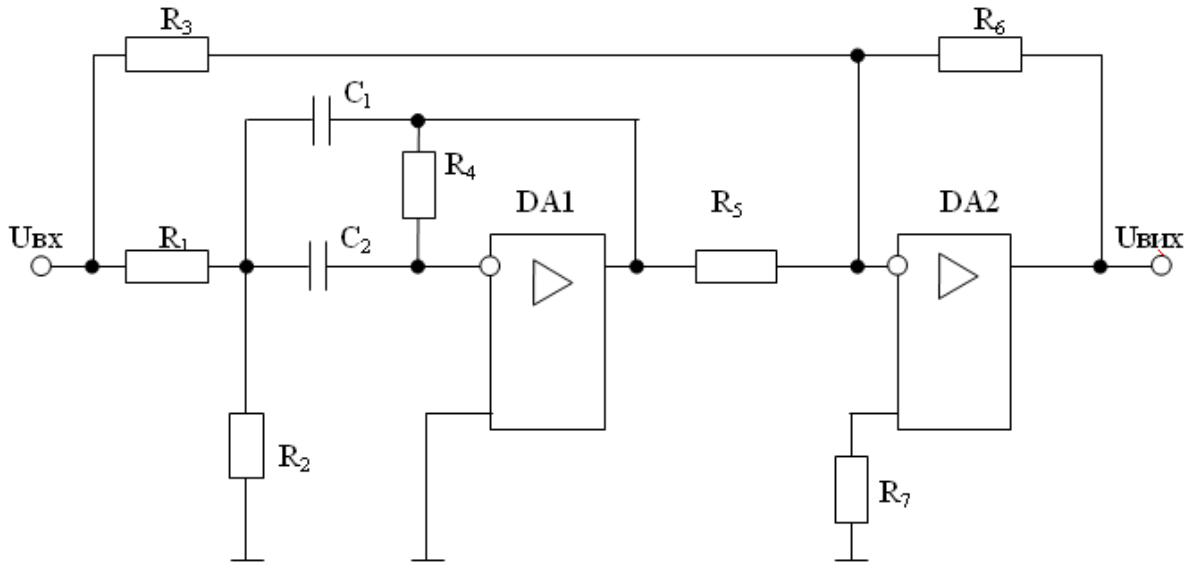
**Варіант №6**  
**“ФВЧ - фільтр високих частот ”**



**Параметри схеми:**

$R_1 - 43 \text{ кОм};$	$R_4 - 71,4 \text{ кОм};$	$C_1 - 2 \text{ нФ};$	$DA1 - 1407УД1.$
$R_2 - 6,2 \text{ кОм};$	$R_3 - 6,8 \text{ кОм};$	$C_2 - 2 \text{ нФ};$	

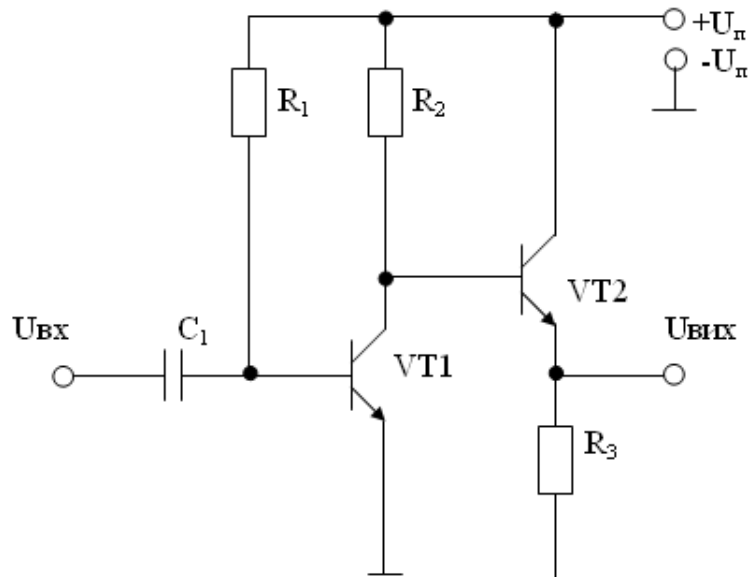
**Варіант №7**  
**“Смуго – загороджуючий фільтр з БЗЗ”**



**Параметри схеми:**

$R_1$  - 82 кОм;      $R_4$  - 330 кОм;      $R_7$  - 1 Ом;     DA1 , DA2 - 140УД7.  
 $R_2$  - 820 кОм;      $R_5$  - 68 кОм;      $C_1$  - 0,1 мкФ;  
 $R_3$  - 33 кОм;      $R_6$  - 68 кОм;      $C_2$  - 0,1 мкФ;

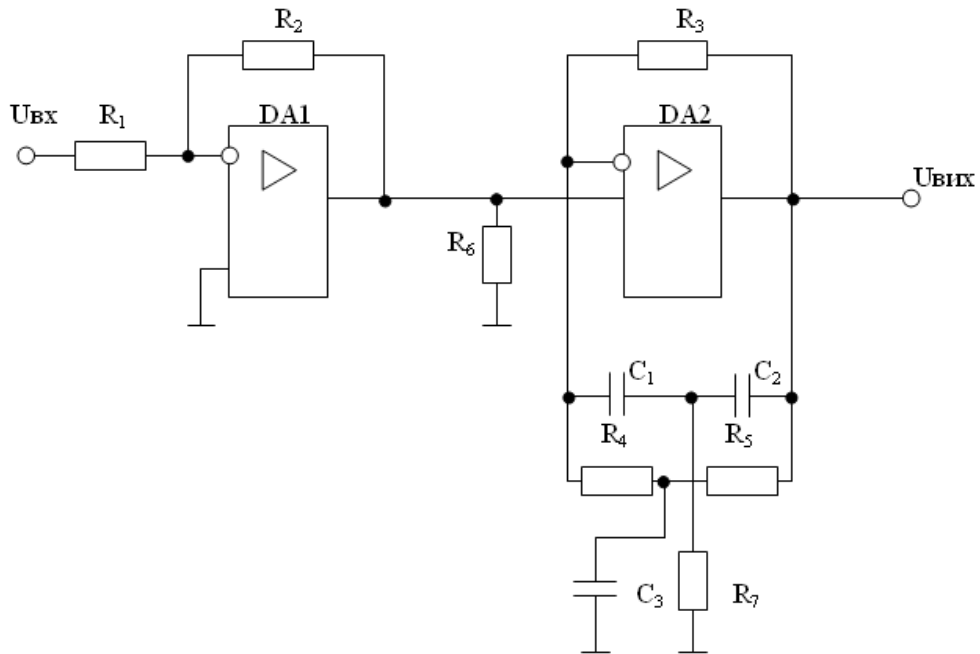
**Варіант №8**  
**“Двухкаскадний підсилювач”**



**Параметри схеми:**

$R_1$  - 5 кОм;      $R_3$  - 3 кОм;     VT1,VT2 – КТ315А.  
 $R_2$  - 1 кОм;      $C_1$  - 4,7 мкФ;

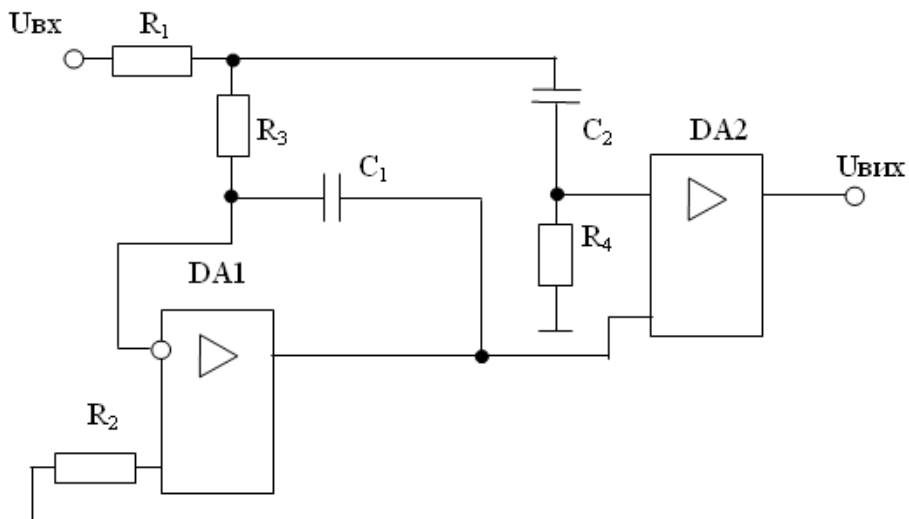
**Варіант №9**  
**“Смуго – пропускаючий фільтр (СПФ)”**



**Параметри схеми:**

$R_1 - 10 \text{ кОм};$	$R_4 - 1 \text{ кОм};$	$R_7 - 2 \text{ кОм};$	$C_3 - 2 \text{ мкФ};$
$R_2 - 100 \text{ кОм};$	$R_5 - 1 \text{ кОм};$	$C_1 - 1 \text{ мкФ};$	$DA1, DA2 - K157UD2.$
$R_3 - 10 \text{ кОм};$	$R_6 - 1 \text{ кОм};$	$C_2 - 1 \text{ мкФ};$	

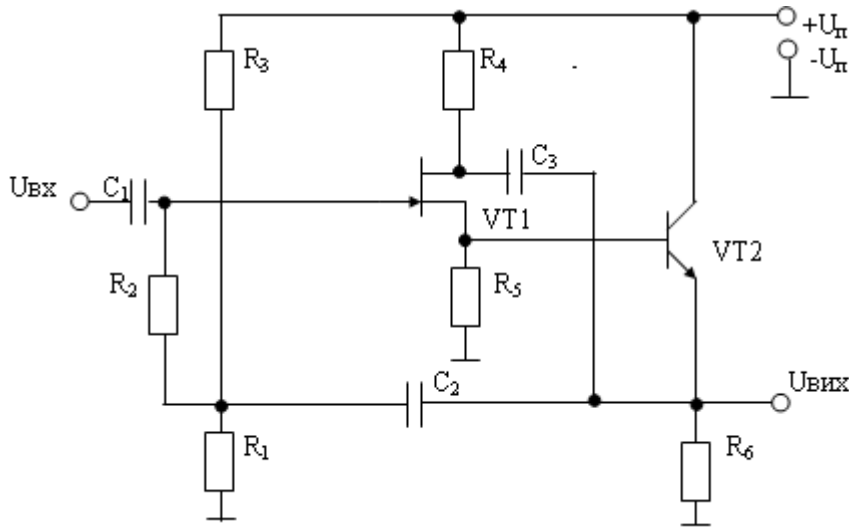
**Варіант №10**  
**“Двухканальний підсилювач”**



**Параметри схеми:**

$R_1 - 10 \text{ кОм};$	$R_3 - 100 \text{ кОм};$	$C_1 - 0,1 \text{ мкФ};$	$DA1 - K140UD7;$
$R_2 - 100 \text{ кОм};$	$R_4 - 100 \text{ кОм};$	$C_2 - 0,1 \text{ мкФ};$	$DA2 - K140UD11.$

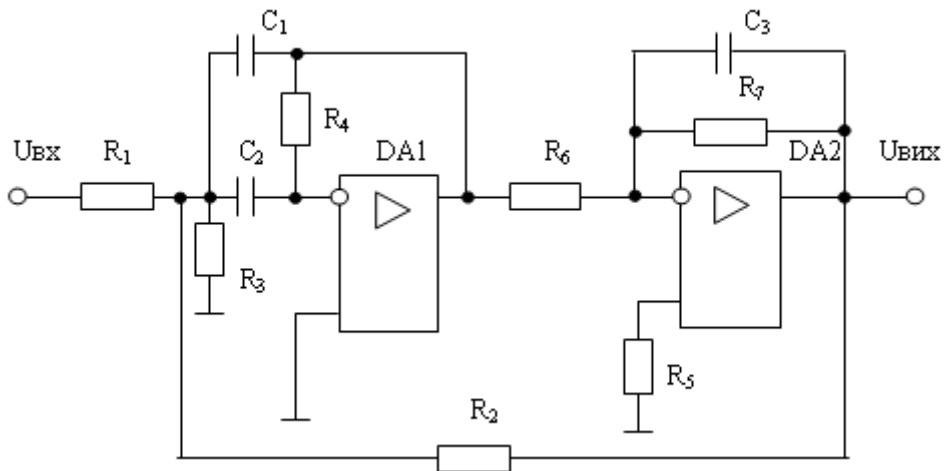
**Варіант №11**  
**“Двухкаскадний підсилювач”**



**Параметри схеми:**

$R_1$ - 1 МОм;	$R_4$ - 10 кОм;	$C_1$ - 1000 пФ;	VT1 – 2П303А;
$R_2$ - 10 МОм;	$R_5$ - 10 кОм;	$C_2$ - 0,1 мкФ;	VT2 – ГТ303В.
$R_3$ - 2,2 МОм;	$R_6$ - 1 кОм;	$C_3$ - 0,1 мкФ;	

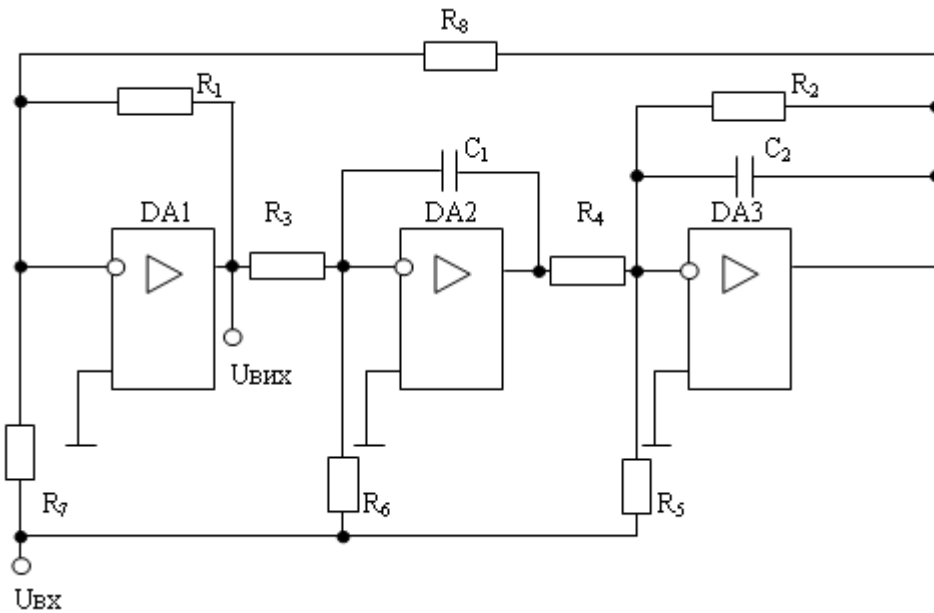
**Варіант №12**  
**“Схема смугового фільтра з T-утворенням мостом у колі ВЗЗ”**



**Параметри схеми:**

$R_1$ - 62 кОм;	$R_4$ - 62 кОм;	$R_7$ - 620 кОм;	$C_3$ - 1 пФ;
$R_2$ - 300 кОм;	$R_5$ - 62 кОм;	$C_1$ - 1 нФ;	DA1, DA2 – 551УД1А.
$R_3$ - 39 кОм;	$R_6$ - 62 кОм;	$C_2$ - 1 нФ;	

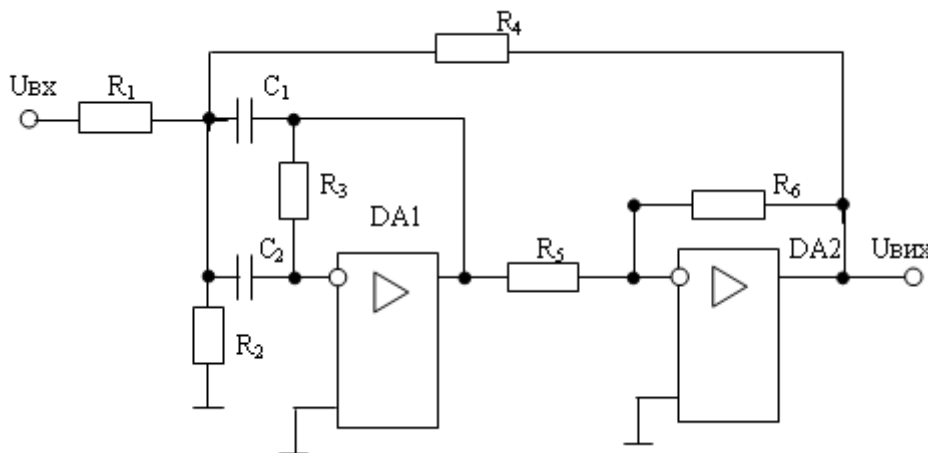
**Варіант №13**  
**“Схема фільтра”**



**Параметри схеми:**

$R_1 - 10 \text{ кОм};$	$R_4 - 20 \text{ кОм};$	$R_7 - 10 \text{ кОм};$	$C_1 - 1 \text{ нФ};$
$R_2 - 270 \text{ кОм};$	$R_5 - 27 \text{ кОм};$	$R_8 - 100 \text{ кОм};$	$C_2 - 1 \text{ нФ};$
$R_3 - 20 \text{ кОм};$	$R_6 - 20 \text{ кОм};$	$DA1, DA2, DA3 - K140UD2.$	

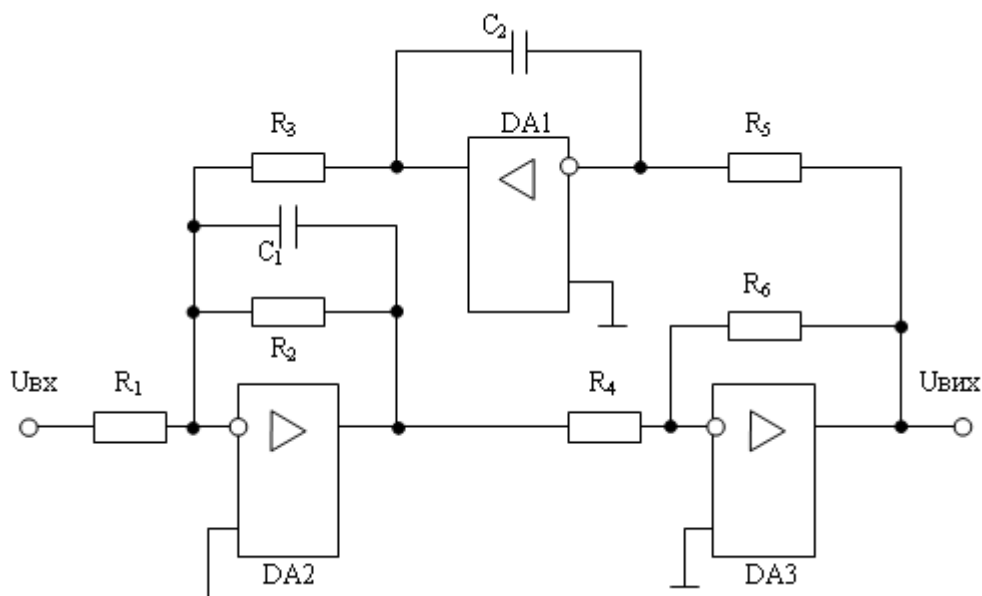
**Варіант №14**  
**“Смуго-пропускаючий фільтр на частоті 1 кГц”**



**Параметри схеми:**

$R_1 - 620 \text{ кОм};$	$R_4 - 620 \text{ кОм};$	$R_6 - 120 \text{ кОм};$	$DA1, DA2 - 140UD8B.$
$R_2 - 620 \text{ кОм};$	$R_5 - 59 \text{ кОм};$	$C_1 - 0,01 \text{ мкФ};$	$C_2 - 0,01 \text{ мкФ};$
$R_3 - 390 \text{ кОм};$			

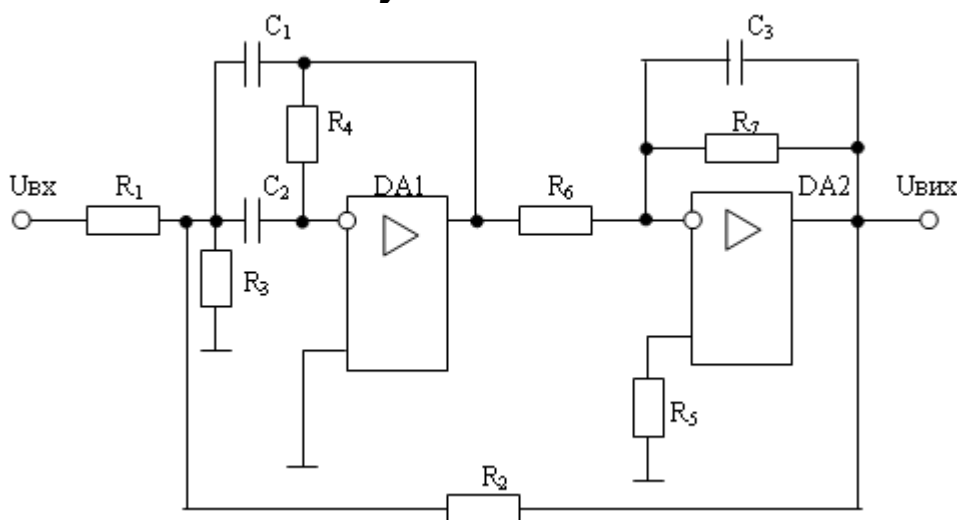
**Варіант №15**  
**“Схема біквдратного смуго-пропускаючого фільтра”**



**Параметри схеми:**

$C_1$  - 5,7 нФ;  $R_2$  - 960 кОм;  $R_5$ - 48 кОм; DA1,DA2,DA3 – КР1407УД 2.  
 $C_2$ - 5,7 нФ;  $R_3$ -25 кОм;  $R_6$ - 48 кОм;  
 $R_1$  - 63 кОм;  $R_4$ - 48 кОм;

**Варіант №16**  
**“Схема смугового фільтра з T-утворенним мостом у колі В33 ”**

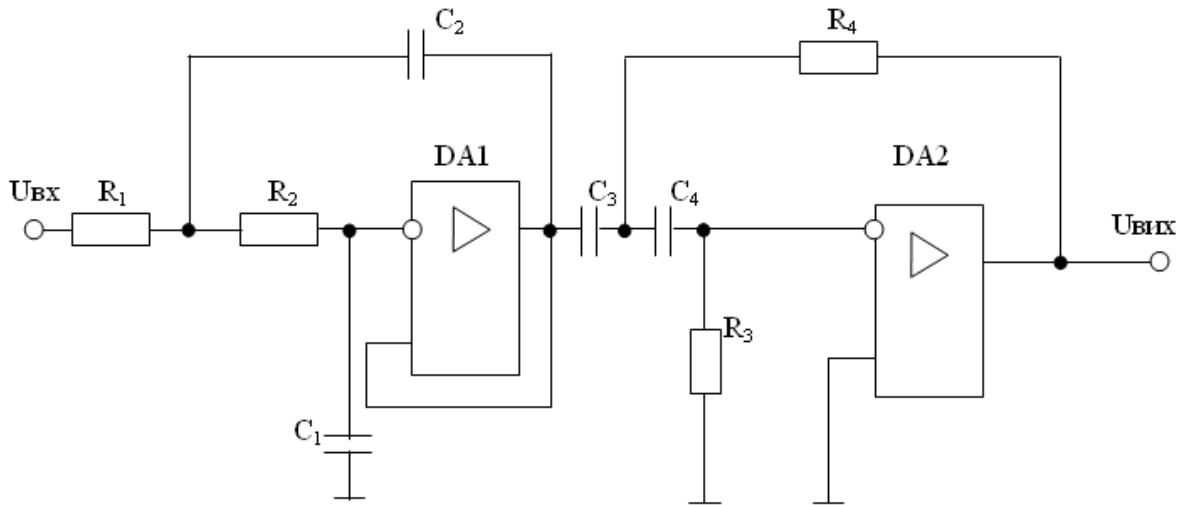


**Параметри схеми:**

$R_1$  - 33 кОм;  $R_4$  - 33 кОм;  $R_7$  - 330 кОм;  $C_3$  - 2 пФ;  
 $R_2$  - 150 кОм;  $R_5$  - 33 кОм;  $C_1$  -2 нФ; DA1 , DA2 – 1407УД3.  
 $R_3$  - 18 Ом;  $R_6$  - 33 кОм;  $C_2$  - 2 нФ;



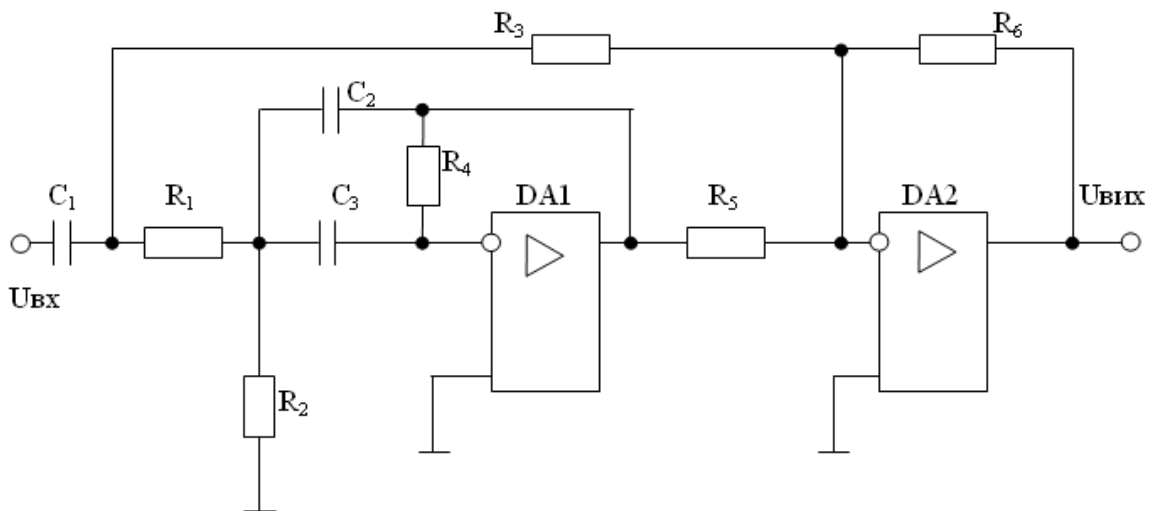
**Варіант №17**  
**“Смуговий фільтр”**



**Параметри схеми:**

$R_1 - 340 \text{ кОм};$	$R_4 - 1 \text{ МОм};$	$C_3 - 0,25 \text{ мкФ};$
$R_2 - 340 \text{ кОм};$	$C_1 - 0,1 \text{ мкФ};$	$C_4 - 0,25 \text{ мкФ};$
$R_3 - 3,4 \text{ МОм};$	$C_2 - 0,25 \text{ мкФ};$	$DA1, DA2 - K140UD1A.$

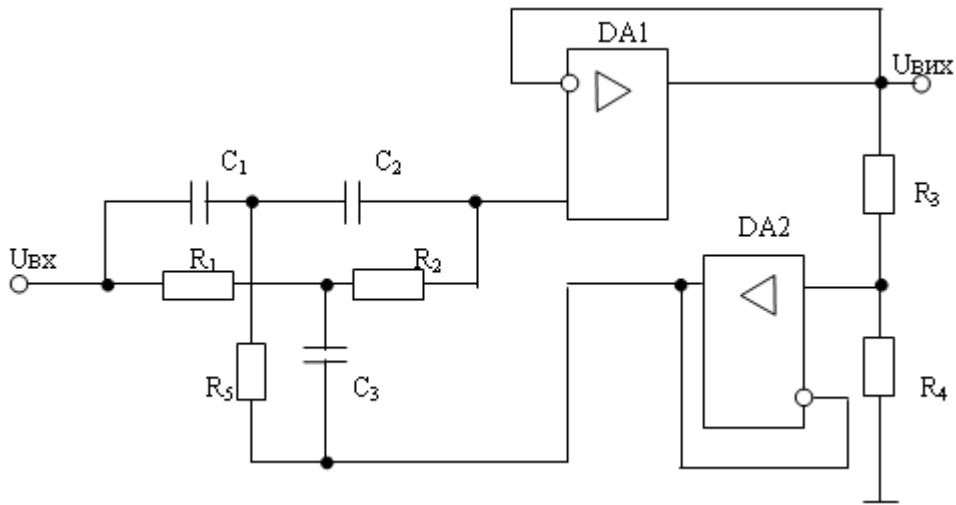
**Варіант №18**  
**“Загороджуючий фільтр”**



**Параметри схеми:**

$R_1 - 24 \text{ кОм};$	$R_3 - 221 \text{ кОм};$	$R_5 - 31 \text{ кОм};$	$C_3 - 2,5 \text{ нФ};$
$R_2 - 41 \text{ кОм};$	$R_4 - 152 \text{ кОм};$	$R_6 - 51 \text{ кОм};$	$DA1, DA2 - 140UD8.$
$C_1 - 2,5 \text{ нФ};$	$C_2 - 2,5 \text{ нФ};$		

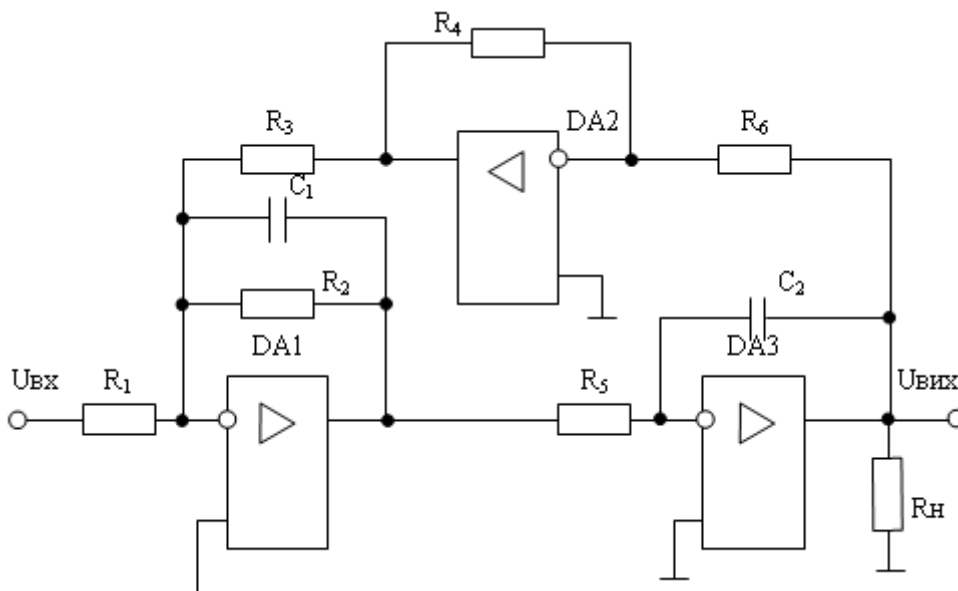
**Варіант №19**  
**“Двухканальний підсилювач”**



**Параметри схеми:**

$R_1 - 18 \text{ кОм}; R_4 - 1,2 \text{ кОм}; C_1 - 10 \text{ нФ}; C_3 - 20 \text{ нФ};$   
 $R_2 - 18 \text{ кОм}; R_5 - 9 \text{ кОм}; C_2 - 10 \text{ нФ}; DA1, DA2 - K140UD14.$   
 $R_3 - 10 \text{ кОм};$

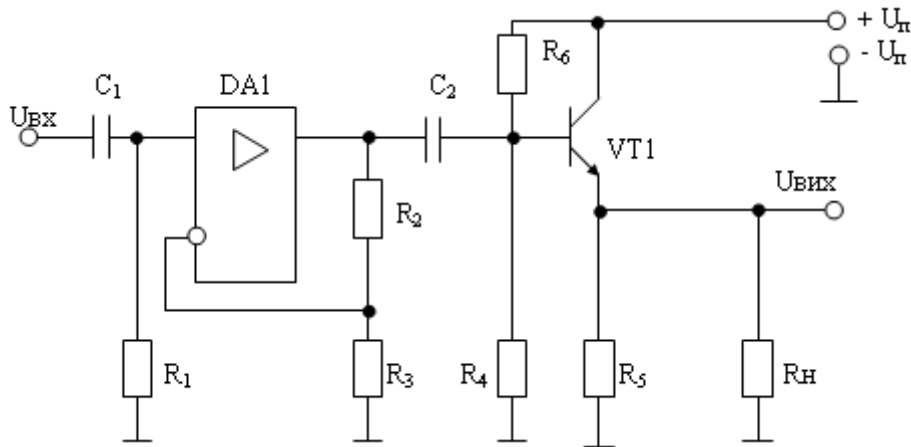
**Варіант №20**  
**“Схема біквдратного ФНЧ другого порядку”**



**Параметри схеми:**

$R_1 - 5,1 \text{ кОм}; R_4 - 33 \text{ кОм}; C_1 - 100 \text{ нФ}; R_H - 5,1 \text{ кОм};$   
 $R_2 - 22 \text{ кОм}; R_5 - 33 \text{ кОм}; C_2 - 100 \text{ нФ}; DA1, DA2, DA3 - KP140UD10.$   
 $R_3 - 33 \text{ кОм}; R_6 - 33 \text{ кОм};$

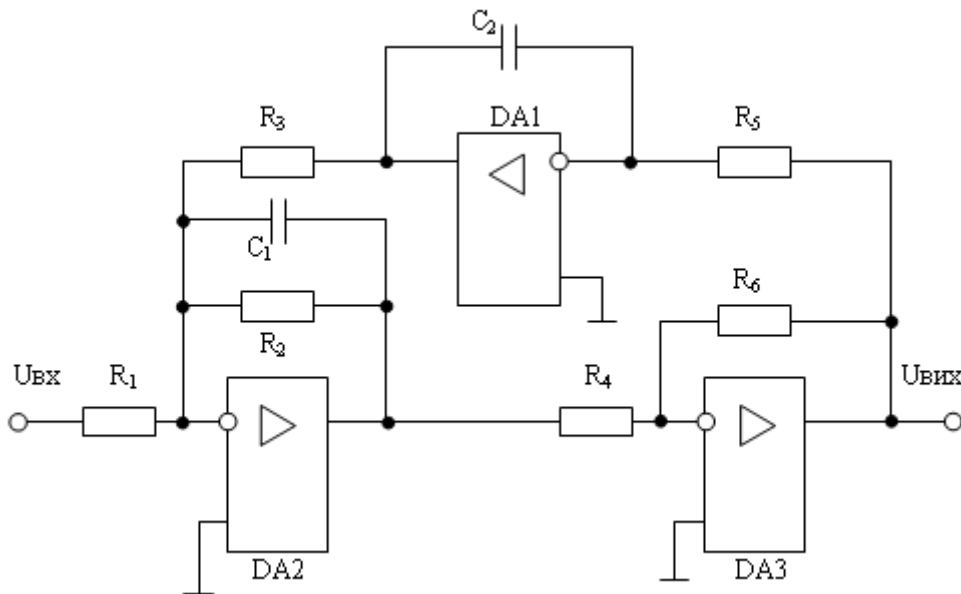
**Варіант №21**  
**“Двухкаскадна схема підсилення з ФНЧ на вході”**



**Параметри схеми:**

$C_1$ - 2,2 мкФ;	$R_2$ - 82 кОм;	$R_5$ - 100 кОм;	VT1- КТ201А;
$C_2$ - 2,2 мкФ;	$R_3$ - 43 кОм;	$R_6$ - 250 кОм;	DA1- 140УД6.
$R_1$ - 20 кОм;	$R_4$ - 82 кОм;	$R_н$ - 300 кОм;	

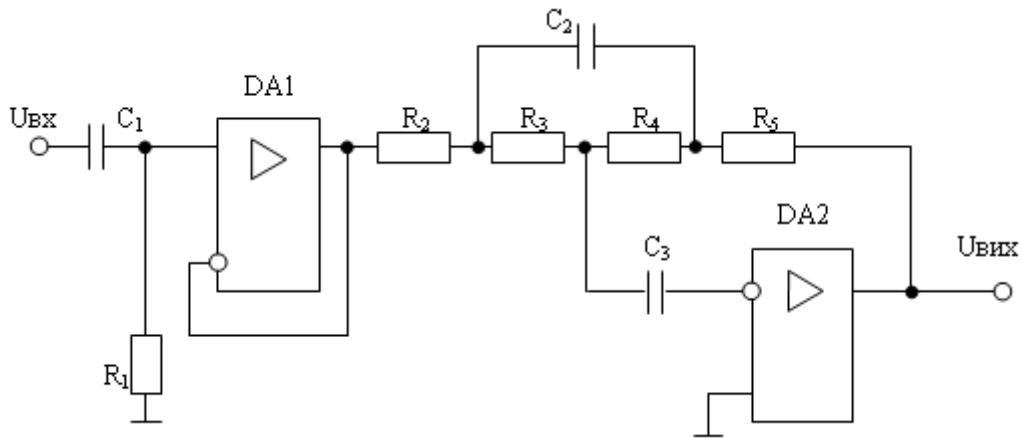
**Варіант №22**  
**“Схема біквдратного смуго-пропускаючого фільтра”**



**Параметри схеми:**

$C_1$ - 1,7 нФ;	$R_2$ - 570 кОм;	$R_5$ -90 кОм;	DA1,DA2,DA3 – 140УД9.
$C_2$ - 1,7 нФ;	$R_3$ - 27 кОм;	$R_6$ -90 кОм;	
$R_1$ - 332 кОм;	$R_4$ -90 кОм;		

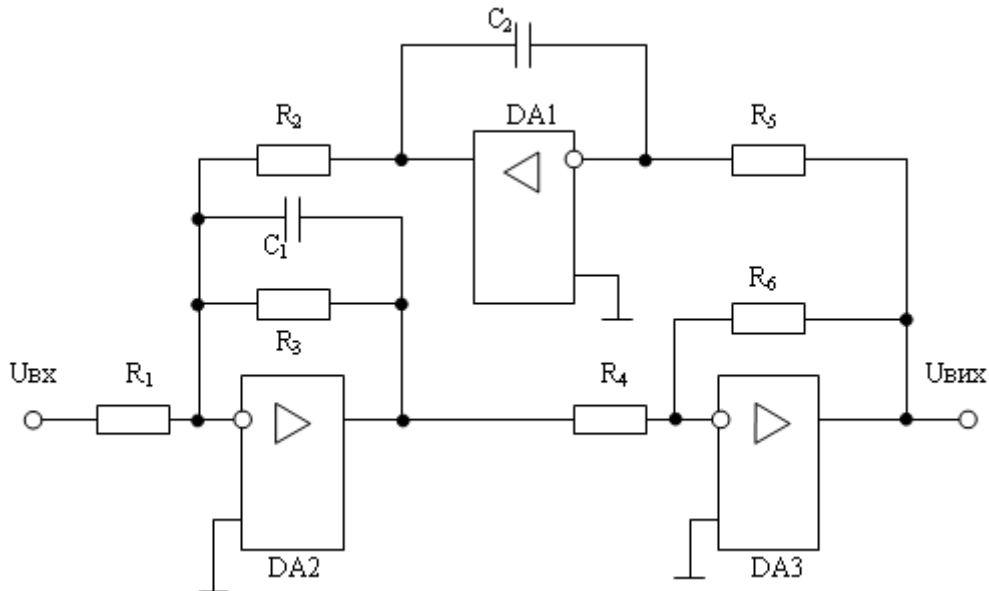
**Варіант №23**  
**“Фільтр високих частот (ФВЧ) з повторювачем на вході”**



**Параметри схеми:**

$C_1$  - 0,47 мкФ;  $R_1$  - 100 кОм;  $R_4$  - 70 кОм; DA1, DA2 - 140УД18.  
 $C_2$  - 64 нФ;  $R_2$  - 10 кОм;  $R_5$  - 10 кОм;  
 $C_3$  - 50 нФ;  $R_3$  - 70 кОм;

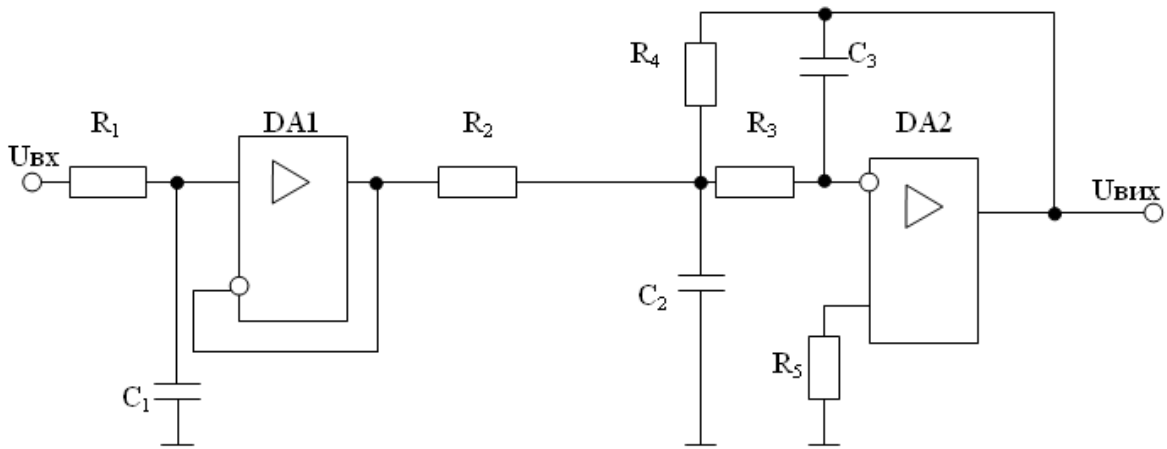
**Варіант №24**  
**“Схема біквдратного смуго-пропускаючого фільтра”**



**Параметри схеми:**

$C_1$  - 50 нФ;  $R_2$  - 5,2 кОм;  $R_5$  - 4200 Ом; DA1, DA2, DA3 - 153УД5.  
 $C_2$  - 50 нФ;  $R_3$  - 127 кОм;  $R_6$  - 4200 Ом;  
 $R_1$  - 3000 Ом;  $R_4$  - 4200 Ом;

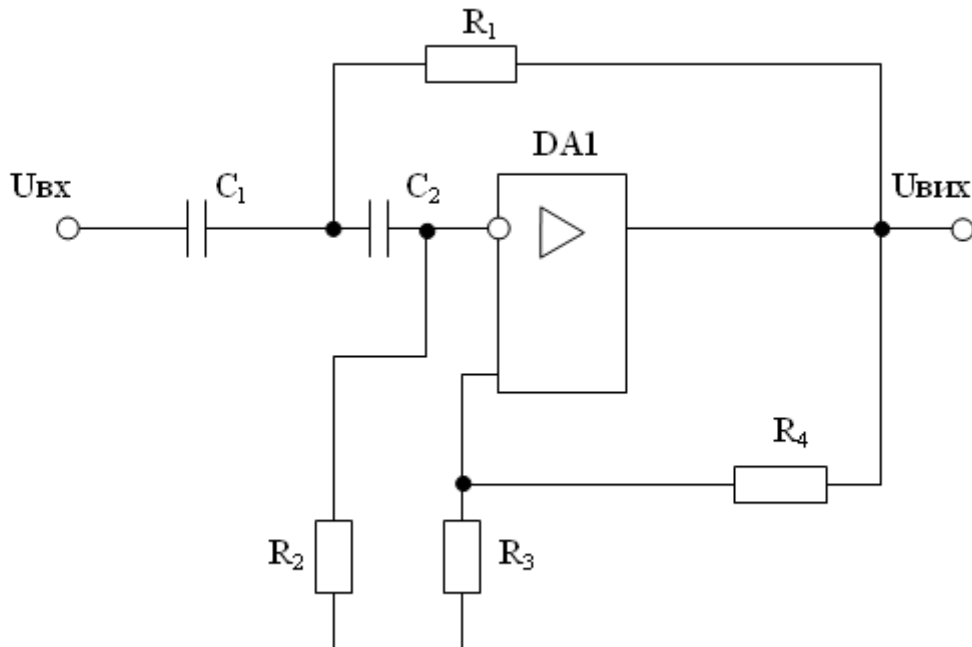
**Варіант №25**  
**“ФНЧ - фільтр низьких частот”**



**Параметри схеми:**

$C_1$  - 0,05 мкФ;     $R_1$  - 28 кОм;     $R_4$  - 128 кОм;    DA1,DA2 – 1153УД6.  
 $C_2$  - 0,05 мкФ;     $R_2$  - 128 кОм;     $R_5$  -57 кОм;  
 $C_3$  - 2,5 нФ;     $R_3$  -57 кОм;

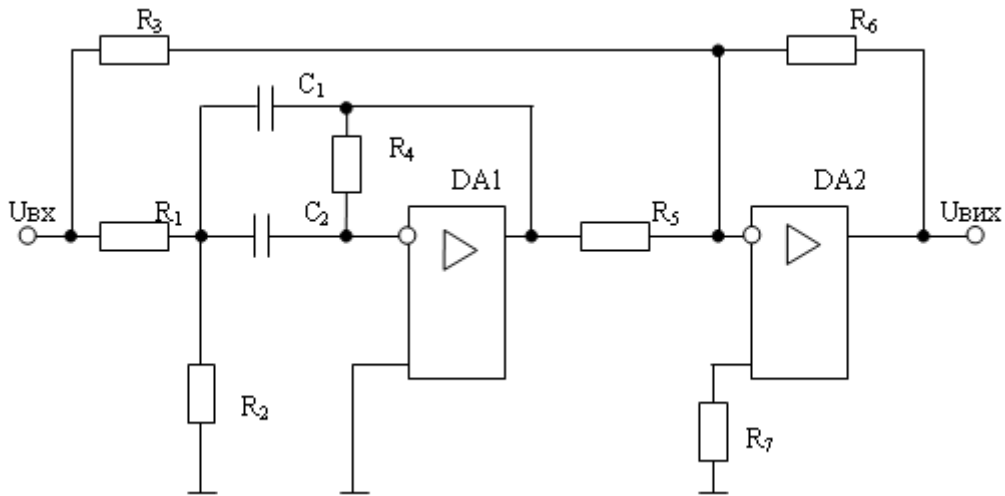
**Варіант №26**  
**“ФВЧ - фільтр високих частот ”**



**Параметри схеми:**

$R_1$  - 86 кОм;     $R_3$  - 14 кОм;     $C_1$  - 4 нФ;    DA1- 154УД1А.  
 $R_2$  - 12,4 кОм;     $R_4$  - 142,8 кОм;     $C_2$  - 4 нФ;

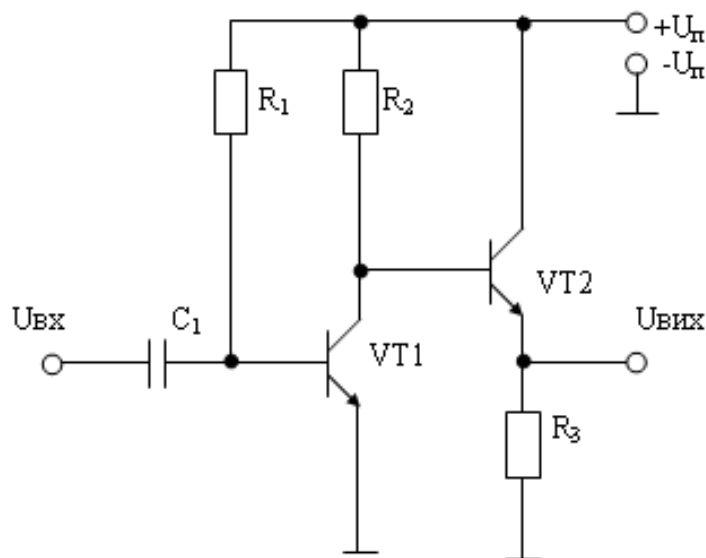
**Варіант №27**  
**“Смуго – загороджуючий фільтр з БЗЗ”**



**Параметри схеми:**

$R_1$  - 164 кОм;       $R_4$  - 660 кОм;       $R_7$  - 2 Ом;      DA1,DA2 - 157УД1.  
 $R_2$  - 1640 кОм;       $R_5$  - 134 кОм;       $C_1$  - 0,2 мкФ;  
 $R_3$  - 66 кОм;       $R_6$  - 134 кОм;       $C_2$  - 0,2 мкФ;

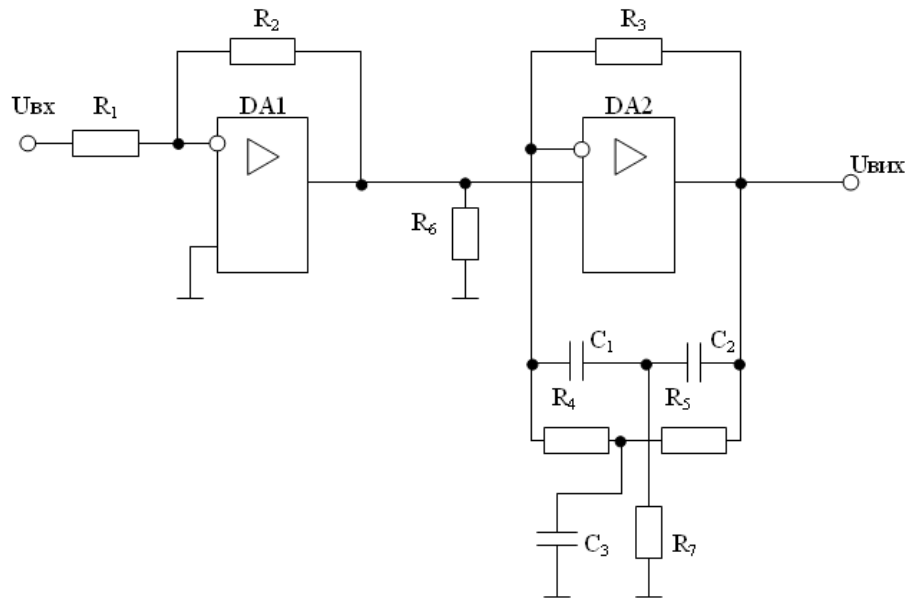
**Варіант №28**  
**“Двухкаскадний підсилювач”**



**Параметри схеми:**

$R_1$  - 10 кОм;       $R_3$  - 31 кОм;      VT1,VT2 – КТ317Б-1.  
 $R_2$  - 11 кОм;       $C_1$  - 5 мкФ;

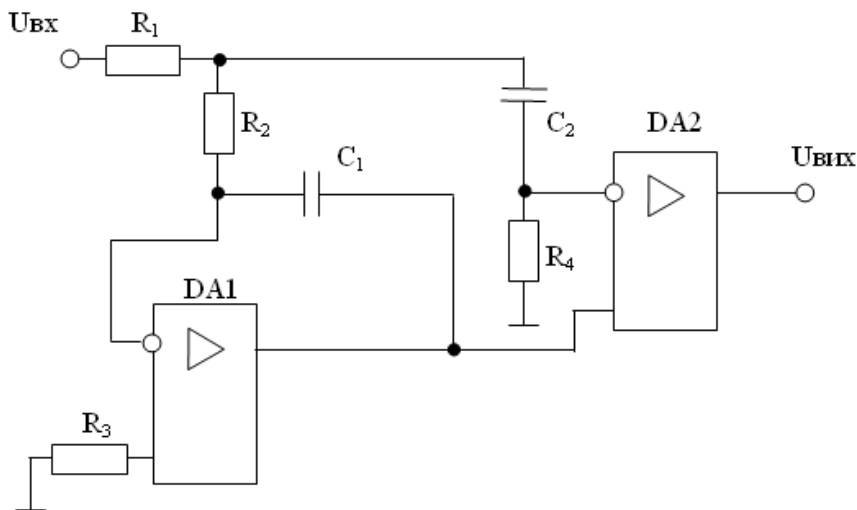
**Варіант №29**  
**“Смуго – пропускаючий фільтр (СПФ)”**



**Параметри схеми:**

$R_1$ - 20 кОм;	$R_5$ - 5 кОм;	$C_1$ - 2 мкФ;	DA1, DA2 – 544УД1А.
$R_2$ - 200 кОм;	$R_6$ - 5 кОм;	$C_2$ - 2 мкФ;	
$R_3$ - 20 кОм;	$R_7$ - 3 кОм;	$C_3$ - 4 мкФ;	
$R_4$ - 5 кОм;			

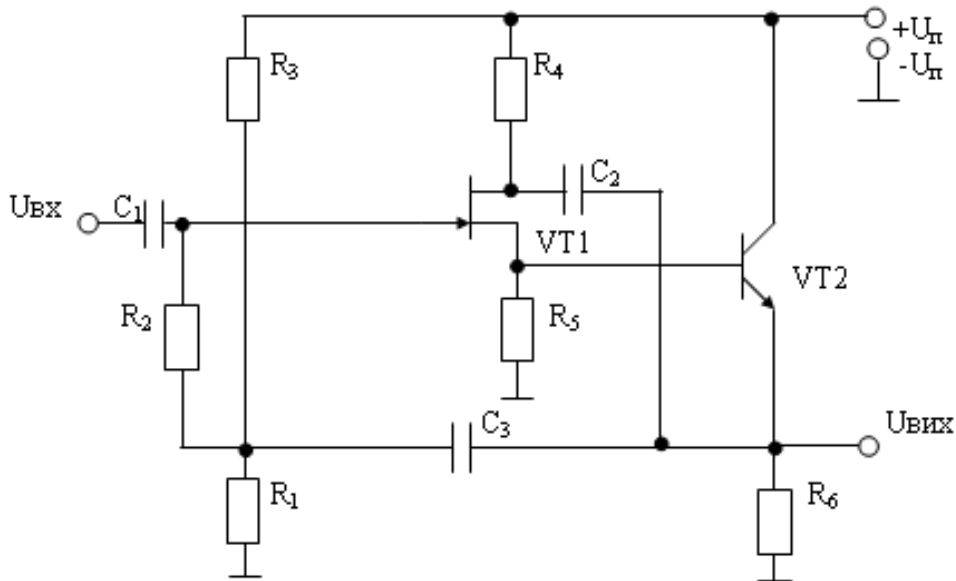
**Варіант №30**  
**“Двухканальний підсилювач”**



**Параметри схеми:**

$R_1$ - 20 кОм;	$C_1$ - 0,225 мкФ;	DA1 – 544УД2А;
$R_2$ - 300 кОм;	$C_2$ - 0,225 мкФ;	DA2 – 140УД13.
$R_3$ - 300 кОм;	$R_4$ - 300 кОм;	

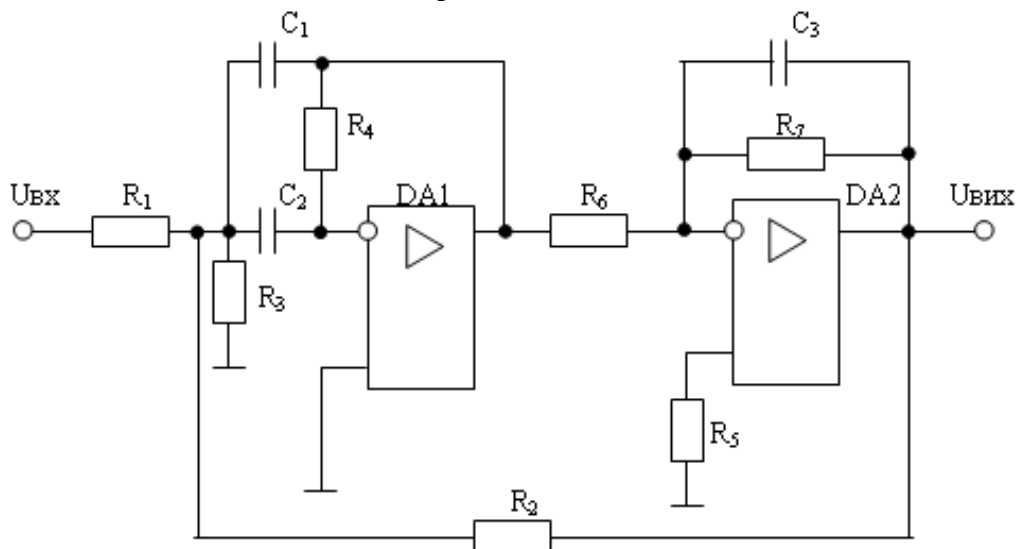
**Варіант №31**  
**“Двухкаскадний підсилювач”**



**Параметри схеми:**

$R_1$ - 2 МОм;	$R_4$ - 22 кОм;	$C_1$ - 2000 пФ;	VT1 –
2П303Ж;			
$R_2$ - 22 МОм;	$R_5$ - 20 кОм;	$C_2$ - 0,8 мкФ;	VT2 – КТ807А.
$R_3$ - 4,6 МОм;	$R_6$ - 2 кОм;	$C_3$ - 0,8 мкФ;	

**Варіант №32**  
**“Схема смугового фільтра з Т-утворенням мостом у колі В33”**

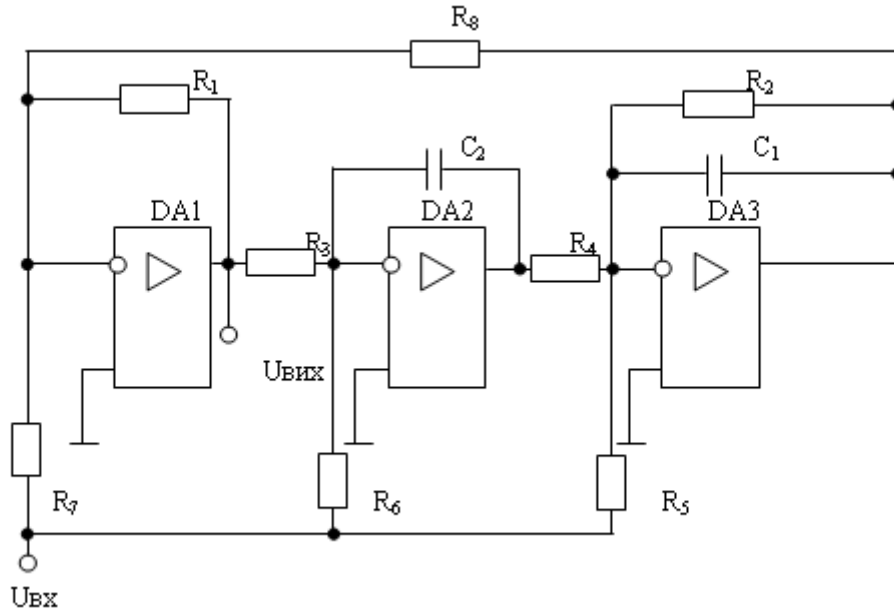


**Параметри схеми:**

$R_1$ - 81 кОм;	$R_4$ - 81 кОм;	$R_7$ - 290 кОм;	$C_3$ - 4,3 пФ;
$R_2$ - 900 кОм;	$R_5$ - 81 кОм;	$C_1$ - 4,3 нФ;	DA1, DA2 – 553УД1.
$R_3$ - 72 кОм;	$R_6$ - 81 кОм;	$C_2$ - 4,3 нФ;	



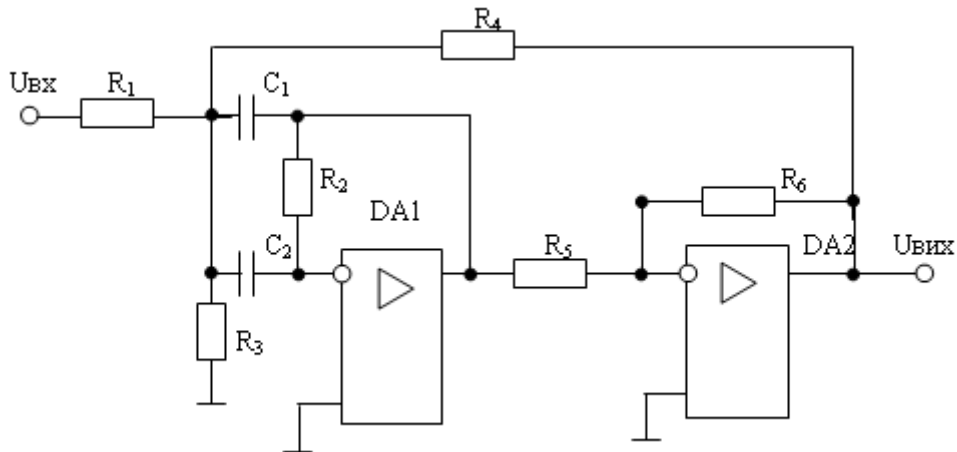
**Варіант №33**  
**“Схема фільтра”**



**Параметри схеми:**

$R_1 - 57 \text{ кОм}; R_4 - 40 \text{ кОм}; R_7 - 57 \text{ кОм}; C_2 - 2,8 \text{ нФ};$   
 $R_2 - 540 \text{ кОм}; R_5 - 52 \text{ кОм}; R_8 - 200 \text{ кОм}; DA1, DA2, DA3 - 1401\text{УД1.}$   
 $R_3 - 40 \text{ кОм}; R_6 - 40 \text{ кОм}; C_1 - 2,8 \text{ нФ};$

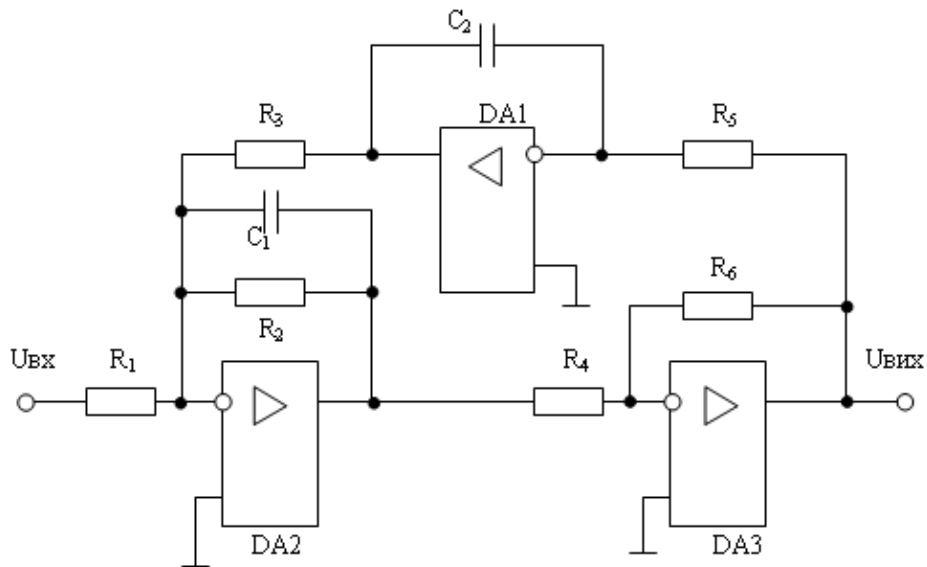
**Варіант №34**  
**“Смуго-пропускаючий фільтр на частоті 1 кГц”**



**Параметри схеми:**

$R_1 - 880 \text{ кОм}; R_4 - 880 \text{ кОм}; C_1 - 0,042 \text{ мкФ}; DA1, DA2 - 154\text{УД3.}$   
 $R_2 - 550 \text{ кОм}; R_5 - 90 \text{ кОм}; C_2 - 0,042 \text{ мкФ};$   
 $R_3 - 880 \text{ кОм}; R_6 - 240 \text{ кОм};$

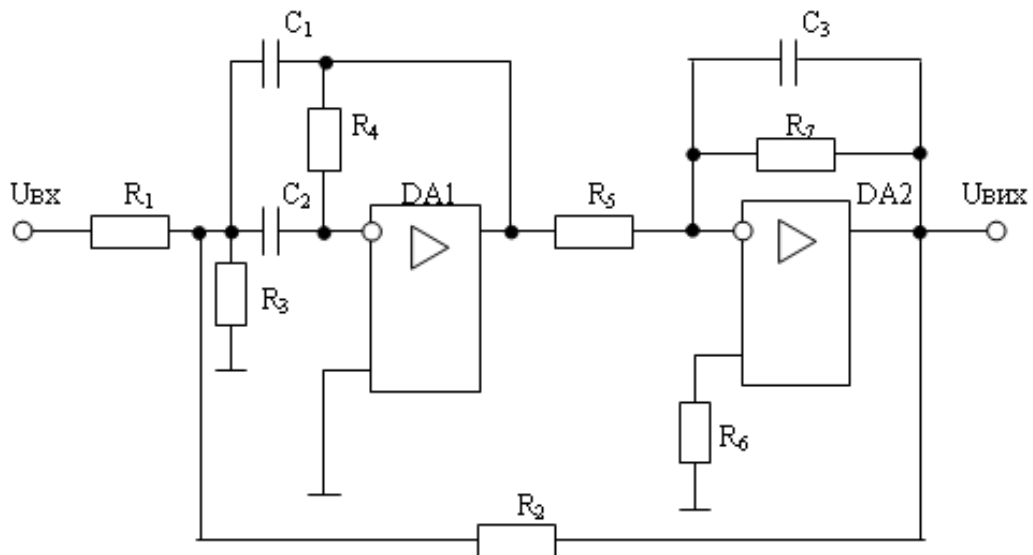
**Варіант №35**  
**“Схема біквдратного смуго-пропускаючого фільтра”**



**Параметри схеми:**

$C_1$  - 9,7 нФ;  $R_2$  - 610 кОм;  $R_5$  - 96 кОм; DA1,DA2,DA3 – 1408УД 1.  
 $C_2$  - 9,7 нФ;  $R_3$  - 50 кОм;  $R_6$  - 96 кОм;  
 $R_1$  - 93 кОм;  $R_4$  - 96 кОм;

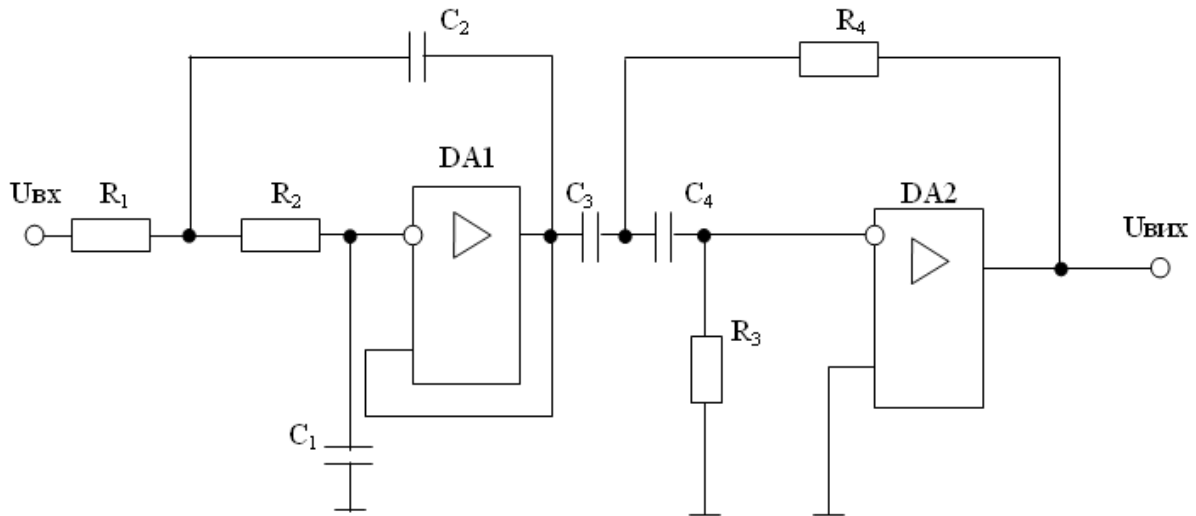
**Варіант №36**  
**“Схема смугового фільтра з T-утворенним мостом у колі В33”**



**Параметри схеми:**

$R_1$  - 66 кОм;  $R_4$  - 66 кОм;  $R_7$  - 660 кОм;  $C_3$  - 6,2 пФ;  
 $R_2$  - 300 кОм;  $R_5$  - 66 кОм;  $C_1$  - 5 нФ; DA1,DA2 – 1401УД3.  
 $R_3$  - 36 Ом;  $R_6$  - 66 кОм;  $C_2$  - 5 нФ;

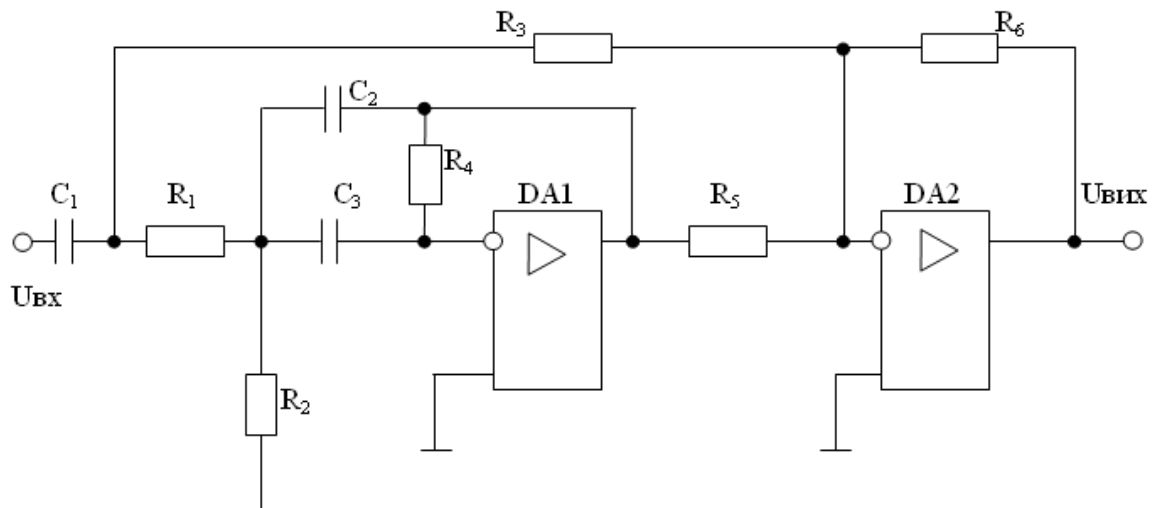
**Варіант №37**  
**“Смуговий фільтр”**



**Параметри схеми:**

$R_1$ - 720 кОм;	$R_4$ - 4 МОм;	$C_3$ - 0,125 мкФ;
$R_2$ - 720 кОм;	$C_1$ - 0,3 мкФ;	$C_4$ - 0,125 мкФ;
$R_3$ - 9,4 МОм;	$C_2$ - 0,125 мкФ;	DA1, DA2 – 1409УД1А.

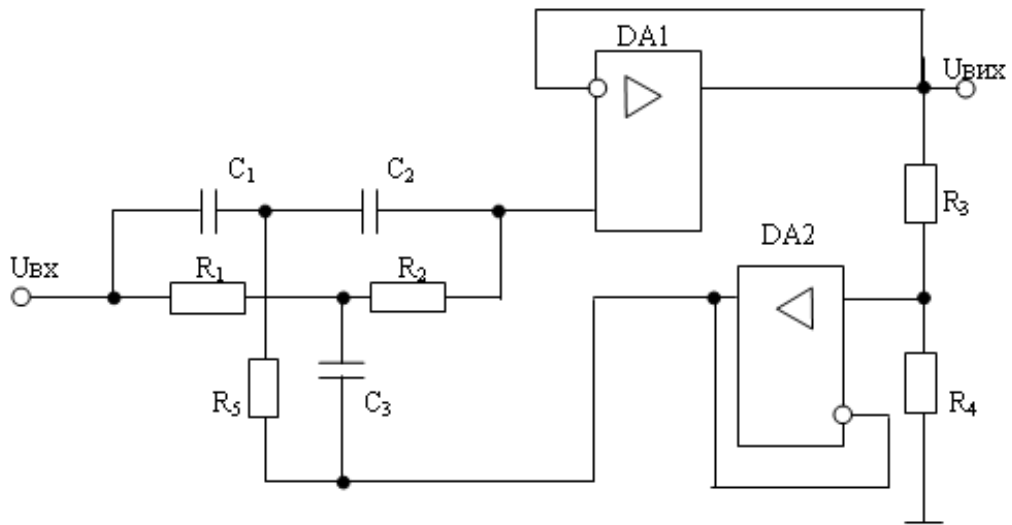
**Варіант №38**  
**“Загороджуючий фільтр”**



**Параметри схеми:**

$R_1$ - 48 кОм;	$R_4$ - 304 кОм;	$C_1$ - 7,5 нФ;	DA1, DA2 – 154УД4А.
$R_2$ - 82 кОм;	$R_5$ - 62 кОм;	$C_2$ - 7,5 нФ;	
$R_3$ - 442 кОм;	$R_6$ - 102 кОм;	$C_3$ - 7,5 нФ;	

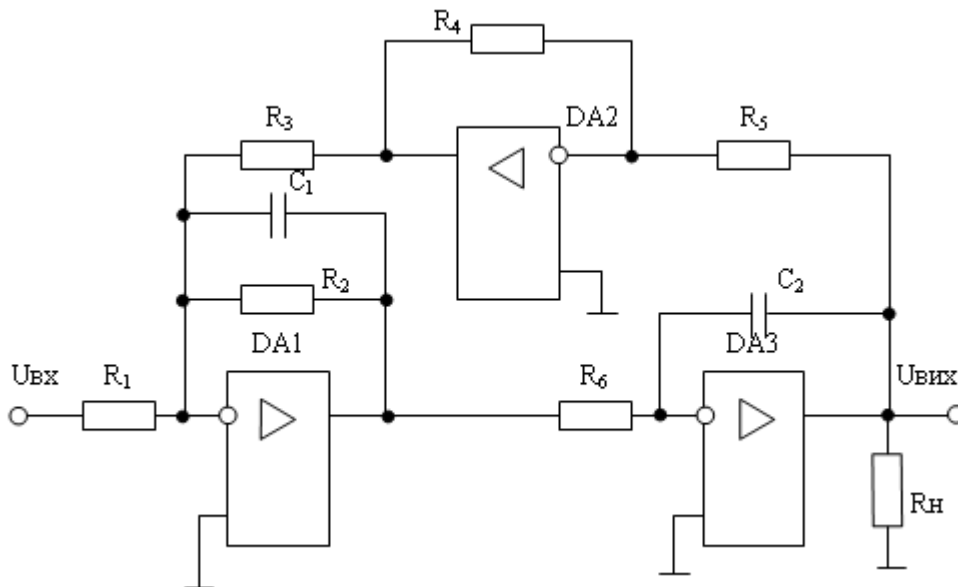
**Варіант №39**  
**“Двухканальний підсилювач”**



**Параметри схеми:**

$R_1 - 39 \text{ кОм}; R_4 - 2,4 \text{ кОм}; C_2 - 20 \text{ нФ}; DA1, DA2 - 574\text{УД}1\text{А}.$   
 $R_2 - 39 \text{ кОм}; R_5 - 18 \text{ кОм}; C_3 - 40 \text{ нФ};$   
 $R_3 - 24 \text{ кОм}; C_1 - 20 \text{ нФ};$

**Варіант №40**  
**“Схема біквдратного ФНЧ другого порядку”**



**Параметри схеми:**

$R_1 - 7.6 \text{ кОм}; R_4 - 66 \text{ кОм}; R_н - 7.6 \text{ кОм}; DA1, DA2, DA3 - 140\text{УД}22.$   
 $R_2 - 44 \text{ кОм}; R_5 - 66 \text{ кОм}; C_1 - 230 \text{ нФ};$   
 $R_3 - 66 \text{ кОм}; R_6 - 66 \text{ кОм}; C_2 - 230 \text{ нФ};$

## Список використаної літератури

- 1 Бондарь В.А., Баушев В.С., Кобзев А.В. Методы анализа и расчета электронных схем - Томск.: Издательство Томского университета, 1989 - 307 с.
- 2 Норенков И.П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем М.: Высшая школа, 1989 – 311 с.
- 3 Чуа Л.О., Пен-Мин-Лин. Машинный анализ электронных схем. – М.: Энергия, 1980 – 638 с.
- 4 Разевиг В.Д. Применение программ PCAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Выпуски 1-4. – М.: Радио и связь. 1992 г.
- 5 Переверзев А.В., Тімовський А.К., Василенко О.В. Моделювання елементів силової електроніки – Запоріжжя, видавництво ЗДІА, 1998 – 117 с. – ISBN 966 – 7101-17-7.
- 6 Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат Design center (PSpice) – М.: СК Пресс, 1996 – 272с.
- 7 Носов Ю.Р., Шилин В.А. Математические модели элементов интегральной электроники. – М.: Сов радио, 1976 – 304 с.
- 8 Демирчан К.С., Бутырин П.А. Моделирование и машинный расчет электронных цепей. – М.: Высшая школа, 1988 г.
- 9 Mohan N., Power Electronic, Converters, Applications and Design, John New York: Wiley & Sons, Inc., 1995.- 385 p.

## Додаток А

Приклад виконання титульного листа

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЧЕРНІГІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Кафедра промислової електроніки

Розрахунково-графічна робота  
з дисципліни “Моделювання електронних схем”  
на тему: “.....”

Варіант ...

Студент групи ПЕ-161

Іванов І.І.

Викладач

доцент Гордієнко В.В.

Чернігів ЧДТУ 2018