

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ТЕХНІЧНОГО
РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЯКОСТІ



КАФЕДРА ЕЛЕКТРОНІКИ ТА МІКРОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ

ДИСЦИПЛІНА

ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ
ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ
ТЕХНІКИ

РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОЛА З
РОЗРАХУНКОМ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

Методичні вказівки та завдання до виконання курсового проекту студентів
денної форми навчання для підготовки бакалаврів

з спеціальності

153 «МІКРО- ТА НАНОСИСТЕМНА ТЕХНІКА»»

Укладачі: Канд. техн. наук, доцент Лещенко О.І.,
старший викладач Любимов А.Я.,
старший викладач Кудряшов В.А.

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри нановимірювань
та вимірювальної техніки
Протокол № 1 від 01.09.2020 р.

Завідувач кафедри  Банзак О.В.

ЗМІСТ

1.	Загальні положення	6
2.	Вхідні дані для розрахунку курсового проекту.....	8
2.1.	Перетворювач «тиск – напруга» на основі операційних підсилювачів із застосуванням тензодатчика.....	8
2.2.	Перетворювач «температура – напруга» на основі операційного підсилювача із застосуванням термодатчиків.....	9
2.3.	Перетворювач «магнітна індукція – напруга» на основі операційного підсилювача із застосуванням датчиків Холу.....	10
2.4.	Перетворювач «заряд – напруга» на основі операційного підсилювача із застосуванням п'єзодатчиків.....	11
2.5.	Перетворювач «струм – напруга» на основі операційного підсилювача із застосуванням фотодатчиків.....	12
3.	Організація виконання курсового проекту.....	13
4.	Методичні вказівки до виконання курсового проекту.....	14
5.	Загальні відомості для виконання курсового проекту.....	16
5.1.	Загальні відомості про вимірювальне коло інформаційно – вимірювальної техніки.....	16
5.2.	Загальні відомості про електронні пристрої вимірювального кола на операційних підсилювачах (ОП).....	18
6.	Приклади електричних розрахунків електронних пристроїв вимірювального кола.....	27
6.1.	Розрахунок інвертуючого підсилювача на операційному підсилювачі.....	27
6.2.	Розрахунок неінвертуючого підсилювача.....	33
6.3.	Розрахунок простого диференціального підсилювача на операційному підсилювачі.....	39
6.4.	Розрахунок вимірювального підсилювача (ВП) на операційному підсилювачі.....	42
6.5.	Розрахунок генератора стабільного струму на транзисторі.....	47
6.6.	Електричний розрахунок перетворювачів.....	50
6.7.	Електричний розрахунок джерела вторинного електроживлення.....	61
	Перелік джерел посилання.....	69
	Додаток А.....	70
	Додаток Б.....	74
	Додаток В.....	75

1 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Метою методичних вказівок є допомога студентам в організації і виконанні курсового проекту з дисципліни «Електронні пристрої інформаційно – вимірювальної техніки».

Курсовий проект є самостійним завданням, метою якого є систематизація, поглиблення теоретичних знань та їх використання при вирішенні практичних завдань. Для виконання за ОПП призначено 90 годин (3 кредита) самостійної роботи студента у шостому семестрі. Під час виконання курсового проекту студент знайомитися з сучасними перетворювачами, з функціональними електронними пристроями на операційному підсилювачі, а також з джерелами вторинного електроживлення. Студент набуває навички роботи з довідковою літературою.

Теми курсових проектів повинні бути актуальними, відповідати потребам сучасного рівня, відображати профіль академії, забезпечувати елементи науково-дослідної роботи.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми у результаті вивчення виконання курсового навчальної дисципліни повинні забезпечуватися наступні програмні компетентності:

загальні компетентності:

ЗК3 Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово.

ЗК4 Здатність спілкуватися іноземними мовами та працювати з іноземною технічною літературою.

спеціальні (фахові, предметні) компетентності:

ФК7 (СК7) Здатність розв'язувати інженерні задачі в галузі мікро- та наносистемної техніки з урахуванням всіх аспектів розробки, проектування, виробництва, експлуатації та модернізації.

ФК9 (СК9) Здатність застосовувати на практиці галузеві стандарти та стандарти якості щодо мікро- та наносистемної техніки.

ФК10 (СК10) Здатність розуміти та застосовувати технологічні принципи виробництва, випробування, експлуатації та ремонту мікро- та наносистемної інформаційно-вимірювальної техніки та біомедичного обладнання.

ФК11 (СК11) Здатність враховувати соціальні, екологічні, етичні, економічні та комерційні міркування, що впливають на ефективність та результати інженерної діяльності в галузі мікро- та наносистемної електронної техніки.

програмні результати навчання:

ПРН-6 (Р6) Застосовувати навички планування та проведення експерименту для перевірки гіпотез та дослідження явищ мікро- та наноелектроніки, вміти використовувати стандартне обладнання, складати схеми пристроїв, аналізувати, моделювати та критично оцінювати отримані результати.

ПРН-12 (Р12) Аналізувати нормативно-правові засади впровадження мікро- та наносистемної техніки; оцінювати переваги інженерних розробок, їх екологічність та безпечність.

ПРН-13 (Р13) Вільно спілкуватися усно і письмово державною та іноземною мовами з професійних питань з дотриманням норм сучасної української ділової та професійної мови.

Методи викладання і навчання та методи оцінювання досягнення ПРН

Символ ПРН	Після успішного завершення цього модуля здобувач вищої освіти буде:	Методи викладання і навчання	Методи оцінювання досягнення ПРН
ПРН-6 (Р6)	володіти знаннями та вміти розробляти застосовувати навички планування та проведення експерименту для перевірки гіпотез та дослідження явищ мікро- та наноелектроніки, вміти використовувати стандартне обладнання, складати схеми пристроїв, аналізувати, моделювати та критично оцінювати отримані результати	СРС	Консультації, оцінювання самостійної роботи; захист КР
ПРН-12 (Р12)	володіти знаннями та вміти аналізувати нормативно-правові засади впровадження мікросистемної техніки; оцінювати переваги інженерних розробок, їх екологічність та безпечність	СРС	Консультації, оцінювання самостійної роботи; захист КР
ПРН-13 (Р13)	володіти знаннями та вміти вільно спілкуватися усно і письмово державною та іноземною мовами з професійних питань з дотриманням норм сучасної української ділової та професійної мови	СРС	Консультації, оцінювання самостійної роботи; захист КР

Обсяг курсового проекту має бути визначений до моменту видачі завдання студенту виходячи з наявного в даному семестрі часу для самостійної роботи.

Проект складається з розрахунково-пояснювальної записки і графічної частини. Загальний обсяг розрахунково-пояснювальної записки - не менше 20 - 30 сторінок рукописного або друкованого тексту формату А4. Пояснювальна записка повинна містити рисунки, схеми, таблиці, які допоможуть краще засвоїти хід розв'язання задачі. Графічна частина проекту виконується на 2-х аркушах формату А3 або А4.

Пояснювальна записка та графічна частина проекту повинні бути виконані у відповідності з вимогами нормативної документації:

- ДСТУ 3008:2015 Звіти у сфері науки і техніки
- ДСТУ ГОСТ 2.001:2006 Єдина система конструкторської документації. Загальні положення (ГОСТ 2.001-93, ІДТ).

Пояснювальна записка включає:

- титульний аркуш;
- завдання на курсовий проект на бланку встановленого зразка;
- зміст;
- вступ;
- основна текстова частина пояснювальної записки;
- висновок;
- список використаної літератури;
- додатки.

Пояснювальна записка повинна містити специфікацію і по тексту повинні бути посилання на використану літературу.

Графічна частина проекту виконується на 2-х аркушах формату А3 або А4.

Курсовий проект виконується студентом під керівництвом викладача кафедри. Перед початком роботи проводиться вступне заняття, на якому роз'яснюються

завдання курсового проекту, приводиться зразковий план пояснювальної записки. Кожен студент отримує індивідуальне завдання і розписується в завданні про терміни виконання курсового проекту. Викладач пояснює порядок виконання індивідуального завдання, вимоги до оформлення пояснювальної записки, оказує допомогу в обиранні теми.

За курсовим проектуванням проводяться консультації, що допомагають організувати і направити роботу студентів над відповідною частиною курсового проекту.

Закінчені курсові проекти здають керівникові. Він перевіряє якість роботи і її відповідність об'єму, вказаному в завданні, правильність виконання креслень і пояснювальної записки. Після цього проект підписується, повертається студентові для ознайомлення з виправленнями і вказівками викладача і студент допускається до захисту курсового проекту. Захист курсового проекту здійснюється в кінці семестру на комісії, затвердженій завідувачем кафедри і яка складається з двох – трьох викладачів кафедри.

При захисті студентові відводиться 5-8 хвилин для доповіді і деякий час для відповідей на питання членів комісії. Оцінюється робота по 100-бальній системі за загальноприйнятими критеріями навчального закладу.

Показник успішності студента (бали)	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою	Критерії оцінювання
		Захист КП	
90–100	A	Відмінно	Повна, ґрунтовна доповідь з використанням слайдів PowerPoint. Розкрито тему, методів дослідження характеристик, на додаткові питання лише з незначною кількістю помилок. Об'єм та якість пояснювальної записки відповідають методичним вказівкам.
82–89	B	Добре	Повна, ґрунтовна доповідь з використанням слайдів PowerPoint. Розкрито тему, методів дослідження характеристик, на додаткові питання лише з незначною кількістю помилок. Об'єм та якість пояснювальної записки відповідають методичним вказівкам. На додаткові питання є незначні помилки.
75–81	C		Доповідь з використанням слайдів PowerPoint. Недостатньо розкрито тему, методів дослідження характеристик, на додаткові питання лише з незначною кількістю помилок. Об'єм та якість пояснювальної записки відповідають методичним вказівкам, незначні помилки в оформленні записки. Порушення затвердженого графіку виконання роботи. На додаткові питання є значні помилки.

Показник успішності студента (бали)	Оцінка ECTS	Оцінка за національною шкалою	Критерії оцінювання
		Захист КП	
64–74	D	Задовільно	<p>Доповідь з використанням слайдів PowerPoint але вони не підкреслюють сутність роботи. Не розкрито тему, метод дослідження характеристик обраний невірною, на додаткові питання відповіді були з значними помилками.</p> <p>Об'єм та якість пояснювальної записки відповідають методичним вказівкам, значні помилки в оформленні записки.</p> <p>Порушення затвердженого графіку виконання роботи. На додаткові питання є значні помилки.</p>
60–63	E		<p>Доповідь з використанням слайдів PowerPoint але вони не підкреслюють сутність роботи або зовсім відсутні. Не розкрито тему, метод дослідження характеристик обраний невірною, не на всі додаткові питання були відповіді.</p> <p>Об'єм та якість пояснювальної записки відповідають методичним вказівкам, значні помилки в оформленні записки.</p> <p>Порушення затвердженого графіку виконання роботи. На додаткові питання є значні помилки.</p>
35–59	FX	Незадовільно	<p>Доповідь без використання слайдів PowerPoint. Не розкрито тему, метод дослідження характеристик обраний невірною, Практично на всі додаткові питання не було вірних відповідей.</p> <p>Об'єм та якість пояснювальної записки не відповідають методичним вказівкам, значні помилки в оформленні записки.</p> <p>Порушення затвердженого графіку виконання роботи. На додаткові питання є значні помилки.</p>
1–34	F		<p>Повна невідповідність роботи, порушення графіку консультацій, Пояснювальна записка оформлена не за відповідними вимогами.</p>

2 ВХІДНІ ДАНІ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

2.1 Перетворювач «тиск – напруга» на основі операційних підсилювачів із застосуванням тензодатчика

Таблиця 2.1 - Основні параметри перетворювача «тиск – напруга» на основі ОП із застосуванням тензодатчика

Варіант	Тензодатчик		Вимірювальний підсилювач	
	Матеріал	Номінальний Опір, Ом	Межі зміни вихідного сигналу, В	Вхідний опір вимірювального підсилювача, кОм
1	Дротяні	120	Уверх. = 5 Униж.. = 2	1000
2	Дротяні	600	Уверх. = 14 Униж.. = 5,0	2000
3	Фольгові	120	Уверх. = 10 Униж.. = 5	10000
4	Фольгові	300	Уверх. = 12 Униж.. = 5	2000
5	Фольгові	600	Уверх. = 20 Униж.. = 3	2000
6	Напівпровідникові	120	Уверх. = 2,5 Униж.. = 0,3	1000
7	Напівпровідникові	600	Уверх. = 10 Униж.. = 3	1500

Продовження таблиці 2.1

Варіант	Неінвертуючий підсилювач			Джерело вторинного електроживлення			
	Струм навантаження, А	Напруга навантаження, мВ	Опір навантаження, Ом	Напруга мережі В ± %	Частота мережі Гц	Коефіцієнт пульсацій K_{Γ}	Змінна вхідна напруга стабілізатора В
1	0,02	2,0	1000	220±10	50	0,1	13 - 20
2	0,01	7,1	2000	220±15	50	0,1	12 - 25
3	0,02	4,8	2000	220±20	50	0,2	13 - 24
4	0,02	8,6	2000	220±15	50	0,15	13 - 18
5	0,01	1,3	2000	220±5	50	0,05	12 - 20
6	0,03	1,5	3000	220±10	50	0,1	12 - 20
7	0,035	2,0	4000	220±25	50	0,15	11 - 18

2.2 Перетворювач «температура – напруга» на основі операційного підсилювача із застосуванням термодатчиків

Таблиця 2.2 - Основні параметри перетворювача «температура – напруга» на основі ОП із застосуванням термодатчика

Варіант	Терморезистор			Вимірювальний підсилювач	
	Тип резистивного термодатчика	Температура °С	Номинальний опір, Ом при 20°С	Межі зміни вихідного сигналу, В	Вхідний опір вимірювального підсилювача, кОм
8	Pt1000	25	1077	Уверх. = 1 Униж. = 0,2	1000
9	Ст1 - 21	30	10000	Уверх. = 1 Униж. = 0,1	1000
10	Ст3 -21	25	1000	Уверх. = 2 Униж. = 0,2	10000
11	Ст1-27	30	10000	Уверх. = 1,0 Униж. = 0,1	2000
12	Ст3-27	25	2200	Уверх. = 2,5 Униж. = 0,3	2000
13	NTC10	25	12535	Уверх. = 2,5 Униж. = 0,3	1000
14	Ст1-31	24	680	Уверх. = 1,0 Униж. = 0,3	1500

Продовження таблиці 2.2

Варіант	Інвертуючий підсилювач			Джерело вторинного електроживлення			
	Струм навантаження, А	Напруга навантаження, В	Опір навантаження, Ом	Напруга мережі, В, ± %	Частота мережі, Гц	Коефіцієнт пульсації Кп	Змінна вхідна напруга стабілізатора, В
8	0,0014	1	2000	220±10	50	0,01	13 - 22
9	0,01	1	2000	220±15	50	0,1	14 - 25
10	0,03	2	3000	220±20	50	0,2	11 - 20
11	0,015	1,5	4000	220±15	50	0,15	12 - 18
12	0,025	1,3	2500	220±5	50	0,05	11 - 20
13	0,03	1,5	3000	220±10	50	0,1	12 - 20
14	0,035	2,0	4000	220±25	50	0,15	13 - 18

Примітка : Студент в процесі розрахунку може вибрати інші функціональні пристрої. Керівник курсового проекту може в процесі розрахунку змінювати вхідні дані курсового проекту

2.3 Перетворювач «магнітна індукція – напруга» на основі операційного підсилювача із застосуванням датчиків Холу

Таблиця 2.3 - Основні параметри перетворювача «магнітна індукція – напруга» на основі ОП з застосуванням датчиків Холу

Варіант	Перетворювач					Вимірювальний підсилювач	
	Датчик Холу	I _x мА	S _i мВ/Тл	Співвідношення опорів R _{вх} /R _{вих} кОм	В, Тл	Межі зміни вихідного сигналу, В	Вхідний опір вимірювального підсилювача, кОм
15	ДХК-05А	3	280	1,8..3,0 /3,0	0,5	Уверх. = 1,0 Униж. = 0,1	1000
16	Дх1	7	300	0,65 /0,65	1	Уверх. = 1,0 Униж. = 0,1	1000
17	Дх2	10	150	0,25 /0,25	1	Уверх. = 2,0 Униж. = 0,2	10000
18	Дх3	10	100	0,04/0,04	1	Уверх. = 1,5 Униж. = 0,2	2000
19	Дх4	5	550	0,950/ 1,8	1	Уверх. = 2,5 Униж. = 0,3	2000
20	ПДХ1	10	150	0,25/ 0,25	0,5	Уверх. = 2,5 Униж. = 0,3	1000
21	ПДХ2	5	550	0,95/1,8	1	Уверх. = 3,0 Униж. = 0,3	1500

Продовження таблиці 2.3

Варіант	Генератор стабільного струму			Джерело вторинного електроживлення			
	Струм Навантаження, мА	Напруга Живлення, В	Опір навантаження, Ом	Напруга мережі, В ± %	Частота мережі, Гц	Коефіцієнт пульсації, Кп	Змінна вхідна напруга стабілізатора, В
15	3	15	2000	220±10	50	0,01	13 - 20
16	7	20	650±50	220±15	50	0,1	14 - 25
17	10	20	250±50	220±20	50	0,2	12 - 20
18	10	15	40±20	220±15	50	0,15	12 - 18
19	5	35	950±20	220±5	50	0,05	11 - 20
20	10	30	250±50	220±10	50	0,1	12 - 20
21	10	25	250±50	220±25	50	0,15	13 - 18

Примітка : Студент в процесі розрахунку може вибрати інші функціональні пристрої. Керівник курсового проекту може в процесі розрахунку змінювати вхідні дані курсового проекту

2.4 Перетворювач «заряд – напруга» на основі операційного підсилювача із застосуванням пьезодатчиків

Таблиця 2.4 - Основні параметри перетворювача «заряд – напруга» на основі ОП із застосуванням пьезоматеріалів

Варіант	Перетворювач			Підсилювач заряду		
	Матеріал	Площа пластини, S, мм ²	Відстань між пластинами, h, мм	Опір видтоку, R _d , Ом	Ємність конденсатру С1, пФ	Постійна кола τ, мс
22	Кварц	100	10	10 ¹¹	51	10
23	Титанат барію	80	8	10 ¹²	43	5
24	Цирконат титанат свинцю	90	15	10 ¹⁰	47	9
25	Сульфат літію	60	10	10 ¹¹	56	7
26	Полівінілідин фториду	100	5	10 ¹²	68	6

Продовження таблиці 2.4

Варіант	Неінвертуючий підсилювач			Джерело вторинного електроживлення			
	Струм навантаження А	Напруга навантаження В	Опір навантаження Ом	Напруга мережі В ± %	Частота мережі Гц	Коефіцієнт пульсації Кп	Змінна вхідна напруга стабілізатора, В
22	0,02	1	2000	220±10	50	0,01	11 - 20
23	0,01	1	2000	220±15	50	0,1	12 - 25
24	0,03	2	3000	220±20	50	0,2	13 - 20
25	0,015	1,5	4000	220±15	50	0,15	12 - 18
26	0,025	1,3	2500	220±5	50	0,05	11 - 20

Примітка : Студент в процесі розрахунку може вибрати інші функціональні пристрої. Керівник курсового проекту може в процесі розрахунку змінювати вхідні дані курсового проекту

2.5 Перетворювач «струм – напруга» на основі операційного підсилювача із застосуванням фотодатчиків

Таблиця 2.5 - Основні параметри перетворювача «струм – напруга» на основі ОП із застосуванням фотодатчиків

Варі- ант	Фотодатчик			Інвертуючий підсилювач		Джерело вторинного електроживлення		
	Тип фотодіода	Струм на вході I _{вх} , мкА	Напруга на виході U _{вих} , В	Напруга на Наванта женні, В	Струм на Наванта женні, I _н А	Напруга мережі, В	Час- тота мере жі f, кГц	Напруга «добавки» В
27	ФД-7К	2,5	2	10	0,1	264-176	130	90
28	ФД-19КК	0,1	1	20	0,2	260-170	120	100
29	ФД-20-32К	0,1	1,5	15	0,15	255-165	115	120
30	ФД-22КП	0,05	3,0	5	0,3	250-175	125	130

Примітка : Студент в процесі розрахунку може вибрати інші функціональні пристрої. Керівник курсового проекту може в процесі розрахунку змінювати вхідні дані курсового проекту

3 ОРГАНІЗАЦІЯ ВИКОНАННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

Курсовий проект виконується студентом на кафедрі під керівництвом одного з викладачів. Темі проекту повинні відповідати програмам дисциплін, що вивчаються.

Перед початком курсового проектування проводиться вступне заняття, на якому роз'яснюються завдання курсового проектування, приводиться зразковий план записки пояснення. Кожен студент отримує індивідуальне завдання і розписується в журналі про терміни виконання курсового проекту. Викладач пояснює порядок виконання індивідуального завдання, вимоги до оформлення записки пояснення і графічної частини проекту.

Робота студентів над виконанням курсового проекту проводиться за графіком, який вказаний в завданні. Дотримання термінів графіка контролюється керівником курсового проекту.

За курсовим проектом проводяться консультації, які допомагають організувати і направити роботу студентів над відповідною частиною курсового проекту. Одним з найважливіших моментів курсового проектування є оцінка проміжних результатів - за правильність розрахунків, за виконання графіка курсового проекту.

Закінчені курсові проекти здають керівникові. Він перевіряє якість роботи і її відповідність об'єму, вказаному в завданні, правильність виконання креслень і записки пояснення. Після цього проект підписується, повертається студентові для ознайомлення з виправленнями і вказівками викладача і студент допускається до захисту курсового проекту.

Захист курсового проекту здійснюється в кінці семестру на комісії, затвердженій завідувачем кафедри і яка складається з двох викладачів кафедри. При захисті студентові відводиться 5-7 хвилин для доповіді і час для відповідей на питання членів комісії із захисту курсового проекту. Питання комісії можуть відноситися до суті проекту, а також по теоретичних питаннях курсу. Оцінюється курсовий проект по 100-бальній системі, з урахуванням оцінок на проміжному контролі.

4 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

4.1 Вступ

Вступ курсового проекту повинний містити короткий огляд пристроїв інформаційно – вимірювального кола і силової електроніки, що вживаються в сучасній промисловості, відомості про операційні підсилювачі і області їх застосування, особливо в інформаційно - вимірювальної техніки. Також в цій частині курсового проекту потрібно сформулювати мету курсового проекту.

4.2 Загальні відомості

У даному розділі необхідне розглянути електронні пристрої, що вказані в завданні, і не тільки вітчизняного, але і іноземного виробництва, основну увагу приділити перевагам та недолікам пристроїв. Крім того розглянути принципи побудови вимірювального кола сучасних інформаційно - вимірювальних систем

4.3 Розробка структурної і принципової схем

Після ознайомлення зі всіма функціональними пристроями, які відповідають завданню, необхідно дати порівняльний аналіз і вибрати оптимальний варіант для виконання завдання курсового проекту.

Студент спочатку креслить структурну схему пристрою з вибраним варіантом і описує призначення функціональних вузлів пристрою, що розробляється. По розробленій структурній схемі розробляється принципова (функціональна) електрична схема і приводиться принцип її роботи.

4.4 Електричний розрахунок

Перед виконанням розрахунків, як правило, формують завдання, вибирають метод її розрахунку, приводять необхідні початкові дані.

Розрахунок проводиться по формулах, приведених в технічній літературі. Перед застосуванням вибраної формули необхідно переконатися в тому, що вона справедлива для умов, обумовлених в завданні курсового проекту.

Для визначення точності, з якою потрібно вести розрахунки, необхідно враховувати особливості функціонального вузла. Під час обчислень треба визначити відносні похибки проміжних розрахунків, відкидаючи в них зайві цифри і залишаючи на одну більше того числа, яке відповідало б відносній похибці остаточного результату. Хід розрахунку повинен бути приведений детально.

Завершальною частиною розрахунків є перевірка результатів. Для запобігання помилок розрахунки рекомендується вести в окремому зошиті. При цьому основні розрахунки фіксуються на правій сторінці зошита, а допоміжні - на лівій. Записи необхідно виконувати акуратно, наочно розташовувати всі проміжні обчислення.

4.5 Висновок

В висновку підводиться підсумок всієї роботи над курсовим проектом, наголошується найцікавіші варіанти вибору функціональних вузлів пристрою. Приводяться переваги і недоліки пристрою, що розробляється. Указуються рекомендації, що направлені на вдосконалення пристрою.

4.6 Перелік джерел посилання

У переліку джерел посилання мають бути підручники, довідники та інші джерела в порядку їх використання в тексті в відповідності з вимогами складання списків літератури. У тексті посилання на літературу записується в прямих дужках з номером із списку, наприклад [1].

4.7 Зміст графічної частини проекту

4.7.1 Креслення 1. На цьому аркуші, формату А3 або А4 потрібно накреслити структурну схему пристрою, що проектується згідно ЕСКД.

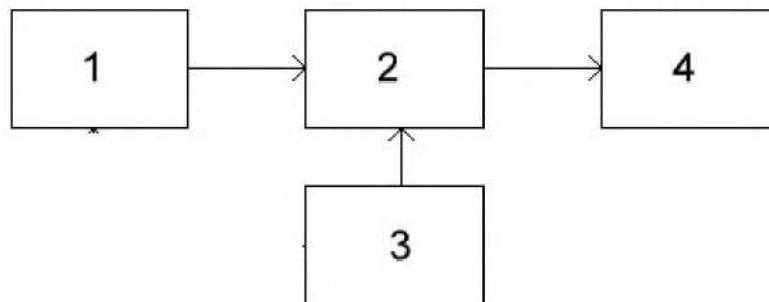
4.7.2 Креслення 2. На цьому аркуші формату А3 або А4 потрібно накреслити принципову (функціональну) схему пристрою згідно ЕСКД. Для цього креслення розробляється специфікація, яка розташовується в кінці пояснювальної записки.

5 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ДЛЯ ВИКОНАННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ

5.1 Загальні відомості про вимірювальне коло інформаційно – вимірювальної техніки

При проектуванні вимірювального кола інформаційно – вимірювальної техніки належить накреслити структурну і функціональну (принципову) схему вимірювального пристрою, тому студент повинен знати схемну побудову основних функціональних вузлів вимірювального кола електронного пристрою і принцип їх роботи. У пояснювальній записці потрібно коротко описати принцип роботи вимірювальних кіл електронного пристрою і накреслити їх схеми.

У розробки і обґрунтуванні структурної схеми вимірювального кола електронного пристрою використовуються різноманітні схеми. Для наочного зображення вимірювального кола електронного пристрою використовують електричну структурну схему, яка приведена на рисунку 5.1



1 – перетворювач ; 2 – функціональний пристрій на операційному підсилювачі;
3 – джерело вторинного електроживлення; 4 – навантаження.

Рисунок 5.1 – Структурна схема вимірювального кола електронного пристрою

Основою будь-якого вимірювального кола електронних пристроїв є первинні перетворювачі (датчики) 1. Зазвичай вони перетворюють вхідні фізичні величини (температуру, тиск, вологість, освітленість, магнітний потік, прискорення і т. д.) в пропорційний електричний вихідний сигнал. Датчики діляться на дві великі групи: генераторні і параметричні.

У генераторних датчиках вимірювана величина викликає генерацію електричного сигналу — струму, напруги, заряду, частоти (I, U, Q, f) і так далі Вони є активними датчиками. Найчастіше в активних датчиках використовуються термоелектричний ефект, п'єзоефект, фотоефект, ефект електромагнітної індукції і так далі.

У параметричних датчиках змінюються параметри електричних, магнітних, оптичних кіл — опору, індуктивності, ємності, пропускання (R, L, C, \dots) і так далі. Вони є пасивними (тобто дозволяють побічно судити про фізичну величину шляхом включення такого датчика в електричне коло). Такі датчики потребують підведення живлення. У пасивних датчиках найчастіше використовуються ефект

зміни активного опору (терморезистивний, фоторезистивний, магніторезистивний ефекти), зміна діелектричної проникності, зміна пропускання світла у волокні і так далі.

Проміжне положення займають комбіновані датчики. У комбінованих датчиках для отримання результату використовується цілий ланцюг послідовних перетворень. Наприклад, датчики тиску можуть працювати за схемою: тиск — деформація мембрани — зміна опору тензодатчика, закріпленого на мембрані — зміна вихідного електричного сигналу мостової схеми.

Останнім часом введено поняття інтелектуальні і інтегровані датчики. Такі датчики оснащуються вбудованими мікропроцесорами (сигнальними процесорами), які працюють по достатньо складних алгоритмах і дозволяють додати вимірювальним приладам багато додаткових функціональних можливостей, такі як фільтрація сигналів, корекція, виявлення відмов, лінеаризація передавальної характеристики, реконфігурація вимірювальної схеми і тому подібне. Проте основою і цих приладів є первинні перетворювачі (датчики), знання основ функціонування яких є необхідною умовою грамотного застосування датчиків в інженерній практиці.

Сигнал з перетворювача (з датчика) 1 поступає на функціональний вузол, який зібраний на операційному підсилювачі 2. У будь-якій вимірювальній системі необхідно проводити посилення, нормалізацію (приведення до необхідного діапазону вимірювання) і перетворення сигналів датчиків. Ці функції в даний час реалізуються на базі інтегральних операційних підсилювачів (ОП). Іншими словами, ОП є основою будь-якої вимірювальної системи і від технічних характеристик ОП багато в чому залежить досягнення кінцевих результатів. В даний час випускаються сотні різних ОП, грамотне застосування яких у вимірювальній техніці ґрунтується як на знанні їх характеристик, так і розробленою класифікації.

Для живлення будь-якої активної електронної схеми необхідно мати один або декілька джерел стабільної напруги постійного струму 3. Прості нерегульовані джерела живлення, виконані по схемі «трансформатор — некерований випрямляч, — згладжуючий фільтр», у багатьох випадках виявляються непридатними, оскільки їх вихідна напруга залежить від струму навантаження і напруги в мережі. Проте за допомогою все того ж негативного зворотнього зв'язку легко побудувати джерело стабільного живлення, використовуючи для компенсації впливу навантаження і нестабільності мережі регулюючий сигнал, отриманий в результаті порівняння вихідної напруги джерела з деякою постійною еталонною (опорною) напругою. Такі стабілізовані джерела живлення відносяться до класу компенсаційних. Вони достатньо універсальні і можуть бути виготовлені у вигляді інтегральних мікросхем стабілізаторів напруги.

Як правило, регулюючим елементом інтегральної мікросхеми стабілізаторів напруги є біполярний або польовий транзистор. Якщо цей транзистор весь час працює в активному режимі, то схему називають лінійним (безперервним) стабілізатором напруги (ЛСН), а якщо регулюючий транзистор працює в ключовому режимі — імпульсним (ІСН).

Структурна схема курсового проекту закінчується навантаженням 4. В якості навантаження можуть бути аналого – цифрові пристрої, виконавчі механізми і так далі. В об'єм розрахунку ці функціональні вузли не входять.

5.2 Загальні відомості про електронні пристрої вимірювального кола на операційних підсилювачах (ОП)

Операційні підсилювачі вмикаються в електричні схеми, як правило, з колом негативного зворотного зв'язку (НЗЗ). Введення негативного зворотного зв'язку дозволяє зменшити вплив перешкод, шумів, температури і тимчасової нестабільності на значення вихідної напруги. Через коло НЗЗ вихідна напруга підсилювача прагне до компенсації різниці вхідної напруги на вході, що інвертуються і прямому вході. Смуга робочих частот підсилювача, охопленого НЗЗ розширюється. Підсилювач охоплений НЗЗ працює як лінійний підсилювач.

Інвертуючі та неінвертуючі операційні підсилювачі

Схема інвертуючого підсилювача приведена на рисунку 6.2. ОП охоплений паралельною НЗЗ по напрузі. На інвертуючий вхід ОП в цій схемі подається сигнал, визначений сумою вхідної і вихідної напруги і дільником на опорах R_1 і R_2 . Оскільки неінвертуючий вхід ОП сполучений із загальним виводом, а $U_{\text{диф}} \approx 0$, та напруга на інвертуючому вході також буде рівна нулю, при будь-якому значенні $U_{\text{вх}}$. Можна бачити, що якщо $U_{\text{вх}}$ позитивно, то $U_{\text{вих}}$ повинне бути негативним, з тим щоб зберегти нульове φ_a , і навпаки : якщо $U_{\text{вх}}$ негативно, то $U_{\text{вих}}$ повинне бути позитивним. Якщо струм не відгалужуватися в інверсний вхід ОП, то $i_1 = i_2$ якщо до того ж $\varphi_a = 0$. В результаті можна записати рівняння (5.1)

$$U_{\text{вх}}/R_1 = -U_{\text{вих}}/R_2, \quad (5.1)$$

звідки знаходимо коефіцієнт підсилення підсилювача (5.2)

$$K_U = U_{\text{вих}}/U_{\text{вх}} = -R_2/R_1. \quad (5.2)$$

Рівняння показує, що посилення визначається відношенням двох зовнішніх резисторів і ілюструє дуже важливе для більшості застосування ОП властивість.

Характеристика схеми із замкнутою петлею зворотного зв'язку визначається му значеннями параметрів компонентів в колі зворотного зв'язку, якщо коефіцієнт підсилення дуже великий по значенню, а похибки підсилювачів дуже малі.

Вхідний опір інвертуючого підсилювача можна визначити за формулою (5.3):

$$R_{\text{вх}} = R_1 + R_2/(K_0 + 1), \quad (5.3)$$

Приймаємо до уваги, що $K_0 \gg 1$, приходимо до висновку, що вхідний опір інвертуючого підсилювача практично рівний R_1 .

Вихідний опір інвертуючого підсилювача визначається за формулою (5.4):

$$R_{\text{вих}} = r_{\text{вих}}/(K_0 \cdot \beta + 1). \quad (5.4)$$

Значення цієї величини складає долі Ома.

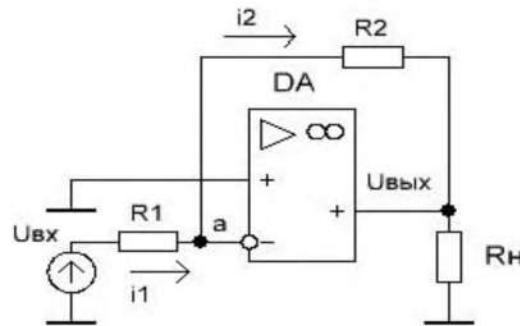


Рисунок 5.2 – Схема інвертуючого підсилювача

Схема неінвертуючого підсилювача приведена на рисунку 6.3. Вхідний сигнал подається тут на неінвертуючий (Н-вход) ОП. Послідовний зворотний негативний зв'язок по напрузі в цьому підсилювачі реалізується завдяки тому, що частина вихідної напруги за допомогою резисторного дільника подається на І-вхід ОП.

Коефіцієнт підсилення неінвертуючого підсилювача з ідеальним ОП може бути визначений за формулою (6.5):

$$K=1 + R_2/R_1 , \quad (5.5)$$

Важливим міркуванням при такому типі включення зворотного зв'язку є те, що напруга, що подається з виходу на вхід φ_a , прагне бути якомога ближче до вхідної напруги $U_{вх}$. Крім того, $U_{вих}$ прийматиме будь-який рівень, який необхідний для встановлення $U_{вх}=\varphi_a$.

Відзначимо деяку різницю у виразах для коефіцієнта посилення із зворотним зв'язком інвертуючого підсилювача по відношенню до того, що не інвертує. Вона часто викликає здивування, оскільки обидва включення ідентичні, за винятком точки введення сигналу. Ця відмінність виникає тому, що в інвертуючому включенні R_1 і R_2 утворюють дільник напруги для сигналу зворотного зв'язку, так і для вхідного сигналу, тоді як в неінвертуючій схемі дільник напруги діє тільки по відношенню до сигналу зворотного зв'язку. Тому для схем з однаковим відношенням резисторів коефіцієнт посилення в неінвертуючій схемі буде на одиницю більше, ніж в інвертуючій схемі. Проте для обчислення частотної характеристики із зворотним зв'язком і ефектів, що виникають на вході під дією шумів, напруги і струму зрушення і так далі, необхідне як для неінвертуючого, так і для інвертуючого включення використовувати коефіцієнт посилення $1 + R_2/R_1$.

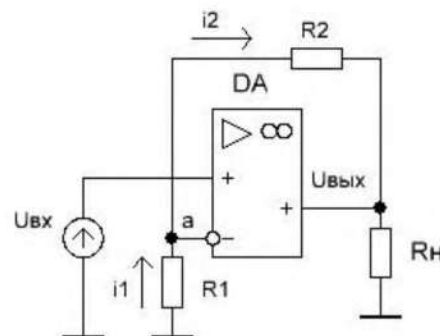


Рисунок 5.3 – Схема неінвертуючого підсилювача

Похибки неінвертуючого підсилювача визначаються практично так само, як в інвертуючому підсилювачі. Відмінність полягає в тому, що на коефіцієнт підсилення K впливає коефіцієнт ослаблення сигналу $K_{ос}$. Вплив $K_{ос}$ приводить до відмінності K від ідеального значення на величину $1/K_{НЗЗ}$.

Вхідний опір неінвертуючого підсилювача з урахуванням послідовного зворотного зв'язку визначається за формулою 5.6:

$$R_{ВХ} = R_{ВХоп}(1 + K_o \cdot \beta), \quad (5.6)$$

$$\text{де } \beta = R_1 / (R_1 + R_2).$$

Значення вхідного опору дуже велике і може досягати порядку 10^{12} Ом.

Досить часто застосовують неінвертуючий підсилювач з коефіцієнтом підсилення, що дорівнює одиниці. Подібний повторювач напруги утворюється шляхом з'єднання виходу ОП з його I- входом (рисунок 5.4). Вхідний опір повторювача напруги вельми великий, а вихідний опір малий. Тому повторювачі напруги зазвичай включаються між джерелом сигналу і навантаженням з метою виключити між ними вплив. Значення вихідного опору складає доли Ом.

Застосування підсилювачів.

Інвертуючі підсилювачі можливе застосовувати в основному в випадках, коли необхідне інвертувати вхідний сигнал і коли підсилювачу не пред'являються вимоги високого вхідного опору. Неінвертуючий підсилювач застосовують коли підсилювач повинен мати великий вхідний опір [3,6,8].

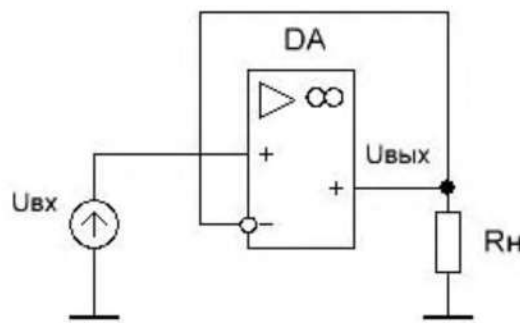


Рисунок 5.4- Схема повторювача напруги на ОП

Диференціальний підсилювач на ОП

Диференціальні підсилювачі призначені для посилення різниці двох вхідних напруг із заданим коефіцієнтом посилення. Простий диференціальний підсилювач, що містить один ОП, показаний на рисунку 5.6.

Підсилювач з диференціальним входом, який об'єднуючий в собі ОП з інвертуючим і неінвертуючим включенням, можна проаналізувати розглянувши

вплив кожного входу окремо. Якщо вхід $U_{\text{вх}2}$ заземлений, то схема є інвертуючим підсилювачем для сигналів з входу $U_{\text{вх}1}$ з коефіцієнтом підсилення $K^{(-)}$, рівним R_2/R_1 .

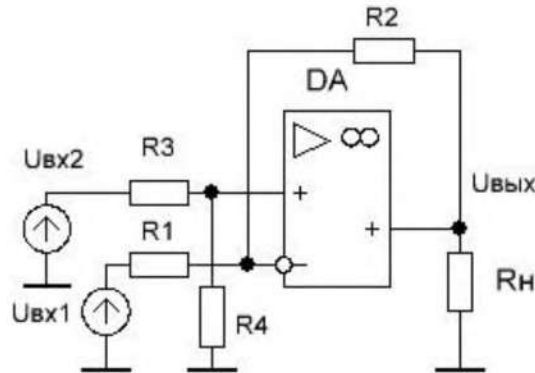


Рисунок 5.5 - Схема простого диференціального підсилювача на операційному підсилювачі

Якщо заземлений вхід $U_{\text{вх}1}$, то схема стає неінвертуючим підсилювачем з резисторами R_3 і R_4 , що створюють дільник напруги на вході; таким чином, напруга на вході $U_{\text{вх}}^{(+)}$ рівна

$$U_{\text{вх}}^{(+)} = U_{\text{вх}2} \cdot [R_4 / (R_3 + R_4)], \quad (5.8)$$

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{вх}}^{(+)} \cdot [(R_1 + R_2) / R_1], \quad (5.9)$$

Якщо $R_1 = R_3$ і $R_2 = R_4$, то підсилення з входу $U_{\text{вх}2}$ рівне R_2/R_1 . У такому разі повний вираз для вихідного сигналу підсилювача має вигляд:

$$U_{\text{вих}} = (U_{\text{вх}2} - U_{\text{вх}1}) \cdot (R_2/R_1). \quad (5.10)$$

Це означає, що в ідеальному випадку вихід ОП реагує тільки на різницю напруги між входами і не реагує на напругу, загальну для обох входів (синфазна напруга). Іншими словами, на виході повинна бути одна і та ж напруга і у тому випадку, коли на вході 2,0 і 2,1В, і коли на них відповідно 0 і 0,1В.

Ця схема особливо корисна для підсилення сигналів, переданих в диференціальній формі по збалансованій лінії передачі, оскільки більшість шумових наведень будуть синфазною напругою. Для отримання найкращого $K_{\text{нзз}}$ відношення $R_2/R_1 = R_4/R_3$ повинне бути витримане якомога точніше, оскільки будь-які розбіжності приведуть до того, що частина синфазного сигналу подаватиме диференціальне $U_{\text{вх}}^{(+)}$ і $U_{\text{вх}}^{(-)}$. Похибка від $K_{\text{нзз}}$ ОП обчислюється з виразу (5.11):

$$U_{\text{вих}} (\text{похибка}) = (U_{\text{синф}} / K_{\text{нзз}}) \cdot (R_2/R_1). \quad (5.11)$$

Похибка від шумів, напруга зрушення і інших причин при обчисленні похибки на виході повинна бути помножена на $[1 + (R_2/R_1)]$. [3,6,8].

Вимірювальний підсилювач

При аналогових вимірюваннях датчики сигналів частійше розташовані на деякому відстанні від вимірювальної системи, значення їх сигналів малі, а вихідні опори великі. Підсилювач загального призначення для нормування цих сигналів повинен мати диференціальний вхід, високий вхідний опір, великий коефіцієнт ослаблення синфазних сигналів і просте підстроювання коефіцієнта підсилення. Схема з трьох підсилювачів (рисунок 5.6) відповідає всім цим вимогам.

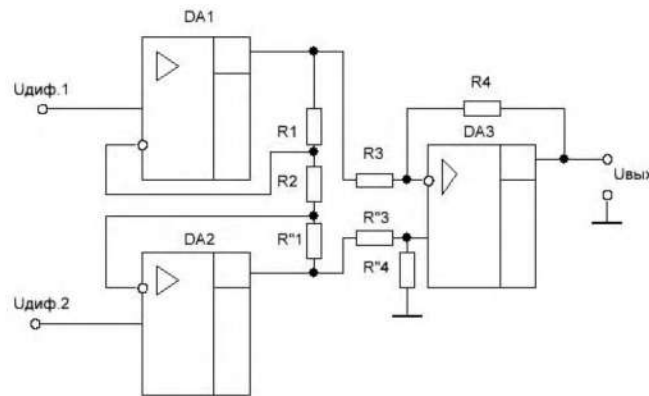


Рисунок 5.6- Вимірювальний підсилювач на трьох ОП

Схема має два каскади підсилення. Перший каскад DA₁, DA₂ і резистори R₁, R₁' і R₂. Другий каскад, складений з DA₃, R₃, R₄, R₃' і R₄' є схемою диференціального підсилювача.

Розглянемо роботу першого каскаду. Оскільки диференціальна вхідна напруга у кожного ОП близько нулю, напругу, що подається на вхід з кожного боку від R₂, визначає струм через резистор. Оскільки цей струм проходить через R₁ і R₁', то можна обчислити напругу на кожному виході. Диференціальний коефіцієнт посилення даного каскаду визначається (5.12):

$$\Delta U_{\text{вих}}/\Delta U_{\text{вх}} = [1+(R_1/0,5 \cdot R_2)]. \quad (5.12)$$

Оскільки сигнал на вході диференціальний і середня точка R₂ потенційно заземлена, цей вираз аналогічний коефіцієнту посилення неінвертуючої схеми підсилення.

При подачі синфазного сигналу на вхід, падіння напруги на R₂ рівне нулю, струм через R₁, R₂ або R₁' не тече. Тому синфазний коефіцієнт підсилення рівний одиниці незалежно від величин резисторів. Коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу для даного каскаду визначається (5.13):

$$K_{\text{осс}} = (K_{\text{диф}}/K_{\text{син}}), \quad (5.13)$$

де K_{диф} - диференціальний коефіцієнт посилення ;

K_{син} - синфазний коефіцієнт посилення.

Якщо на вхід подавати як диференціальний, так і синфазний сигнали, то на виході синфазний сигнал рівний синфазному сигналу на вході. Велика частина цього синфазного сигналу буде ослаблена в другому каскаді. Загальний коефіцієнт

підсилення обох каскадів складає (5.14):

$$\Delta U_{\text{вих}}/\Delta U_{\text{вх}} = [1 + (2 \cdot R_1/R_2)] \cdot (R_4/R_3). \quad (5.14)$$

Це посилення легко можна підстроювати без порушення симетрії схеми шляхом зміни опору R_2 . Перший каскад можна використовувати і окремо, якщо необхідно, щоб як вхід, так і вихід були диференціальними [3,6,8]..

Підсилювачі струму і заряду

Підсилювачі струму призначені для перетворення малих струмів в напругу. Простий спосіб перетворення струму в напругу - це пропустити цей струм через резистор з відомим опором. Проте при цьому для збільшення чутливості при вимірюванні дуже малих струмів доводиться істотно збільшувати опір резистора. Це у свою чергу приводить, *по-перше*, до збільшення небажаної зворотної дії вимірювального ланцюга на ланцюг, в якому проводиться вимірювання, *по - друге*, потрібне підвищення вхідного опору подальшої апаратури і, *по - третє*, збільшення інерційності ланцюга, що викликається дією паразитних ємностей, зокрема ємності сполучних ліній.

Застосування *підсилювача струму на основі ОП* дозволяє в значній мірі позбавитися від перерахованих недоліків. У простому випадку підсилювачем струму є інвертуючий підсилювач (рисунок 6.7) без вхідного резистора. На рисунку 6.7 показана схема подібного підсилювача, в якій в ланцюг зворотного зв'язку використовується Т-подібне коло, що дозволяє зменшити опір резисторів при заданій чутливості пристрою.

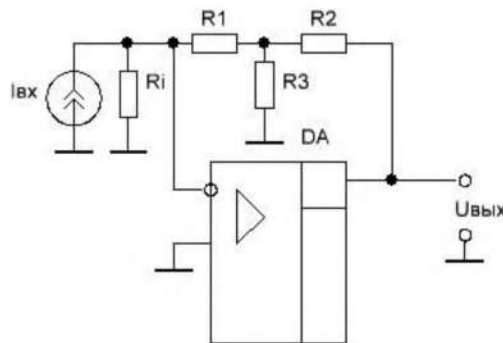


Рисунок 5.7 - Схема підсилювача струму

У наслідок трох вхідного опору підсилювача струму практично не робить зворотного впливу на ланцюг, яким вимірюється струм. Крім того, усувається вплив ємності сполучних ліній, так ця ємність включена паралельно низькому вхідному опору підсилювача струму і тому обумовлена нею постійна часу дуже мала. Вихідний опір підсилювача струму малий, як і у всякого підсилювача із зворотним зв'язком по напрузі.

Якщо до підсилювача не пред'являються вимоги високої швидкодії, то можна рекомендувати включити конденсатор між входу і І- входом ОП з метою зменшення напруги шумів на виході.

Застосовуються *підсилювач струму* для роботи з фотопомножувачами,

іонізаційними перетворювачами і у всіх інших випадках, коли потрібно підсилювати малі струми.

Підсилювачі заряду забезпечує зміна вихідної напруги, пропорційна зміні електричного заряду, що приходить на його вхід (іншими словами, підсилювач заряду - це інтегратор вхідного струму). Схема *підсилювача ЗАРЯДУ* показана на рисунку 6. 8.

Схема включає ОП, охоплений зворотним зв'язком через конденсатор $C_{зз}$. До входу ОП приєднано джерело вхідного заряду $q_{вх}$. умовно показаний на рисунку 6.8 у вигляді сполучених послідовно ЕРС E і змінній ємності C ($q_{вх} = \Delta C \cdot E$ – де ΔC зміна ємності). Конденсатор C_1 на схемі рисунок 5.8 показує ємність лінії, що сполучає вхід джерела заряду з входом підсилювача.

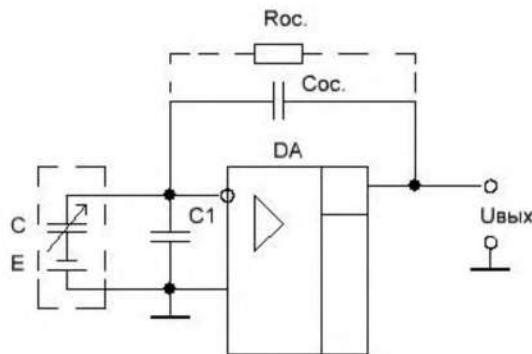


Рисунок 5.8 - Схема підсилювача заряду

Паралельно конденсатору $C_{зз}$ в підсилювачі заряду може бути встановлений ключ, що дозволяє проводити початкову установку вихідної напруги шляхом розряду цього конденсатора через замкнутий ключ. Можлива також установка резистора $R_{зз}$, за допомогою якого обмежується знизу смуга пропускання підсилювача.

Підсилювачі заряду знаходять застосування для посилення сигналів від п'єзоелектричних перетворювачів, де ці підсилювачі дозволяють зменшити похибки вимірювання, опори ізоляції і ємності перетворювача і сполучній лінії, що викликаються нестабільністю. Застосування в ОП додаткового вхідного каскаду на МОН - транзисторах і конденсатора $C_{зз}$ з малими витокami дозволяє будувати підсилювачі заряду з нижньою частотою смуги пропускання менше 10^{-3} Гц (резистор $R_{зз}$ при цьому, природно, не ставиться). Завдяки цьому з'являється можливість використовувати п'єзоперетворювачі в режимі, близькому до статичного, наприклад в електричних вагах.

Підсилювачі заряду знаходять застосування також у поєднанні з іншими перетворювачами, що мають як вихідну величину електричний заряд, наприклад з конденсаторними мікрофонами[6,19,20].

Перетворювач струм – напруга

Іноді бажано отримати схему з дуже низьким вхідним опором і напругу на виході, пропорційним вхідному струму. Цю функцію виконує схема інвертуючого підсилювача при $R_1=0$. Як показано на рисунку 6.9 вхідний струм від джерела

сигналу повинен протікати через резистор зворотного зв'язку R_2 . Для того, щоб диференціальна вхідна напруга підтримувалася близькою нулю, вихідна напруга повинна приймати наступні значення (5.15)

$$U_{\text{вих}} = -I_{\text{вх}} \cdot R_{\text{обс}} \quad (5.15)$$

Таким чином, вихідна напруга прямо пропорційна вхідному струму. Перетворювач «струм – напруга» використовується в якості амперметра с нульовим опором, а також для підсилення сигналів, що відаються високоомними джерелами струму.

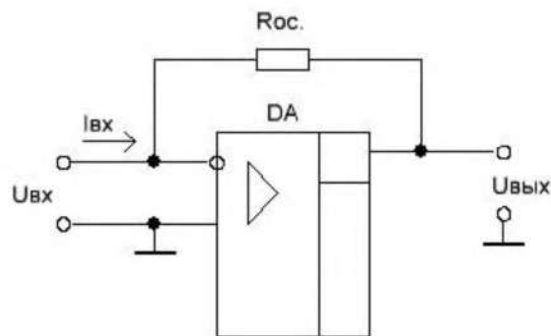


Рисунок 5.9- Схеми перетворення струм – напруга

Перетворювач *струм-напруга* має одну з переваг при використанні схеми як швидкодіючий підсилювач для фотодіода[6,19,20]..

Мостові перетворювачі опору в напругу

Мостові перетворювачі опору в напругу (МПОН) — це перетворювачі неважесня мостового резистивного кола в напругу. Для побудови мостового ПОН, взагалі кажучи, досить підключити до вихідної діагоналі мостового кола диференціальний підсилювач. Так часто і роблять. Але у ряді випадків, при побудові мостового ПОН прагнуть вирішити додаткові завдання такі, як виняток впливи сполучної лінії і корекції похибки від нелінійності.

Розглянемо чотирьохплечий резистивний міст, схема якого показана на рисунку 6.10.

Схема включає резистивний міст (R_1, R_2, R_3, R_4) в одне з плеч котрого вкнут перетворювач сигнал здиагоналі мосту подається до входу операційного підсилювача (DA). Вихідна напруга визначається за формулою (6.16)

$$U_{\text{вих}} = E \cdot [(R_1 \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3) / (R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)]. \quad (5.16)$$

Ця формула показує, що мостове коло при холостому ході забезпечує лінійне перетворення приросту опору в напругу U_d тільки в двох випадках. По-перше, тоді, коли міст має два активні плечі, опори котрих змінюються диференціальне, наприклад $R_1 = R + \Delta R$, $R_2 = R - \Delta R$, при цьому $R_3 = R_4 = R$. По друге, тоді коли всі чотири плечі активні: $R_1 = R_4 = R + \Delta R$, $R_2 = R_3 = R - \Delta R$.

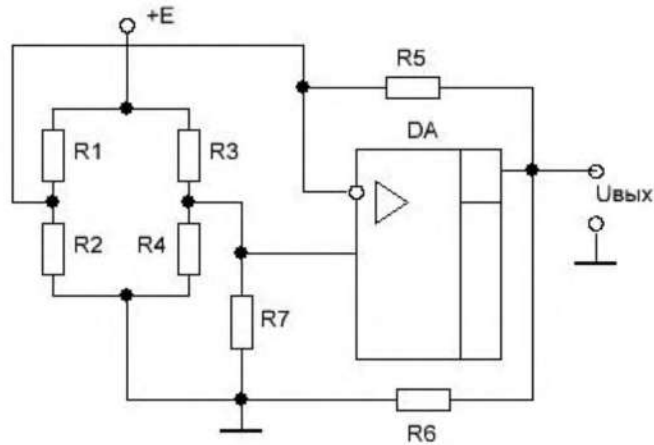


Рисунок 5.10- Мостовий перетворювач опору в напругу з лінеаризацією функції перетворення

Якщо ж під впливом вимірюваної величини змінюється тільки одне плече моста, то його функція перетворення буде нелінійною. За допомогою ОП можна лінеаризувати функцію перетворення моста.

Перспективні *ПОН*, в яких живлення моста проводиться від джерела стабільного струму. Такі мости доцільно використовувати в режимі короткого замикання, при цьому відношення вихідного струму до струму живлення визначається відносною (а не абсолютним) зміною входних в міст опорів. [6,19,20].

6 ПРИКЛАДИ ЕЛЕКТРИЧНИХ РОЗРАХУНКІВ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОЛА

6.1 Розрахунок інвертуючого підсилювача на операційному підсилювачі

Для розрахунку інвертуючого підсилювача задаємося початковими даними :

- номінальне значення напруги на навантаженні $U_H = 10 \text{ В}$;
- номінальне значення струму на навантаженні $I_H = 0,1 \text{ А}$;
- напруга на вході підсилювача $U_{\text{вх. ін.під.}} = 0,1 \text{ В}$;
- сопротивление нагрузки $R_H = 100 \text{ Ом}$.

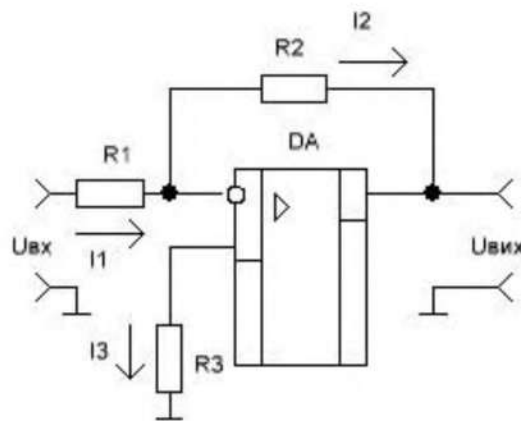


Рисунок 6. 1 – Схема інвертуючого підсилювача на операційному підсилювачі

6.1.1 Вибір типу операційного підсилювача

Для вибору операційного підсилювача необхідне щоб параметри операційного підсилювача були рівні або більше номінального значення напруги і струму на навантаженні (6.1).

$$\begin{aligned} U_{\text{оп.вих.м}} &\geq U_H \\ I_{\text{оп.вих. м}} &\geq I_H. \end{aligned} \quad (6.1)$$

З довідника [10] вибираємо мікросхему К157УД1. Параметри мікросхеми приведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 - Електричні параметри мікросхеми К157УД1

Параметри	$U_{\text{вих.}}$ В	$I_{\text{вих.}}$ А	$K_{\text{оп.}}$ 10^3	$U_{\text{п}}$ В	f , МГц	$U_{\text{см.}}$ мВ	$R_{\text{вих.}}$ Ом	$R_{\text{вх.}}$ кОм	$I_{\text{п.}}$ мА	$\Delta I_{\text{вх}}$ нА
К157УД1	12	0,3	50	15	0,5	± 5	40	10	9	500

6.1.2 Визначення опору R_2 .

Оскільки опір резистора R_2 і дрейф нуля підсилювача знаходяться в прямо пропорційній залежності, що виходить з формули (6.2)

$$U_{0\text{вих}} = (1 + R_2/R_1) U_{\text{см}} + \Delta I_{\text{вх.оп}} R_2, \quad (6.2)$$

то при розрахунку підсилювача за всіх рівних умов необхідно прагнути до вибору мінімального значення резистора R_2 , яка обмежена знизу допустимим вихідним струмом і напругою операційного підсилювача (7.3).

$$R_{2\text{min}} \approx 10 U_{\text{вих}} / I_{\text{вих}}, \quad (6.3)$$

де $U_{\text{вих}}$, $I_{\text{вих}}$ – номінальне допустимі значення вихідної напруги і струму операційного підсилювача.

$$R_{2\text{min}} \geq (10 \times 12) / 0,3 = 400 \text{ Ом.}$$

Максимальна величина резистора $R_{2\text{max}}$:

$$R_{2\text{max}} = (0,01 \times 0,1) / 2 \pi f_{\text{max}} C_{\text{пар}} \quad (6.4)$$

де f_{max} – максимальна частота операційного підсилювача;
 $C_{\text{пар}}$ – паразитна ємність для резистора, $C_{\text{пар}} = (0,1 \div 0,5) \text{ пФ}$.

$$R_{2\text{max}} \leq 0,1 / (2 \times 3,14 \times 500 \cdot 10^3 \times 0,1 \cdot 10^{-12}) = 318 471 \text{ Ом.}$$

Для більшості сучасних операційних підсилювачів $R_{2\text{max}} \approx (100 \div 1000) \text{ кОм}$. При збільшенні опорів R_1 і R_2 погіршуються динамічні характеристики і перешкодостійкість підсилювача.

Згідне додатку А (таблиця 1) вибираємо $R_2 = 200 \text{ кОм}$.

6.1.3 Визначення коефіцієнту підсилення інвертуючого підсилювача.

За формулою 6.5 визначаємо:

$$K_{\text{ін.під.}} = U_{\text{н}} / U_{\text{вх. ін.п}}, \quad (6.5)$$

$$K_{\text{ін.під.}} = 10 / 0,1 = 100.$$

6.1.4 Визначення опору резистора R_1 за формулою:

$$R_1 = R_2 / K_{\text{ін.під.}} \quad (6.6)$$

$$R_1 = 200 \cdot 10^3 / 100 = 2000 \text{ Ом.}$$

Згідне додатку А (таблиця 1) вибираємо $R_1 = 2 \text{ кОм}$.

6.1.5 Перевірка правильності вибору резисторів R_1 і R_2 .

Для цього підставляємо вибрані значення резисторів R_1 і R_2 у формулу (6.2)

$$U_{0\text{ВИХ}} = (1 + R_2/R_1) U_{\text{СМ}} + \Delta I_{\text{ВХ оп}} R_2 ,$$

$$U_{0\text{ВИХ}} = (1 + 200 \cdot 10^3 / 2000) \times 5 \cdot 10^{-3} + 500 \cdot 10^{-9} \times 200 \cdot 10^3 = 0,6 \text{ В}$$

Напруга $U_{0\text{ВИХ}}$ викликана впливом $U_{\text{СМ}}$ і вхідними струмами операційного підсилювача.

Визначаємо коефіцієнт передачі кола негативного зворотного зв'язку за формулою (6.7):

$$\beta = 1 / [1 + (R_2/R_1) + (R_2/R_{\text{ВХ}})], \quad (6.7)$$

$$\beta = 1 / [1 + (200 \cdot 10^3 / 2000) + (200 \cdot 10^3 / 10 \cdot 10^3)] = 0,01$$

Визначаємо коефіцієнт передачі операційного підсилювача $K(p)$ за формулою (6.8)

$$K(p) = (R_2/R_1) \times [K_{\text{оп}} \times \beta / (1 + K_{\text{оп}} \times \beta)] \quad (6.8)$$

$$K(p) = (200 \cdot 10^3 / 2000) \times [50 \cdot 10^3 \times 0,01 / (1 + 50 \cdot 10^3 \times 0,01)] = 99$$

Визначаємо напругу на виході операційного підсилювача $U_{\text{ВИХ}}$ за формулою (6.9)

$$U_{\text{ВИХ}} = - K(p) \times U_{\text{ВХ}} \pm U_{0\text{ВИХ}} \quad (6.9)$$

$$U_{\text{ВИХ1}} = - 99 \times 0,1 - 0,6 = - 10,5 \text{ В}$$

$$U_{\text{ВИХ2}} = - 99 \times 0,1 + 0,6 = - 9,3 \text{ В}$$

Висновок: резистори вибрані правильно оскільки виконується умова

$$U_{\text{ВИХ1}} \geq U_{\text{н.макс}} ; 10,5 \text{ В} \geq 10 \text{ В.}$$

6.1.6 Визначаємо опір резистора R_3 , що коректує, за формулою (6.10)

$$R_3 = (R_2 R_1) / (R_1 + R_2), \quad (6.10)$$

$$R_3 = (200 \cdot 10^3 \times 2 \cdot 10^3) / (200 \cdot 10^3 + 2 \cdot 10^3) = 1980 \text{ Ом}$$

Згідне додатку А (таблиця 1) вибираємо: $R_3 = 2 \text{ кОм}$.

6.1.7 Визначаємо вхідний струм I_1 за формулою (6.11)

$$I_1 = U_{\text{ВХ}} / R_1 \quad (6.11)$$

$$I_1 = 0,1 / 2 \cdot 10^3 = 50 \cdot 10^{-6} \text{ A}$$

Згідне першому закону Кирхгофа $I_1 = I_2 = I_3$.

6.1.8 Визначаємо потужність резисторів R_1, R_2, R_3 за формулою (6.12)

$$P = I^2 \times R \quad (6.12)$$

$$P_{R1} = (50 \cdot 10^{-6})^2 \times 2 \cdot 10^3 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$$

$$P_{R2} = (50 \cdot 10^{-6})^2 \times 200 \cdot 10^3 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}$$

$$P_{R3} = (50 \cdot 10^{-6})^2 \times 2 \cdot 10^3 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$$

Оскільки потужність, що розсіюється на резисторах мала, рекомендується вибирати резистори по потужності порядку 0,125 Вт. типу С2-33.

$$\begin{aligned} R_1 &- \text{C2-33} - 0,125 - 2\text{кОм} \pm 5\% ; \\ R_2 &- \text{C2-33} - 0,125 - 200 \text{кОм} \pm 5\% ; \\ R_3 &- \text{C2-33} - 0,125 - 2\text{кОм} \pm 5\% . \end{aligned}$$

6.1.9 Визначаємо вихідний опір інвертуючого підсилювача (6.13)

$$R_{\text{вих.ін.під}} = R_{\text{вих. оп.}} / (1 + K_{\text{оп}} \times \beta), \quad (6.13)$$

$$R_{\text{вих.ін.під}} = 40 / (1 + 50 \cdot 10^3 \times 0,01) = 0,08 \text{ Ом.}$$

6.1.10 Визначаємо вхідний опір інвертуючого підсилювача (6.14)

$$R_{\text{вх.ін.під}} = R_1 \quad (6.14)$$

$$R_{\text{вх.ін.під}} = 2000 \text{ Ом.}$$

Для підвищення стійкості при роботі з різними навантаженнями рекомендується, окрім основної корекції, що підключається між виводами 1 - 3 або 1 - 5. і з'єднання виводів 2 і 6 через конденсатори поблизу мікросхеми із загальним дротом пристрою підключати додатковий RC-цепь між виводами 3 і 5 мікросхеми.

6.1.11 Аналіз похибок інвертуючого підсилювача.

Похибки інвертуючого підсилювача можна розділити на мультиплікативні (пропорційні вхідному сигналу) і аддитивні (не залежні від вхідного сигналу). Як видно з формули $K_{\text{ін.під}} = - R_2 / R_1$, погрішність підсилювача, тобто відхилення вихідної напруги від розрахункового значення, визначається раніше всього похибками опорів резисторів R_2 і R_1 .

Зведена похибка підсилювача визначається резисторами R_2 і R_1 (6.15)

$$\gamma_{\text{отн}} = - (\Delta R / R) \times 100 \%, \quad (6.15)$$

Резистори виготовляються з допустимим відхиленням 5 %

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{отн}R1} &= - 100/2000 = - 5\% \\ \gamma_{\text{отн}R2} &= 10000/200000 = 5\% \end{aligned}$$

Зведена похибка підсилювача, викликана наявністю $U_{\text{см}}$ (6.17).

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{отн}U_{\text{см}}} &\approx (U_{\text{см}} / U_{\text{вх. ин.ус.}}) \times 100 \\ \gamma_{\text{отн}U_{\text{см}}} &\approx (5 \cdot 10^{-3} / 0,1) \times 100 \% = 5\%. \end{aligned} \quad (6.16)$$

Зведена похибка підсилювача, обумовлена різницею вхідних струмів $\Delta I_{\text{вх}}$ (6.17).

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{отн} I_{\text{вх}}} &\approx (\Delta I_{\text{вх}} \times R_1 / U_{\text{вх. ин.під.}}) \times 100 \%, \\ \gamma_{\text{отн} I_{\text{вх}}} &\approx (500 \cdot 10^{-9} \times 2 \cdot 10^3 / 0,1) \times 100 \% = 1\% \end{aligned} \quad (6.17)$$

Для того, щоб зменшити похибку, що визначається резисторами потрібно вибирати більш прецизійні резистори. Наприклад резистори металлофольгові типу МРХ з відхиленням, що допускається $\pm 0,02\%$.

$$\begin{aligned} R_1 &- \text{МРХ} - 0,125 - 2\text{кОм} \pm 0,02\% ; \\ R_2 &- \text{МРХ} - 0,125 - 200 \text{кОм} \pm 0,02\% ; \\ R_3 &- \text{МРХ} - 0,125 - 2\text{кОм} \pm 0,02\% \end{aligned}$$

Якщо потрібно здійснити посилення сигналу в діапазоні частот від 20 Гц до 20 кГц, то слід застосовувати підсилювач змінної напруги на операційному підсилювачі, схема якого приведена на рисунку 6.3. Коефіцієнт частотних спотворень $M_H = 1,02$.

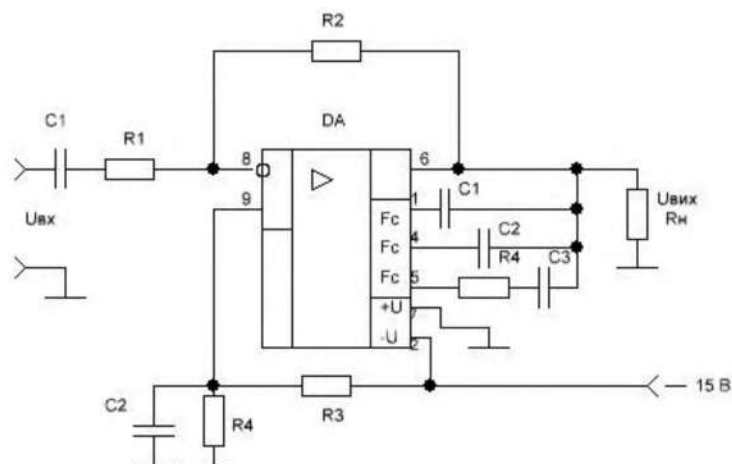


Рисунок 6.3 – Принципова схема підсилювача змінної напруги зібрана на мікросхемі К157 УД1

У підсилювачах змінної напруги доцільно використовувати, тільки одне джерело живлення позитивної або негативної полярності. Проте при цьому на вході операційного підсилювача необхідно включати коло для формування напруги зсуву, за допомогою якої на виході операційному підсилювачі встановлюється напруга, рівна половині напруги живлення.

6.1.12 Визначаємо максимальну частоту, при якій вихідна напруга не спотворена.

Швидкість збільшення вихідної напруги мікросхеми рівна $\Delta U = 1\text{В/мкс}$.

$$f_{\max} = (1/2\pi \times U_{\text{вих. м}}) \times \Delta U$$

$$f_{\max} = (1/6,28 \times 10,6) \times 1/10^{-6} = 15022 \text{ кГц}$$

6.1.13 Параметри підсилювача резисторів R_1, R_2, R_3, R_5 і мікросхеми DA вибираємо по п.6.1.1 - 6.1.8. Опір резистора $R_4 = R_3$.

6.1.14 Визначаємо ємність конденсатора C_1 за формулою (6.18)

$$C_{1\min} = 1 / (2\pi f_H R_1 \sqrt{M_H^2 - 1}), \quad (6.18)$$

$$C_{1\min} = 1 / (2 \times 3,14 \times 20 \times 2 \cdot 10^3 \sqrt{1,02^2 - 1}) = 98 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

З довідника [5] вибираємо конденсатор C_1 типу

$$\text{K50-6 -200мкФ} \times 25 \text{ В} \pm 10\%$$

Проводимо перевірку. Повинна виконуватися умова (6.19)

$$X_{c1} \ll R_1, \quad 1/(2\pi \times f_H \times C_1) \ll R_1 \quad (6.19)$$

$$1 / (2 \times 3,14 \times 20 \times 200 \cdot 10^{-6}) \ll 2,0 \cdot 10^3$$

$$39 \text{ Ом} \ll 2,0 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

6.1.15 Визначаємо ємність конденсатора C_2 , що призначена для придушення пульсації за формулою (6.21)

$$C_{2\min} = (10 \div 20) / [2 \times \pi \times f_H \times (R_3 \times R_4 / R_3 + R_4)] \quad (6.20)$$

$$C_{2\min} = 10 / (2 \times 3,14 \times 20 \times (2 \cdot 10^3 \times 2 \cdot 10^3 / (2 \cdot 10^3 + 2 \cdot 10^3))) = 79,617 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

З довідника [5] вибираємо конденсатор C_2 типу

$$\text{K50-18 - 100 мкФ} \times 25 \text{ В} \pm 10\%.$$

6.2 Розрахунок неінвертуючого підсилювача

Для розрахунку неінвертуючого підсилювача задаємося початковими даними:

- номінальне значення напруги на навантаженні $U_H = 1 \text{ В}$;
- номінальне значення струму на навантаженні $I_H = 0,01 \text{ А}$;
- напруга на вході підсилювача $U_{\text{вх.неін.під.}} = 0,01 \text{ В}$
- опір навантаження $R_H = 2 \text{ кОм}$.
- частотний діапазон $f = (0 \text{ Гц до } 20 \text{ кГц})$.

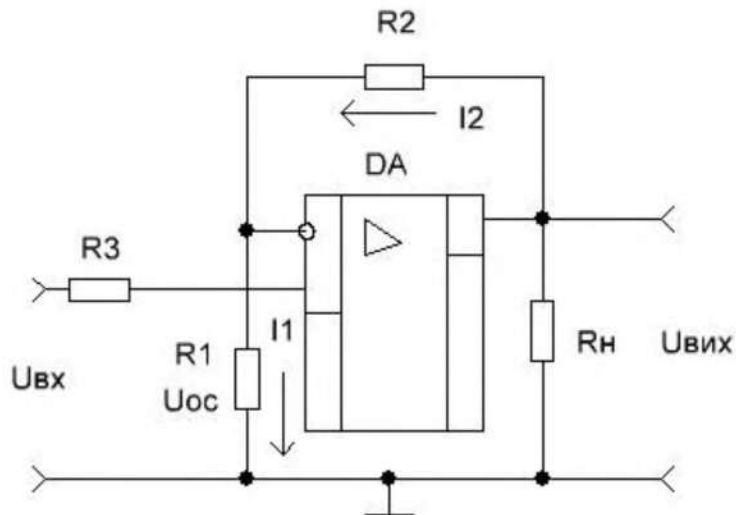


Рисунок 6.4 – Принципова схема неінвертуючого підсилювача

6.2.1 Вибір операційного підсилювача.

Вибір операційного підсилювача необхідно проводити за параметрами при виконанні наступних умов (6.21):

$$\begin{aligned} U_{\text{оп. вих}} &\geq U_H \\ I_{\text{оп. вих}} &\geq I_H \end{aligned} \quad (6.21)$$

З додатку А вибираємо мікросхему К1408УД1. Параметри мікросхеми приведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 - Електричні параметри мікросхеми К1408УД1

Параметри	$U_{\text{вих.}}$ В	$I_{\text{вих.}}$ А	$K_{\text{оп.}}$ 10^3	$U_{\text{п.}}$ В	f МГц	$U_{\text{см.}}$ мВ	$R_{\text{вих.}}$ Ом	$R_{\text{вх.}}$ МОм	$I_{\text{п.}}$ мА	$\Delta I_{\text{вх}}$ нА
К1408УД1	18	0,1	70	2×27	0,5	± 8	180	1	5	10

6.2.2 Визначення опору R_2 .

Оскільки опір резистора R_2 і дрейф нуля підсилювача знаходяться в прямо пропорційній залежності, що виходить з формули (6.22)

$$U_{0\text{вих}} = (1 + R_2/R_1) U_{\text{см}} + \Delta I_{\text{вх.оп}} R_2, \quad (6.22)$$

то при розрахунку підсилювача за всіх рівних умов необхідно прагнути до вибору мінімальної величини резистора R_2 , яка обмежена знизу максимально допустимим вихідним струмом операційного підсилювача (6.23).

$$R_{2\text{min}} \approx 10 U_{\text{вих}} / I_{\text{вих}}, \quad (6.23)$$

де $U_{\text{вих}}^{\text{max}}$, $I_{\text{вих}}^{\text{max}}$ – максимально допустимі значення вихідної напруги і струму операційного підсилювача.

$$R_{2\text{min}} \approx (10 \times 18) / 0,1 = 1800 \text{ Ом.}$$

Максимальний опір резистора $R_{2\text{max}}$:

$$R_{2\text{max}} = (0,01 \div 0,1) / 2 \pi f_{\text{max}} C_{\text{пар.}}, \quad (6.24)$$

де f_{max} – максимальна частота операційного підсилювача;
 $C_{\text{пар.}}$ – паразитна ємкість для резистора $C_{\text{пар.}} = (0,1 \div 0,5) \text{ пФ.}$

$$R_{2\text{max}} \leq 0,1 / (2 \times 3.14 \times 500 \cdot 10^3 \times 0,1 \cdot 10^{-12}) = 318 471 \text{ Ом.}$$

Для більшості сучасних операційних підсилювачів ця величина знаходиться в діапазоні $R_{2\text{max}} \approx (100 \div 1000) \text{ кОм.}$ При збільшенні опорів R_1 і R_2 погіршуються динамічні характеристики та перешкодостійкість підсилювача.

З додатку А (таблиця 1) вибираємо $R_2 = 100 \text{ кОм.}$

6.2.3 Визначаємо коефіцієнт підсилення неінвертуючого підсилювача за формулою (6.25)

$$K_{\text{неін.під.}} = U_{\text{н}} / U_{\text{вх.неін.під.}} \quad (6.25)$$

$$K_{\text{неін.під.}} = 1 / 0,01 = 100.$$

6.2.4 Визначаємо опір резистора R_1 за формулою (6.26)

$$K_{\text{неін.під.}} = (1 + R_2 / R_1), \quad (6.26)$$

$$R_1 = R_2 / (K_{\text{неін.під.}} - 1) \quad (6.27)$$

$$R_1 = 100 \cdot 10^3 / (100 - 1) = 1010 \text{ Ом}$$

З додатку А (таблиця 1) вибираємо $R_1 = 1,1 \text{ кОм}$.

6.2.5 Визначаємо опір резистора R_3 за формулою (6.28)

$$R_3 = R_1 \times R_2 / (R_1 + R_2), \quad (6.28)$$

$$R_3 = 100 \cdot 10^3 \times 1.1 \cdot 10^3 / (100 \cdot 10^3 + 1.1 \cdot 10^3) = 1088 \text{ Ом}$$

З додатку А (таблиця 1) вибираємо $R_3 = 1,1 \text{ кОм}$.

6.2.5 Перевіряємо вибір резисторів R_1 і R_2 .

Для цього підставляємо вибрані значення опорів резисторів R_1 і R_2 у формулу (6.29)

$$U_{\text{вих}} = (1 + R_2/R_1) U_{\text{см}} + \Delta I_{\text{вх оп}} R_2 \quad (6.29)$$

$$U_{\text{вих}} = (1 + 100 \cdot 10^3 / 1100) \times 8 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 10^{-9} \times 100 \cdot 10^3 = 0.736 \text{ В}$$

Напруга помилки $U_{\text{вих}}$, викликана впливом $U_{\text{см}}$ і вхідними струмами операційного підсилювача.

Визначаємо коефіцієнт передачі кола негативного зворотного зв'язку за формулою 6.30

$$\beta = 1 / (1 + R_2 / ((R_1 (R_3 + R_{\text{вх оп}}) / (R_1 + (R_3 + R_{\text{вх оп}}))), \quad (6.30)$$

$$\beta = 1 / (1 + 100 \cdot 10^3 / ((1 \cdot 10^3 \times (1.1 \cdot 10^3 + 1000 \cdot 10^3) / (1 \cdot 10^3 + (1.1 \cdot 10^3 + 1000 \cdot 10^3)))) = 0,011$$

Визначаємо коефіцієнт передачі операційного підсилювача $K(p)$ за формулою (6.31)

$$K(p) = (1 + R_2/R_1) \times [K_{\text{оп}} \times \beta / (1 + K_{\text{оп}} \times \beta)], \quad (6.31)$$

$$K(p) = (1 + 100 \cdot 10^3 / 1.1 \cdot 10^3) \times [70 \cdot 10^3 \times 0,011 / (1 + 70 \cdot 10^3 \times 0,011)] = 91$$

Визначите вихідну напругу на виході операційного підсилювача $U_{\text{вих}}$ за формулою (6.32)

$$U_{\text{вих}} = K(p) \times U_{\text{вх}} \pm U_{\text{вих}}, \quad (6.32)$$

$$U_{\text{вих1}} = 91 \times 0,01 + 0,736 = 1,6 \text{ В},$$

$$U_{\text{вих2}} = 91 \times 0,01 - 0,736 = 0,174 \text{ В},$$

Вивід: Резистори вибрані правильно оскільки виконується умова

$$U_{\text{вих1}} > U_{\text{н.мах}} ; 1,6 \text{ В} > 1 \text{ В}$$

6.2.7 Визначаємо вхідний струм I_1 за формулою (6.33)

$$I_1 = (U_{\text{вх. неінв. під.}} + U_d) / R_1, \quad (6.33)$$

де U_d – диференціальна вхідна напруга ОП.

$$U_d = U_{\text{вих}} / K_{\text{оп}}, \quad (6.34)$$

$$U_d = 18 / 70000 = 0,257 \cdot 10^{-3} \text{ В}$$

$$I_1 = (0,01 + 0,00257) / 1100 = 11 \cdot 10^{-6} \text{ А},$$

Струм $I_1 = I_2 = 11 \cdot 10^{-6} \text{ А}$, оскільки $R_{\text{вх}} \rightarrow \infty$

6.2.8 Визначаємо потужність резисторів R_1, R_2, R_3 за формулою

$$P_{R_1, R_2, R_3} = I_1^2 \times R_{1,2,3}, \quad (6.35)$$

$$P_{R_1} = (11 \cdot 10^{-6})^2 \times 1,1 \cdot 10^3 = 0,133 \cdot 10^{-6} \text{ Вт},$$

$$P_{R_2} = (11 \cdot 10^{-6})^2 \times 100 \cdot 10^3 = 0,121 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}$$

$$P_{R_3} = (40 \cdot 10^{-9})^2 \times 1,1 \cdot 10^3 = 44 \cdot 10^{-15} \text{ Вт}$$

Оскільки потужність резисторів дуже мала, то рекомендуються вибирати резистори по потужності порядку 0,125 Вт. типу С2-33.

$$R_1 - \text{С2-33} - 0,125 - 1,1 \text{ кОм} \pm 5\% ;$$

$$R_2 - \text{С2-33} - 0,125 - 100 \text{ кОм} \pm 5\% ;$$

$$R_3 - \text{С2-33} - 0,125 - 1,1 \text{ кОм} \pm 5\% .$$

При наявності в схемі неінвертуючого підсилювача послідовного негативного зворотного зв'язку по напрузі його вхідний опір зростає (6.36)

$$R_{\text{вх. неінв. під.}} = R_3 + R_{\text{вх. оп}} (1 + K_{\text{оп}} \beta), \quad (6.36)$$

$$R_{\text{вх. неінв. під.}} = 1,1 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^6 (1 + 70 \cdot 10^3 \times 0,011) = 772 \cdot 10^6 \text{ Ом}$$

6.2.9 Визначаємо вихідний опір неінвертуючого підсилювача за формулою (6.37)

$$R_{\text{вих. неінв. під.}} = R_{\text{вих. оп}} / (1 + K_{\text{оп}} \beta), \quad (6.37)$$

$$R_{\text{вих. неінв. під.}} = 180 / (1 + 70 \cdot 10^3 \times 0,011) = 0,23 \text{ Ом}.$$

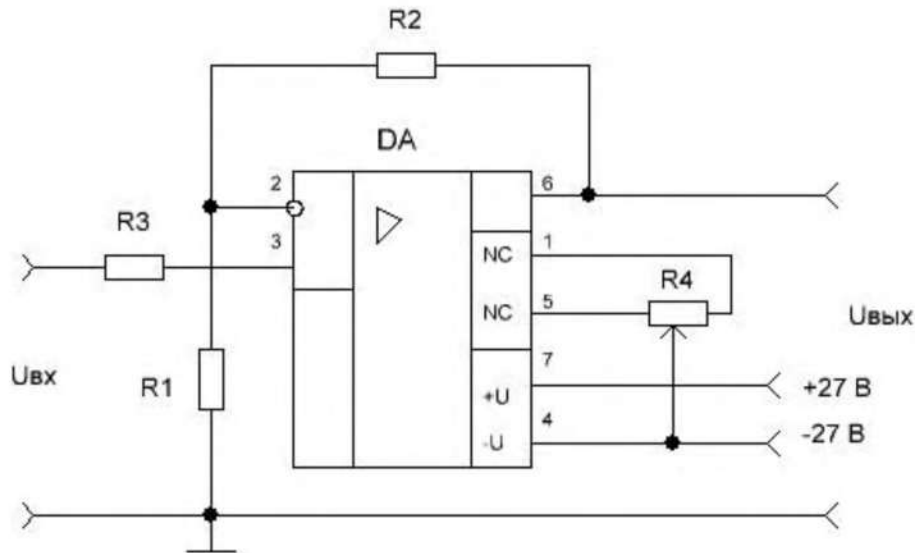


Рисунок 6.5 - Принципова схема неінвертуючого підсилювача з елементами корекції зібраного на мікросхемі К1408 УД1 (1,5 – частотна корекція R4 = 1-10 кОм.- СП-5-16Б).

6.2.10 Розрахунок похибок неінвертуючого підсилювача.

Похибка підсилювача, тобто відхилення вихідної напруги від розрахункового значення, визначається раніше всього похибками опорів резисторів R₂ і R₁.

Відносна похибка підсилювача визначена резисторами R₂ і R₁ (6.38,6.39).

$$\gamma_{\text{від.R1}} = - (\Delta R_1 / R_1) \times ((R_2 / R_1) / (1 + R_2 / R_1)) \times 100 \% , \quad (6.38)$$

$$\gamma_{\text{від.R1}} = -(55/1100) \times [(100 \cdot 10^3 / 1100) / (1 + 100 \cdot 10^3 / 1100)] \times 100 \% = -4,95\%$$

$$\gamma_{\text{від.R2}} = (\Delta R_2 / R_2) \times [(R_2 / R_1) / (1 + R_2 / R_1)] \times 100 \% , \quad (6.39)$$

$$\gamma_{\text{від.R2}} = (5000/100000) \times [(100 \cdot 10^3 / 1100) / (1 + 100 \cdot 10^3 / 1100)] \times 100 \% = 4,95\%$$

Резистори виготовляються як правило з відхиленням до 5 %

Зведена похибка підсилювача, що викликана наявністю U_{см}.

$$\gamma_{\text{зв.Ucm}} \approx ((U_{0\text{вх}} - U_{\text{см}}) / U_{\text{н}}) \times 100 \% , \quad (6.40)$$

$$\gamma_{\text{зв.Ucm}} \approx (0,736 \times 8 \cdot 10^{-3} / 0,01) \times 100 \% = 0,6\%.$$

Зведена похибка підсилювача, що обумовлена різницею вхідних струмів ΔI_{вх}.

$$\gamma_{\text{зв.ΔIвх}} \approx (\Delta I / U_{\text{вх. неін. Під.}}) \times [(R_1 R_2) / (R_1 + R_2)] \times 100 \% , \quad (6.41)$$

$$\gamma_{\text{зв.ΔIвх}} \approx (10 \cdot 10^{-10} / 0,01) \times [(1,1 \cdot 10^3 \times 100 \cdot 10^3) / (1,1 \cdot 10^3 + 100 \cdot 10^3)] \times 100 \% = 0,02\%$$

З аналізу похибок видно, що застосування резисторів типу С2-33 похибка підсилювача найбільша. Для того, щоб зменшити похибку, що визначена резисторами потрібно вибирати прецизійні резистори.

Наприклад резистори металофольгові типу МРХ з відхиленням, що допускається, $\pm 0,02\%$.

$$\begin{aligned} R_1 &- \text{МРХ} - 0,125 - 1.1\text{кОм} \pm 0,02\% ; \\ R_2 &- \text{МРХ} - 0,125 - 100 \text{кОм} \pm 0,02\% ; \\ R_3 &- \text{МРХ} - 0,125 - 1.1\text{кОм} \pm 0,02\% \end{aligned}$$

Якщо потрібно здійснити посилення сигналу в діапазоні частот від 20 Гц до 20 кГц, то слід застосовувати підсилювач змінної напруги на операційному підсилювачі, схема якого приведена на рисунку 6.6. Коефіцієнт частотних спотворень $M_H = 1,02$.

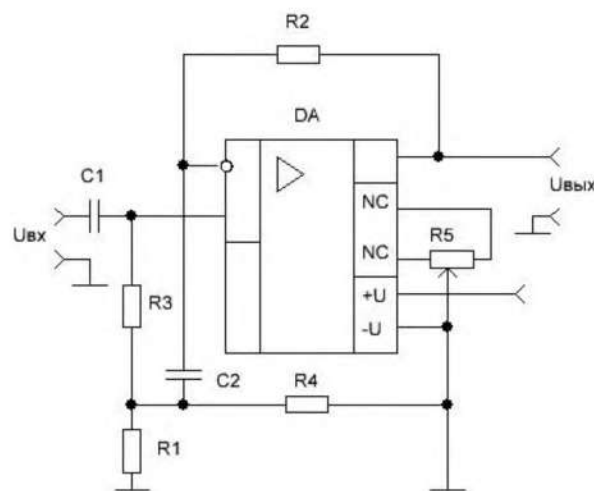


Рисунок 6.6 – Принципова схема підсилювача змінної напруги зібрана на мікросхемі К1408 УД1

У підсилювачах змінної напруги доцільно використовувати, тільки одно джерело живлення позитивної або негативної полярності. Проте при цьому на вході операційного підсилювача необхідно включати коло для формування напруги зсуву, за допомогою якої на виході операційного підсилювача встановлюється напруга, що рівна половині напруги живлення.

Параметри підсилювача резисторів R_1, R_2, R_3, R_5 і мікросхеми DA вибираємо по п.6.2.1 і 6.2.8. Опір резистора $R_4 = R_3$.

6.2.11 Визначаємо вхідний опір підсилювача змінної напруги (6.42)

$$R_{\text{вх}} \approx R_3 \times (K_{\text{оп}} / K_{\text{неін. під.}}), \quad (6.42)$$

$$R_{\text{вх}} \approx 1.1 \cdot 10^3 \times (70 \cdot 10^3 / 100) = 770 \cdot 10^3 \text{ Ом.}$$

6.2.12 Визначаємо ємність конденсатора C_1 за формулою (6.43)

$$C_{1\min} = 1 / (2\pi f_H R_3 \sqrt{M_H^2 - 1}), \quad (6.43)$$

$$C_{1\min} = 1 / (2 \times 3,14 \times 20 \times 1,1 \cdot 10^3 \sqrt{1,02^2 - 1}) = 36 \cdot 10^{-6} \Phi.$$

З довідника [5] вибираємо конденсатор C_1 типу

$$K50-6 -100\text{мк}\Phi \times 25 \text{ В} \pm 10\%$$

Проводимо перевірку: повинна виконуватися умова (6.44)

$$X_{c1} \ll R_3, \quad 1/(2\pi \times f_H \times C_1) \ll R_3, \quad (6.44)$$

$$1 / (2 \times 3,14 \times 20 \times 100 \cdot 10^{-6}) \ll 1,1 \cdot 10^3$$

$$80 \text{ м} \ll 1,1 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

6.2.13 Визначаємо ємність конденсатора C_2 , призначеного для придушення пульсації за формулою (6.45)

$$C_{2\min} = (R_1 + R_4) / (2 \times \pi \times f_H \times R_1 \times R_4 \times \sqrt{M_H^2 - 1}), \quad (6.45)$$

$$C_{2\min} = (1,1 \cdot 10^3 + 1,1 \cdot 10^3) / (2 \times 3,14 \times 20 \times 1,1 \cdot 10^3 \times 1,1 \cdot 10^3 \times \sqrt{1,02^2 - 1}) \\ = 358,316 \cdot 10^{-6} \Phi.$$

З довідника [5] вибираємо конденсатор C_2 типу

$$K50-6-1000 \text{ мк}\Phi \times 25 \text{ В} \pm 10\%.$$

Проводимо перевірку: повинна виконуватися умова (6.46)

$$X_{c2} \ll R_1 R_4 / (R_1 + R_4), \quad 1/(2\pi \times f_H \times C_2) \ll R_1 R_4 / (R_1 + R_4) \quad (6.46)$$

$$1 / (2 \times 3,14 \times 20 \times 1000 \cdot 10^{-6}) \ll 1,1 \cdot 10^3 \times 1,1 \cdot 10^3 / (1,1 \cdot 10^3 + 1,1 \cdot 10^3),$$

$$7,96 \text{ Ом} \ll 550 \text{ Ом}$$

Визначаємо коефіцієнт передачі підсилювача змінної напруги [6,19,20].

$$K = 1 + (R_2 / ((R_1 \cdot R_4) / (R_1 + R_4))), \quad (6.47)$$

$$K_{\text{неін. зм. під.}} = 1 + (100 \cdot 10^3 / (1,1 \cdot 10^3 \times 1,1 \cdot 10^3 / (1,1 \cdot 10^3 + 1,1 \cdot 10^3))) = 182$$

6.3 Розрахунок простого диференціального підсилювача на операційному підсилювачі

Для розрахунку простого диференціального підсилювача задаємося

початковими даними :

- синфазна перешкода $U_{\text{сф. Пр.}} = 1,2 \text{ В}$;
- синфазний сигнал $U_{\text{сф. max.}} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ В}$;
- допустимий відсоток придушення синфазної перешкоди $\delta = 3\%$;
- внутрішній опір джерела сигналу $R_c = 1 \text{ кОм}$.

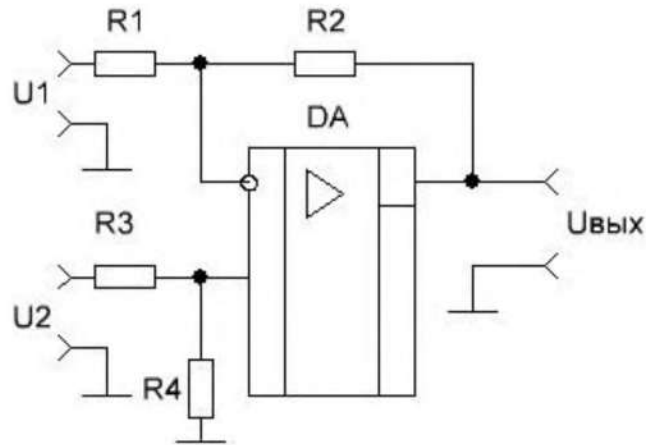


Рисунок 6.7 – Принципова схема простого диференціального підсилювача

6.3.1 Вибір схеми диференціального підсилювача.

Вибираємо схему диференціального підсилювача, приведену на рисунку 6.7. Схема дозволяє забезпечити високі значення входного опору. Використовуємо операційний підсилювач типу К140УД8 з польовими транзисторами на вході, що дозволяє зменшити похибку, викликану різницею входних струмів.

Таблиця 6.3 - Електричні параметри мікросхеми К140УД8А

Параметри	$+U_{\text{вх. инв.}}$ В	$U_{\text{БЭ}}$ В	$K_{\text{оп}}$, 10^3	$U_{\text{ж}}$ В	f , МГц	$U_{\text{зв}}$, мВ	$R_{\text{вих}}$, Ом	$R_{\text{вх}}$, МОм	$I_{\text{ж}}$ мА	$I_{\text{вх}}$ нА
К140УД8А	12	0,6	50	15	1	± 50	200	10	5	0,2
	$\Delta U_{\text{зв}}$, мкВ/С°		$\Delta I_{\text{вх}}$ нА		$\pm U_{\text{вих}}$ В		$K_{\text{осс}}$ дБ	$R_{\text{н}}$ кОм	$U_{\text{Увих}}$ В/мкс	
	50		0,1		10		70	2	2	

При виконанні умови $R_1/R_2 = R_3/R_4$ підсилення диференціального сигналу набагато більше підсилення синфазного сигналу і коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу ($K_{\text{осс}}$) буде максимальним.

6.3.2 Визначаємо коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу $K_{\text{осс}}$ за формулою

$$K_{\text{осс}} = (U_{\text{сф. Пр}} / U_{\text{сф. max}}) \times (1/\delta), \quad (6.48)$$

$$K_{\text{осс}} = (1,2 / 3 \cdot 10^{-3}) \times (1/3 \cdot 10^{-2}) = 13332$$

6.3.3 Визначите коефіцієнт підсилення диференціального сигналу за Формулою (6.49)

$$K_{\text{диф.}} = K_{\text{осс}} \times K_{\text{синф.}}, \quad (6.49)$$

де $K_{\text{синф}}$ визначається з наступних міркувань: якщо резистори мають допуск:

- для резисторів, що мають допуск 5% - $K_{\text{синф}} = 0,1$;
- для резисторів тих, що мають допуск 1% - $K_{\text{синф}} = 0,02$;
- для резисторів тих, що мають допуск 0.5% - $K_{\text{синф}} = 0,01$.

Вибираємо $K_{\text{синф}} = 0,1$, тоді

$$K_{\text{диф.}} = 13332 \times 0,1 = 1333,2.$$

6.3.4 Визначаємо опір резисторів R_1 і R_3 .

Для як найкращого узгодження вихідного опору джерела сигналу з диференціальним підсилювачем приймаємо опір сигналу джерела рівним вхідному опору $R_1 = R_3 = R_c$.

З додатку А (таблиця 1) вибираємо $R_1 = R_3 = 1,0$ кОм.

6.3.5 Визначаємо опір резисторів зворотного зв'язку R_2 і R_4 .

З виразу для диференціального коефіцієнту підсилення $K_{\text{диф.}} = R_2/R_1$, визначаємо:

$$R_2 = K_{\text{диф.}} \times R_1,$$

$$R_2 = 1333,2 \times 1000 = 1,3332 \cdot 10^6 \text{ Ом}$$

З додатку А (таблиця 1) вибираємо $R_2 = R_4 = 1,3 \cdot 10^6$ Ом.

6.3.6 Визначаємо напругу на виході диференціального підсилювача

$$U_{\text{вих}} = K_{\text{диф.}} \times U_{\text{сф. max}},$$

$$U_{\text{вих}} = 1333,2 \times 3 \cdot 10^{-3} = 3,9996 \text{ В} \approx 4 \text{ В}$$

6.3.7 Визначаємо струм I_1 , що протікає через резистори R_1 , R_2 .

У наслідок нульових вхідних струмів операційного підсилювача $I_1 = I_2$.

Вихідна напруга диференціального підсилювача рівна

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{сф. max}} - I_1 \times R_2 ,$$

$$I_1 = (U_{\text{сф. max}} - U_{\text{вих}}) / R_2 ,$$

$$I_1 = (0.003 - 4) / 1,3 \cdot 10^6 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ А},$$

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ А}.$$

6.3.8 Визначаємо потужність резисторів R_1, R_2, R_3 і R_4

$$P_{R1, R3} = (3 \cdot 10^{-6})^2 \times 1 \cdot 10^3 = 9 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}$$

$$P_{R2, R4} = (3 \cdot 10^{-6})^2 \times 1,3 \cdot 10^6 = 11,7 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$$

Вибираємо резистори R_1, R_3 - C2-29В – 0,125 Вт – 1 кОм $\pm 0,1\%$,

Вибираємо резистори R_2, R_4 - C2-29В – 0,25 Вт – 1,3 МОм $\pm 0,1\%$,

6.3.8 Визначаємо похибку за рахунок можливого відхилення опорів резисторів R_1, R_2 .

$$\delta[\Delta R_1, \Delta R_2] = \sqrt{|\delta_3|^2 + |\delta_5|^2} ,$$

$$\delta[\Delta R_1, \Delta R_2] = \sqrt{|0,1|^2 + |0,1|^2} = 0,14 \text{ \%},$$

Для діапазону робочих температур від 0 до 40⁰ (20⁰C $\pm \Delta T$) додаткова похибка резисторів складає:

$$\delta_T = \text{ТКО} \times 20^{\circ}\text{C} ,$$

де ТКО – температурний коефіцієнт опору (ТКО = $75 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ при $T < 20^{\circ}\text{C}$;
ТКО = $25 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ при $T > 20^{\circ}\text{C}$) .

$$\delta_T = 75 \cdot 10^{-6} \times 20 = 0,0015 = 0,15\%$$

Результуюча похибка для резисторів складає:

$$\delta_{\Sigma R} = \sqrt{\delta_{[\Delta R_1, \Delta R_2]}^2 + \delta_T^2} ,$$

$$\delta_{\Sigma R} = \sqrt{0,14^2 + 0,15^2} = 0,21 \text{ \%}$$

6.4 Розрахунок вимірювального підсилювача (ВП) на операційному підсилювачі

Для розрахунку вимірювального підсилювача задаємося початковими даними:

- синфазний вхідної сигнал $U_{\text{сф.вп. макс.}} = 190 \cdot 10^{-3} \text{ В}$;
- диференціальний вхідної сигнал $U_{\text{вх.вп. диф.}} = 10 \text{ мВ}$;
- верхня межа діапазону зміни вихідного сигналу ВП $U_{\text{вих.вп. макс.}} = 1 \text{ В}$
- нижня межа діапазону зміни вихідного сигналу ВП $U_{\text{вих.вп. мін.}} = 0,1 \text{ В}$
- вхідний опір вимірника підсилювача $R_{\text{вх.вп.}} = 1 \cdot 10^6 \text{ Ом}$

Вибираємо схему вимірювального підсилювача, приведену на рис. 6.8. Данна схема дозволяє забезпечити високі значення вхідного опору і регулювання коефіцієнта посилення за допомогою одного змінного резистора (aR). Використовуємо операційний підсилювач типу К140УД8 з польовими транзисторами на вході, що дозволяє зменшити похибку, викликану різницею вхідним струмом.

Таблиця 6.4 - Електричні параметри мікросхеми К140УД8А

Параметри	$+U_{\text{вх. інв.}}$, В	$U_{\text{БЭ}}$, В	$K_{\text{оп}}$, 10^3	$U_{\text{ж}}$, В	f , МГц	$U_{\text{см}}$, мВ	$R_{\text{вих.}}$, Ом	$R_{\text{вх.}}$, МОм	$I_{\text{ж.}}$, мА	$I_{\text{вх.}}$, нА
К140УД8А	12	0,6	50	15	1	± 50	200	10	5	0,2
	$\Delta U_{\text{см}}$, мкВ/С°		$\Delta I_{\text{вх.вх}}$, нА		$\pm U_{\text{вих}}$, В		$K_{\text{ос.сф}}$, дБ	$R_{\text{н}}$, кОм	$\Delta U_{\text{вих}}$, В/мкс	
	50		0,1		10		70	2	2	

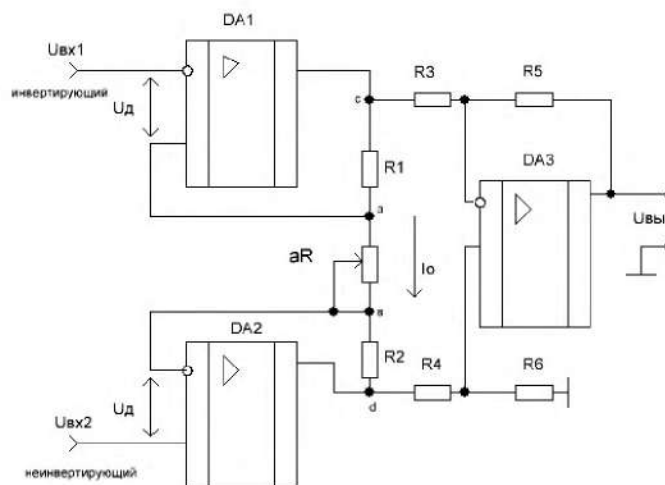


Рисунок 6.8 - Принципова схема вимірювального підсилювач

6.4.1 Вибір резисторів схеми.

Номінальні значення параметрів резисторів вибираємо так, щоб вхідні струми операційних підсилювачів були малими. Зазвичай значення опорів вхідних резисторів схеми (R_3, R_4) беруть високими в межах десятків кОм. ($R_3 = R_4 = 10 \text{ кОм}$), щоб не навантажувати входи операційного підсилювача. Значення опорів зворотного зв'язку $R_5 = R_6$ як правило вище ($R_5 = R_6 = 50 \text{ кОм}$). Для забезпечення високого значення $K_{\text{ос}}$ опори резисторів R_1 , R_2 і aR , а також резисторів R_3 і R_5 з

вибирають рівними з точністю $\delta = 0,1\%$ (з ряду E192 номіналів опорів резисторів).

6.4.2 Визначаємо коефіцієнт диференціального підсилення

$$\begin{aligned} K_{п. Діф.} &= R_5/R_3, \\ K_{п. Діф} &= 50/10 = 5. \end{aligned}$$

6.4.3 Визначаємо межі зміни коефіцієнта підсилення схеми вимірювального підсилювача

$$K_{u \text{ вп. макс.}} = U_{\text{вих вп. макс.}} / U_{\text{вх вп. диф}},$$

$$K_{u \text{ вп. макс.}} = 1 / 10 \cdot 10^{-3} = 100,$$

$$K_{u \text{ вп. мін.}} = U_{\text{вих вп. мін.}} / U_{\text{вх вп. диф}},$$

$$K_{u \text{ вп. мін.}} = 0,1 / 10 \cdot 10^{-3} = 10$$

6.4.4 Визначаємо похибку ΔK по заданій точності

$$\Delta K_{п. Диф} = (\delta \times K_{п. Диф}) / 100,$$

$$\Delta K_{п. Диф} = (5 \times 5) / 100 = 0,25$$

6.4.5 Визначаємо межі зміни коефіцієнта $K_{п.}$ (від $K_{u \text{ вп. мін.}}$ до $K_{u \text{ вп. макс.}}$) змінного резистора aR , виходячи з необхідної глибини регулювання коефіцієнта посилення схеми вимірника підсилювача від $K_{u \text{ вп. макс}}$ до $K_{u \text{ вп. мін.}}$

$$K_{п. мін} = (2 \times K_{п. Диф}) / (K_{u \text{ вп. макс.}} - K_{п. Диф}), \quad (6.51)$$

$$K_{п. мін} = (2 \times 5) / (100 - 5) = 0,26,$$

$$K_{п. макс} = (2 \times K_{п. Диф}) / (K_{u \text{ вп. мін.}} - K_{п. Диф}), \quad (6.52)$$

$$K_{п. макс} = (2 \times 5) / (10 - 5) = 5$$

6.4.6 Визначаємо межі зміни опору змінного резистора aR . З довідника беремо навантаження мікросхеми К140УД8А $R_H = 2 \text{ кОм}$, тоді:

$$K_{п. мін} \times R_H \leq aR \leq K_{п. макс} \times R_H, \quad (6.53)$$

$$0,26 \times 2 \cdot 10^3 \leq aR \leq 5 \times 2 \cdot 10^3,$$

$$520 \text{ Ом} \leq aR \leq 10 \text{ кОм}$$

6.4.7 Визначаємо струм I_0 , що протікає через резистор aR

$$I_0 = (U_{вх2} - U_{вх1}) / aR ,$$

$$I_0 = 2 \times U_{сф. max} / aR,$$

$$I_0 = 380 \cdot 10^{-3} / 10 \cdot 10^3 = 38 \cdot 10^{-6} \text{ А}$$

струм $I_0 \gg I_{вх.оп}$; $38 \cdot 10^{-6} \text{ А} \gg 0,2 \cdot 10^{-9} \text{ А}$.

6.4.8 Визначаємо потужність резисторів R_1, R_2 і aR

$$P_{R1, R2} = (I_0)^2 \times R_1,$$

$$P_{R1, R2} = (38 \cdot 10^{-6})^2 \times 10 \cdot 10^3 = 0,1444 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}$$

Вибираємо резистори R_1, R_2 - С2-29В – 0,125 Вт – 10кОм $\pm 0,1\%$,
змінний резистор aR - Сп5-21а – 0,5Вт – 10 кОм $\pm 5\%$.

6.4.9 Визначаємо напругу на вході диференціального підсилювача

$$U_{вх.диф.} = U_{вих макс.} / K_{п.Диф}$$

$$U_{вх.диф} = 1/5 = 0,2 \text{ В}$$

6.4.10 Визначаємо струм $I_3 = I_4$ що протікає через резистори R_3, R_4 .

$$I_3 = I_4 = (U_{вих макс} - U_{вх.диф}) / (R_3 + R_4),$$

$$I_3 = I_4 = (1 - 0,2) / (10 \cdot 10^3 + 50 \cdot 10^3) = 13 \cdot 10^{-6} \text{ А}$$

6.4.11 Визначаємо потужність резисторів R_3, R_4, R_5 і R_6

$$P_{R3, R4, R5 \text{ и } R6} = (I_0)^2 \times R_{3,5},$$

$$P_{R3, R5} = (13 \cdot 10^{-6})^2 \times 10 \cdot 10^3 = 0,0169 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}$$

$$P_{R3, R5} = (13 \cdot 10^{-6})^2 \times 50 \cdot 10^3 = 0,0845 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}$$

Вибираємо резистори R_3, R_5 - С2-29В – 0,125 Вт – 10кОм $\pm 0,1\%$

Вибираємо резистори R_4, R_6 - С2-29В – 0,125 Вт – 50кОм $\pm 0,1\%$

6.4.12 Визначите погрішність за рахунок можливого відхилення від вибраної величини опорів. Оскільки технологічний розкид резисторів від номінальних значень може бути різними за знаком, в розрахунок на гірший випадок похібки повинні по модулю підсумовуватися.

$$\delta[\Delta R_3, \Delta R_5] = \sqrt{|\delta_3|^2 + |\delta_5|^2} , \quad (6.54)$$

$$\delta[\Delta R_3, \Delta R_5] = \sqrt{|0,1|^2 + |0,1|^2} = 0,14 \%,$$

Для діапазону робочих температур від 0 до 40⁰ (20⁰С ±ΔТ) додаткова похибка резисторів складає

$$\delta_T = \text{ТКО} \times 20^0\text{С} ,$$

де ТКО – температурний коефіцієнт опору
ТКО = 75·10⁻⁶К⁻¹ при Т < 20⁰С ; ТКО = 25·10⁻⁶К⁻¹ при Т > 20⁰С .

$$\delta_T = 75 \cdot 10^{-6} \times 20 = 0,0015 \times 100 = 0,15\%$$

Результуюча похибка для резисторів складає

$$\delta_{\Sigma R} = \sqrt{\delta_{[\Delta R_1, \dots, \Delta R_7]}^2 + \delta_T^2} ,$$

$$\delta_{\Sigma R} = \sqrt{0,14^2 + 0,15^2} = 0,21 \%$$

6.4.13 Визначаємо нижню межу вхідного опору вимірювального підсилювача

$$R_{\text{вх. вп. мін}} = R_{\text{вх. оп.}} \cdot [K_{\text{У вп. мін}} / (1 + 2/K_{\text{У вп. мін}})] ,$$

$$R_{\text{вх. мін}} = 10 \cdot 10^6 [10 / (1 + 2/10)] = 83 \cdot 10^6 \text{ Ом}$$

6.4.14 Визначаємо нижню межу КОСС вимірювального підсилювача (при K_{у вп. макс.}) за формулою 6.55

$$K_{\text{ОСС вп. ниж.}} = (1 + 2/K_{\text{У вп. макс.}}) \times (1 + K_{\text{п. Диф}}) (K_{\text{п. Диф}} / \Delta K_{\text{п. Диф}}) , \quad (6.55)$$

$$K_{\text{ОСС вп. ниж.}} = (1 + 2/100) \times (1 + 5) (5 / 0,25) = 122,4 (41 \text{ Дб})$$

6.4.15 Визначаємо коефіцієнт підсилення синфазного сигналу операційного підсилювача, при K_{ОСС оп} = 70 дБ (3162)

$$K_{\text{сф1. вп.}} = 1 / K_{\text{ОСС оп}}$$

$$K_{\text{сф1. вп.}} = 1 / 3162 = 0,000316.$$

6.4.16 Визначаємо максимальний коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу вимірювального підсилювача

$$K_{\text{косс. вп.}} = K_{\text{п. Диф}} / K_{\text{сф1}}$$

$$K_{\text{косс.вп.}} = 5/0,000316 = 15823 \text{ (84дБ)}$$

6.4.17 Визначаємо найбільший рівень синфазної перешкоди на виході вимірювального підсилювача 6.56

$$U_{\text{вих.вп.сн.макс.}} = U_{\text{сф.макс}} (K_{\text{ц.вп.макс.}}/K_{\text{косс.вп.ниж}}) \quad (6.56)$$

$$U_{\text{вих.вп.сн.макс.}} = 190 \cdot 10^{-3} (100/122,4) = 155 \cdot 10^{-3} \text{ В}$$

6.4.18 Визначаємо відносну похибку вимірювання синфазної перешкоди

$$\delta_{\text{синф.}} = (U_{\text{вих.сн.макс}} / U_{\text{вих.}}) 100,$$

$$\delta_{\text{синф.}} = (0,155 \cdot 10^{-3} / 1) 100 = 0,015 \%$$

Сумарна похибка вимірювального підсилювача

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_{\text{синф.}}^2 + \delta_{\Sigma R}^2},$$

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{0,000225 + 0,0441} = 0,211 \%$$

6.5 Розрахунок генератора стабільного струму на транзисторі

Для розрахунку генератора стабільного струму (рисунок 6.9) задаємо початкові данні :

- номінальне значення струму $I_{\text{ж.ст.}} = 20 \text{ мА}$;
- номінальна напруга живлення $U_{\text{ж.}} = 15 \text{ В}$;
- опір навантаження $R_{\text{н.}} = 3 \text{ кОм}$.

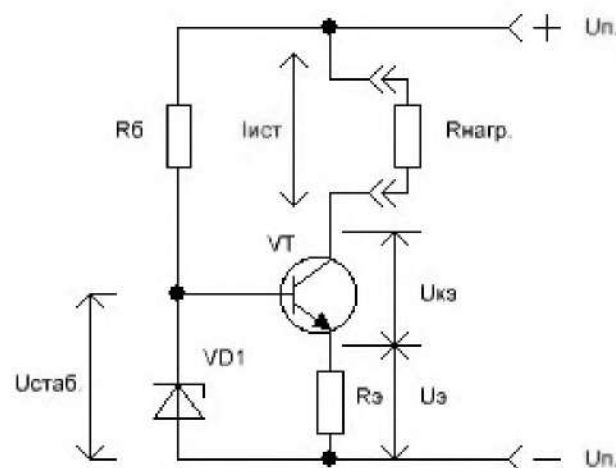


Рисунок 6.9 - Принципова схема генератора стабільного струму на біполярному транзисторі

6.5.1 Визначаємо напругу на навантаженні

$$U_H = I_{ж.} \times R_H ;$$

$$U_H = 0,02 \times 3000 = 60 \text{ В.}$$

Розрахуємо напругу $U_{\text{стаб.}}$.

Задана напруга $U_{ж}$ менше необхідної U_H . Отже, не можна забезпечити необхідний струм в навантаженні, при даному опорі навантаження. Для забезпечення необхідного струму навантаження потрібно вибрати стабілітрон VD1. Параметри транзистора VT, вибираємо заздалегідь, вважаємо що напруга $U_{\text{бе}}$ транзисторів менше ніж 1 В. Вибираємо $U_{\text{бе}} = 0,65$.

$$U_{\text{стаб}} = U_{\text{бе}} \times 6,$$

$$U_{\text{стаб}} = 0,65 \times 6 = 3,9 \text{ В.},$$

6.5.2 Визначаємо потужність розсіювання на транзисторі VT

$$P_{\text{к макс}} = [U_{ж} - (U_{\text{ст.}} - U_{\text{бе}})] \times I_{\text{ж.ст.}},$$

$$P_{\text{к макс}} = [15 - (3,9 - 0,6)] \times 0,02 = 0,234 \text{ Вт.}$$

З довідника вибираємо стабілітрон типу КС139А. Дані стабілітрона приведені в таблиці 6. 5., та транзистор з умови $P_{\text{к макс}} < P_{\text{VT}}$, $I_{\text{ж.ст}} < I_{\text{VT}}$ типу КТ3102А, дані приведені в таблиці 6.6.

Таблиця 6.5 – Параметри стабілітрона типу КС139А

Тип приладу	$U_{\text{ст ном.}}$, В ($I_{\text{ст ном.}}$, МА)	$P_{\text{макс}}$, мВт	Значення параметрів при $T=25^{\circ}\text{C}$, $I_{\text{пр.ном}}$				
			$U_{\text{ст мін.}}$, В	$U_{\text{ст макс.}}$, В	$r_{\text{ст}}$, Ом	$r_{\text{ст}}$, Ом при $I_{\text{ст мін}}$	$a_{\text{ст}} \cdot 10^{-2}$ %/К
КС139А	3,9 (10)	300	3,51	4,29	60	180	-10

Таблиця 6.6 – Параметри транзистора типу КТ3102А

Тип приладу	$I_{\text{к макс}}$, МА	$P_{\text{макс}}$, мВт	Значення параметрів при $T=25^{\circ}\text{C}$, $I_{\text{пр.ном}}$				
			$U_{\text{ке,макс}}$, В	$U_{\text{еб макс}}$, В	$h_{21э}$	$I_{\text{зз.к}}$, мкА	$I_{\text{зз.э}}$, мкА
КТ3102А	100	250	50	5	100	0,003	10

6.5.3 Визначаємо необхідний запас за напругою

$$U_{\text{зап.}} = (U_{\text{стаб.}} - U_{\text{бе}}) + U_{\text{ке}},$$

$$U_{\text{зап.}} = (3,9 - 0,6) + 3 = 6,3 \text{ В.}$$

6.5.4 Визначаємо максимальне можливу напругу на навантаженні

$$U_{\text{н}} = U_{\text{ж}} - U_{\text{зап.}},$$

$$U_{\text{н}} = 15 - 6,3 = 8,7 \text{ В}$$

6.5.5 Визначаємо значення струму $I_{\text{ж.ст}}$

$$I_{\text{ж.ст}} = U_{\text{н}} / R_{\text{н}}$$

$$I_{\text{ж.ст}} = 8,7 / 3000 = 2,9 \text{ мА.}$$

Дана схема може забезпечити стабільність струму тільки за умови, що через навантаження протікатиме струм $I_{\text{ж.ст}} = 2,9 \text{ мА.}$, для того, щоб збільшити струм потрібно зменшити опір навантаження $R_{\text{н}}$ або збільшити напругу живлення $U_{\text{ж}}$.

6.5.6 Визначаємо опір резистора $R_{\text{б}}$ при значенні струму $I_{\text{ж.ст}} = 3 \text{ мА}$

$$R_{\text{б}} = (U_{\text{ж}} - U_{\text{ст}}) / I_{\text{ст.ном.}},$$

$$R_{\text{б}} = (15 - 3,9) / 0,01 = 1110 \text{ Ом}$$

де $I_{\text{ст.ном}} = 10 \text{ мА}$ номінальне значення струму стабілітрона VD .

Вибираємо найменший стандартний опір $R_{\text{б}} = 1,1 \text{ кОм}$

6.5.7 Визначаємо потужність розсіювання на резисторі $R_{\text{б}}$

$$P_{R_{\text{б}}} = (I_{\text{ст.ном}})^2 \times R_{\text{б}},$$

$$P_{R_{\text{б}}} = (0,01)^2 \times 1100 = 0,11 \text{ Вт}$$

Вибираємо резистор $R_{\text{б}}$ типу C2-33 – 0,125 -1,1 кОм $\pm 5\%$.

6.5.8 Визначаємо опір резистора $R_{\text{е}}$

$$R_{\text{е}} = (U_{\text{стаб.}} - U_{\text{еб.}}) / I_{\text{ж.ст}} .$$

$$R_{\text{е}} = (3,6 - 0,6) / 0,003 = 1000 \text{ Ом}$$

Вибираємо найменший стандартний опір $R_{\text{е}} = 1 \text{ кОм}$

6.5.9 Визначаємо потужність розсіювання на резисторі $R_{\text{е}}$

$$P_{R_{\text{е}}} = (I_{\text{ж.ст}})^2 \times R_{\text{е}},$$

$$P_{R_{\text{е}}} = (0,003)^2 \times 1000 = 0,009 \text{ Вт}$$

Вибираємо резистор R_e типу С2-33 – 0,125 -1 кОм $\pm 5\%$.

6.5.10 Якщо параметри схеми повинні бути постійними, то треба збільшувати напругу живлення, яка повинна мати наступне значення [2,3,11].

$$U_{ж. \cdot \text{Мін}} = U_{\text{нагр.макс.}} + U_{\text{э}} + U_{\text{ке}},$$

$$U_{ж. \cdot \text{Мін}} = 9 + 5 + 50 = 64 \text{ В.}$$

Схема повинна мати наступний вигляд (рисунок 7.10):

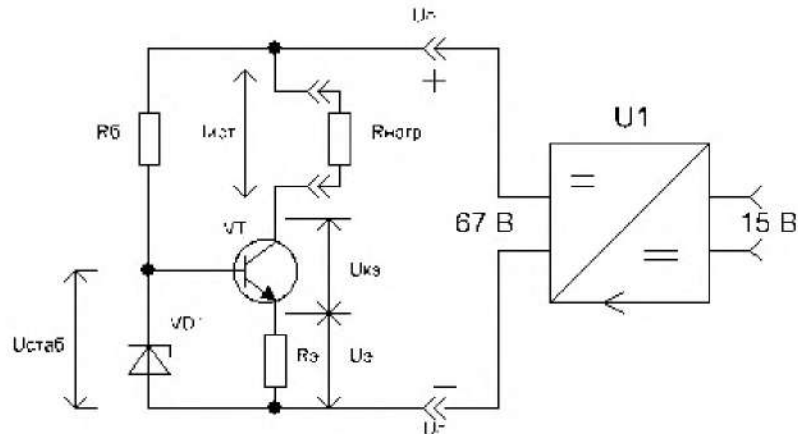


Рисунок 6.10 – Принципова схема генератора стабільного струму з перетворювачем напруги

6.6 Електричний розрахунок перетворювачів

6.6.1 Розрахунок перетворювача струм - напруга

Вхідні дані для розрахунку перетворювача струм - напруга :

- вхідний струм перетворювача $I_{\text{вх}} = 1 \text{ мкА}$;
- напруга на виході перетворювача $U_{\text{вих}} = 1 \text{ В}$;

Розрахунок перетворювача струм - напруга виконується по схемі приведеною на рисунку 6.11.

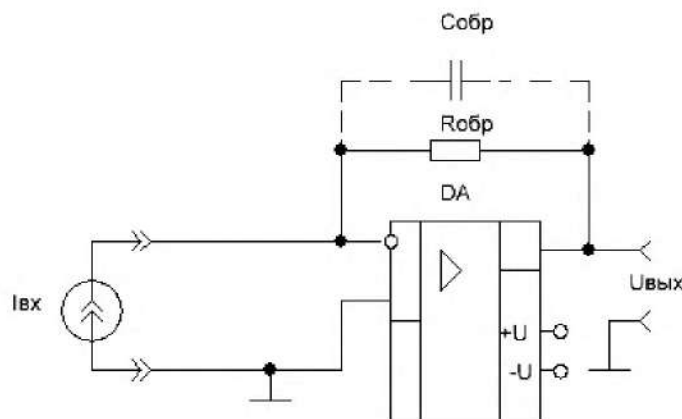


Рисунок 6.11- Принципова схема перетворювача струм – напруга з віртуальною землею

Вибір інтегральної мікросхеми DA.

Основна умова вибору мікросхеми, це великий вхідний опір інтегральної мікросхеми. Це можливо якщо використовувати на вході операційного підсилювача польові транзистори.

По додатку А вибираємо мікросхему типу К574УД2. Мікросхема виготовлена по суміщеній біполярно-польовій технології (BIFET). Мікросхеми К574УД2Б є здвоєним операційним підсилювачем середньої точності з великим вхідним опором. Застосовуються для створення вхідних підсилювачів датчиків різних фізичних величин. Немають внутрішньої частотної корекції. Параметри мікросхеми приведені в таблиці 6.7

Таблиця 6.7 - Електричні параметри мікросхеми К574УД2

Параметри	$U_{\text{вих.}}$ В	$I_{\text{вих.}}$ А	$K_{\text{оп.}}$ 10^3	$U_{\text{ж}}$ В	f , МГц	$U_{\text{зв.}}$ мВ	$R_{\text{вих.}}$ Ом	$R_{\text{вх.}}$ МОм	$I_{\text{ж.}}$ мА	$\Delta I_{\text{вх}}$ нА
К574УД2	10	0,01	25	15	2	\pm 50	1000	10^4	10	0,5

Визначаємо опір зворотнього зв'язку R_{33} .

$$R_{33} = U_{\text{вих}} / I_{\text{вх}},$$

$$R_{33} = 1 / 1 \cdot 10^{-6} = 1 \cdot 10^6 \text{ Ом.}$$

Визначаємо потужність розсіювання резистора R_{33}

$$P_{R_{33}} = (I_{\text{вх}})^2 \times R_{33},$$

$$P_{R_{33}} = (1 \cdot 10^{-6})^2 \times 1 \cdot 10^6 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$$

Вибіраємо прецизійні резистори з малим дрейфом, інакше можуть виникнути великі похибки коефіцієнта підсилення і велика нелінійність характеристики. Краще всього використовувати високостабільні резистори на основі металевих або металлоокисних плівок.

$$C5-57 - 0,05 \text{ Вт} - 1\text{МОм} - \pm 0,01\%.$$

Визначаємо вхідний опір перетворювача

$$R_{\text{вх}} = R_{33} / (1 + K_{\text{оп}}),$$

$$R_{\text{вх}} = 1 \cdot 10^6 / (1 + 25 \cdot 10^3) = 40 \text{ Ом.}$$

Визначаємо вихідну напругу зсуву

$$U_{\text{зс.вих.}} = U_{\text{зв.}} + R_{33} \cdot \Delta I_{\text{вх.}}$$

$$U_{\text{зс.вих.}} = 50 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^6 \times 0,5 \cdot 10^{-9} = 50,5 \cdot 10^{-3} \text{ В}$$

Для обмеження високочастотних шумів додаткового резистора і запобігання самозбудженню ОП можна паралельно йому включити шунтуючий конденсатор (10 нФ - 100 нФ).

Вибираємо $C_{\text{зз.}} = 10 \text{ нФ}$.

$K10 - 9 - 10\ 000 \text{ пФ} \pm 20\%$.

Практичне застосування перетворювача струм – напруга в режимі включення фотодіода (рисунок 6.12) [1,3,8,20].

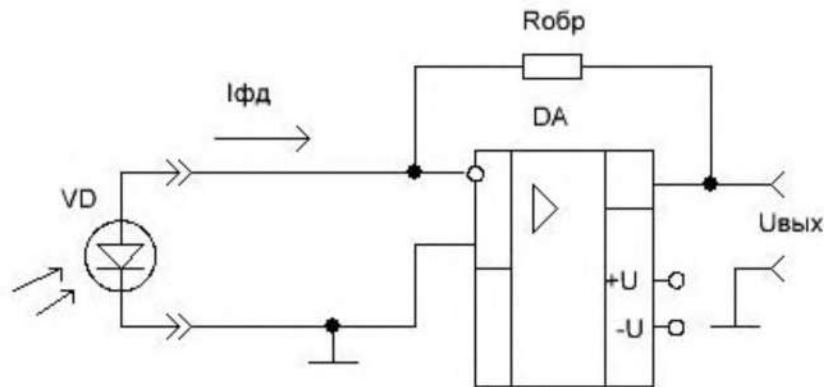


Рисунок 6.12 – Режим включення фотогальванический (близкий к режиму КЗ) фотодіода з перетворювачем струм - напруга

6.6.2 Розрахунок перетворювача заряд - напруга

Розрахунок перетворювача заряд - напруга виконується по схемі приведеної на рисунку 6.13.

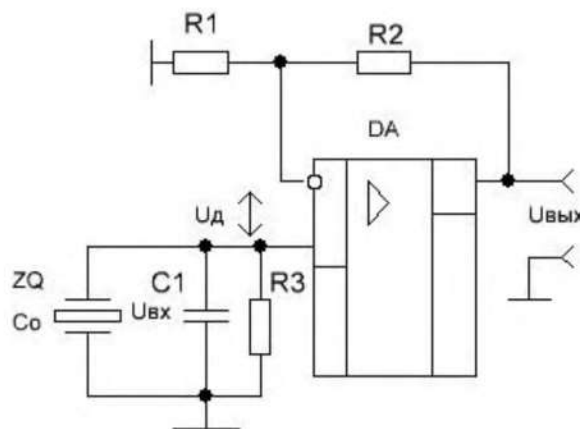


Рисунок 6.13 - Принципова схема перетворювача заряд - напруга

Датчик заряду повинен підключатися в схемі до навантаження з дуже великим опором навантаження. В цьому випадку виконуються умови

$$R_H \rightarrow \infty, U = Q / C_{\Sigma},$$

де $C_{\Sigma} = C_H + C_0$,

Умова $R_H \rightarrow \infty$ повинна виконуватися за допомогою операційних з високим вхідним опором і з малими вхідними струмами (спеціальні підсилювачі електрометрій). Вибираємо операційний підсилювач типу LF-355. Параметри мікросхеми типу LF-355 приведені в таблиці 6.8

Таблиця 6.8 - Електричні параметри мікросхеми LF-355

Параметри	$U_{\text{вих.}}$ В	$I_{\text{вих.}}$ А	$K_{\text{оп.}}$ 10^3	$U_{\text{ж}}$ В	f , МГц	$U_{\text{зв.}}$ мВ	$R_{\text{вих.}}$ Ом	$R_{\text{вх.}}$ МОм	$I_{\text{ж}}$ мА	$\Delta I_{\text{вх}}$ нА
LF-355	11	0,01	25	± 15	2,5	± 10	1000	10^{12}	4	2

Вхідна ємність $C_d = 3\text{пФ}$.

Розрахунок параметрів датчика заряду.

З таблиці 6.9 вибираємо матеріал для датчика - кварц.

У простому випадку пьезоелемент можна розглядати як плоский конденсатор ємністю

$$C_d = \varepsilon \cdot S / h,$$

де: S – площа пластин,

h – відстань між ними

Таблиця 6.9 - Параметри п'єзоматеріалів

Матеріал	Діелектрична проникність, ε 10^{-9} Ф/м	Пьезомодуль $d \cdot 10^{-12}$ Кл /Н	Сила, що приложена F, Н	Коефіцієнт електромеханичного зв'язку, k %
Кварц	5	2	10	10
Титанат барію (Ватіоз)	1700	78	11	21
Цирконат титанат свинцю (ЦТС)	1200	110	8	30
Сульфат літію	10	16	12	0,38
Полівінілідин фториду (PVDF)	12	2	30	11

Для вибраних розмірів: $S = 100 \text{ мм}^2$, $h = 10 \text{ мм}$., визначаємо ємність:

$$C_d = 5 \cdot 10^{-12} \cdot 100 / 10 = 50 \text{ пФ}$$

Визначаємо заряд конденсатору:

$$Q = d \cdot F$$

$$Q = 2 \cdot 10^{-12} \times 10 = 20 \text{ пКл.}$$

Напруга на виході п'єзoeлементa

$$U_{\text{вих}} = Q / C_{\text{д}}$$

$$U_{\text{вих}} = 20 \cdot 10^{-12} / 50 \cdot 10^{-12} = 400 \text{ мВ}$$

Коефіцієнт пропорційності

$$K = U_{\text{вих}} / Q ,$$

$$K = 400 / 20 = 20 \text{ мВ/ пКл.},$$

Запасена енергія в датчику заряду

$$W = (C_{\text{д}} \times U_{\text{вих}}^2) / 2 ,$$

$$W = (50 \cdot 10^{-12} \times (400 \cdot 10^{-3})^2) / 2 = 4 \cdot 10^{-12} \text{ Дж.}$$

Потужність холостого ходу

$$P_{\text{хх}} = U_{\text{вих}}^2 / R_{\text{д}} ,$$

$$P_{\text{хх}} = (40 \cdot 10^{-2})^2 / 10^{11} = 16 \cdot 10^{-13} \text{ Вт.}$$

П'єзoeлектричний датчик є надзвичайно малопотужним пристроєм, отже потрібно встановити операційний підсилювач. Розрахунок неінвертуючого підсилювача зібраного на мікросхемі DA і на резисторах R_1 , R_2 , R_3 виконується по методиці, яка викладена в п. 6.2.

У даній схемі параметри перетворювача залежать від параметрів сполучній лінії, тому дану схему на рисунку 6.13. рекомендується застосовувати коли сполучна лінія має малу довжину.

Підсилювач на інтеграторі струму (рисунок 6.14).

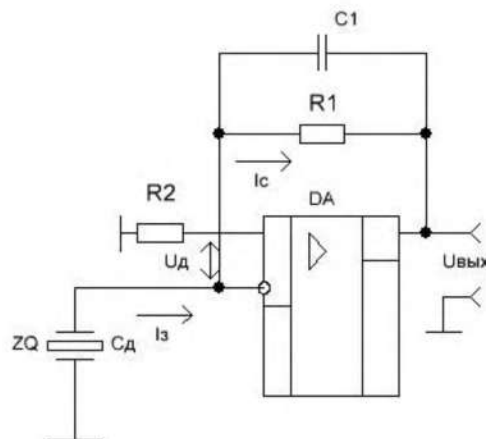


Рисунок 6.14 – Принципова схема перетворювача заряд - напруга

Розрахунок проводимо по п. 6.6.2

Визначаємо вихідну напругу

$$U_{\text{вих}} = -1/C_1 \int I_c \cdot dt = Q / C_1,$$

$$U_{\text{вих}} = 20 \cdot 10^{-12} / 51 \cdot 10^{-9} = 400 \text{ мВ}$$

Вибираємо ємність C_1 в межах 51 -1000 пФ

$$K10-17 - 51 \text{ пФ} \pm 5\%.$$

Визначаємо опір резистора R_1

$$\tau = R_1 \times C_1,$$

$$R_1 = \tau / C_1,$$

де τ – постійна кола зворотного зв'язку ($\tau=10\text{мс}$)

$$R_1 = 10 \cdot 10^{-3} / 51 \cdot 10^{-12} = 0,2 \cdot 10^9 \text{ Ом} = 200 \text{ МОм}$$

Визначаємо струм I_1 , що протікає через резистор R_1

$$U_{\text{вих}} = I_1 \times R_1,$$

$$I_1 = U_{\text{вих}} / R_1,$$

$$I_1 = 0,4 / 200 \cdot 10^6 = 2 \cdot 10^{-9} \text{ А} = 2 \text{ нА}.$$

Визначаємо потужність розсіювання на резисторі R_1

$$P_{R_1} = (2 \cdot 10^{-9})^2 \cdot 0,2 \cdot 10^9 = 0,4 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}.$$

Вибираємо резистор типу:

$$C3-14 -0,01 \text{ Вт} - 100 \text{ МОм} \pm 10\%.$$

6.6.3 Розрахунок перетворювача опір - напруга с тензодатчиком

Розрахунок перетворювача «опір - напруга» виконується по схемі, що приведена на рисунку 6.15.

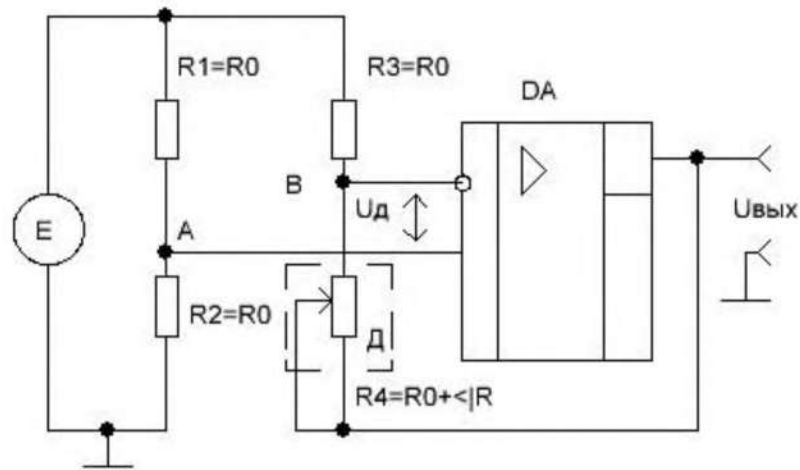


Рисунок 6.15 – Принципова схема мостового перетворювача з автобалансуванням

При розрахунку мостової схеми повинні виконуватися наступні умови:

- опір джерела постійної напруги E зневажливо мало ($R_i = 0$);
- опір в діагоналі моста А - В набагато більше опорів решти резисторів

моста $R_1..R_4$, тобто можна прийняти $R_{A-B} = R_{д. оп.} > \infty$.

За цих умов обидві сторони моста $R_1 = R_2$ і $R_3 = R_4$ є ненавантаженими ділянками напруги загального джерела живлення.

Вибираємо операційний підсилювач типу К574УД2.

Таблиця 6.10 - Електричні параметри мікросхеми К574УД2

Параметри	$U_{вих.}$, В	$I_{вих.}$, мА	$K_{оп.}$, 10^3	$U_{ж}$ В	f , МГц	U_c , мВ	$R_{вих.}$, кОм	$R_{вх.}$, МОм	$I_{ж.}$, мА	$\Delta I_{вх}$ нА
К574УД2	10	10	25	2×15	2	± 50	10	10^3	10	0,5

В якості датчика використаємо тензорезистор. Дані тензорезисторів приведені в таблиці 6.11

Таблиця 6.11 – Характеристики дротяних, фольгових і напівпровідникових тензорезисторів

Характеристики	Тензорезистори		
	металеві		Напівпровідникові
	Дротяні	Фольгові	
Номінальний опір, Ом	120, 600	120, 300, 350, 600	120, 600
Розкид опору в упаковці %	0,25—0,5	0,2	0,5
Активна вимірювана довжина, мм	3—6 або до 150	0,6—6 або до 30	1—5
Чутливість	2,1	2,1	100—160
Розкид чутливості %	0,5	1	2

Діапазон вимірюваних частот f_m , кГц	0—100	0—100	
Допустимий струм, мА	10-40	20—40	10—20
Найбільша напруга живлення моста, В	2-60	2—20	1—2
Максимальне розтягування 10^{-2} м/м	0,5—5	5—3	0,3—0,5
Лінійна ділянка розтягування, мкм/м, при погрішності %: $\pm 0,1 \pm 1$	4000 10 000	4000 10 000	1000
Діапазон температур з компенсацією температурному погрішності $^{\circ}\text{C}$	—10-+150	—10- +130	
Температурний коефіцієнт α_k Термокомпенсації (мкм/м) / К	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	

З таблиці 6.11 вибираємо дротяний тензорезистор з номінальним опором $R_T = 120 \text{ Ом}$, чутливість $S = 2,1$, допустимий струм $I = 30 \text{ мА}$., розкид опорів $\Delta R / R = 10^{-3}$.

Визначаємо напругу живлення мостового перетворювача E

$$E = 2 \times R_T \times I,$$

$$E = 2 \times 120 \times 30 \cdot 10^{-3} = 7,2 \text{ В.}$$

Напруга $E = 7,2 \text{ В}$, напруга живлення тензорезистора $U_{\text{п.тенз.}} = (2 \dots 60) \text{ В}$.

Визначаємо опори резисторів $R_1 \dots R_4$.

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0 = 120 \text{ Ом.}$$

Визначаємо напругу на виході A і B мостового перетворювача

$$U_{a-b} = (R_2 \times \Delta R) / (R_1 + R_2)^2 \times E,$$

$$U_{a-b} = (120 \times 0,12) / (120 + 120)^2 \times 7,2 = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ В}$$

При однакових опорах моста $R_1 = R_2 = R_0$ вихідна напруга при датчику в одному плечі моста рівна:

$$U_{a-b} / E = (1/4) \cdot \Delta R / R ,$$

$$1,8 \cdot 10^{-3} / 7,2 = (1/4) \cdot 0,12 / 120,$$

$$0,25 \cdot 10^{-3} = 0,25 \cdot 10^{-3}.$$

Визначаємо подовження ε тензодатчика

$$U_{a-b} / E = \varepsilon / 2 ,$$

$$\varepsilon = (U_{a-b} / E) \times 2,$$

$$\varepsilon = (1,8 \cdot 10^{-3} / 7,2) \times 2 = 0,5 \text{ мм./м}$$

Визначаємо вихідну напругу на виході операційного підсилювача

$$U_{\text{вих}} = U_{\text{н}} = E/2 \cdot (1 \pm R)$$

$$U_{\text{вих макс}} = U_{\text{н}} = 7.2/2 \cdot (1 + 0,12) = 4,05 \text{ В}$$

$$U_{\text{вих мин}} = U_{\text{н}} = 7.2/2 \cdot (1 - 0,12) = 3,17 \text{ В}$$

Визначаємо потужність розсіювання на резисторах $R_1, R_2, R_3 = R_0$ і на тензорезисторі R_4

$$P_{R_0} = (I)^2 \times R_0,$$

$$P_{R_0} = (30 \cdot 10^{-3})^2 \times 120 = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}$$

Вибираємо резистори $R_1 = R_2 = R_3 = R_0$:

$$C5-53B - 0,125 \text{ Вт} - 120 \text{ Ом} \pm 0,1\%$$

6.6.4 Розрахунок перетворювача опір - напруга с терморезистором.

Розрахунок перетворювача опір - напруга с терморезистором виконуємо за схемою (рисунок 6.16).

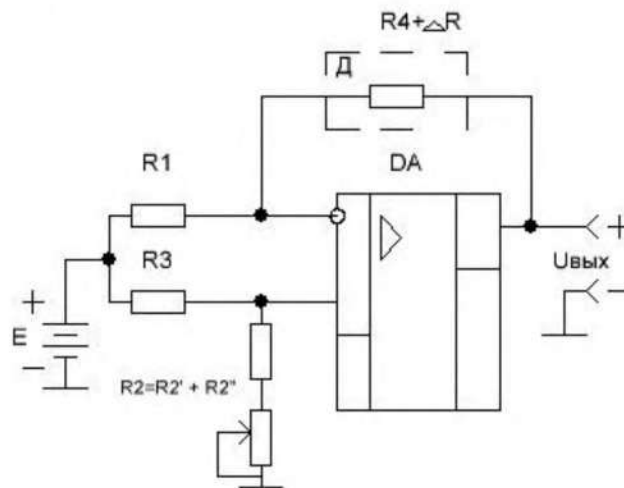


Рисунок 6.16 – Принципова схема термопреобразователя

Промисловість випускає терморезистори типів Ст1-21, СТЗ-21, Ст1-27, СТЗ-27, СТЗ-31 і ін., причому терморезистори з непрямим підігрівом типу Ст1-31 призначені для використання як безконтактні керовані опори в колах постійного і змінного струмів. Залежність їх опору від струму підігрівача приведена в таблиці 6.12

Таблиця 6.12 - Терморезистори з негативним ТКС непрямим підігрівом

Тип	Номинальна опір, кОм при 20°C	ТКС при 20°C, %/°C	Діапазон робочих температур, °C	Номинальна потужність, мВт	Постоянная времени, τ, с
СТ1-21	6,8...150	3,25...5,75	-60.....85	60	15...40
СТ3-21	0,68...1,5	2,9...4,6	-60.....85	60	15...40
СТ1-27	33	4,3...5,25	-60.....85	70	4...6
СТ3-27	2,2	3...4.45	-60.....85	70	4...6
СТ3-31	0,68	3,15...3,85	-60.....85	90	4...6

Приклад розрахунку терморезистора .

Датчик - терморезистор Pt1000. Залежність опору датчика від температури (таблиця 6.13)

Таблиця 6.13 – Залежність опору резистивного датчика від температури

°C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
R, Ом	1000	1039	1077	1116	1155	1194	1232	1270	1309	1347	1385

Датчик Pt1000 в схемі (рисунок 6.16) при температурі 40°C $R_4 = 1155$ Ом.

Резистори $R_1 = R_3 = 10$ кОм.

При $U_{\text{вих}} = 0$ опір резистора $R_2 = R_4$.

$$R_2 = 1155 \text{ Ом}$$

Напруга живлення E повинна бути від 5 до 15 В. $E = 15$ В.

Якщо міст перетворювача відкалібрований, тоді вихідна напруга $U_{\text{вих}}$

$$U_{\text{вих}} = E \left[\frac{\Delta R}{R_1 + R_4} \right],$$

де: для $t^0 = 50^\circ\text{C}$ $\Delta R = 1194 - 1155 = 39$ Ом

$$U_{\text{вих}} = 15 \left[\frac{39}{(10000 + 1155)} \right] = 0,052 \text{ В}$$

Визначаємо значення струму що протікає через резистори R_1 і R_4 .

$$I_{R1} = I_{R4} = \frac{-E - U_{\text{вих}}}{[R_1 + (R_4 + \Delta R)]},$$

$$I_{R1} = I_{R4} = \frac{(-15 - 0,052)}{[10000 + (1155 + 39)]} = 0,0013 \text{ А.}$$

Визначаємо потужність розсіювання резисторів R_1, R_2, R_3 і потужність термістора.

$$P_{R1, R3} = (I_{R1})^2 \times R_1,$$

$$P_{R1,R3} = (0,0013)^2 \times 10000 = 0,0169 \text{ Вт.}$$

$$P_{R2,R4} = (0,0013)^2 \times 1194 = 0,002 \text{ Вт.}$$

Типи резисторів виберіть з довідника [Додаток А] [1,3,8,20].

6.6.5 Розрахунок перетворювача «магнітне поле – напруга»

Розрахунок перетворювача «магнітне поле - напруга» виконується за схемою, що приведена на рисунку 6.17.

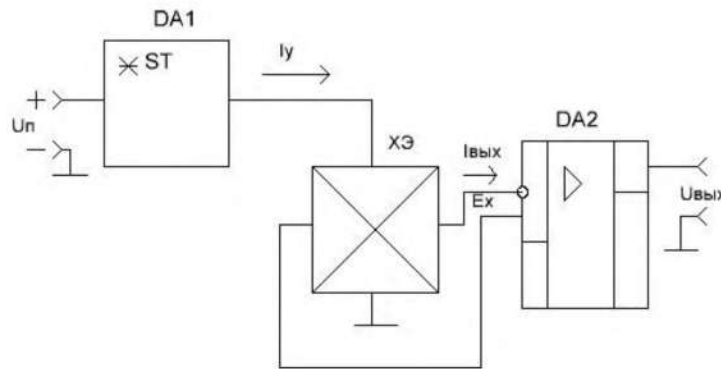


Рисунок 6.17 – Узагальнена схема перетворювача «магнітне поле – напруга» виконаного на елементі Холу

Розрахунок елемента Холла.

Датчик Холу ДХК- 0,5 А, що призначений для перетворення магнітної індукції у вихідну напругу. Параметри якого наведені в додатку А (таблиця 3).

Визначаємо диференціальну вихідну напругу

$$\Delta E_{\text{вих.д.}} = +E_{\text{вих}} - (-E_{\text{вих}}) = S_i (I_x / 3) \text{ В,}$$

$$\Delta E_{\text{вих.д.}} = 280(3/3) \cdot 1,0 = 280 \text{ мВ.}$$

де S_i – чутливість датчика Холла $S_i = 280 \text{ мВ/Тл}$;

I_x – значення керуючого струму, $I_x = 3 \text{ мА}$;

B – магнітна індукція $B = 1 \text{ Тл}$.

Синфазна вихідна напруга $E_{\text{вих синф.}} = 14 \text{ мВ}$.

Розрахунок вимірювального підсилювача на основі операційного підсилювача п. 6.4. Розрахунок генератора стабільного струму на транзисторі п. 6.5.

6.7 Електричний розрахунок джерела вторинного електроживлення

6.7.1 Розрахунок параметричного стабілізатора напруги

Для розрахунку параметричного стабілізатора напруги задаємося початковими даними :

- номінальне значення напруги на навантаженні $U_H = U_{CT} = 8 \text{ В}$;
- номінальне значення струму на навантаженні $I_H = I_{CT} = 10 \text{ мА}$;
- мінімальне значення струму на навантаженні $I_{H, \text{мін.}} = 8 \text{ мА}$;
- відхилення вхідної напруги: $a = 0,1 (\pm 10\%)$, $b = 0,15 (\pm 15\%)$.
- діапазон робочих температур навколишнього середовища $T_{\text{ср.}} = +25..+40^\circ\text{C}$.

Розрахунок параметричного стабілізатора напруги виконується за схемою включення стабілітрона з обмежувальним резистором (рисунок 6.18.)

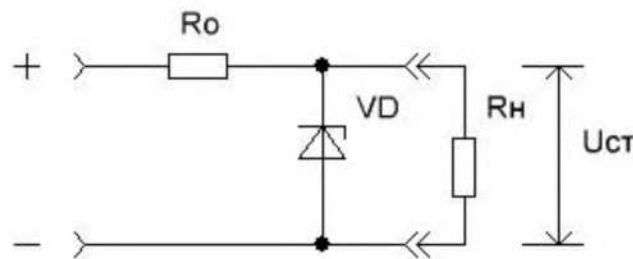


Рисунок 6.18 – Принципова схема параметричного стабілізатора напруга з обмежувальним резистором

Вихідна напруга $U_H = U_{CT} = 8 \text{ В}$ може бути отримано за допомогою кремнієвого стабілітрона типу Д814А, що має параметри :

$$U_{CT} = 7..7,75\dots 8,5 \text{ В}; I_{CT, \text{мін.}} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ А}; I_{CT, \text{макс.}} = 37 \cdot 10^{-3} \text{ А (при } t^0 = +40^\circ\text{C)}; \\ q = 0,1 (\pm 10\%), r_d = 12 \text{ Ом}$$

Баластовий резистор R_0 вибирається типу МЛТ з $d = 0,1 (\pm 10\%)$.

Визначаємо допоміжні коефіцієнти :

$$A = (1+a)/(1-b); \quad D = (1+d)/(1-d); \quad Q = (1+q)/(1-q),$$

$$A = (1+0,1)/(1-0,15) = 1,29; \quad D = (1+0,1)/(1-0,1) = 1,22;$$

$$Q = (1+0,1)/(1-0,1) = 1,22$$

Обчислюємо мінімальний струм через резистор R_0 :

$$I_{R_0 \text{ мін}} = I_{CT} + I_H$$

$$I_{R_0 \text{ мін}} = (3 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 10^{-3}) = 13 \cdot 10^{-3} \text{ А}$$

Визначаємо мінімальну напругу на вході

$$U_{\text{ВХ.МІН.}} = (1 - q)/(1 - \beta) \times [Q \times (I_{\text{СТ.МІН.}} + I_{\text{СТ.МАКС.}}) - D \times I_{\text{RМІН.}}] /$$

$$(I_{\text{СТ.МАКС.}} + I_{\text{Н.МІН.}} - D \times A \times I_{\text{RМІН.}}) \times U_{\text{СТ.}},$$

$$U_{\text{ВХ.МІН.}} = (1 - 0,1)/(1 - 0,15) \times [1,22 \times (3 \cdot 10^{-3} + 37 \cdot 10^{-3}) - 1,22 \times 13 \cdot 10^{-3}] /$$

$$(37 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-3} - 1,29 \times 1,22 \times 13 \cdot 10^{-3}) \times 7,75 = 13 \text{ В}$$

Приймаємо номінальне значення $U_{\text{ВХ}} = 16 \text{ В} > U_{\text{ВХ.МІН}}$

Визначаємо опір баластового резистора R_0

$$R_0 = [U_{\text{ВХ}}(1 - \beta) - U_{\text{СТ.}}(1 + q)] / (1 + d) \times I_{\text{RМІН.}},$$

$$R_0 = [16(1 - 0,15) - 7,75(1 + 0,15)] / (1 + 0,1) \times 13 \cdot 10^{-3} = 350 \text{ Ом}$$

Перевіряємо правильність вибору резистора R_0

$$R_{0 \text{ МІН.}} = [(1 - q)/(1 - d)] / [(A \times Q - 1) \times (I_{\text{СТ.МІН.}} + I_{\text{Н.МІН.}} - D \times A \times I_{\text{RМІН.}})],$$

$$R_{0 \text{ МІН.}} = [(1 - 0,1)/(1 - 0,1)] / [(1,29 \times 1,22 - 1) \times (37 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-3} - 1,29 \times 1,22 \times 13 \cdot 10^{-3})] = 180 \text{ Ом.}$$

Оскільки $R_0 > R_{0 \text{ МІН}}$ приймаємо стандартне значення $R_0 = 360 \text{ Ом}$

Визначаємо можливий робочий струм через стабілітрон VD

$$I_{\text{СТ.МОЖ.}} = [U_{\text{ВХ.}}(1 + a) - U_{\text{СТ.}}(1 - q)] / [R_0(1 - d)],$$

$$I_{\text{СТ.МОЖ.}} = [16(1 + 0,1) - 7,75(1 - 0,1)] / [360(1 - 0,1)] = 25 \cdot 10^{-3} \text{ А,}$$

Розрахунок проведений вірно, оскільки $I_{\text{СТ.МОЖ.}} < I_{\text{СТ.МАКС.}}$

$$25 \cdot 10^{-3} < 37 \cdot 10^{-3}$$

Визначаємо потужність розсіювання на резисторі R_0

$$P_{R_0} = (I_{\text{СТ.МОЖ.}} - I_{\text{Н.МІН.}})^2 \times R_0,$$

$$P_{R_0} = (25 \cdot 10^{-3} - 8 \cdot 10^{-3})^2 \times 360 = 0,39 \text{ Вт}$$

Вибираємо резистор МЛТ -0,5 Вт – 360 Ом $\pm 10\%$.

Визначаємо температурну нестабільність вихідної напруги

$$\delta U_{\text{Н(Т)}} = \alpha_{\text{СТ.}} \Delta T,$$

$$\delta U_{H(T)} = 5,9 \cdot 10^{-2} \times (40-25) = 0,89\%$$

Для визначення нестабільності вихідної напруги при зміні живлячої напруги і струму навантаження знаходимо слідуючі параметри:

- повна зміна струму через стабілітрон при коливаннях вхідної напруги

$$\Delta U_{ВХ} = (a + b)U_{ВХ}, \quad \Delta I_H = I_H - I_{H.мін.}$$

$$\Delta I_{СТ} = [U_{ВХ}(a + b)] / R_o + \Delta I_H,$$

$$\Delta I_{СТ} = [16(0,1 + 0,15)] / 360 + 2 \cdot 10^{-3} = 13 \cdot 10^{-3} \text{ МА.}$$

- початкове значення струму стабілітрона

$$I_{СТ.о} = 1/(1+q) \times [(1+d) \times I_{СТ.мін} + (d-q) \times I_H + |q(1-b)U_{ВХ}/R_o],$$

$$I_{СТ.о} = 1/(1+0,1) \times [(1+0,1) \times 3 \cdot 10^{-3} + (0,1-0,1) \times 10 \cdot 10^{-3} + |0,1 \times (1-0,15) \times 16 / 360] = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ МА}$$

Визначаємо коефіцієнт стабілізації параметричного стабілізатора напруги

$$K_{СТ} = [1 - (I_{Rмакс} R_o / U_{ВХ})] * [(R_o + r_d) / r_d],$$

$$K_{СТ} = [1 - (33 \cdot 10^{-3} \times 360 / 16)] * [(360 + 12) / 12] = 8$$

Визначаємо нестабільність вихідної напруги параметричного стабілізатора напруги

$$\Delta U_H = (a + b) \times U_{ВХ} / K_{СТ} \times U_{ВХ},$$

$$\Delta U_H = [(0,1 + 0,15) \times 16 / 8 \times 16] 100 \% = 3,13\%$$

Визначаємо коефіцієнт фільтрації параметричного стабілізатора напруги на стабілітроні [2,10,11].

$$k_{\phi} = (R_o + r_d) / r_d$$

$$k_{\phi} = (360 + 12) / 12 = 31$$

6.7.2 Розрахунок інтегрального стабілізатора напруги

Розрахунок інтегрального стабілізатора на фіксовану напругу

Для розрахунку інтегрального стабілізатора напруги задамося початковими даними :

- номінальне значення напруги на навантаженні $U_H = U_{СТ} = 9 \text{ В}$;
- номінальне значення струму на навантаженні $I_H = I_{СТ} = 56 \text{ МА}$;
- мінімальна вхідна напруга $U_{ВХ.мін.} = 14 \text{ В}$;
- максимальна вхідна напруга $U_{ВХ.макс} = 20 \text{ В}$;

Розрахунок інтегрального стабілізатора напруги виконується за схемою рисунок 6.19.

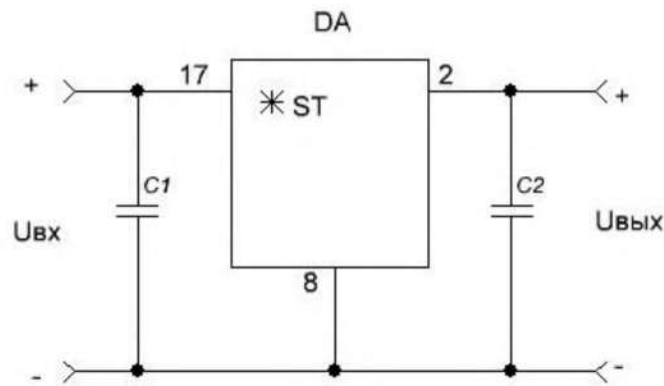


Рисунок 6.19 – Принципова схема інтегрального стабілізатора напруги, що виконан на мікросхемі КР142ЕН8А

Вибіраємо інтегральну мікросхему.

Для вибору інтегральної мікросхеми слід проаналізувати напругу на виході стабілізатора, струм споживання навантаженням і допустимі зміни напруги на вході (таблиця 6.14).

Вибираємо мікросхему КР142ЕН8А з напругою $U_{\text{вих}} = 9 \text{ В}$.

По напрузі слід виконати наступні вимоги:

$$U_{\text{вх.макс.}} < U_{\text{вх макс. доп.}}$$

де $U_{\text{вх макс. доп}}$ - максимальна допустима напруга на вході мікросхеми;

$$U_{\text{вх. мін}} - U_{\text{вих}} > U_{\text{мик. мін.}}$$

$$14,5 - 9 = 5,5 \text{ В} > 2,5 \text{ В.}$$

По напрузі для даної мікросхеми умови виконуються.

Проводимо перевірку використання мікросхеми КР142ЕН8А за потужністю.

Визначаємо максимальне падіння напруги на мікросхемі DA

$$\Delta U = U_{\text{вх макс}} - U_{\text{н}},$$

$$\Delta U = 20 - 9 = 11 \text{ В,}$$

тоді

$$P_{\text{мік.}} = \Delta U \cdot I_{\text{н}},$$

$$P_{\text{мік.}} = 11 \times 0,056 = 0,616 \text{ Вт}$$

Оскільки $P_{\text{мік.}} < 1 \text{ Вт}$, то мікросхему можна використовувати без тепловідводу

Таблиця 6.14 – Параметри інтегральних мікросхем стабілізаторів напруги серії 142

Електричні параметри	KP142 EH5A	KP142 EH5B	KP142 EH8A	KP142 EH8B	KP142 EH8B	KP142 EH9A	K142 EH9B	KP142 EH9B	KP142 EH12A	
Вихідна напруга, В	4,9... 5,1	5,88... 6,12	8,73... 9,27	11,64... 1-2,36	14,55 ...15,4 5	19,6... 24,48	23,52 ...24,48	26,46 ...27,54	1,3... 37	
Номинальна вихідна напруга, В	5	6	9 ± 0,27	12 ±0,36	15± 0,45В	20	24	27	-	
Мінімальне падіння напруга В, не більше	2,5								3,5	
Нестабільність вихідної напруги від зміни вхідної напруги %/В, не більше	0,05								0,01	
Нестабільність вихідної напруги від зміни вихідного струму %/А, не більше	2		1						0,2	
Параметри граничного режиму										
Вхідна напруга, В	7,5... 15	8,5... 15	11,5... 35	14,5... 35	17,5... 35	23... 45	27... 45	30... 45	5... 45	
Вихідний струм, А	3		2	1,5				1		
Потужність, що розсіюється без тепловідводу Вт	1									
Потужність, що розсіюється з тепловідводом, Вт	10		9					10		
Коефіцієнт згладжування пульсацій, не менше	30дБ									
Струм споживання, не більш	10мА									
Дрейф напруги, не більш	1,0%									
Коефіцієнт нестабільності по напрузі, не більш	0,05% / В									
Температурний коефіцієнт напруги, не більш	0,02% / °С									
Температура навколишнього середовища	-45...+100°С									

Ємність конденсатора C_2 повинна бути не менше 0,68 мкФ.

По довіднику [Додаток А] вибираємо ємність конденсаторів $C_1 = 10$ мкФ, і $C_2 = 10$ мкФ на напругу 50 В.

K50 - 35 – 10 мкФ –50 В ±10%

6.7.3 Розрахунок випрямляча і згладжуючого фільтру джерела вторинного електроживлення

Розрахунок випрямляча і згладжуючого фільтру проводимо за схемою, яка приведена на рисунку 6.20.

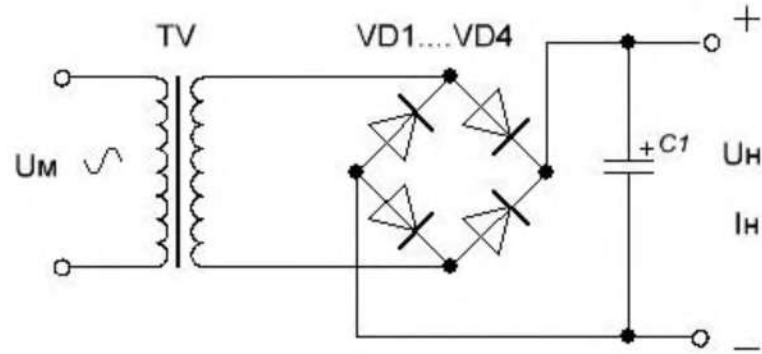


Рисунок 6.20 - Принципова схема випрямляча і згладжуючого фільтру

Початкові дані для розрахунку:

- напруга на навантаженні випрямляча $U_H = 6 \text{ В}$;
- струм навантаження $I_H = 200 \text{ мА}$;
- коефіцієнт пульсації на виході $k_H = 0,1$,
- напруга мережі $U_M = 220 \text{ В}$, може змінюватися в межах $\pm 10\%$ ($a = 0,1$); частота мережі $f_c = 50 \text{ Гц}$.

Визначаємо потужність, споживану навантаженням

$$P_2 = U_H \times I_H$$

$$P_2 = 6 \times 0,2 = 1,2 \text{ Вт}$$

Визначаємо опір навантаження

$$R_H = U_H / I_H$$

$$R_H = 6 / 0,2 = 30 \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт пульсації порівняно низький, тому можна спробувати як фільтр використовувати тільки один конденсатор .

Вибираємо двонапівперіодну схему випрямлення з конденсатором, що включен паралельно навантаженню. Для вибрано схеми $m = 2$.

Визначаємо максимальну випрямлену напругу

$$U_{H,\text{макс}} = U_H \times (1 + a),$$

$$U_{H,\text{макс}} = 6 \times (1 + 0,1) = 6,6 \text{ В.}$$

Задаємося коефіцієнтами B , D і F :

$$B \approx 1; D \approx 2,2; F = 5 .$$

Визначаємо постійну складову струму і амплітуду зворотної напруги діода за коефіцієнтами B і D

$$U_{зв.макс.VD} = 2,82 \times B \times U_{н макс.},$$

$$U_{зв.макс.VD} = 2,82 \times 1 \times 6,6 = 18,6 \text{ В},$$

$$I_{ср.VD} = 0,5 \times I_0,$$

$$I_{ср.VD} = 0,5 \times 0,2 = 0,1 \text{ А}.$$

Діод повинен мати допустимі значення $U_{зв.макс.VD}$ і $I_{ср.VD}$ більше обчислених.

З довідника [Додаток А] по діодах вибираємо напівпровідниковий діод Д226Д, у якого $U_{зв.макс.VD} = 100 \text{ В}$, допустимий випрямлений струм $I_{доп.Випл.стр.VD} = 0,5 \text{ А}$ і пряме падіння напруги $U_{пр.VD} = 1 \text{ В}$. Параметри вибраного діода з хорошим запасом задовольняють вимогам.

Визначаємо диференціальний опір діода

$$r_{тр.VD} = 1,2 \times U_{пр.VD} / I_{доп.Випл.стр.VD},$$

$$r_{тр.VD} = 1,2 \times 1 / 0,5 = 3 \text{ Ом}$$

Визначаємо найбільшу зворотну напругу, що прикладена до діода

$$U_{зв.макс.VD} = 2,82 \times B \times U_{н.макс.},$$

$$U_{зв.макс.VD} = 2,82 \times 1 \times 6,6 = 22,7 \text{ В}.$$

Визначаємо середній струм що протікає через діоди

$$I_{ср.VD} = 0,5 \times I_n,$$

$$I_{ср.VD} = 0,5 \times 0,2 = 0,1 \text{ А}.$$

Визначаємо амплітуду струму через діод або максимальне значення струму

$$I_{F макс.VD} = 0,5 \times F \times I_0,$$

$$I_{F макс.VD} = 0,5 \times 5 \times 0,2 = 0,5 \text{ А}.$$

Вибраний діод Д226Д придатний для роботи в проектованому випрямлячі, оскільки всі його параметри вище потрібних.

Визначаємо ємність конденсатора, виходячи з коефіцієнта пульсацій на його виході $k_{п} = 0,1$. Для мостової схеми випрямлення:

$$C_1 = (30 \times I_0) / U_n,$$

$$C_1 = (30 \times 0,2) / 6 = 1 \text{ мкФ}.$$

Перевіряємо правильність вибору конденсатора C_1

$$k_{\Pi} = 300 \times I_{\Pi} / U_{\Pi} \times C_1,$$

$$k_{\Pi} = 300 \times 0,2 / 6 \times 1 = 10\% = 0,1$$

При виборі робочої напруги конденсатора обов'язково потрібно враховувати значення випрямленої напруги на неодруженому ході.

У режимі холостого ходу випрямляча конденсатор заряджатиме до амплітудного значення напруги па вторинній обмотці, а воно з урахуванням можливого підвищення напруги живлячої мережі на 10% ($a=0,1$). [2,20].

$$U_{p.n..max.} = \sqrt{2} \times U_{\Pi} \times (1+a),$$

$$U_{p.n..max.} = \sqrt{2} \times 6 \times (1+0,1) = 9,3 \text{ В.}$$

$$\text{де } U_2 = B \times U_0 = 1 \times 6 = 6 \text{ В}$$

Вибираємо конденсатор на найближчу напругу $U_{\text{раб.}} = 16 \text{ В.}$
По довіднику вибираємо конденсатор типу:

$$K50-6 - 1 \text{ мкФ} - 16 \text{ В} \pm 10\%.$$

ПЕРЕЛИК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Величко О.М., Коломієць Л.В., Гордієнко Т.Б. Метрологія, технічне регулювання та забезпечення якості: у 5-ти томах. Том 1: Метрологія. Підручник. – Одеса: ВМВ, 2014
2. Любимов А.Я., Кудряшов В.О., Грабовський О.В. та ін. Електроніка: Навчальний посібник- Одеса:тов.. Плутон, 2015.- 412 с.
3. Медведенко Б.І., Коломієць Л.В., Квасніков В.П. Основи електроніки на базі програми схемотехнічного моделювання «*MULTISIM*»: Навчальний посібник- Одеса: Бондаренко М.О., 2015
4. Колонтаєвська Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка.- К.: Каравела, 2003.
5. Коломієць Л.В, Любимов А.Я., Бердієв Б.Ч.та ін. Електроніка та мікропроцесорні системи автомобілів: Підручник //за загальною редакцією Коломійця Л.В.// – Одеса:Бондаренко М.О., 2017. - 404 с.
6. Кудряшов В.О., Кучерук В.Ю., Севастьянов В.М. та ін. Умовні графічні позначення на електричних схемах. Довідник// За заг.редакцією Коломійця Л.В. – Одеса «Плутон», 2015
7. Гонтаренко Г.М. Основи цифрової т мікропроцесорної техніки.-Одеса,: «ТЄС», 2002.-281с.
8. Банзак О.В., Маслов О.В., Мокрицький В.А. Полупроводниковые детекторы нового поколения для радиационного контроля дозиметрии ионизирующих излучений. Монография. – Одесса. Издательство «ВМВ», 2013.
9. Сажко В.А. Електричне та електронне обладнання автомобілів: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – К.: Каравела, 2001. с.34...44.
10. Величко О.М., Коломієць Л.В., Гордієнко Т.Б. Фізичні величини та їхні одиниці: Підручник. – Одеса: ВМВ, 2009. -297 с.
11. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум. За ред.. А.Г. Соскова.- К.: Каравела,3002.-368 с.
12. Б.І.Медведенко, Л.В.Коломієць, В.П.Квасніков Основи електроніки на базі програми схемотехнічного моделювання «*MULTISIM*»: Навчальний посібник- Одеса: Бондаренко М.О., 2015
13. Умовні графічні позначення на електричних схемах. Довідник / В.Ю. Кучерук, В.М. Севастьянов, О.В. Грабовський, В.О Кудряшов и др ; За загал. Ред.. Л.В. Коломійця; Одеса: ФОП Бондаренко М.О., 2015. – 116 с.

ДОДАТОК А

Таблиця А1 - Ряди Е номінальних ємностей конденсаторів і постійних резисторів

Індекс ряду	Позиція ряду	Допустиме відхилення від номінальної величини, %
Е6	1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8	±20
Е12	1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,3; 3,9; 4,7; 5,6; 6,8; 8,2	± 10
Е24	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	±5

Таблиця А2 - Постійні резистори

Тип резистора	Діапазон опорів	Номінальна потужність, Вт
МЛТ	1 Ом-3,01 МОм	0,125
	1 Ом-5,1 МОм	0,25; 0,5
	1 Ом-10 МОм	1;2
С2-33	1 Ом - 3 МОм	0,125
	1 Ом-5,1 МОм	0,25
	0,1 Ом-5,1 МОм	0,5
	1 Ом - 10 МОм	1
	1 Ом - 22 МОм	2

Таблиця А3 - Параметри датчиків Холла ДХ1, ДХ2, ДХ3, ДХ4

Тип датчика	ДХ1	ДХ2	ДХ3	ДХ4	ПДХ1	ПДХ2
Матеріал	GaAs	GaAs	GaAs	GaAs	GaAs	GaAs
Активна зона, мкм	100X100	100X100	100X100	100X100	100X100	100X100
Вхідний опір, Ом	650±150	250 ± 50	40 ±20	950±190	255	950
Вихідний опір, Ом	650±150	250 ± 50	40 ±20	1800 ±360		
Номінальний струм живлення, мА	7	10	10	5	10	5
Чутливість до магнітного поля, не менше, мВ/Тл	300	150	100	550	150	550
Напруга зсуву, не більше, мВ	25	20	10	40	25	20
Магнітна індукція, Тл	0,5	1	1	1	0,5	1

Датчики ДХ1 - ДХ4 на основі елементів Хола є первинними перетворювачами магнітного поля, виготовленими на основі монокристалічних напівпровідникових сполук GaAs, GaAs. Кристал датчика розміщено на немагнітній діелектричній підкладці. Є безкорпусний виконання з гнучкими дротяними виводами і захисним покриттям кристала. Датчики мають 4 виводу

Таблиця А4 - Номінальна потужність, межі номінальних опорів, допустимі відхилення від номінального опору

Тип датчика	Допускає- мє отклонє- ннє, %	Пределы номинальных сопротивлений, Ом, для номинальной мощности, Вт				
		0,125	0,25	0,5	1,0	2,0
С5-53В	$\pm 0,05$	$100-33 \cdot 10^4$	$100-1 \cdot 10^6$	$100-1 \cdot 10^6$	$100-1 \cdot 10^6$	$100-1 \cdot 10^6$
	$\pm 0,1$	$68,1-33 \cdot 10^4$	$100-1 \cdot 10^6$	$100-15 \cdot 10^5$	$100-33 \cdot 10^5$	$100-1 \cdot 10^7, 2 \cdot 10^7$
	$\pm 0,2$	$51,1-33 \cdot 10^4$	$51,1-1 \cdot 10^6$	$100-15 \cdot 10^5$	$100-33 \cdot 10^5$	$100-1 \cdot 10^7, 2 \cdot 10^7$
	$\pm 0,5$	$33-33 \cdot 10^4$	$33-1 \cdot 10^6$	$51,1-15 \cdot 10^5$	$100-33 \cdot 10^5$	$100-1 \cdot 10^7, 2 \cdot 10^7$
	$\pm 1,0$	$1-33 \cdot 10^4$	$3,3-1 \cdot 10^6$	$4,7-15 \cdot 10^5$	$10-33 \cdot 10^5$	$10-1 \cdot 10^7, 2 \cdot 10^7$
С5-54В	$\pm 0,01$	$1000-33 \cdot 10^4$	$1000-1 \cdot 10^6$	$1000-1 \cdot 10^6$	$1500-1 \cdot 10^6$	$1500-1 \cdot 10^6$
	$\pm 0,02$	$510-33 \cdot 10^4$	$510-1 \cdot 10^6$	$510-15 \cdot 10^5$	$750-33 \cdot 10^5$	$750-1 \cdot 10^7$
	$\pm 0,05$	$100-33 \cdot 10^4$	$100-1 \cdot 10^6$	$100-15 \cdot 10^5$	$100-33 \cdot 10^5$	$100-1 \cdot 10^7$

Таблиця А5 - Параметри операційних підсилювачів

ОУ	U _{пит.} , В	U _{пит. ном.} , В	K _D x10 ⁻³	I _{но} , мА	U _{см} , мВ	TKU _{см} , мкВ/К	I _н , нА	ΔI _н , нА	U _{лф} max, В	U _{сф} max, В	K _{сф} , дБ	f _н , МГц	V _т , В/мкс	U _{2m} max, В	R _{2m} min, кОм	R _D max, МОм	Ближайший зарубежный аналог
K140УД1А, КР140УД1А	-	2x6,3	0,5	6	7	20	5000	1500	1,5	3	60	3	0,2	2,8	5	0,004	μA702
K140УД1Б, КР140УД1Б	-	2x12,6	1,3	12	7	20	8000	1500	1,5	6	60	8	0,5	5,7	5	0,004	μA702
K140УД5А ¹⁾	2x(6..13)	2x12	0,5	12	10	35	5000	1000	3	6	50	5	6	6,5	5	0,05	-
K140УД5Б ¹⁾	2x(6..13)	2x12	1	12	7	10	10000	5000	3	6	60	10	6	6,5	5	0,003	-
K140УД6, КР140УД608	2x(5..20)	2x15	30	3	8	20	50	15	30	11	70	1	2	12	1	1	МС1456С
K140УД7, КР140УД708	2x(5..20)	2x15	30	2,8	9	10	400	200	20	15	70	0,8	0,3	10,5	2	0,4	μA741
K140УД8, КР140УД8	-	2x15	50	5	50	50	0,2	0,1	6	10	70	1	2	10	2	10	μA740
K140УД9	2x(9..18)	2x12,6	35	8	5	20	350	100	4	7	80	1	0,2	10	1	0,3	-
K140УД10	2x(5..18)	2x15	50	10	5	50	250	70	4	6	70	15	30	12	2	0,4	LM118
K140УД11, КР140УД1101	2x(5..18)	2x15	30	8	10	50	500	200	10	11	70	15	50	12	2	0,4	LM318
K140УД12, КР140УД1208 ²⁾	2x(1,5..18)	2x3/15	25/50	0,03/0,17	6	5/6	10/50	6/28	-	1,2/12	70	0,2/1	0,1/0,8	2/12	5	50/5	μA776
K140УД14, КР140УД1408	2x(5..18)	2x15	50	1	5	20	5	1	13	13	85	0,5	0,1	12	1	30	LM308

K140УД17	2x(3..18)	2x15	200	5	0,25	1,3	10	5	15	13	100	0,4	0,1	12	2	30	OP-07E
KP140УД18	2x(6..18)	2x15	25	-	10	-	0,2	0,2	-	16	80	2,5	5	11	2	10 ⁶	LF-355
K140УД20	2x(5..20)	2x15	50	3	5	2	100	30	10	12	70	0,5	0,3	11	1	0,4	μA747
K153УД1	2x(9..18)	2x15	15	6	7,5	30	1500	500	5	8	70	1	0,2	10	2	0,2	μA709
K153УД2	2x(5..18)	2x15	25	3	7,5	30	1500	500	30	12	70	1	0,5	10	2	0,3	LM101
K153УД3	2x(9..18)	2x15	25	4	2	15	200	50	5	8	80	1	0,2	10	2	0,4	μA709A
K153УД4	2x(3..18)	2x6	5	0,8	5	50	400	150	2	5	70	0,7	0,1	4	5	0,2	WCC188
K153УД5	2x(5..16)	2x15	500	3,5	2	10	100	20	5	13	100	0,2	0,01	10	2	1	μA725
K153УД6	2x(5..18)	2x15	50	3	2	15	75	10	30	12	80	0,7	0,5	10	2	0,3	LM301A
K154УД1	2x(4..18)	2x15	150	0,15	5	30	40	20	10	10	80	1	10	11	2	1	HA2700
K154УД2	2x(5..18)	2x15	100	6	2	20	100	20	10	10	70	15	+150/-75 ³⁾	10	2	0,5	-
K154УД3	2x(5..18)	2x15	8	7	10	30	200	50	10	10	80	15	80	10	2	1	AD509
K154УД4	2x(5..17)	2x15	8	7	6	50	1200	300	-	10	70	30	400	10	2	1	HA2520
K157УД1	2x(3..20)	2x15	50	9	5	50	500	150	-	20	70	0,5	0,5	12	0,02	1	-
K157УД2	2x(3..18)	2x15	50	7	10	50	500	150	-	18	70	1	0,5	13	0,3	0,5	2xLM301
K544УД1, КР544УД1	2x(8..16,5)	2x15	50	3,5	20	50	0,1	0,05	10	10	80	1	3	10	2	10	μA740
K544УД2, КР544УД2	2x(6..17)	2x15	20	7	50	50	0,5	0,1	10	10	70	15	20	10	2	10	CA3130
K551УД1	2x(5..16,7)	2x15	500	5	1,5	5	100	20	5	13,5	100	0,8	0,01	10	2	1	-
KM551УД1	2x(5..16,7)	2x15	500	5	2	10	120	35	5	13	100	0,8	0,01	12	2	1	μA725

Продовження таблиці 5 - Параметри операційних підсилювачів

КМ551УД2	2x(5..16,7)	2x15	5	10	5	20	2000	1000	5	8	70	1	0,25	12	2	0,5	μA739
КМ553УД1	2x(9..18)	2x15	10	6	7,5	30	200	60	5	8	65	1	0,2	10	2	0,2	μA709
КМ553УД2	2x(5..18)	2x15	20	3	7,5	30	1500	500	30	12	70	1	0,5	10	2	0,3	LM301
КМ553УД3	2x(9..18)	2x15	30	4	2	15	200	50	5	8	80	1	0,2	10	2	0,3	μA709A
К574УД1, КР574УД1	-	2x15	50	8	50	50	0,5	0,2	10	30	80	10	50	10	2	10	AD513
К574УД2, КР574УД2	-	2x15	25	10	50	30	1	0,5	10	10	60	2	10	10	10	10 ³	TL0837
К574УД3, КР574УД3	2x(3..16,5)	2x15	20	7	5	5	0,5	0,2	-	10	80	15	30	10	10	10 ³	-
К1401УД1	4..15	2x15	2	8	5	30	150	-	-	-	70	2,5	0,5	12	-	1	LM2900
К1401УД2	2x(2..15)	2x15	25	3	5	30	150	30	-	-	70	1	0,5	12	2	-	LM324
К1407УД1, КР1407УД1	2x(3..12)	2x5	10	8	10	50	10	2	2,5	4	70	20	10	3	1	-	-
К1407УД2, КР1407УД2	2x(1,2..13,2)	2x12	50	0,1	0,5	-	150	50	2,5	10	100	3	0,5	10	2	-	LM4250
К1407УД3, КР1407УД3	2x(2..12)	2x12	10	2	5	20	5	1	2,5	4	75	5	5	3	2	-	-
КФ1407УД4	2x(1,5..6)	2x5	3	2	5	-	0,5	0,06	2,5	1,5	70	1	1	0,65	0,25	-	-
К1408УД1, КР1408УД1	2x(7..40)	2x27	70	5	8	-	40	10	20	21	70	0,5	2	18	2	1	LM343
К1408УД1	2x(5..20)	2x15	50	2,8	4	-	200	70	-	15	70	0,8	0,7	11,5	2	0,4	μA747C
К1409УД1	2x(5..15)	2x15	20	6	15	-	0,05	0,03	10	10	70	1	4	12	2	10 ⁰	CA3140

Таблиця А6 - Параметри потужних операційних підсилювачів

Тип ОУ	I _{вих} , А	U _{вих} , В	U _п , В	K _{по} , тыс.	f _г , МГц	U _{см} , мВ	Примечание
К157УД1	0,3	12	15	50	0,5	5	—
К1408УД1	0,015	27	+(5...33)	25	1,0	7	Два усилителя
К1040УД2	0,5	22,5	25	1	0,3	50	
К1408УД1	0,1	19	27	70	0,5	8	-
К1422УД1	1,0	-	15	50	4,5	5	-

ДОДАТОК Б

Бланк титульного аркуша на курсовий проект

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ТЕХНІЧНОГО
РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЯКОСТІ

Навчально-науковий інститут метрологій, автоматизації, інтелектуальних
технологій та електроніки

(назва факультету)

Кафедра електроніки та мікросистемної техніки

(назва кафедри)

КУРСОВИЙ ПРОЕКТ

З дисципліни: Електронні пристрої інформаційно-вимірювальної техніки
(назва дисципліни)

на тему: РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КОЛА З
РОЗРАХУНКОМ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

Студента _____ курсу _____ групи

(прізвище, та ініціали)

Керівник: _____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Національна шкала: _____

Кількість балів: _____ Оцінка: ECTS _____

Члени комісії: _____
(підпис) (прізвище, та ініціали)
_____ (підпис) (прізвище, та ініціали)

ДОДАТОК В

Бланк завдання на курсовий проект

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА ЯКОСТІ

Навчально-науковий інститут метрологій, автоматизації, інтелектуальних
технологій та електроніки
(назва факультету)

Кафедра електроніки та мікросистемної техніки

(назва кафедри)

ЗАВДАННЯ **на курсовий проект**

з дисципліни: Електронні пристрої інформаційно-вимірювальної техніки

студента _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема РОЗРОБКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ ВИМІРЮВАЛЬНОГО
КОЛА З РОЗРАХУНКОМ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

2. Термін здачі студентом закінченої роботи “ _____ ” _____ 20 ____ р.

3. Вхідні дані до роботи: _____

4. Перелік питань, які мають бути розроблені (формулюється у повному обсязі керівником КП із попереднім узгодженням (за необхідності) з консультантами з окремих питань і може бути структурований за розділами (частинами):

Вступ, загальні відомості, розробка структурної та принципової схем, електричний розрахунок, розрахунок перетворювача, розрахунок вимірювального підсилювача на операційному підсилювачі, розрахунок джерела електроживлення, висновок, список використаних джерел.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів)

1. Структурна схема вимірювального кола

2. Принципова схема вимірювального кола

7. Дата видачі завдання « ____ » 20 ____ р.

Керівник

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

(ініціали, прізвище)

