

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
Кафедра інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії

С.М. Ткаченко

**КОМП'ЮТЕРНА СХЕМОТЕХНІКА**

**Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт**  
для здобувачів ступеня бакалавра  
спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія

Дніпро  
НТУ «ДП»  
2025

**Ткаченко С.М.**

Комп'ютерна схемотехніка [Електронний ресурс] : методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт для здобувачів ступеня бакалавра спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія / С.М. Ткаченко ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2025. – 34 с.

Автор

С.М. Ткаченко, канд. техн. наук, доц.

Затверджено науково-методичною комісією спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія (протокол № 1 від 30.01.2025) за поданням кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії (протокол № 8 від 27.12.2024).

Методичні рекомендації містять опис методики виконання лабораторних робіт з дисципліни «Комп'ютерна схемотехніка» здобувачами ступеня бакалавра спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія.

Орієнтовано на активізацію навчальної діяльності здобувачів ступеня бакалавра та закріплення практичних знань з даної дисципліни.

Відповідальний за випуск завідувач кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії В.В. Гнатушенко, д-р техн. наук, проф.

## ЗМІСТ

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ                                                                                         | 4  |
| Лабораторна робота 1. Моделювання роботи випрямлячів та фільтрів джерел живлення              | 5  |
| 1.1 Мета лабораторної роботи                                                                  | 5  |
| 1.2 Постановка задачі                                                                         | 5  |
| 1.3 Порядок виконання роботи                                                                  | 5  |
| 1.4 Зміст звіту                                                                               | 6  |
| 1.5 Теоретичні відомості                                                                      | 6  |
| 1.6 Варіанти завдань                                                                          | 6  |
| 1.7 Контрольні питання                                                                        | 6  |
| Лабораторна робота 2. Моделювання роботи параметричних та компенсаційних стабілізаторів       | 9  |
| 2.1 Мета лабораторної роботи                                                                  | 9  |
| 2.2 Постановка задачі                                                                         | 9  |
| 2.3 Порядок виконання роботи                                                                  | 10 |
| 2.4 Зміст звіту                                                                               | 10 |
| 2.5 Теоретичні відомості                                                                      | 11 |
| 2.6 Варіанти завдань                                                                          | 20 |
| 2.7 Контрольні питання                                                                        | 20 |
| Лабораторна робота 3. Моделювання роботи каскадів транзисторних підсилювачів                  | 20 |
| 3.1 Мета лабораторної роботи                                                                  | 20 |
| 3.2 Постановка задачі                                                                         | 20 |
| 3.3 Порядок виконання роботи                                                                  | 21 |
| 3.4 Зміст звіту                                                                               | 22 |
| 3.5 Теоретичні відомості                                                                      | 22 |
| 3.6 Варіанти завдань                                                                          | 26 |
| 3.7 Контрольні питання                                                                        | 26 |
| Лабораторна робота 4. Моделювання роботи обчислювальних елементів на операційних підсилювачах | 26 |
| 4.1 Мета лабораторної роботи                                                                  | 26 |
| 4.2 Постановка задачі                                                                         | 26 |
| 4.3 Порядок виконання роботи                                                                  | 27 |
| 4.4 Зміст звіту                                                                               | 28 |
| 4.5 Теоретичні відомості                                                                      | 28 |
| 4.6 Варіанти завдань                                                                          | 32 |
| 4.7 Контрольні питання                                                                        | 32 |
| Список використаних джерел                                                                    | 34 |

## ВСТУП

Методичні вказівки призначені для студентів спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія, що вивчають дисципліну «Комп'ютерна схемотехніка».

Методичні вказівки включають низку частково взаємопов'язаних робіт, під час виконання яких студенти мають можливість покращити досвід роботи з середовищем моделювання електронних схем Multisim, навчитися будувати, розраховувати, відлагоджувати електронні схеми базових електронних пристроїв.

При підготовці до виконання лабораторної роботи студент повинен:

- ознайомитися з методичними вказівками;
- повторити лекційний матеріал, пов'язаний з темою лабораторної роботи;
- підготувати відповіді на контрольні питання, які наведені у методичних вказівках наприкінці кожної лабораторної роботи.

Виконавши ці завдання, студент повинен продемонструвати викладачеві роботу на комп'ютері, оформити звіт за результатами лабораторної роботи і захистити його. Звіт у форматі документа PDF студент в електронному вигляді надсилає на веб-сторінку предмету платформи дистанційної освіти університету.

За умови своєчасного повного виконання лабораторних робіт, представлених у даних методичних рекомендаціях студент отримує 100 балів за лабораторний курс дисципліни «Комп'ютерна схемотехніка». Виконання кожної з п'яти робіт оцінюється максимум по 25 балів.

Загальні вимоги до виконання лабораторної роботи, що мають забезпечити максимальну оцінку:

- повна відповідність звіту про виконання лабораторної роботи методичним рекомендаціям: 10 балів;
- володіння практичними навиками, необхідними для виконання завдання: 10 балів;
- володіння теоретичним матеріалом і про предмет досліджень, здатність спілкуватись за темою виконаної роботи: 5 балів;

У разі порушення термінів виконання й звітування бали, що виставляються за кожною роботою зменшуються у два рази.

Терміни виконання:

- роботи 1 і 2 мають бути виконані й захищені до тижня контрольних заходів першої чверті навчального семестру;
- роботи 3 і 4 мають бути виконані й захищені до тижня контрольних заходів другої чверті навчального семестру.

Отримані студентом бали за лабораторні роботи додаються до балів, отриманих за виконання тестів з лекційного матеріалу, і визначається середньоарифметичний результат поточних контролів, який і є підсумковою оцінкою за вивчення навчальної дисципліни. Максимально за поточною успішністю студент може набрати 100 балів.

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

## МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ВИПРЯМЛЯЧІВ ТА ФІЛЬТРІВ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ

### 1.1 Мета лабораторної роботи

Вивчити принципи роботи напівпровідникових джерел живлення постійного струму з ємнісним фільтром.

### 1.2 Постановка задачі

1. Побудувати схеми однофазних однонапівперіодного, двохнапівперіодного на трьохточці та мостового випрямлячів напруги  $\sim U_{вх}$ ;
2. Додати до всіх випрямлячів ємнісний НЧ-фільтр та резистор навантаження;
3. За умови ємності конденсатора фільтра  $C_f$  визначити, за якого значення струму навантаження  $I_n$  та опору  $R_n$  навантаження коефіцієнт пульсації на виході не перевищить  $\delta_o=15\%$ ;
4. За умови опору навантаження  $R_n$  визначити, яка повинна бути ємність  $C_f$ , щоб коефіцієнт пульсації на виході не перевищив  $\delta_o=10\%$ .

### 1.3 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з лекційним матеріалом щодо схем випрямлячів та фільтрів НЧ;
2. За таблицею 1.1 та своїм номером за списком визначити параметри електричної схеми;
3. Побудувати у середовищі Electronic Workbench схеми випрямлячів. В якості джерела  $\sim U_{вх}$  використати при цьому Function Generator або AC Voltage Source. Сигнал  $\sim U_{вх}$  синусоїдальний, 50 Гц;
4. Зняти парні осцилограми вхідної та випрямлених напруг на схемах випрямлячів за допомогою Oscilloscope;
5. Додати у схеми випрямлячів  $C_f$  так, щоб утворився НЧ-фільтр. Додати опір навантаження  $R_n$  та Multimeter для вимірювання струму  $I_n$ ;
6. Визначити, яка  $\Delta U_{вих}$  відповідає пульсації  $\delta_o=15\%$ ;
7. Виконати завдання 3 шляхом підбору ємності  $C_f$ .  $R_n$  при цьому приймати за своїм варіантом;
8. Зняти парні осцилограми вихідної та вихідної фільтрованої напруг на схемах випрямлячів. Поміряти струм  $I_n$ ;
9. Визначити, яка  $\Delta U_{вих}$  відповідає пульсації  $\delta_o=10\%$ ;
10. Виконати завдання 4 шляхом підбору опору навантаження  $R_n$  для кожного випрямляча.  $C_f$  при цьому приймати за своїм варіантом;
11. Зняти парні осцилограми вихідної та вихідної фільтрованої напруг на схемах випрямлячів. Поміряти струм  $I_n$ ;
12. Зробити висновки.

## 1.4 Зміст звіту

1. Назва, мета й завдання лабораторної роботи згідно свого варіанту завдання.
2. Схеми випрямлячів без фільтра, включаючи їх вимірювальні прилади, осцилограми їх вхідних і вихідних напруг.
3. Розрахунок  $\Delta U_{\text{вих}}$  при  $\delta_o=15\%$ .
4. Схеми випрямлячів НЧ-фільтрами, включаючи їх вимірювальні прилади, знайдені  $C_f$ , значення струмів навантаження  $I_n$ , осцилограми нефільтрованих та фільтрованих вихідних напруг випрямлячів.
5. Розрахунок  $\Delta U_{\text{вих}}$  при  $\delta_o=10\%$ .
6. Схеми випрямлячів НЧ-фільтрами, включаючи їх вимірювальні прилади, знайдені  $R_n$ , значення струмів навантаження  $I_n$ , осцилограми нефільтрованих та фільтрованих вихідних напруг випрямлячів
6. Висновок за проведеними дослідженнями.

## 1.5 Теоретичні відомості

У роботі в якості НЧ-фільтра використовується конденсатор, паралельно підключений до випрямляча. Він може характеризуватись показниками:

1. Коефіцієнт згладжування ( $\gamma$ ) – відношення коефіцієнта пульсації на вході фільтра до коефіцієнта пульсації на виході:

$$\gamma = \delta_i / \delta_o; \quad (1.1)$$

2. Коефіцієнт пульсації – відношення амплітуди першої гармоніки до постійної складової:

$$\delta_o = \Delta U_{\text{вих}} / U_{\text{вих}}, \text{ коли } U_{\text{вх}} = \text{const}; \quad (1.2)$$

3. Коефіцієнт фільтрації – відношення амплітуди першої гармоніки на вході до амплітуди першої гармоніки на виході фільтра

$$\varepsilon = \Delta U_{\text{вх}} / \Delta U_{\text{вих}}; \quad (1.3)$$

4. Коефіцієнт передачі – величина обернена відношенню середнього значення напруги на виході і на вході фільтру

$$K_f = U_{\text{вх}} / U_{\text{вих}} \quad (1.4)$$

## 1.6 Варіанти завдань

Таблиця 1.1 – Варіанти завдань.

| Напруга $\sim U_{\text{вх}}$ , В | Ємність $C_f$ , мкФ | Опір навантаження |
|----------------------------------|---------------------|-------------------|
| $15B+x$                          | $60+4*x$            | $300+40*x$        |

де  $x$  – номер студента за списком у журналі.

## 1.7 Контрольні питання

1. Чим відрізняється за осцилограмами однонапівперіодний від двохнапівперіодного випрямляча?
2. У чому відмінність випрямляча з трьохточкою від діодного мосту?

3. Як впливає на осцилограму вихідної напруги додання у схему НЧ-фільтра?
4. Як впливає збільшення навантаження на осцилограму вихідної напруги схеми випрямляча з НЧ-фільтром?
5. Де діюче значення напруги буде більшим, у одно- чи двонапівперіодного випрямляча?
6. Де потрібна більша ємність НЧ-фільтра, у одно- чи двонапівперіодного випрямляча?
7. Де вища можна підключати більше навантаження при збереженні однієї й тої ж нестабільності фільтра, у одно- чи двонапівперіодного випрямляча?
8. Як співвідносяться діючі напруги на вході і виході у однонапівперіодного випрямляча?
9. Як співвідносяться діючі напруги на вході і виході у двонапівперіодного випрямляча?

## **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2**

### **МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПАРАМЕТРИЧНИХ ТА КОМПЕНСАЦІЙНИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ**

#### **2.1 Мета лабораторної роботи**

Ознайомитися з основними принципами роботи параметричних та компенсаційних стабілізаторів, дослідження їх основних характеристик.

#### **2.2 Постановка задачі**

1. Побудувати схеми параметричного та послідовного компенсаційного стабілізаторів, використавши при цьому в якості вхідного каскаду мостовий або трьохточковий однофазного випрямляч та ємнісний НЧ-фільтр першого порядку з конденсатором  $C1=200$  мкФ для параметричного та  $C2=2000$  мкФ для компенсаційного відповідно;

2. Скориставшись лекційним матеріалом, розрахувати баластний резистор параметричного стабілізатора таким чином, щоб стабілізатор міг дати максимальний струм на виході до  $I_n=100$  мА. Встановити відповідний номінал резистора та вхідну напругу на схемі. Виміряти струми на виході, на стабілітроні. Виміряти падіння напруги на баластному резисторі. Визначити ККД всієї схеми та коефіцієнта  $\delta i$  нестабільності на виході стабілізатора. Коефіцієнт нестабільності на виході стабілізатора повинен відповідати умові  $\delta i \leq 3\%$ ;

3. Скориставшись лекційним матеріалом, розрахувати компенсаційний стабілізатор таким чином, щоб стабілізатор міг дати максимальний струм на

виході до 1,5А. Встановити відповідні номінали та вхідну напругу на схемі. Визначити статичну помилку  $\delta_u$  стабілізатора, коефіцієнта  $\delta i$  нестабільності на виході стабілізатора, ККД стабілізатора. Статична помилка повинна відповідати умові  $\delta i \leq 1,5\%$  Коефіцієнт нестабільності на виході стабілізатора повинен відповідати умові  $\delta i \leq 5\%$ .

## **2.3 Порядок виконання роботи**

1. Ознайомитися з лекційним матеріалом щодо схем параметричного та компенсаційного стабілізатора;
2. Побудувати у середовищі Electronic Workbench схеми стабілізаторів, що отримують живлення від послідовних каскадів (кожен від свого) мостового або трьохточкового однофазного випрямляча та ємнісного НЧ-фільтру першого порядку з конденсатором  $C1=200\mu\text{F}$ . На випрямляч від генератора подати гармонійну напругу  $\sim U_{вх}$  промислової частоти, отриману від Function Generator або AC Voltage Source;
3. За таблицею 2.1 та своїм номером за списком визначити необхідну вихідну напругу;
4. Скориставшись методичними вказівками, розрахувати та встановити на побудованій схемі опір баластного резистора стабілізатора таким чином, щоб стабілізатор міг дати максимальний струм на виході до  $I_n=100\text{ mA}$ . Зняти осцилограми на вході і виході, визначивши при цьому напруги  $U_{вх.\text{max}}$  та  $U_{вих}$ .
5. Виміряти струм на виході. Виміряти падіння напруги на баластному резисторі.
6. Визначити коефіцієнт нестабільності на виході стабілізатора. Він повинен відповідати умові  $\delta i \leq 3\%$ .
7. Визначити ККД параметричного стабілізатора;
8. Скориставшись методичними вказівками, розрахувати компенсаційний стабілізатор таким чином, щоб стабілізатор міг дати максимальний струм на виході до 1,5 А;
9. Встановити розраховані номінали елементів схеми, зняти осцилограми на вході і виході, виконати налагодження (підлаштування елементів) схеми так, щоб вона відповідала завданню і виставленій вимозі  $\delta i \leq 5\%$ ;
10. Визначити ККД компенсаційного стабілізатора.
11. Зробити висновки щодо можливостей стабілізаторів.

## **2.4 Зміст звіту**

1. Назва, мета й завдання лабораторної роботи згідно свого варіанту завдання.

2. Схеми стабілізаторів, включаючи їх вимірювальні прилади, випрямляч, фільтр;
3. Розрахунки параметричного та компенсаційного стабілізаторів, номінали елементів на схемах;
4. Парні осцилограми вхідної та стабілізованої напруг на схемах обох стабілізаторів, та осцилограми, необхідні для демонстрації етапів розрахунків і налагодження;
5. Результати вимірювань струмів та напруг;
6. Розрахунки ККД параметричного та компенсаційного стабілізаторів
7. Висновки.

## 2.5 Теоретичні відомості

### Робота з параметричним стабілізатором

1. Визначимо опір навантаження. За умовами,  $I_H = 100 \text{ мА} = 0,1 \text{ А}$ . Нехай потрібно забезпечити  $U_{\text{ст}} = 24 \text{ В}$ . Тоді

$$R_H = U_{\text{ст}} / I_H = 24 / 0,1 = 240 \text{ Ом.} \quad (2.1)$$

2. Будуємо схему мостового або балансного випрямляча на ідеальних діодах з НЧ-фільтром і опором навантаження  $R_H$ .

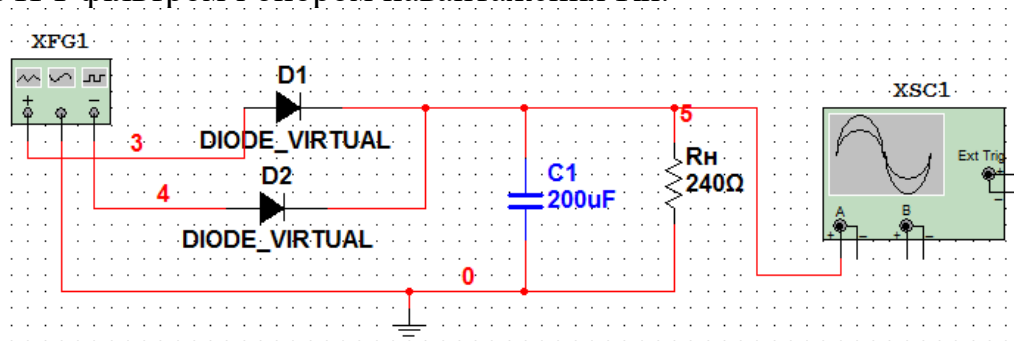


Рисунок 2.1 – Приклад схеми з балансним випрямлячем

3. Виставляємо амплітуду  $U_{\text{вх.мах}}$  змінного джерела так, щоб амплітуда вхідної напруги після фільтра не опускалася нижче  $U_{\text{вих}}$ , перевищувала  $U_{\text{ст}}$  на 4...7В. У представленому рішенні  $U_{\text{вх.мін}} = 30 \text{ В}$  (див. рисунок 2.2). При цьому  $U_{\text{вх.мах}} = 36 \text{ В}$ .

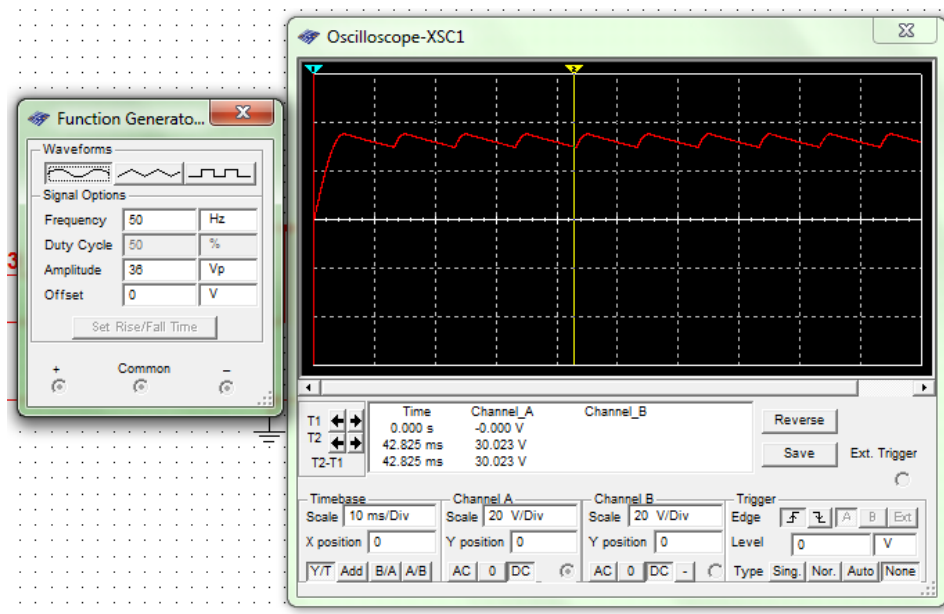


Рисунок 2.2 – Осцилограма на виході НЧ-фільтра та вхідна змінна напруга

4. Розрахуємо номінал баластного резистора  $R_b$ . Рівняння параметричного стабілізатора

$$U_{вх} = U_{ст} + (I_n + I_{ст})R_b. \quad (2.2)$$

Для нормальної роботи стабілізатора (щоб напруга на навантаженні завжди була в межах від  $U_{ст.min}$  до  $U_{ст.max}$ ) необхідно, щоб струм через стабілітрон завжди був в межах від  $I_{ст.min}$  до  $I_{ст.max}$ . Мінімальний струм через стабілітрон буде текти при мінімальному вхідному напрузі і максимальному струмі навантаження. Таким чином, опір баластного резистора:

$$R_b = (U_{вх.min} - U_{ст.min}) / (I_n.max + I_{ст.min}). \quad (2.3)$$

У нашому випадку

$$R_b = (U_{вх.min} - U_{ст}) / (I_n + I_{ст}). \quad (2.4)$$

Для побудови схеми в EWB буде використано ідеальний стабілітрон (ZENER\_VIRTUAL) зі струмом  $I_{ст} = 20 \text{ mA} = 0,02 \text{ A}$  та напругою  $U_{ст} = 24 \text{ В}$ . Це потрібно вказати у його властивостях на схемі. Тому,

$$R_b = (U_{вх.min} - U_{ст}) / (I_n + I_{ст}) = (30 - 24) / (0,1 + 0,02) = 50 \text{ Ом}.$$

5. Побудуємо в EWB схему стабілізатора, як показано на рисунку 2.3 та отримаємо осцилограму вхідних та вихідних характеристик. У прикладі

виявилось, що виміряна  $U_{вх.мах} = 35 \text{ В}$ .

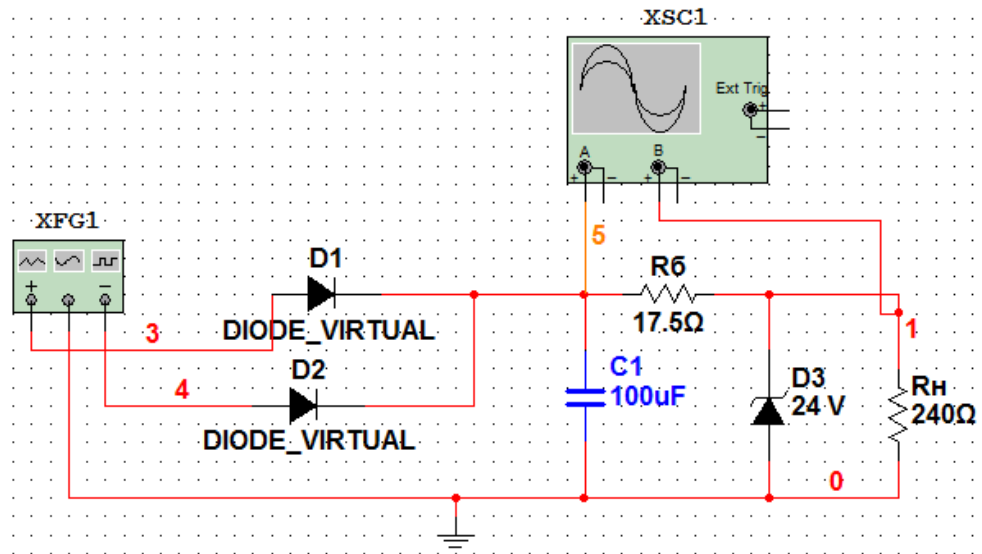


Рисунок 2.3 – Схема параметричного стабілізатора

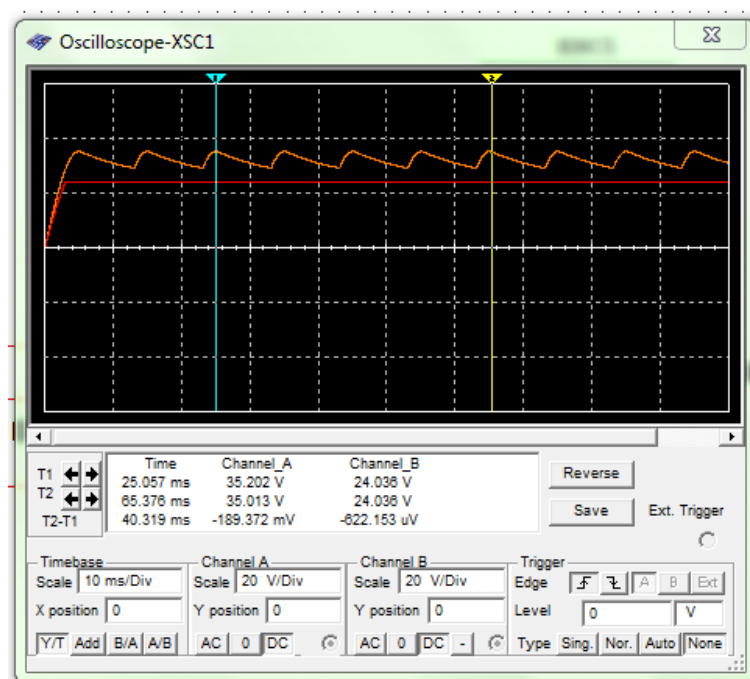


Рисунок 2.4 – Вхідна та вихідна осцилограми параметричного стабілізатора. Виміряна  $U_{вх.мах} = 35 \text{ В}$

6. Для вимірювань струмів і напруг підключимо до схеми мультиметри, як показано на рисунку 2.5. Тут вимірюємо: ХММ1 – струм навантаження, ХММ2 – падіння напруги на баластному резисторі. У прикладі вийшли

результати, показані на рисунку 2.5.

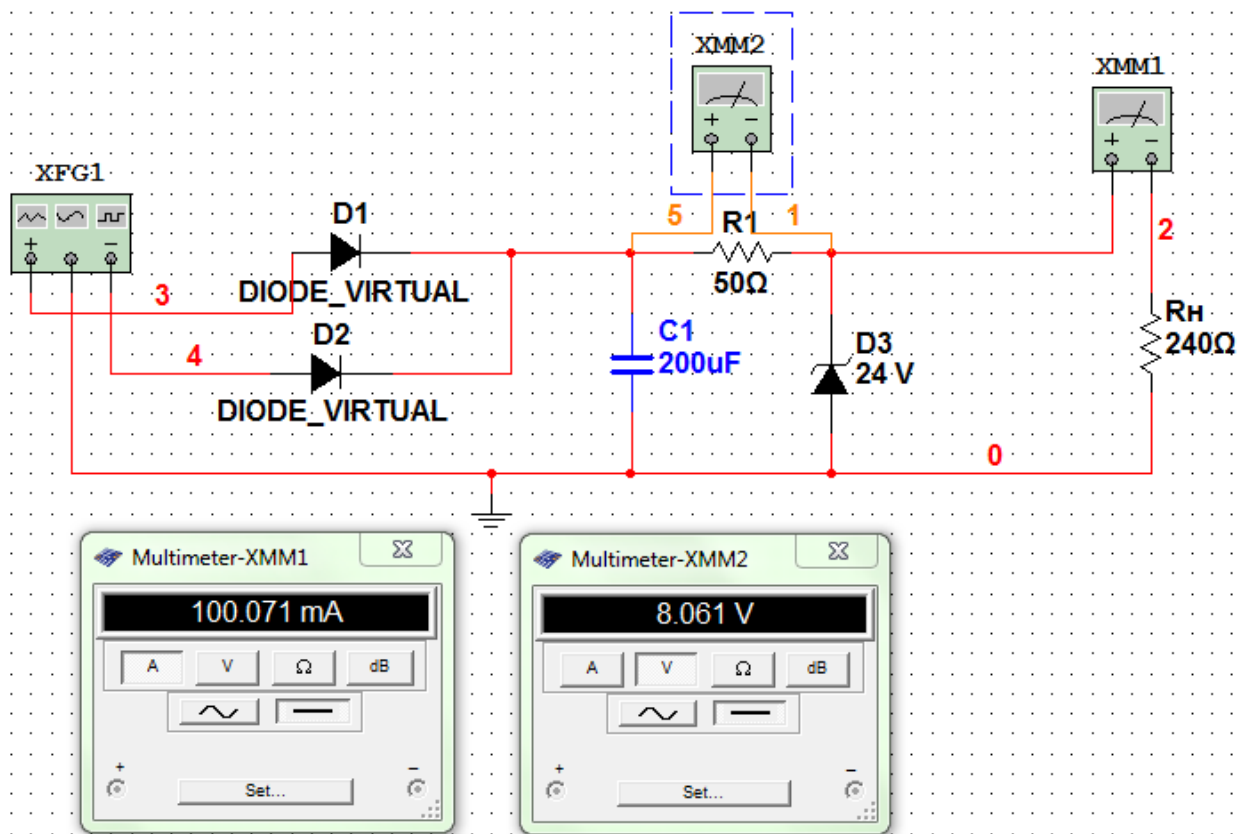


Рисунок 2.5 – Вимірювання струмів і напруги стабілізатора згідно завдання

7. Коефіцієнт нестабільності на виході стабілізатора повинен відповідати умові  $\delta i \leq 3\%$ . Знайдемо відхилення напруги на навантаженні  $\Delta U_{\text{ст}}$ , за якої  $\delta i = 3\%$ . Нестабільність вихідної напруги в залежності від струму навантаження

$$\delta i = \Delta U_{\text{ст}} / U_{\text{ст}}, \text{ при } U_{\text{вх}} = \text{const.} \quad (2.5)$$

Тоді

$$\Delta U_{\text{ст}} = \delta i * U_{\text{ст}} = 0,03 * 24 = 0,72 \text{ В.} \quad (2.6)$$

Виміряємо осцилографом відхилення вихідної напруги, підключивши його канал В як показано на рисунку 2.3. Зверніть увагу, що вимірювати потрібно лише змінну складову напруги, тому на каналі осцилографа замість кнопки «DC» натисніть «AC». У прикладі була отримана осцилограма, показана на рисунку 2.6. Тут  $\Delta U_{\text{ст}} \approx 51 \text{ мВ}$ , що набагато менше 0,72 В. Тому умова  $\delta i \leq 3\%$  витримана. Якщо під час виконання завдання виявилось, що це не так, підвищить

амплітуду  $U_{вх.max}$  і повторіть кроки 4-7.

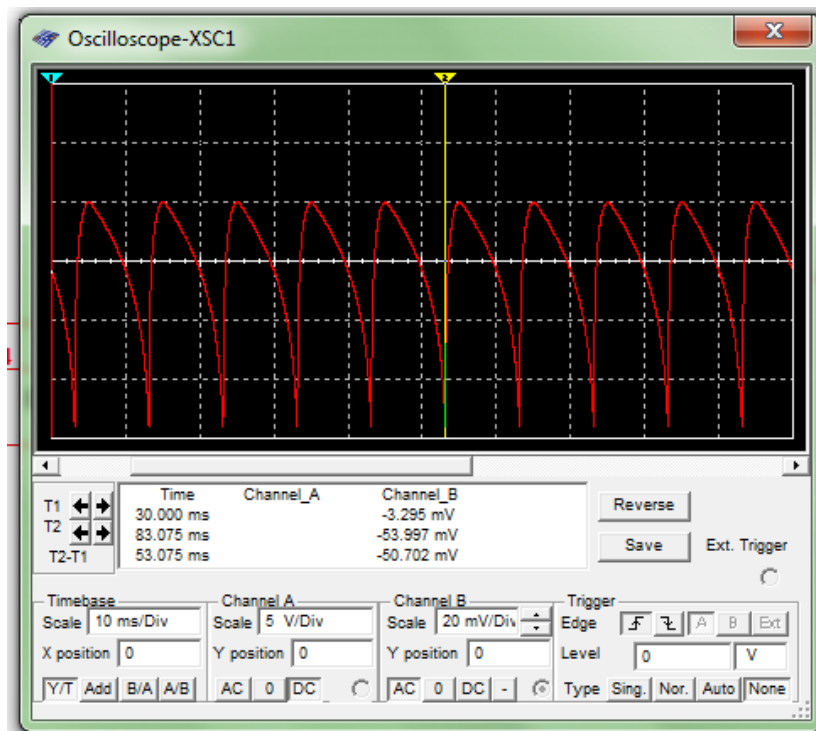


Рисунок 2.6 – Вимірювання  $\Delta U_{ст}$

8. Коефіцієнт корисної дії стабілізатора визначається як відношення вихідної потужності до потужності, споживаної стабілізатором:

$$\eta = P_{вих} / P_{вх}. \quad (2.7)$$

Вхідна потужність визначається за формулою:

$$P_{вх} = U_{вх} \cdot I_{вх} = 0,636 U_{вх.max} \cdot (I_{ст} + I_{н}). \quad (2.8)$$

Вихідна потужність визначається за формулою:

$$P_{вих} = I_{вих}^2 \cdot R_{н}. \quad (2.9)$$

Тоді  $\eta = (I_{н}^2 R_{н}) / (0,636 U_{вх.max} \cdot (I_{ст} + I_{н})) =$

$$= (0,1^2 \cdot 240) / (0,636 \cdot 35 \cdot (0,1 + 0,02)) \approx 0,899, \text{ тобто } \eta \approx 90\%.$$

## Робота з компенсаційним стабілізатором

1. Визначимо опір навантаження:

$$R_{н} = U_{out} / I_{н}. \quad (2.11)$$

За умовами попереднього прикладу  $U_{out} = 24 \text{ В}$ , тому

$$R_{н} = 24 / 1,5 = 16 \text{ Ом}.$$

2. В EWB створіть схему послідовного параметричного стабілізатора, як показано на рисунку 2.7. Транзистори виберіть тих же моделей, що й на рисунку, номінали ємності фільтра та  $R_n$ , відповідно, 200 мкФ і 16 Ом. Інші опори резисторів поки що не мають значення.

Характеристики 2N6703 для розрахунків:

Напруга колектор-емітер максимальна 110В;

Струм колектора максимальний 7А;

Коефіцієнт підсилення 20

Розсіювана потужність максимальна 50 Вт.

Характеристики BC847В для розрахунків:

Напруга колектор-емітер максимальна 6В

Струм колектора максимальний 100мА

Коефіцієнт підсилення 200.

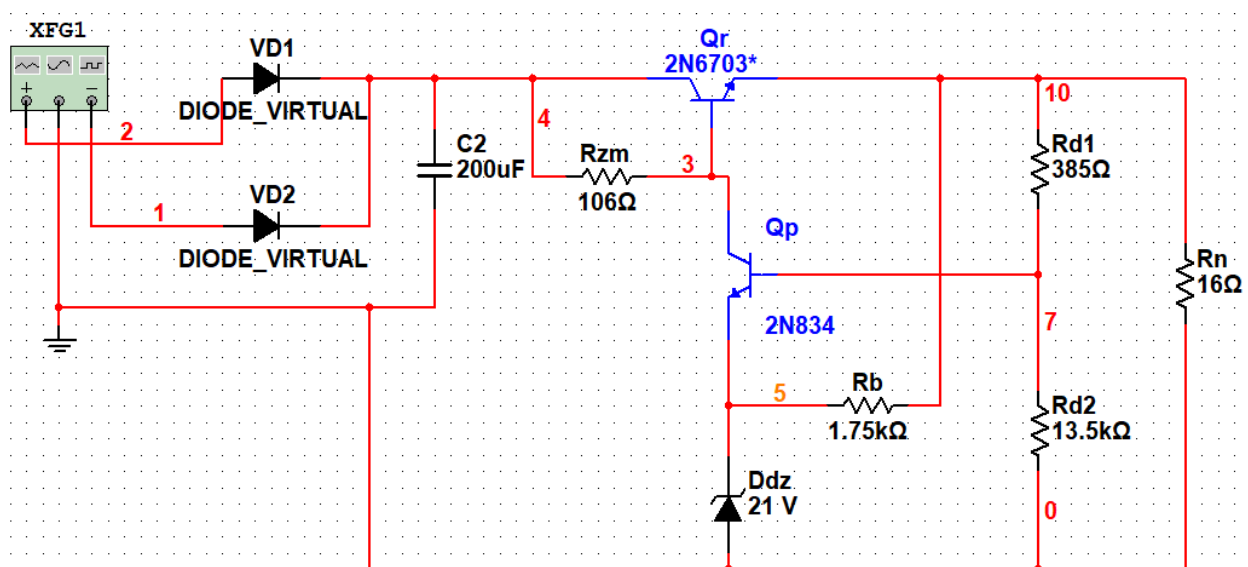


Рисунок 2.7 – Схема компенсаційного стабілізатора

3. Далі для розрахунку компенсаційного стабілізатора варто визначитись із цілеспрямуванням. Для прикладу, нам потрібно отримати стабільні 24 В з мережі  $U_{inr} = 230$  В. Рекомендується прийняти, що мережа побутова. Очікувані

коливання діючої напруги складають від 200 до 260 В, далі спрацює захисне обладнання мережі. Тобто, вхідне відхилення складе

$$\epsilon_{U_{in}} = \Delta U_{in} / U_{ind} = (260 - 200) / 230 = 0,26. \quad (2.12)$$

Таким чином, діапазон регулювання напруги на виході складе

$$\Delta U_{out} = \epsilon_{U_{in}} * U_{out} = 0,26 * 24 = 6,24 \text{ В}. \quad (2.13)$$

Очевидно, що всупереч рекомендаціям про прийняття для розрахунків падіння напруги на регулюючому транзисторі Qr у 4..5 В, для даного випадку потрібно прийняти напругу

$$U_{Qr} = \Delta U_{out} + U_{Qrbe} + U_0 = 6,24 + 0,6 + 2 = 8,3 \text{ В}, \quad (2.14)$$

тут  $U_{Qrbe} = 0,6 \text{ В}$  – падіння напруги між базою та емітером транзистора Qr;  $U_0 = 2 \text{ В}$  – деяке залишкове значення напруги, яке буде зберігатись на транзисторі за умови максимально низької вхідної напруги, для варіантів  $U_{out} \leq 15 \text{ В}$  його можна приймати 1 В, якщо  $U_{out} \leq 5 \text{ В}$  можна приймати 0 В. Чим більша залишкова напруга  $U_0$ , тим нижчий ККД схеми і більше нагрівається Qr за рахунок активної потужності. З іншого боку, з підвищенням  $U_0$  надійність схеми підвищується за умови правильно підібраних елементів.

4. Визначаємо необхідну діючу напругу на вході регулюючого транзистора Qr (на конденсаторі C2 вхідного НЧ-фільтра):

$$U_{C2} = U_{out} + U_{Qr} = 24 + 8,3 \text{ В} = 32,3 \text{ В}. \quad (2.15)$$

5. Амплітуда за змінною напругою на вході двохнапівперіодного випрямляча (на виході не показаного на схемі понижуючого трансформатора) складе для мостового двонапівперіодного випрямляча:

$$U_{AT} = U_{C2} / 0,636 + 2 * U_{VD}; \quad (2.16)$$

для баластної схеми випрямляча, яка показана на рисунку 2.7:

$$U_{AT} = U_{C2} / 0,636 + U_{VD} = 32,3 / 0,636 + 1 \approx 52 \text{ В}, \quad (2.16)$$

де  $U_{VD}$  – пряме падіння напруги на випрямних діодах мосту, 1 В.

6. Коефіцієнт трансформації для трансформатора блока живлення складе:

$$K = \sqrt{2} * U_{ind} / U_{AT} = 1,41 * 230 / 52 \approx 6,24. \quad (2.17)$$

Визначимо максимальну потужність, що розсіюється на транзисторі Qr:

$$P_{Qr} = U_{Qr} \cdot I_n = 8,3 \cdot 1,5 = 12,45 \text{ Вт.} \quad (2.18)$$

За значеннями  $I_n=1,5 \text{ А}$ ,  $U_{Qr}=8,3 \text{ В}$ ,  $P_{Qr}=12,45 \text{ Вт}$  вибираємо тип транзистора, що реалізує регулюючий елемент. У завданні його вже вибрано. Це 2N6703, у якого  $I_{k.\max}=7 \text{ А} > 1,5 \text{ А}$   $U_{ke.\max}=110 \text{ В} \gg 8,3 \text{ В}$ ,  $P_{\max}=50 \text{ Вт} > 12,45 \text{ Вт}$ . Запаси для реальних стабілізаторів завеликі, але для моделювання це підійде;

7. Вибираємо стабілітрон так щоб його падіння напруги  $U_{Ddz}$  було на 2..3 нижче очікуваної напруги стабілізації  $U_{out}$  або, у випадку коли напруга  $U_{out}$  не перевищує 12 В,  $U_{Ddz}$  має дорівнювати половині напруги стабілізатора  $U_{out}$ . Для прикладу, що розглядається  $U_{Ddz} = 24-3 = 21 \text{ В}$ .

Якщо такого стабілітрона на існує, зазвичай вибирають найближчий менший, наприклад, 11,6В. Але оскільки працюємо з ідеальним стабілітроном, нехай буде 12 В, якому виставимо струм 20 мА.

8. Для надійної роботи, нехай через стабілітрон протікає струм  $I_{Ddz}=24 \text{ мА}$ . Тоді половину з цього струму буде видавати баластний резистор  $R_b$ , а половину – підсилюючий транзистор  $Q_r$ . Тоді опір резистора  $R_b$  складе:

$$R_b = 2 \cdot U_{Ddz} / I_{Ddz} = 2 \cdot 21 / 0,024 = 1750 \text{ Ом.} \quad (2.19)$$

9. Визначимо максимальну напругу колектор-емітер підсилювального транзистора  $Q_r$ :

$$U_{Qpce} = U_{out} - U_{Ddz} - U_{Qrbe} = 24 - 21 - 0,6 = 2,4 \text{ В.} \quad (2.20)$$

10. Вибираємо в якості підсилювального елемента транзистор типу BC847В з  $\beta = 200$  (вже вибрано і внесено у схему). Паспортний струм колектора транзистора максимальний 100 мА, що більше очікуваного

$$I_{DQpce} = I_{Ddz} / 2 = 24 / 2 = 12 \text{ мА.} \quad (2.21)$$

11. Очікувана розсіювана потужність

$$P_{DQpce} = U_{Qp3} \cdot I_{DQpce} = 2,4 \cdot 0,012 = 0,029 \text{ Вт.} \quad (2.22)$$

Це менше максимально допустимої потужності  $Q_r$ , яка дорівнює 6 Вт. Тому обраний транзистор підходить для схеми.

12. Визначимо струм бази транзистора  $Q_r$ . Струм емітера  $I_{Qrbe} = I_n = 1,5 \text{ А}$ . Струм бази  $Q_r$  становить

$$I_{Qrbe} = I_{eQ2} / (1 + \beta_{Q2}) = I_H / (1 + \beta_{Q2}) = 1,5 / (1 + 20) \approx 72 \text{ мА}. \quad (2.23)$$

13. Визначимо опір  $R_{zm}$ . Його струм складе

$$I_{Rzm} = I_{Qrbe} + I_{DQpce} = 72 + 12 = 84 \text{ мА}. \quad (2.24)$$

Падіння напруги на резисторі  $R_{zm}$

$$U_{Rzm} = U_{C2} - U_{Qqce} - U_{Ddz} = 32,3 - 2,4 - 21 = 8,9 \text{ В}. \quad (2.25)$$

$$R_{zm} = U_{Rzm} / I_{Rzm} = 8,9 / 0,084 = 106 \text{ Ом}. \quad (2.26)$$

14. Визначимо струм бази транзистора  $Q_p$ .

$$I_{Qpbe} = I_{DQpce} / (1 + \beta_{Q3}) = 0,012 / (200 + 1) \approx 0,06 \text{ мА}. \quad (2.27)$$

15. Струм бази  $I_{Qpbe}$  (на виході дільника) для нормальної роботи дільника повинен бути у 10...20 разів менше від струму  $I_d$  самого дільника, тоді:

$$I_d = 20 * I_{Qpbe} = 0,06 * 20 = 1,6 \text{ мА}. \quad (2.28)$$

16. Резистор дільника  $R_{d1}$  складе

$$R_{d1} = (U_{out} - U_{Ddz} - U_{Qpce}) / I_d = (24 - 21 - 2,4) / 0,0016 = 375 \text{ Ом}. \quad (2.29)$$

17. Резистор дільника  $R_{d2}$  складе

$$R_{d2} = (U_{Ddz} + U_{Qpbe}) / I_d = (21 + 0,6) / 0,0016 = 13\,500 \text{ Ом}. \quad (2.30)$$

18. Підставивши всі розрахунки у схему, отримаємо осцилограму входу й виходу стабілізатора, показану на рисунку 2.8. З неї видно, що очікувана напруга майже досягнута, але відхилення за діючою складає приблизно 2 В. Тим не менш, стабілізатор працює, про що свідчать зрізані максимуми вихідної осцилограми. Крім того, на вихідній осцилограмі є провалення напруги до 17 В, коли очікується 24. Це свідчить про недостатність ємності  $C_2 = 200 \text{ мкФ}$  вхідного фільтру. Виставимо її на 2000 мкФ, як рекомендовано. У результаті отримаємо осцилограму, показану на рисунку 2.9. Тут, завдяки інтегруючим властивостям НЧ-фільтра значення напруги покращились. Але вихідна діюча напруга склала 23,74 В замість очікуваних 24. Оскільки маємо близько 18 В запасу регулювання задіємо підлаштування номіналів резисторів  $R_{d1}$  і  $R_{d2}$  дільника для зменшення струму бази транзистора підсилення  $Q_p$ .

На рисунку 2.10 показані осцилограми, діюча вихідна напруга та

скориговані номінали резисторів дільника.

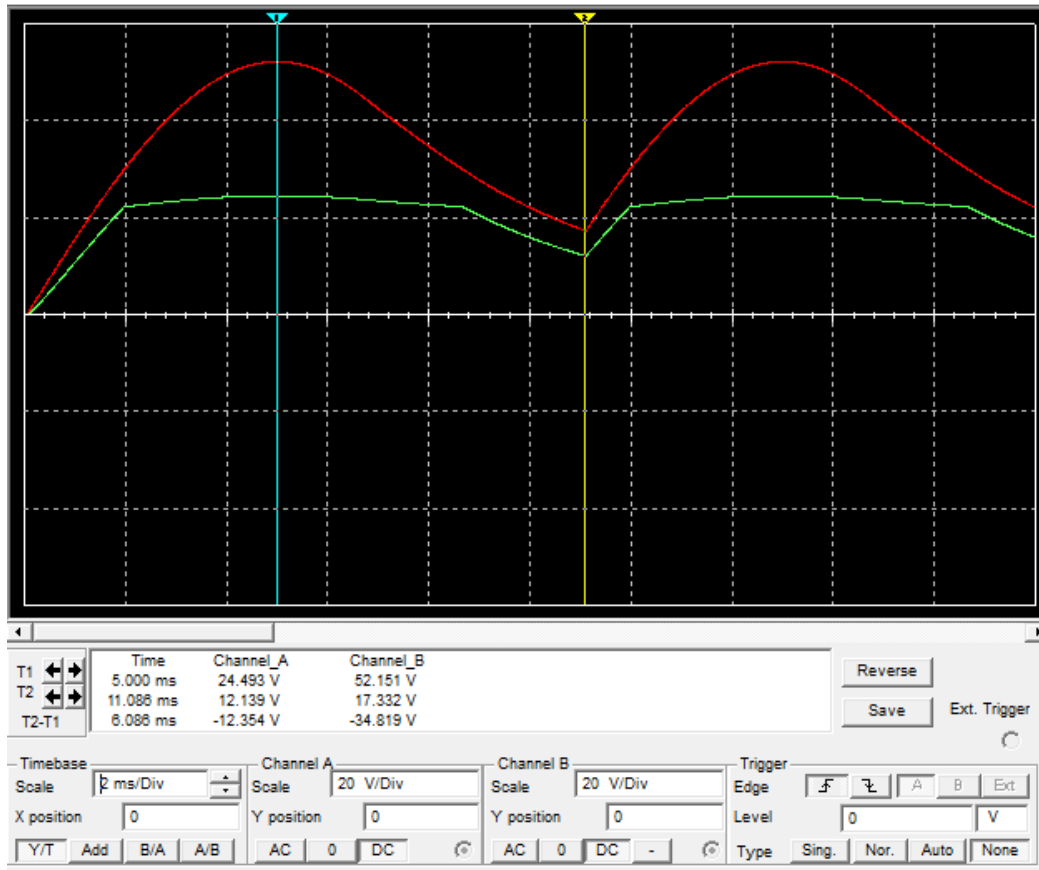


Рисунок 2.8 – Вхідна та вихідна осцилограми роботи компенсаційного стабілізатора у схемі з недостатньою ємністю НЧ-фільтра

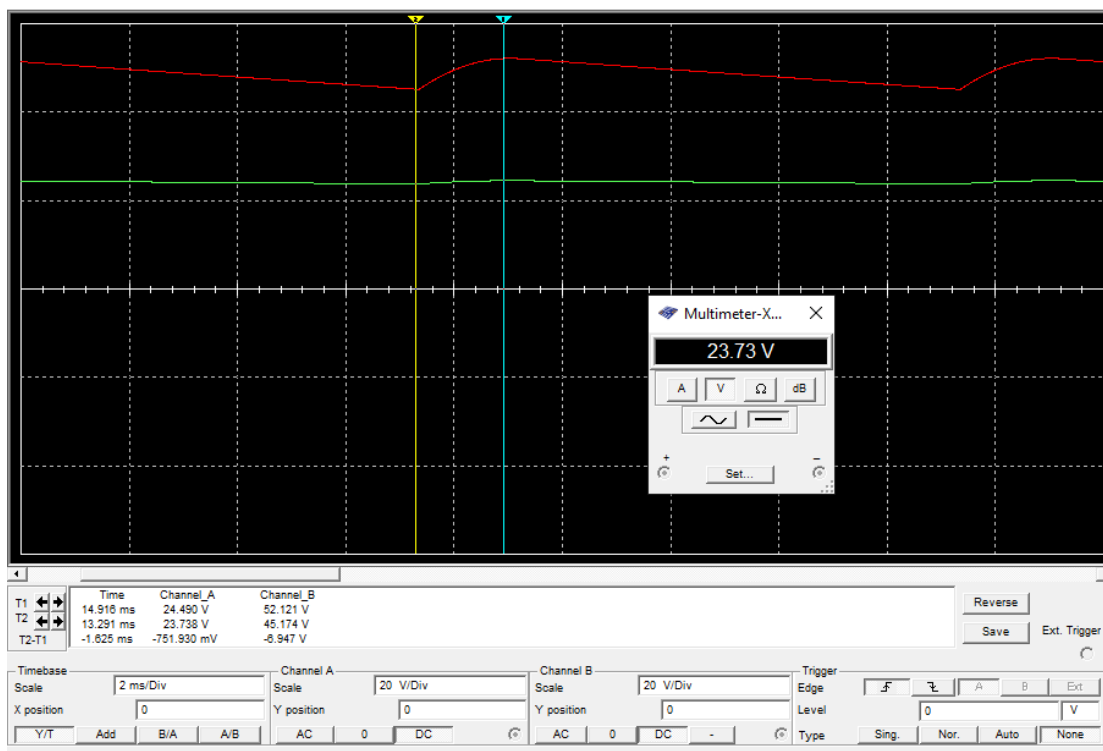


Рисунок 2.9 – Вхідна та вихідна осцилограми роботи компенсаційного стабілізатора у схемі зі скоригованою ємністю НЧ-фільтра

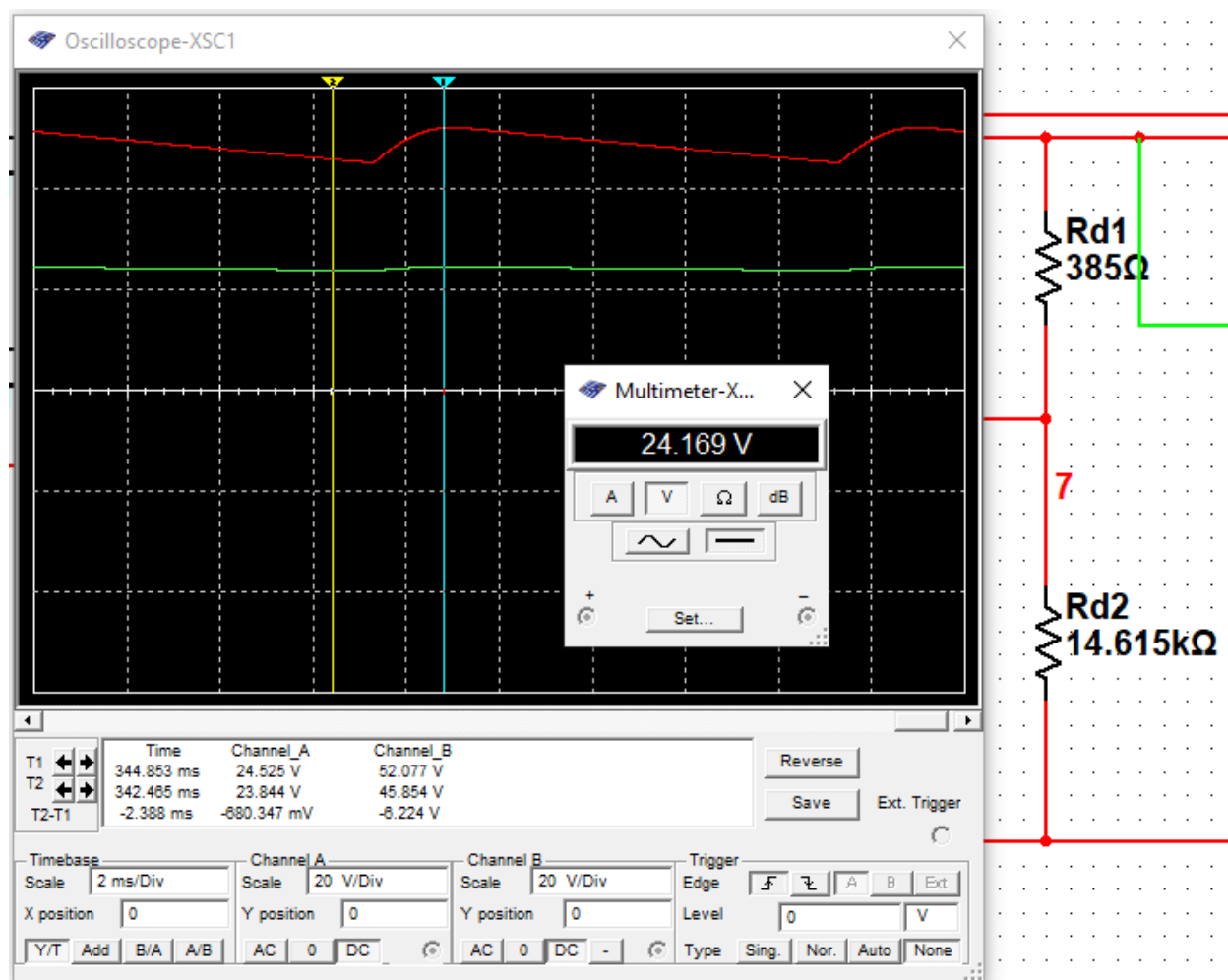


Рисунок 2.10 – Вхідна та вихідна осцилограми роботи компенсаційного стабілізатора у схемі зі скоригованими резисторами дільника підсилювача відхилень.

19. Визначимо статичну помилку стабілізатора:

$$\delta_u = \Delta U_{out} / U_{out} * 100\% = (24,169 - 24) / 24 * 100\% = 0,7\%. \quad (2.31)$$

Статична помилка в нормі, настройка резисторів дільника коректна.

20. Визначимо коефіцієнт нестабільності стабілізатора  $\delta i$ :

$$\delta i = \max\{\Delta U_{out}\} / U_{out} * 100\% = \max\{23,844 - 24, 25,525 - 24\} / 24 * 100\% = 2,2\%. \quad (2.32)$$

Результат входить у рамки завдання  $\pm 5\%$ . Якщо це не так, спробуйте підвищити вхідну напругу та діапазон напруги  $\Delta u_{out}$ , який виділений для

регулювання на транзисторі Qr. Після цього перерахуйте схему. Якщо знову не вийшло, зменшіть на 1...2 В напругу на стабілітроні, щоб транзистор Qr працював у ширшому діапазоні.

21. ККД компенсаційного стабілізатора визначається за тією ж методикою, що і для параметричного:  $\eta = P_{вих}/P_{вх}$ . Скористайтесь мультиметром та набутим досвідом.

## 2.6 Варіанти завдань

Таблиця 2.1 – Варіанти завдань

| Стабілізатор   | Напруга стабілізації, Uст, В            |
|----------------|-----------------------------------------|
| параметричний  | $3В + x/2$                              |
| компенсаційний | $3В + x/3$ , округлити до одиниць Вольт |

де x – номер студента за списком у журналі

Транзистори для компенсаційного стабілізатора: регулюючий – 2N6703; підсилювач у мості – 2N834.

## 2.7 Контрольні питання

1. Чим відрізняється компенсаційний від параметричного стабілізатора?
2. Чим відрізняються коефіцієнт пульсації, коефіцієнт фільтрації і коефіцієнт стабілізації?
3. Як відрізняються вхідна і вихідна напруги стабілізатора? Чому?
4. Як впливає збільшення навантаження на осцилограму вихідної напруги стабілізатора?
5. Який принцип роботи схеми захисту від короткого замикання?
6. Що є спільного у схемі параметричного і компенсаційного стабілізатора?

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ КАСКАДІВ ТРАНЗИСТОРНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ

## 3.1 Мета лабораторної роботи

Ознайомитися с основними принципами роботи підсилювача напруги за схемою із загальним емітером.

## 3.2 Постановка задачі

1. Розрахуйте підсилювач змінної напруги із загальним емітером зі зміщенням напруги бази та опором зворотного зв'язку у ланцюзі емітера за своїм варіантом завдання. Побудуйте в у середовищі Multisim схему згідно розрахунку.

2. Виміряйте струми спокою колектора і бази, напруги спокою колектора і бази. Порівняйте з розрахунком.
3. Подайте на вхід підсилювача змінний гармонійний та визначте коефіцієнт підсилення утвореної схеми. Порівняйте із заданим.
4. Визначте падіння змінної напруги на розділюючих конденсаторах. Вкажіть, як вони вплинули на коефіцієнт підсилення схеми.
5. Вийдіть на заданий коефіцієнт підсилення.
6. Зніміть осцилограми входів і виходів на частотах 16 Гц і 20 кГц та визначте коефіцієнти підсилення. Зробіть висновки.

### **3.3 Порядок виконання роботи**

1. Ознайомитися з лекційним матеріалом щодо підсилювача із загальним емітером;
2. Ознайомитися з методичним матеріалом щодо розрахунку схеми згідно завдання, підбору резисторів та конденсаторів;
3. Ознайомитися з методичним матеріалом щодо необхідних характеристик транзистора;
4. Побудувати у середовищі Multisim схему підсилювача згідно розрахунку;
5. Виміряти струми спокою колектора і бази, напруги спокою колектора і бази за допомогою Multimeter. Порівняти з розрахунком, подавши результати порівняння у вигляді таблиці;
6. Подати на вхід підсилювача змінний гармонійний сигнал амплітудою 20 мВ і частотою 1 кГц. Зняти осцилограми на вході і виході схеми та визначте коефіцієнт підсилення утвореної схеми як відношення амплітуд сигналів. Порівняти із заданим, подавши результат у вигляді стовпчика (строки) таблиці попереднього пункту (п. 5);
7. Визначити падіння змінної напруги на роздільних конденсаторах за допомогою Multimeter. Записати, як вони вплинули на коефіцієнт підсилення схеми взагалі;
8. Змінюючи та підбираючи номінали резисторів, вийти на заданий коефіцієнт підсилення. Якщо схема виходить в насичення (гармонійний сигнал на виході стає зрізаним), підвищити напругу Еж. Записати нові номінали і напругу;
9. У скоригованій схемі зняти осцилограми входів і виходів на частотах 16 Гц і 20 кГц та визначте коефіцієнти підсилення. Зробіть висновки, чи змінюється коефіцієнт підсилення схеми на межах звукового діапазону.
10. Зробити висновки щодо можливостей схеми підсилювача.

### 3.4 Зміст звіту

1. Назва, мета й завдання лабораторної роботи згідно свого варіанту завдання.
2. Розрахунок підсилювача згідно варіанту завдання.
3. Схему підсилювача, включаючи її тестовий генератор та вимірювальні прилади.
4. Результати порівняння струмів, напруг спокою, коефіцієнту підсилення розрахункових та змодельованої схеми.
5. Парні осцилограми вхідної та вихідної амплітуди сигналів побудованої схеми.
6. Нові номінали резисторів, живлення, які були отримані під час доведення коефіцієнта підсилення до заданого.
7. Парні осцилограми вхідної та вихідної амплітуди сигналів відлагодженої схеми на частотах 16Гц, 1кГц, 20кГц.
8. Коефіцієнти підсилення нової схеми на частотах 16Гц, 20кГц і висновки щодо їх поведінки відносно коефіцієнта на частоті 1кГц
9. Висновки.

### 3.5 Теоретичні відомості

Виходимо з того, що обмеження вихідного сигналу має бути рівномірним. Обмеження зверху (у верхній напівхвилі гармонійного сигналу) обумовлено досягненням потенціалу колектора напруги джерела живлення і настає при повністю закритому транзисторі. Колекторний струм, а отже і базовий ( $I_B = I_K \cdot \beta$ ) близькі до нуля. Обмеження знизу (у нижній напівхвилі сигналу) настає при повністю відкритому транзисторі, тобто  $I_K \gg I_{RK}$ . Тоді внутрішній опір відкритого транзистора малий і не впливає на струм колекторного ланцюга.

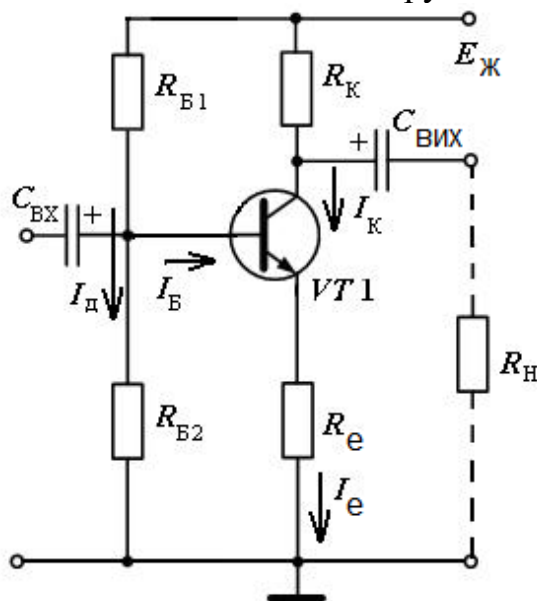


Рисунок 3.1 – Схема підсилювача змінної напруги із загальним емітером зі зміщенням напруги бази

У емітерному ланцюзі до струму колектора додається струм бази  $I_b$ , але він досить малий (у  $\beta$  разів менше  $I_k$ , приблизно у 50...100 разів). Тому можна знехтувати  $I_b$  і прийняти, що струм колектора дорівнює струму емітера. Тоді обмеження знизу настане при

$$U_{вих} = U_{кн} = I_k * R_e = [E_{ж} / (R_k + R_e)] * R_e, \quad (3.1)$$

див. рисунок м.1. Вибираємо  $R_e \ll R_k$ . Тоді Можна з достатньою точністю вважати коефіцієнт посилення вихідного каскаду

$$K = R_k / R_e, \quad (3.2)$$

завдяки наявності негативного зворотного зв'язку обумовленого  $R_e$ .

Колекторний і емітерний опори впливають і на інші важливі параметри підсилювального каскаду, а саме на вхідний ( $R_e$ ) і вихідний ( $R_k$ ) опори.

З достатнім ступенем точності можна вважати, що вхідний опір каскаду

$$R_{вх} = R_e * \beta, \quad (3.3)$$

а вихідний опір приблизно дорівнює  $R_{вих} = R_k$ .

Під час розрахунку каскаду зі схемою із загальним емітером, необхідно керуватися умовами компромісу:

- для збільшення коефіцієнта посилення необхідно зменшувати  $R_e$  та збільшувати  $R_k$ ;
- для збільшення максимального вихідної напруги необхідно зменшувати  $R_e$  та збільшувати  $R_k$  (але є обмеження  $E_{ж}$ ), оскільки корисна напруга знімається тільки з  $R_k$ ;
- для узгодження з попереднім каскадом підсилення вхідний опір, а отже і  $R_e = R_{вх} / \beta$  повинен бути якомога більшим;
- для узгодження з наступним каскадом вихідний опір, а, отже, і  $R_k = R_{вих}$  має бути якомога меншим.
- номінал резисторів  $R_k$  і  $R_e$  обмежує струми транзистора і розсіювану на ньому потужність, що не дозволяє останньому вийти з ладу через тепловий пробій.

### **Розглянемо порядок розрахунку схеми.**

Нехай у каскаді напруга живлення  $E_{ж} = 12V$ , необхідно отримати коефіцієнт підсилення 10.

Для визначення номіналів резисторів каскаду виконаємо наступні розрахунки:

#### **1. Приймаємо**

$$R_k = 2 * K * R_e = 2 * 5 * R_e, \quad (3.4)$$

Подвійний запас по навантаженню дозволяє забезпечити потрібний коефіцієнт підсилення  $K = 5$ .

2. Візьмемо транзистор BC847A.  $P_{max} = 250$  мВт;  $I_{max} = 100$  мА;  $h_{21e}(\beta) \approx 110 \dots 200$ . Для розрахунків прийmemo  $\beta = 150$ .

3. Максимум потужності транзистора розсіюється під час проходження підсинюваного сигналу через точку спокою. Приймемо коефіцієнт запасу за розсіюваною потужністю 0,8. Тоді

$$P_{розр.max} = 0,8 * P_{max} = 0,8 * 250 \text{ мВт} = 200 \text{ мВт}. \quad (3.5)$$

4. Струм колектору у статичному режимі (без сигналу)

$$I_{K0} = P_{розр.max} / U_{KE0} = P_{розр.max} / (E_{ж}/2) = 200 / (12/2) \approx 33 \text{ мА}. \quad (3.6)$$

5. Враховуючи, що на транзисторі в статичному режимі (без сигналу) падає половина напруги живлення, друга половина напруги живлення буде падати на резисторах, тоді

$$(R_K + R_E) = (E_{ж}/2) / I_{K0} = (12/2) / 0,033 \approx 182 \text{ Ом}. \quad (3.7)$$

6. З урахуванням п.1, оберемо з існуючого ряду E24 номіналів резисторів  $R_K = 160 \text{ Ом}$ ;  $R_E = 16 \text{ Ом}$ .

7. Знайдемо напругу на колекторі транзистора без сигналу. Вона складе

$$U_{K0} = U_{KE0} + I_{K0} * R_E = E_{ж} - I_{K0} * R_K = 12 - 0,033 * 160 = 6,72 \text{ В}. \quad (3.8)$$

8. Базовий струм визначається напругою зміщення на базі, яке задається базовим резистивним дільником  $R_{61}$ ,  $R_{62}$ . Струм бази

$$I_B = I_K / \beta \approx [E_{ж} / (R_K + R_E)] / \beta = [12 / (160 + 16)] / 150 \approx 0,00046 \text{ А} = 0,46 \text{ мА}. \quad (3.9)$$

9. Струм резистивного базового подільника повинен бути набагато більшим (у 5...10 разів) струму бази, щоб останній не впливав на напругу зсуву. Вибираємо струм дільника

$$I_{пд} = 10 * I_B = 10 * 0,46 = 4,6 \text{ мА}. \quad (3.10)$$

Тоді

$$(R_{61} + R_{62}) = E_{ж} / I_{пд} = 12 / 4,6 \approx 2,61 \text{ кОм}. \quad (3.11)$$

10. Падіння напруги на емітері транзистора в режимі спокою

$$U_{E0} = (I_{K0} + I_{60}) * R_E = (I_{K0} + I_{K0} / \beta) * R_E = I_{K0} * (\beta + 1) / \beta * R_E = \\ = 0,033 * (150 + 1) / 150 * 16 \approx 0,53 \text{ В}. \quad (3.12)$$

11. Напруга на базі кремнієвих транзисторів складає 0,6...0,7В, на базі германієвих – 0,3...0,4В. Для простоти обчислень приймаємо  $U_{6e0} = 0,67 \text{ В}$ , тоді повна напруга

$$U_{60} = U_{E0} + U_{6e0} = 0,53 + 0,67 = 1,2 \text{ В}. \quad (3.13)$$

12. Оскільки напруга дільника

$$U_{60} = E_{ж} * R_{62} / (R_{61} + R_{62}), \quad (3.14)$$

$$R_{62} = (R_{61} + R_{62}) * U_{60} / E_{ж} = 6 * 1,2 / 12 = 0,6 \text{ кОм}, \quad (3.15)$$

приймаємо по ряду E24  $R_{62} = 620 \text{ Ом}$ .

13. Баластний резистор дільника

$$R_{61} = (R_{61} + R_{62}) - R_{62} = 6000 - 620 = 5380 \text{ Ом}, \quad (3.16)$$

приймаємо по ряду E24  $R_{61} = 5,1 \text{ кОм}$ .

14. Вхідний опір каскаду

$$R_{вх} \approx R_E * \beta = 16 * 150 = 256 \text{ Ом}. \quad (3.17)$$

15. Реактивний опір змінному струму у діапазоні підсилення на вході повинен скласти

$$X_{C_{вх}} < (0,01 \dots 0,1) R_{вх}. \quad (3.18)$$

Нехай він складає  $X_{C_{вх}} = 2 \text{ Ом}$  на частоті 1 кГц. Оскільки

$$X_{C_{вх}} = 1 / 2\pi f C_{вх}, \quad (3.19)$$

то

$$C_{BX} = 1/2\pi f X_{C_{BX}} = 1/(2 * 3,14 * 1000 * 2) \approx 7,96 * 10^{-5} \approx 82 \text{ мкФ} \quad (3.20)$$

з урахуванням ряду E24. Відповідно, на 20 Гц опір  $X_{C_{BX}} = 10 \text{ Ом}$ , що задовольняє вимогам  $X_{C_{BX}} < (0,01 \dots 0,1) R_{BX}$  для звукового діапазону.

16. Реактивний опір змінному струму у діапазоні підсилення на виході повинен скласти

$$X_{C_{ВХ}} < (0,01 \dots 0,1) R_H. \quad (3.21)$$

Для скорочення обчислень у роботі, будемо вважати, що вхідний опір наступного каскаду  $R_H$  аналогічний  $R_{BX}$ . Тоді приймемо  $C_{ВХ} \approx 82 \text{ мкФ}$ .

Таким чином, на транзисторі BC847A можна побудувати підсилювач змінної напруги із загальним емітером зі зміщенням напруги бази із напругою живлення 12В, з коефіцієнтом підсилення 10, якщо підібрати наступні номінали резисторів:  $R_K = 160 \text{ Ом}$ ;  $R_E = 16 \text{ Ом}$ ;  $R_{\delta 1} = 5,1 \text{ кОм}$ ;  $R_{\delta 2} = 620 \text{ Ом}$ . Розділюючі конденсатори прийняти по 82 мкФ. Опір навантаження  $R_H = 256 \text{ Ом}$ .

Використання номінального ряду E24.

1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8;  
2,0; 2,2; 2,4; 2,7;  
3,0; 3,3; 3,6; 3,9;  
4,3; 4,7;  
5,1; 5,6;  
6,2; 6,8;  
7,5;  
8,2;  
9,1.

Ряд E24 використовується для вибору номіналів резисторів, конденсаторів, невеликих індуктивностей. Щоб вибрати потрібний номінал, необхідно підібрати найбільш близьке за мантисою число ряду, а порядок приймається, який потрібен. Наприклад, маємо необхідність у опорі 290 Ом. У формі степені мантиса\*порядок це становить  $2,9 * 10^2 \text{ Ом}$ . Найближча мантиса – 2,7. Отже, можна знайти резистор  $2,7 * 10^2 \text{ Ом}$ , тобто 290 Ом. Множники, що задають порядок для резисторів складають 0,1, 10, 100, 1000... 10 000 000. Для конденсаторів E24 застосовується аналогічно, тут множники можуть задавати ємність від одиниць пікофарад до сотень мікрофарад.

Характеристики транзистора 2N2218:

Структура - n-p-n;

Струм колектора, не більше: 0.8 А;

Розсіювана потужність колектора, не більше: 0,8 Вт;

Коефіцієнт посилення транзистора: від 40 до 120.

Характеристики транзистора 2N4401:

Структура - n-p-n;

Струм колектора, не більше: 0.6 А;  
 Розсіює потужність колектора, не більше: 0.625 Вт;  
 Коефіцієнт посилення транзистора: від 100 до 300.

### 3.6 Варіанти завдань

Таблиця 3.1 – Варіанти завдань

| Модель транзистора            | Напруга Еж                                           | Коефіцієнт підсилення К                             |
|-------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Парні за списком:<br>2N2218   | 9В+х/2, десяткові<br>значення округляти до<br>менших | 4+х/2 десяткові<br>значення округляти до<br>більших |
| Непарні за списком:<br>2N4401 |                                                      |                                                     |

Примітка: х – студента номер за списком.

### 3.7 Контрольні питання

1. Чим схема підсилювача з загальним емітером з фіксованим струмом бази відрізняється від схеми з загальним емітером з фіксованою напругою бази?
2. Як задається коефіцієнт підсилення у схемі із загальним емітером?
3. Як задається негативний зворотній зв'язок у схемі із загальним емітером?
4. Як відрізняються коефіцієнти підсилення схем із загальним емітером та загальною базою?
5. Навіщо у схемі із загальним емітером у ланцюзі бази подільник напруги?
6. Як називається показник ге транзистора і як його визначити?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ

### 4.1 Мета лабораторної роботи

Ознайомитися с основними принципами побудови аналогових обчислювальних елементів.

### 4.2 Постановка задачі

1. Побудуйте схему обчислення вихідної напруги за варіантом завдання.
2. Розрахуйте і встановіть номінали резисторів підсилювачів так, щоб досягти заданих коефіцієнтів підсилення.

3. Розрахуйте і встановіть номінали RC-ланцюга НЧ- фільтра на схемі так, амплітуда частоти перешкоди була зменшена у 100 разів.

4. Подайте на входи схеми напруги  $a$ ,  $b$ ,  $d$  і перешкоду  $f(d)$  та зніміть осцилограму на виході схеми та на виходах усіх каскадів операційних підсилювачів.

5. Відлагодьте схему.

6. Додайте до напруги  $a$  -30 мВ, -20 мВ, -10 мВ, 10 мВ, 20 мВ, 30 мВ та зніміть осцилограму на виході схеми. Результати вимірювань зведіть у таблицю.

7. Поверніть напругу  $a$  до тієї, що у завданні та повторіть дії п.6 для напруги  $b$ .

8. Поверніть напругу  $b$  до тієї, що у завданні та повторіть дії п.6 для напруги  $d$ .

9. Поверніть напругу  $d$  до тієї, що у завданні та змініть частоту перешкоди на -0,5 кГц та на +0,5 кГц. Зніміть осцилограми на виході схеми. Як змінилась вихідна осцилограма відносно знятої за п. 4 або п. 5?

10. Зробіть висновки.

#### **4.3 Порядок виконання роботи**

1. Ознайомитися з лекційним матеріалом щодо схем з операційними підсилювачами для обчислень та активних фільтрів;

2. Відповідно до формули у варіанті завдання побудувати в EWB схему на операційних підсилювачах, що включає інвертуючі чи неінвертуючі суматори або віднімачі, фільтр низьких частот. Використовувати операційний підсилювач 3288RT із двополярним живленням  $\pm 15\text{В}$ ;

3. Розрахувати коефіцієнти підсилення суматорів, віднімачів, НЧ-фільтра так, щоб на входах операційних підсилювачів збереглись, за можливістю номінали резисторів по 1 кОм;

4. Розрахувати за частотою зріза НЧ-фільтра та резистором фільтруючого ланцюга RC ємність  $C$ . Пропорційно збільшити її так, щоб амплітуда частоти перешкоди була придушена не до 71% (на 3 дБ), а до 1% як вимагає завдання.

5. Внести результати розрахунків номіналів у схему, встановити вхідні напруги та частоту перешкоди згідно завдання. В якості перешкоди використати гармонійний сигнал генератора сигналів;

6. Розрахувати, які напруги згідно формули завдання повинні бути на виході схеми та на виходах каскадів операційних підсилювачів.

7. Зняти осцилограми напруг на виході схеми та на виходах каскадів операційних підсилювачів. Порівняти з розрахованими. У випадку неспівпадіння більше, ніж на 1% необхідно відлагодити схему шляхом підбору резисторів і ємності та зняти осцилограми знову;

8. Виконати п.п. 8-6 завдання та представити результати у вигляді таблиць (або таблиці). Самі осцилограми представляти не треба;

9. Виконати завдання п. 9, представити осцилограми на виході та відповіді на питання у завданні п.9;

10. Зробити висновки щодо результатів роботи.

#### 4.4 Зміст звіту

1. Назва, мета й завдання лабораторної роботи згідно свого варіанту завдання.

2. Розрахунок аналогової обчислювальної схеми згідно варіанту завдання.

3. Рисунок відлагодженої аналогової обчислювальної схеми в Multisim, включаючи її джерела напруги, генератор перешкоди та осцилоскоп;

4. Осцилограми на виході схеми та на виходах всіх каскадів операційних підсилювачів для відлагодженої схеми.

5. Осцилограми вихідних напруг при зміні частоти перешкоди.

6. Відповідь на запитання за п.9 завдання.

7. Висновки.

#### 4.5 Теоретичні відомості

В якості демонстрації побудуємо схему, котра на виході реалізує формулу  $-K_1 \cdot (a+b) - K_2 \cdot f(c)$ , причому  $K_1=10$ ,  $K_2=1$ ,  $a=10$  мВ,  $b=20$  мВ,  $d=100$  мВ,  $f(d)=50$  мВ з частотою перешкоди  $f=1$  кГц. Схема в Multisim буде виглядати, як показано на рисунку 4.1.

Розглянемо її докладніше.

Вираз  $V_1 = -K_1 \cdot (a+b)$  реалізовано на підсилювачеві U2. Це одночасно інвертуючий суматор й підсилювач. Коефіцієнт  $K_1$  забезпечено резисторами R2 для напруги a, R3 для напруги b та R6 зворотного зв'язку. Якби R2 та R3 були різні, то і коефіцієнти підсилення для a та b були б різні. Але тут  $R_2=R_3$ , тому

$$K_1 = -R_6/R_2 = -R_6/R_3. \quad (4.1)$$

$R_2=R_3=1$ кОм,  $K_1=10$ , підсилювач інвертуючий. Тоді

$$R_6 = -K_1 \cdot R_3 = 10 \cdot 1 = 10 \text{ кОм}. \quad (4.2)$$

Вираз  $V_2 = K_2 \cdot f(c) = K_2 \cdot (d + f(d))$  реалізовано за допомогою активного НЧ-фільтра з коефіцієнтом підсилення 1 на операційному підсилювачі U1. Тому його резистори  $R_1=R_4=1$ кОм. Частота зрізу у нього складає

$$F_0 = 1/(2\pi R_4 \cdot C_1). \quad (4.3)$$

Але це ослаблення перешкоди до 0,71. Щоб послабити до 0,01 необхідно зменшити у  $0,71/0,01=71$  раз. Тобто формула частоти перешкоди, амплітуда якої зменшується у 100 разів буде

$$F_1 = 71/(2\pi R_4 \cdot C_1). \quad (4.4)$$

R4 відповідає за коефіцієнт підсилення, тому підбирати слід конденсатор C1. Тоді

$$C_1 = 71/(2\pi R_4 \cdot F_1) = 71/(2 \cdot 3.14 \cdot 1000 \cdot 1000) = 11,3 \approx 12 \text{ мкФ}. \quad (4.5)$$

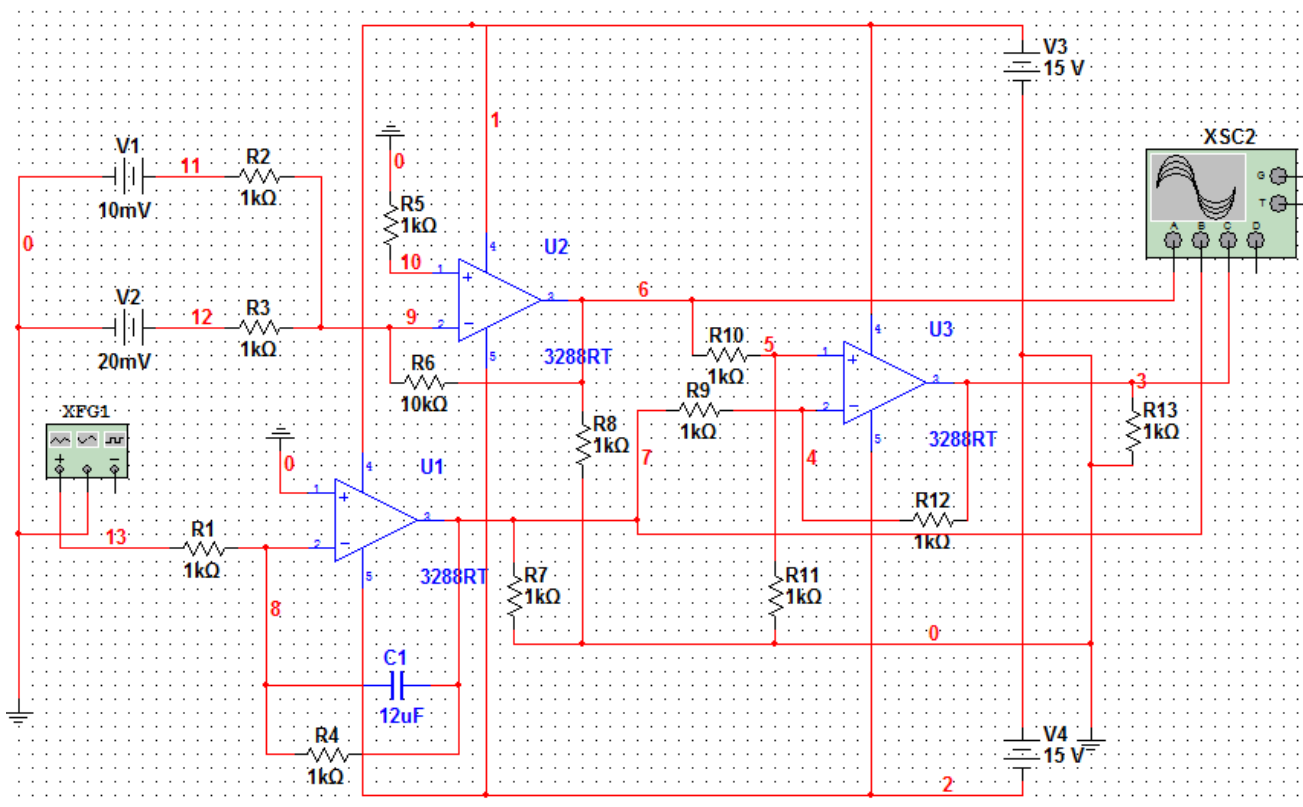


Рисунок 4.1 – Схема аналогового обчислювального вузла

Вираз  $V3 = B1 - B2 = -K1 \cdot (a + b) - K2 \cdot f(c)$  остаточно виконується на вівідмаючій схемі на U3. Тут також одиничний коефіцієнт підсилення, тому всі резистори мають номінал 1 кОм.

Варто також звернути увагу на резистори R7, R8, R13. Це вихідні навантаження каскадів ОП, з яких знімається напруга. Вони не обов'язкові, але їх бажано використовувати для температурної стабілізації навантаження операційних підсилювачів, оскільки самі вони споживають дуже мало (вхідний опір від кількох кОм до десяткі МОм).

Джерела V1 та V2 відповідають напругам a та b. Напруга d та перешкода f(d) задаються на функціональному генераторі XFG1, як показано на рисунку 4.2

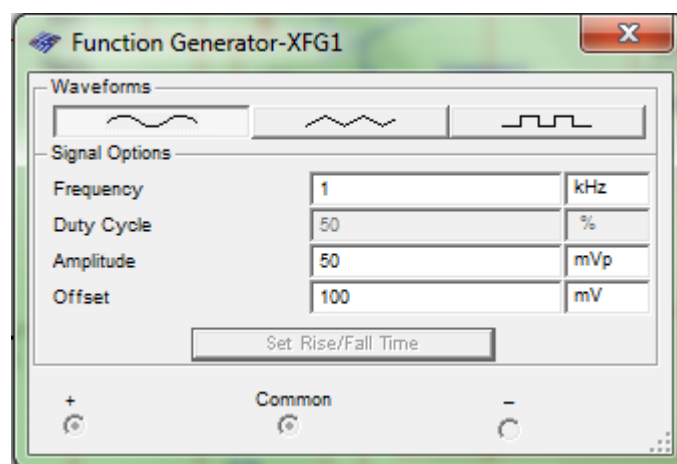


Рисунок 4.2 – Напруга d(Offset) та перешкода f(d) (Amplitude, Frequency)

У результаті запуску схеми матимемо такі осцилограми:

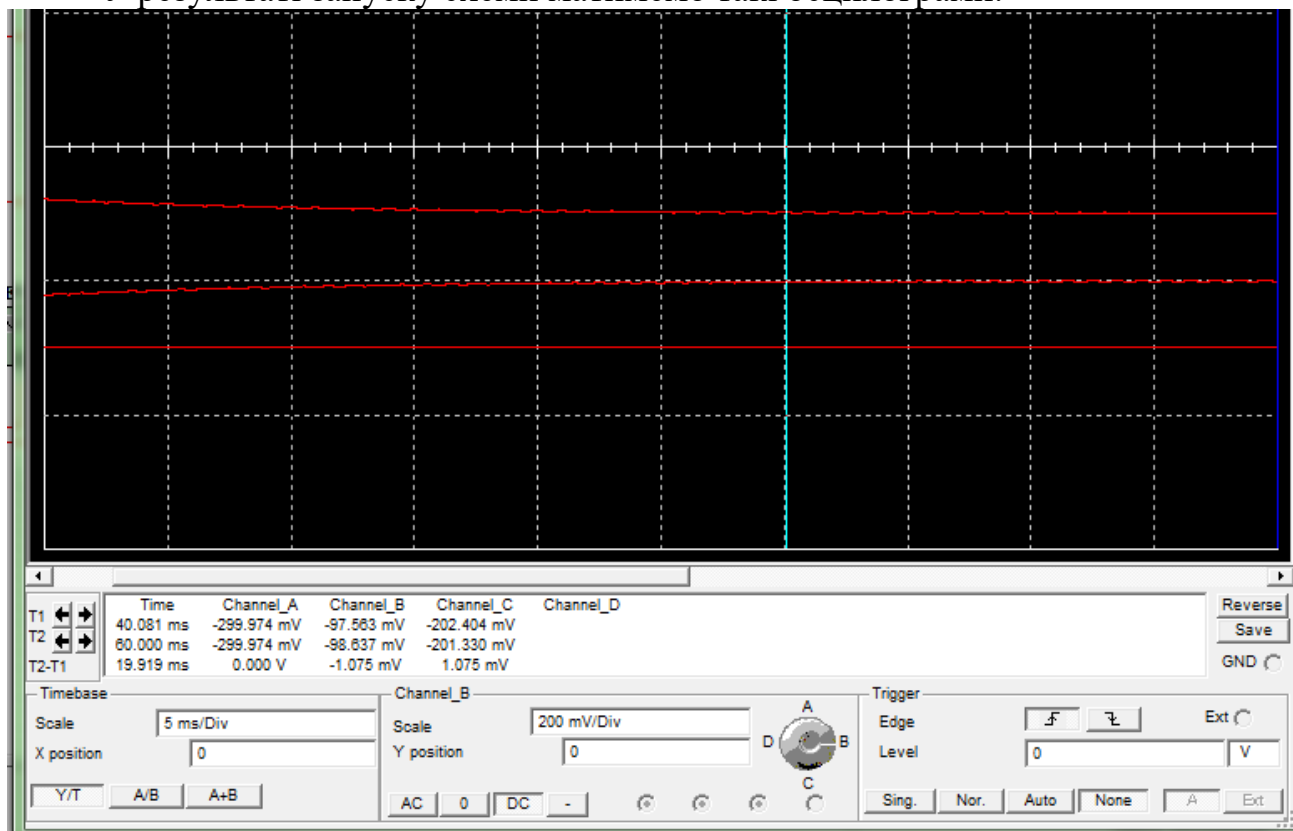


Рисунок 4.3 – Осцилограми на виходах підсилювачів аналогової обчислювальної схеми

За умовою  $V_3 = -K_1 \cdot (a+b) - K_2 \cdot f(c) = -10 \cdot (10+20) - 1 \cdot 100 = -200$  мВ.  $f(c) = d = 100$  мВ, оскільки перешкоду придушено на НЧ-фільтрі. За осцилограмами у найгіршому випадку маємо:  $V_3 = -299,974 - (-97,563) \approx -202,404$  мВ. Значення -202,404 відрізняється від еталонного 200 мВ приблизно на 2,4 мВ або на 1,2%. Це не вкладається у вимоги, тому схему необхідно відлагодити. Найбільш значне відхилення, на 2,44 мВ спостерігається на НЧ-фільтрі. Це нормально, оскільки конденсатор має витоки, що дещо зменшує загальний опір ланцюга R4-C1, а значить і коефіцієнт підсилення. Найпростіший крок – збільшити ємність C1. Збільшивши ємність до з 12 до 30 мкФ (у 2,5...3 рази), отримаємо осцилограми, показані на рисунку 2.4. Тут  $V_3 = -200,193$  мВ, тобто найбільша розбіжність з еталоном складе 193 мВ, або 0,95%. Вимоги витримані.

Якщо збільшенням ємності задана точність не досягається, або ємність потрібно збільшувати до сотень або тисяч мікрофарад, тоді цей спосіб не годиться. У такому випадку довелося б збільшити опір R4, щоб підтягти знижений коефіцієнт підсилення НЧ-фільтру до потрібного 1. Також можна варіювати коефіцієнти підсилення U1 та U3 за допомогою їх резисторів.

Схема відлагоджена, вона виглядає, як показано на рисунку 4.5. Можна переходити до виконання пунктів 6-10 завдання.

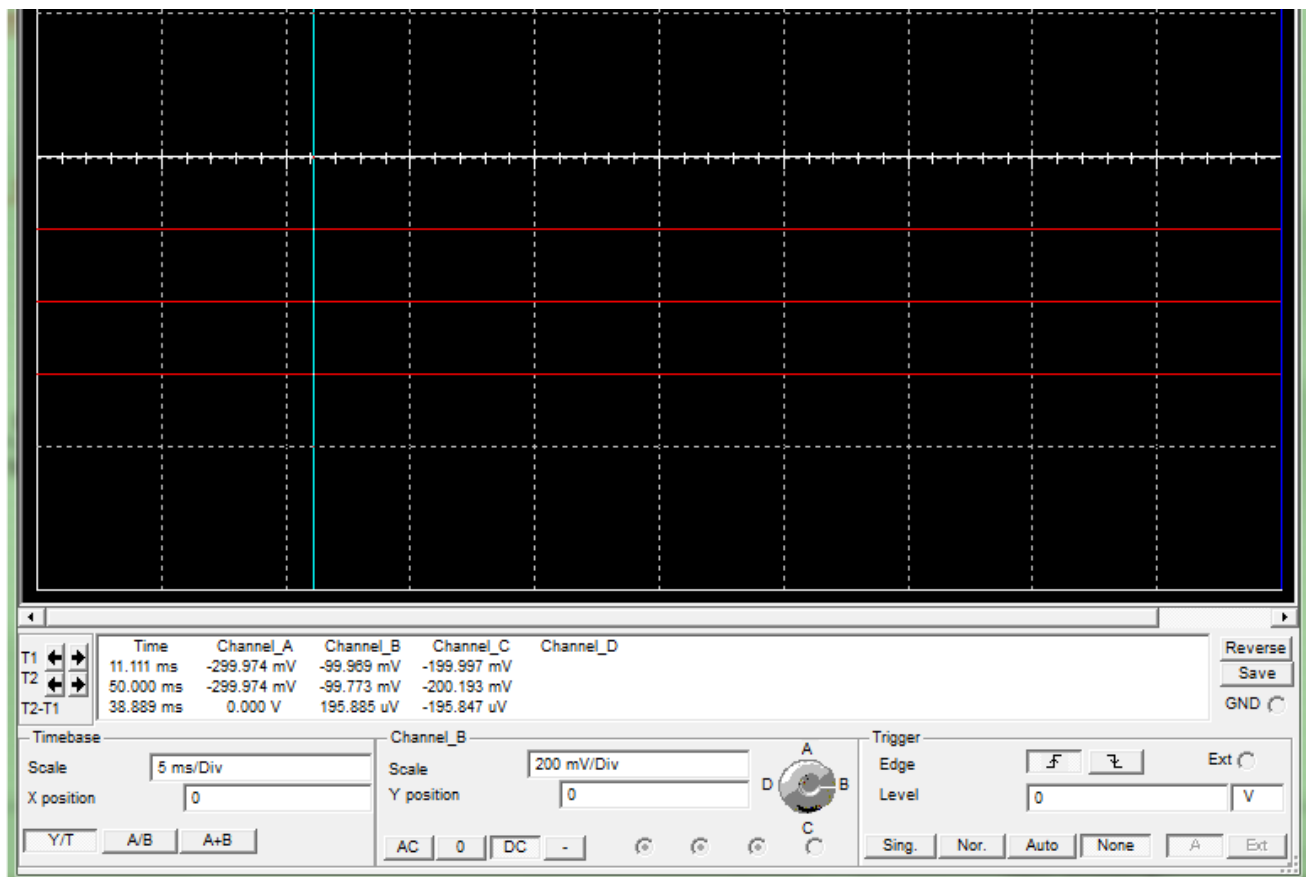


Рисунок 4.4 – Осцилограми на виходах підсилювачів скоригованої аналогової обчислювальної схеми

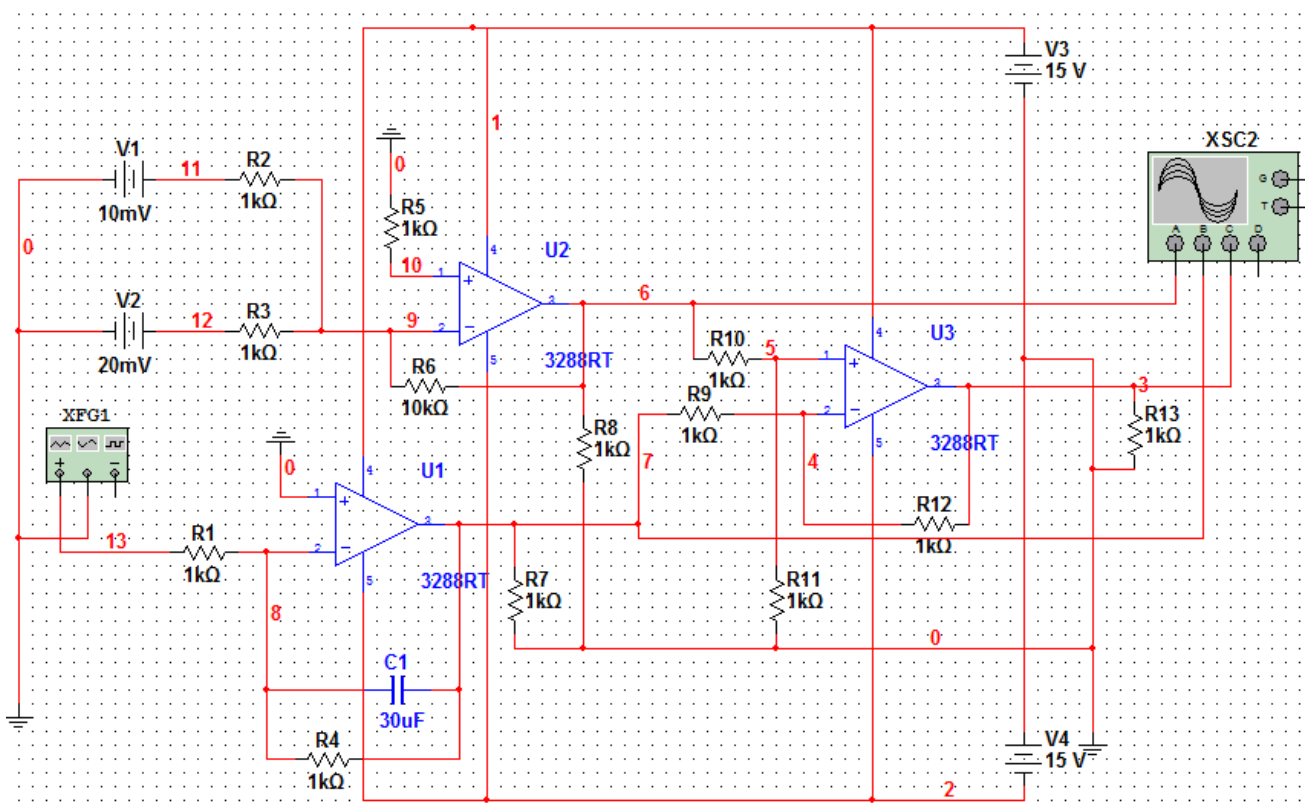


Рисунок 4.5 – Скоригована схема аналогового обчислювального вузла

## 4.6 Варіанти завдань

Таблиця 4.1 – Варіанти завдань

| №  | Формула                             | a, мВ | b, мВ | c, мВ    | d, мВ | f(d) |     | K1 | K2 |
|----|-------------------------------------|-------|-------|----------|-------|------|-----|----|----|
|    |                                     |       |       |          |       | мВ   | кГц |    |    |
| 1  | $K1 \cdot (a+b) + K2 \cdot f(c)$    | 20    | 30    | $d+f(d)$ | 30    | 15   | 1,2 | 10 | 5  |
| 2  | $K1 \cdot (a+b) - K2 \cdot f(c)$    | 10    | 20    | $d+f(d)$ | 20    | 10   | 2   | 15 | 10 |
| 3  | $K1 \cdot (a - K2 \cdot f(c)) + b$  | 30    | 100   | $d+f(d)$ | 10    | 5    | 1,3 | 10 | 8  |
| 4  | $K1 \cdot (a + K2 \cdot f(c)) - b$  | 30    | 50    | $d+f(d)$ | 20    | 10   | 1,4 | 20 | 10 |
| 5  | $K1 \cdot (a - K2 \cdot f(c)) + b$  | 20    | 200   | $d+f(d)$ | 30    | 10   | 1,5 | 10 | 10 |
| 6  | $K1 \cdot (K2 \cdot f(c) - b) + a$  | 200   | 10    | $d+f(d)$ | 10    | 5    | 1,6 | 10 | 5  |
| 7  | $K1 \cdot (K2 \cdot f(c) + b) + a$  | 100   | 30    | $d+f(d)$ | 20    | 10   | 1,7 | 15 | 5  |
| 8  | $K1 \cdot (K2 \cdot f(c) + b) - a$  | 100   | 10    | $d+f(d)$ | 30    | 10   | 1,8 | 10 | 1  |
| 9  | $K1 \cdot (a-b) + K2 \cdot f(c)$    | 10    | 20    | $d+f(d)$ | 30    | 20   | 1,9 | 10 | 10 |
| 10 | $-K1 \cdot (a-b) - K2 \cdot f(c)$   | 30    | 20    | $d+f(d)$ | 10    | 5    | 1,1 | 20 | 10 |
| 11 | $-K1 \cdot (a+b) + K2 \cdot f(c)$   | 20    | 30    | $d+f(d)$ | 30    | 15   | 1,2 | 10 | 5  |
| 12 | $-K1 \cdot (a+b) - K2 \cdot f(c)$   | 10    | 20    | $d+f(d)$ | 20    | 10   | 2   | 15 | 10 |
| 13 | $-K1 \cdot (a - K2 \cdot f(c)) + b$ | 30    | 100   | $d+f(d)$ | 10    | 5    | 1,3 | 10 | 8  |
| 14 | $-K1 \cdot (a + K2 \cdot f(c)) - b$ | 30    | 50    | $d+f(d)$ | 20    | 10   | 1,4 | 20 | 10 |
| 15 | $-K1 \cdot (a - K2 \cdot f(c)) + b$ | 20    | 200   | $d+f(d)$ | 30    | 10   | 1,5 | 10 | 10 |
| 16 | $-K1 \cdot (K2 \cdot f(c) - b) + a$ | 200   | 10    | $d+f(d)$ | 10    | 5    | 1,6 | 10 | 5  |
| 17 | $-K1 \cdot (K2 \cdot f(c) + b) + a$ | 100   | 30    | $d+f(d)$ | 20    | 10   | 1,7 | 15 | 5  |
| 18 | $-K1 \cdot (K2 \cdot f(c) + b) - a$ | 100   | 10    | $d+f(d)$ | 30    | 10   | 1,8 | 10 | 1  |
| 19 | $-K1 \cdot (a-b) + K2 \cdot f(c)$   | 10    | 20    | $d+f(d)$ | 30    | 20   | 1,9 | 10 | 10 |
| 20 | $-K1 \cdot (a-b) - K2 \cdot f(c)$   | 30    | 20    | $d+f(d)$ | 10    | 5    | 1,1 | 20 | 10 |
| 21 | $-K1 \cdot (a - K2 \cdot f(c)) - b$ | 30    | 200   | $d+f(d)$ | 20    | 10   | 1,3 | 10 | 1  |
| 22 | $K1 \cdot (a - K2 \cdot f(c)) - b$  | 30    | 100   | $d+f(d)$ | 20    | 10   | 1,3 | 10 | 1  |
| 23 | $a - K2 \cdot f(c) + K1 \cdot b$    | 300   | 10    | $d+f(d)$ | 10    | 5    | 1,3 | 10 | 8  |
| 24 | $a + K2 \cdot f(c) - K1 \cdot b$    | 200   | 10    | $d+f(d)$ | 20    | 10   | 1,4 | 20 | 20 |
| 25 | $a - K2 \cdot f(c) + K1 \cdot b$    | 20    | 200   | $d+f(d)$ | 5     | 5    | 1,5 | 10 | 20 |
| 26 | $K2 \cdot f(c) - b + K1 \cdot a$    | 20    | 100   | $d+f(d)$ | 10    | 10   | 1,6 | 10 | 20 |
| 27 | $K2 \cdot f(c) + b + K1 \cdot a$    | 10    | 300   | $d+f(d)$ | 15    | 10   | 1,7 | 15 | 20 |
| 28 | $K2 \cdot f(c) + b - K1 \cdot a$    | 10    | 100   | $d+f(d)$ | 30    | 10   | 1,8 | 10 | 5  |
| 29 | $K1 \cdot a - b + K2 \cdot f(c)$    | 15    | 200   | $d+f(d)$ | 30    | 20   | 1,9 | 10 | 10 |
| 30 | $-K1 \cdot a + b - K2 \cdot f(c)$   | 20    | 300   | $d+f(d)$ | 10    | 5    | 1,2 | 10 | 10 |

## 4.7 Контрольні питання

1. Чим схема чистого інтегратора відрізняється від НЧ-фільтра?
2. Які схеми аналогових суматорів на ОП Ви знаєте?
3. Як виглядає схема струмового повторювача?
4. Як можна задавати вагові коефіцієнти вхідних сигналів аналогового суматора?
5. Як виглядає логарифматор на ОП?
6. Як розрахувати частоту зрізу активного НЧ-фільтра?

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ткаченко С.М. Комп'ютерна схемотехніка [Електронний ресурс]: Дистанційна освіта НТУДП/ Кафедра інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії; м. Дніпро, Національний технічний ун-т «Дніпровська політехніка». – Електрон. дані (15 файлів). – 2021–2022. – Режим доступу: <https://do.nmu.org.ua/course/view.php?id=2946>.
2. Завадський В.А. Комп'ютерна електроніка. – Київ: БЕК, 2011. - 368с.
3. Завадський В.А. Практикум з комп'ютерної електроніки. – Київ: БЕК+, 2002 – 270 с.
4. Новацький А. О. Комп'ютерна електроніка. – Київ: Національний технічний ун-т України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – 468 с.
5. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із навчальної дисципліни «Комп'ютерна електроніка» (для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова; уклад.: Ю.П. Колонтаєвський, Д.В. Тугай. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017. – 128 с.

Навчальне видання

**Ткаченко** Сергій Миколайович

## **КОМП'ЮТЕРНА СХЕМОТЕХНІКА**

**Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт**  
для здобувачів ступеня бакалавра  
спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія

Видано в авторській редакції.

Електронний ресурс.  
Підписано до видання 18.02.2025. Авт. арк. 2,6.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».  
49005, м. Дніпро, просп. Дмитра Яворницького, 19.