

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО КУРСОВОГО ПРОЕКТУВАННЯ
З КУРСІВ «ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ» ТА
«АНАЛОГОВА СХЕМОТЕХНІКА»
для студентів спеціальності
152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»**

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 2 від 17.05.2019

Харків
НТУ «ХПІ»
2019

Методичні вказівки до курсового проектування з курсів «Основи електроніки» та «Аналогова схемотехніка» для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка».

/ Уклад. І.В. Григоренко, М.В. Трохін – Харків: НТУ «ХПІ», 2019.– 34 с.– Укр. мовою

Укладачі: І.В. Григоренко
М.В. Трохін

Рецензент проф. Лазуренко О.П.

Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій і систем

ВСТУП

Електроніка є універсальним і ефективним засобом для вирішення самих різних проблем в області збору і обробки інформації, автоматичного керування і перетворення енергії. Знання в області електроніки стають необхідними все більш широкому колу фахівців. Сфера застосування електроніки постійно розширюється. Практично кожна достатньо складна технічна система оснащується електронними пристроями. Важко назвати технологічний процес, керування яким здійснювалося б без використання електроніки.

Предметом навчальних дисциплін «Основи електроніки» та «Аналогова схемотехніка» є фізичні принципи, що лежать в основі роботи приладів напівпровідникової мікроелектроніки, питання побудови аналогових електронних пристроїв на транзисторах та операційних підсилувачах, їх характеристики і розрахунок схем на їх основі. Науково-методичною основою дисципліни є загальна фізика, математика, теоретичні основи електротехніки, теорія електромагнітного поля, теорія роботи напівпровідників. Дисципліни «Основи електроніки» та «Аналогова схемо-техніка» є не тільки одними з базових дисциплін для підготовки бакалаврів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка», вона інтегрують знання, отримані студентами при вивченні загальнонаукових дисциплін і мають метою досягти розуміння студентами взаємозв'язку між фізичними закономірностями електронних процесів в твердих тілах з кінцевими експлуатаційними характеристиками аналогових електронних приладів.

Значну увагу під час вивчення дисциплін відводиться засвоєнню студентами теоретичних знань, придбання практичних навичок вирі-

шення завдань розрахунку простих і складних електричних схем, розрахунку підсилювачів на базі транзисторів та операційних підсилювачів, оцінці якості функціонування електричних схем, придбанню практичних навичок моделювання та конструювання електронних схем різної складності і умінь працювати з електричними засобами вимірювання.

Дані методичні вказівки призначені для проведення курсового проектування з цих дисциплін та складаються з двох частин. Перша частина це курсовий проект з курсу «Основи електроніки», який складається з теоретичної частини та індивідуальних завдань для студентів. Друга частина це курсовий проект з курсу «Аналогова схемотехніка», який побудовано також з теоретичної частини та розрахункових індивідуальних завдань. До кожної частини входить комп'ютерне моделювання у середовищі Multisim для перевірки отриманих теоретичних результатів.

Multisim дозволяє створити схему і емітувати поведінку інтегральної схеми за допомогою стандартного промислового симулятора SPICE. Це середовище має велику бібліотеку моделей різноманітних за призначенням аналогових і цифрових електронних компонентів і дозволяє складати і досліджувати принципові схеми практично необмеженої складності.

Курсове проектування надає можливість закріпити теоретичні знання отримані при прослухованні лекцій та поглибити практичні знання отримані при виконанні лабораторного практикуму.

1. КУРСОВЕ ПРОЕКТУВАННЯ З КУРСУ «ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ»

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ

1.1. Масштабні вимірювальні перетворювачі

При вимірюванні електричних величин часто виникає потреба в прямо пропорційному перетворенні одного значення струмів, напруг, потужностей в інше, більше або менше. В таких випадках використовують масштабні вимірювальні перетворювачі, які змінюють значення цих величин в задане число разів із заданою точністю.

Масштабні перетворювачі поділяють на пасивні та активні. До пасивних масштабних перетворювачів належать шунти, резистори додаткові, подільники напруги, атенюатори, вимірювальні трансформатори струму та напруги, а до активних масштабних перетворювачів – вимірювальні підсилювачі [1].

1.1.1. Подільники напруги.

Подільники напруги застосовують для зміни меж вимірювання напруги електронних приладів (вольтметрів тощо). Вони можуть входити до складу приладу як вхідна чи проміжна ланка або використовуватися як самостійні перетворювачі одного значення напруги в інше. Подільники виконують на резисторах, конденсаторах або (рідше) на котушках індуктивності. Резистивні подільники напруги застосовуються на частотах до 1 МГц. Вони можуть бути з однією межею вимірювання (рис. 1.1, а) або з декількома межами вимірювань (рис. 1.1, б), високоомні та низькоомні. Коефіцієнт передачі таких подільників може змінюватися внаслідок старіння резисторів, зміни температури навколишнього середовища. Для зменшення температурної похибки в прецизійних подільниках використовують резистори з манганінового дроту або з мікродроту зі скляною ізоляцією. Для усунення частотної похибки, обумовленої паразитними ємностями, резистори шунтують конденсаторами (рис. 1.1, в). Ємності конденсаторів C_1 і C_2 вибирають такими, щоб ви-

конувалась умова $R_1 C_1 = R_2 C_2$. Такий подільник напруги є частотно-незалежним [1].

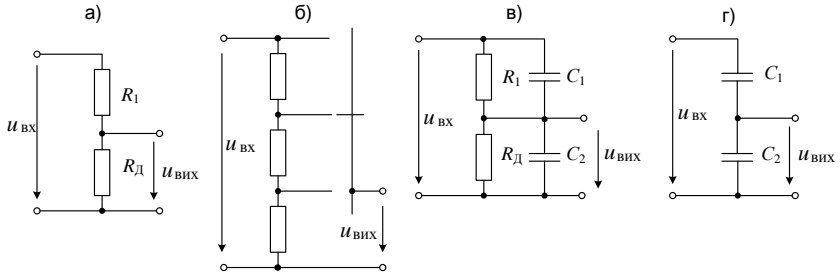


Рисунок 1.1 – Схеми подільників напруги: а – з фіксованим коефіцієнтом ділення; б – зі східчастим діленням; в – компенсований; г – ємнісний

Односхідчасті подільники напруги на мікродротових резисторах з елементами частотної компенсації мають частотну похибку близько десятих часток відсотка в діапазоні звукових частот. Частотна похибка подільників на недротових резисторах може досягати 1...2 %.

Подільники напруги на конденсаторах (рис. 1.1, г) мають постійний коефіцієнт ділення в широкому діапазоні частот (до кількох сотень мегагерц). На більш високих частотах на них починає істотно впливати паразитна індуктивність. Недолік ємнісних подільників напруги полягає в тому, що їх вхідний і вихідний опори змінюються залежно від частоти вхідної напруги. З цієї причини використання ємнісних подільників обмежене [1].

Подільники напруги призначені для одержання певного співвідношення між вхідною U_1 і вихідною U_2 напругами ($U_2 < U_1$). Виконуються вони на параметричних елементах. Найчастіше це резистори й конденсатори (рис. 1.2).

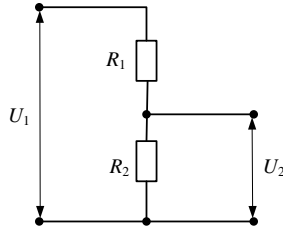


Рисунок 1.2 – Схема найпростішого резистивного подільника напруги

Якщо вихід подільника не навантажений (холостий хід), то рівняння перетворення (коефіцієнт перетворення КП) на постійному струмі має вигляд

$$K_{\Pi} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{1 + (R_1/R_2)}$$

Як опір резистора R_1 може виступати вихідний опір першого каскаду (пристрою), а як опір R_2 – вхідний опір наступного каскаду (пристрою). У цьому випадку, скориставшись рівнянням для подільника напруги, можна визначити, яка частина вихідної напруги потрапить на вхід наступного каскаду (мається на увазі теорема про еквівалентне перетворення схем) [2].

Подільники використовуються для розширення меж виміру приладів з високим опором (таких, як вольтметри, компенсатори).

Відносна похибка подільника становить

$$\delta K_{\Pi} = \frac{\partial K_{\Pi}}{\partial K_{\Pi}} = (1 - K_{\Pi}) \cdot (\delta_{R_2} - \delta_{R_1})$$

де δ_{R_1} й δ_{R_2} – відносні похибки відповідних резисторів R_1 і R_2 , тобто відхилення дійсних значень їх опорів від номінальних.

Якщо на виході подільника включене навантаження R_H , то вираз для КП має вигляд

$$K_{\Pi}^H = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_H}\right)}$$

Подільник напруги може бути й регульованим (рис. 1.3) [2].

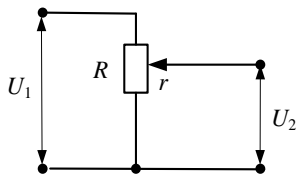


Рисунок 1.3 – Схема регульованого резистивного подільника напруги

Вхідна напруга U_1 підводиться до затискачів, при цьому через резистор протікає струм I_1 , що створює на ньому спадання напруги U_1 . Вихідна напруга U_2 знімається з тієї частини резистора, яка розташована між движком (рухливою частиною змінного резистора) і загальною точкою подільника, тобто з опору r . Якщо движок перебуває в нижньому положенні, то опір r між движком і нижньою загальною точкою, а також вихідна напруга U_2 й КП дорівнюють нулю. Якщо движок установлений у верхнє положення (тобто $r = R$), то $U_2 = U_1$, а КП = 1.

1.2. Емітерний повторювач

Схема найпростішого емітерного повторювача наведена на рис. 1.4. Він названий так тому, що вихідний сигнал знімається з емітера, напруга на якому дорівнює напрузі на вході (на базі) мінус спадання напруги на переході БАЗА- ЕМІТЕР [2].

$$U_E = U_B - 0,6 \text{ В.}$$

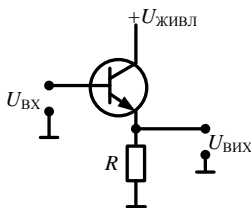


Рисунок 1.4 – Схема найпростішого емітерного повторювача

Вихідний сигнал за формою повторює вхідний, але рівень його напруги на 0,6 – 0,7 В нижче. Для наведеної схеми напруга $U_{ВХ}$ повинна становити, принаймні, 0,6 В, інакше вихідна напруга буде дорівнювати потенціалу землі. Якщо до емітерного резистора підключити джерело негативної напруги, то вхідний сигнал може бути й негативним.

Вхідний імпеданс більший, ніж вихідний. Із цього випливає, що джерело вхідного сигналу буде віддавати меншу потужність, якщо навантаження підключити до нього не безпосередньо, а через емітерний повторювач. Тому, джерело, що має значний внутрішній імпеданс, може через повторювач працювати на навантаження, яке має порівнянний, або навіть більш низький імпеданс без втрати амплітуди сигналу. Таким чином, емітерний повторювач забезпечує посилення струму, хоча й не дає посилення напруги. Він також забезпечує посилення потужності.

Якщо на емітерний повторювач повинен надходити сигнал з попереднього каскаду схеми, то найкраще підключати його безпосередньо до виходу попереднього каскаду (рис. 1.5) [2].

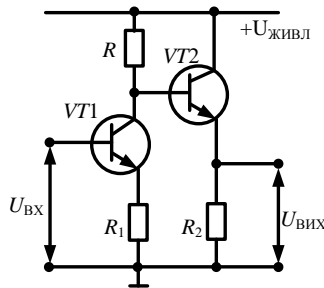


Рисунок 1.5 – Схема підключення емітерного повторювача до попереднього каскаду посилення

Оскільки сигнал на колекторі транзистора $VT1$ змінюється в межах діапазону, обмеженого значеннями напруги джерела живлення, то потенціал бази транзистора $VT2$ завжди знаходиться між напругою $U_{живл}$ і потенціалом землі, і отже, $VT2$ перебуває в активній області. При цьому перехід БАЗА-ЕМІТЕР відкритий, а потенціал колектора,

принаймні, на декілька десятих часток вольта більший, ніж потенціал емітера.

У деяких випадках вхід емітерного повторювача й напруга живлення не вдало співвідносяться один з одним, і тоді може виникнути необхідність у ємнісному зв'язку (зв'язок за змінним струмом) із зовнішнім джерелом сигналу. У цьому випадку середня напруга сигналу дорівнює нулю, і безпосередній зв'язок з емітерним повторювачем приводить до того, що сигнал на виході буде змінюватися щодо входу. В емітерному повторювачі (як і в будь-якому транзисторному підсилювачі) необхідно створювати зсув для того, щоб колекторний струм протікав протягом повного періоду сигналу. Простіше всього для цього скористатися подільником напруги (рис 1.6) [2].

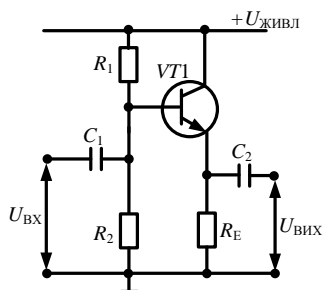


Рисунок 1.6 – Схема емітерного повторювача змінного струму

Резистори R_1 , R_2 обрані так, що під час відсутності вхідного сигналу потенціал бази дорівнює половині різниці між напругою джерела $U_{живл}$ і потенціалом землі, тобто опори R_1 і R_2 однакові. Процес вибору робочої напруги в схемі під час відсутності поданих на її вхід сигналів називається установкою робочої точки або точки спокою. Для цієї схеми, як і для більшості випадків, точку спокою встановлюють так, щоб на виході формувався максимально симетричний сигнал (без обмежень або зрізів). Припустимо, що імпеданс джерела зсуву постійному струму (імпеданс із боку виходу дільника) малий, у порівнянні з імпедансом навантаження (імпеданс постійному струму з боку бази повторювача). Тоді

$$\frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \ll h_{21E} \cdot R_E$$

Із цього співвідношення витікає, що струм, який протікає через подільник напруги, повинен бути більшим, ніж струм бази [2].

1.2.1 Приклад розробки схеми емітерного повторювача.

Як приклад розробимо схему емітерного повторювача для сигналів звукової частоти (від 20 Гц до 20 кГц) Напруга U_{CC} становить +15 В, струм спокою дорівнює 1 мА.

Крок 1. Вибір напруги U_e . Для отримання симетричного сигналу без зрізів необхідно, щоб виконувалася умова ($U_e = 0,5 U_{кк}$, або +7,5 В).

Крок 2. Вибір резистора R_e . Струм спокою повинен становити 1 мА, тому $R_e = 7,5$ кОм.

Крок 3. Вибір резисторів R_1 і R_2 . Напруга U_B – це сума $U_e + 0,6$ В, або 8,1 В. З цього витікає, що опору резисторів R_1 і R_2 ставляться один до одного як 1: 1,17. Ми повинні підібрати резистори R_1 і R_2 так, щоб опір їх паралельного з'єднання становило приблизно 75 кОм або менше (0,1 від твору 7,5 кОм на h_{21e}). Виберемо наступні стандартні значення опорів: $R_1 = 130$ кОм, $R_2 = 150$ кОм.

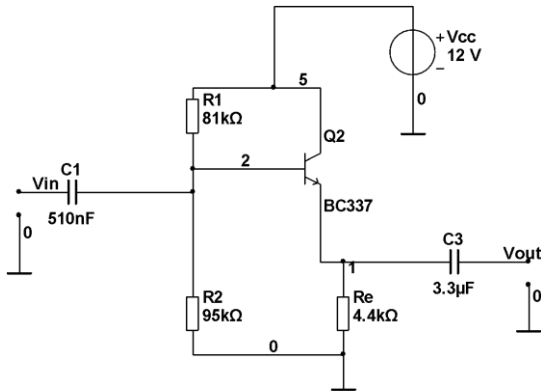


Рисунок 1.7 – Приклад схеми емітерного повторювача

1.3. Варіанти для виконання індивідуального завдання

Варіанти індивідуальних завдань до курсового проектування представлені у табл.1.1

Таблиця 1.1 – Варіанти індивідуальних завдань до курсового проектування

Варіант	Вхідні данні для дільника напруги	Напруга живлення, В	Значення струму покою, мА
1	2	3	4
1	$U_{H1} = 0,01\text{В}$ $U_{H2} = 300\text{В}$ $R_{BX} = 2\text{МОм}$	10	0,8
2	$U_{H1} = 0,1\text{В}$ $U_{H2} = 300\text{В}$ $R_{BX} = 8\text{МОм}$	11	0,9
3	$U_{H1} = 0,1\text{В}$ $U_{H2} = 100\text{В}$ $R_{BX} = 4\text{МОм}$	12	1,0
4	$U_{H1} = 0,03\text{В}$ $U_{H2} = 100\text{В}$ $R_{BX} = 7\text{МОм}$	13	1,1
5	$U_{H1} = 0,3\text{В}$ $U_{H2} = 300\text{В}$ $R_{BX} = 3\text{МОм}$	14	1,2
6	$U_{H1} = 1\text{В}$ $U_{H2} = 600\text{В}$ $R_{BX} = 6\text{МОм}$	15	1,3
7	$U_{H1} = 1\text{В}$ $U_{H2} = 1000\text{В}$ $R_{BX} = 9\text{МОм}$	10	1,4

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4
8	$U_{H1} = 0,01\text{В}$ $U_{H2} = 100\text{В}$ $R_{BX} = 2,5\text{МОм}$	11	1,5
9	$U_{H1} = 3\text{В}$ $U_{H2} = 1000\text{В}$ $R_{BX} = 5,5\text{МОм}$	12	1,6
10	$U_{H1} = 0,1\text{В}$ $U_{H2} = 300\text{В}$ $R_{BX} = 6,5\text{МОм}$	13	1,7
11	$U_{H1} = 0,03\text{В}$ $U_{H2} = 300\text{В}$ $R_{BX} = 1\text{МОм}$	14	0,8
12	$U_{H1} = 0,1\text{В}$ $U_{H2} = 300\text{В}$ $R_{BX} = 2\text{МОм}$	15	0,9
13	$U_{H1} = 1\text{В}$ $U_{H2} = 300\text{В}$ $R_{BX} = 3\text{МОм}$	10	1,0
14	$U_{H1} = 0,03\text{В}$ $U_{H2} = 100\text{В}$ $R_{BX} = 4\text{МОм}$	11	1,1
15	$U_{H1} = 0,3\text{В}$ $U_{H2} = 300\text{В}$ $R_{BX} = 5\text{МОм}$	12	1,2
16	$U_{H1} = 0,1\text{В}$ $U_{H2} = 100\text{В}$ $R_{BX} = 7\text{МОм}$	13	1,3

Закінчення табл. 1.1

1	2	3	4
17	$U_{H1} = 1\text{В}$ $U_{H2} = 1000\text{В}$ $R_{\text{ВХ}} = 10\text{МОм}$	14	1,4
18	$U_{H1} = 0,01\text{В}$ $U_{H2} = 100\text{В}$ $R_{\text{ВХ}} = 9\text{МОм}$	15	1,5
19	$U_{H1} = 30\text{В}$ $U_{H2} = 1000\text{В}$ $R_{\text{ВХ}} = 5,5\text{МОм}$	10	1,6
20	$U_{H1} = 0,3\text{В}$ $U_{H2} = 1000\text{В}$ $R_{\text{ВХ}} = 8\text{МОм}$	11	1,7
21	$U_{H1} = 0.01\text{В}$ $U_{H2} = 300\text{В}$ $R_{\text{ВХ}} = 8,5\text{МОм}$	12	0,8
22	$U_{H1} = 0,1\text{В}$ $U_{H2} = 500\text{В}$ $R_{\text{ВХ}} = 7,5\text{МОм}$	13	0,9

Варіант для виконання індивідуального завдання обирається виходячи з номеру відповідно до журналу академічної групи.

1.4. Зміст завдання для курсового проектування з курсу «Основи електроніки»

У ході курсового проектування необхідно, відповідно до технічного завдання зробити розрахунок подільника напруги для вольтметра постійного струму та провести розрахунок емітерного повторювача.

Для цього необхідно:

- на підставі технічного завдання сформулювати технічні вимоги до пристрою (кількість меж вимірювання, коефіцієнти подільника на кожній з меж, наминали резисторів на кожній з меж подільника, т.і.);
- привести розрахункові співвідношення для визначення параметрів елементів, що входять у пристрій;
- виконати розрахунок елементів і сформулювати вимоги до їхньої точності й стабільності (тобто вибрати тип резисторів і номінальні значення);
- виконати аналіз джерел похибок пристрою й провести їх розрахунок, виходячи з обраних резисторів із стандартного ряду;
- перевірити методом комп'ютерного моделювання відповідність розробленого пристрою вимогам технічного завдання, привести результати моделювання;
- виконати розрахунок емітерного повторювача;
- у записці привести схему й перелік елементів, зробити висновки про отримані результати.

Обсяг пояснювальної записки 12-15 стор. формату А4. Оформлення відповідно до вимог ЄСКД. Набір тексту шрифтом Times New Roman, розмір шрифту 14 пт., інтервал полуторний. Текстовий редактор Word. Схеми й малюнки виконувати в Multisim та Visio.

2. КУРСОВЕ ПРОЕКТУВАННЯ З КУРСУ «АНАЛОГОВА СХЕМОТЕХНІКА»

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ

2.1. Бюджет похибок вимірювальних підсилювачів

Похибки вимірювальних підсилювачів можна розділити на мультиплікативні (абсолютне значення пропорційне вхідному сигналу) і адитивні (абсолютне значення якої не залежить від вхідного сигналу). Мультиплікативні похибки характеризуються відносним значенням, а адитивні – зведеним. Межа відносної основної припустимої похибки (у відсотках) може бути визначена за формулою

$$\delta = \Delta/x = \left[c + d \left(|x_H/x| - 1 \right) \right],$$

де x_H – номінальне значення величини;

$$c = 100 \left(b + a/|x_H| \right),$$

$$d = 100a/|x_H|,$$

де a і b – позитивні числа, що не залежні від x і що визначають абсолютну основну припустиму похибку

$$\Delta = \pm(a + bx).$$

Значення c і d вибирають з ряду $1 \cdot 10n; 1,5 \cdot 10n; 2 \cdot 10n; 2,5 \cdot 10n; 4 \cdot 10n; 5 \cdot 10n$ ($n = 1, 0, -1, -2$ і т. і.).

Таким чином, перш ніж приступати до розрахунку, слід, виходячи із загальних вимог до точності всього пристрою, виділити складову похибки, що вноситься проєктованим підсилювачем і задати значення c і d (наприклад: $0,2 / 0,1$). З рівняння для відносної похибки випливає, що у разі широкого динамічного діапазону вхідного сигналу особливу увагу слід приділяти зменшенню адитивної складової похибки.

Розглянемо основні джерела адитивної і мультиплікативної складових похибки пристроїв на операційних підсилювачах.

Мультиплікативна похибка обумовлена, в основному, чотирма чинниками:

- зміною коефіцієнта посилення операційного підсилювача (ОП) під дією температури, напруги живлення, механічних дій, за рахунок старіння а також відхиленням дійсного значення коефіцієнта посилення від номінального, наведеного в довідниках (зазвичай, окрім типового значення, указують також мінімальне і максимальне);

- відхиленням від розрахункових значень елементів, які визначають коефіцієнт посилення підсилювача із зворотним зв'язком;

- спрощенням моделі підсилювача за рахунок знехтування впливом вхідного і вихідного опорів підсилювача, опору джерела сигналу і опору навантаження.

- залежністю коефіцієнта посилення від частоти, для підсилювачів змінного струму

Як відомо вплив коефіцієнта посилення ОП на коефіцієнт посилення підсилювача з негативним зворотним зв'язком ослаблений в $1 + \beta K_{\text{ОП}} \gg 1$ разів, де β коефіцієнт зворотного зв'язку. Коефіцієнт посилення підсилювача з негативним зворотним зв'язком $K_U \approx 1/\beta$, тобто для підсилювача з коефіцієнтом посилення $K_U = 100$, побудованого на ОП з $K_{\text{ОП}} = 106$, значення βK_U складе 104, а відносна похибка коефіцієнта посилення підсилювача, навіть при 50 % відхиленні $K_{\text{ОП}}$ від номінального, складе 0,005 %.

Не дивлячись на те, що ця похибка може бути скоректована при початковому налаштуванні підсилювача, для прецизійних підсилювачів її необхідно враховувати оскільки коефіцієнт посилення ОП може змінювати своє значення в часі (старіння), при зміні температури, під дією ударів, вібрацій, короткочасних перевантажень, залишкових явищ від циклічних змін температури, при заміні ОП під час ремонту.

При роботі в широкому частотному діапазоні слід враховувати залежність $K_{\text{ОП}}$ від частоти.

Модуль коефіцієнта передачі повністю скоректованого ОП на частоті ω може бути визначений за формулою

$$K_{\text{ОП}}(f) = \frac{K_0}{\sqrt{1 + \frac{f^2}{f_0^2}}}, \quad (2.1)$$

де K_0 – коефіцієнт посилення ОП на постійному струмі, а f_0 визначається або за АЧХ ОП, або виходячи з коефіцієнта посилення ОП на постійному струмі і частоти одиничного посилення f_1 ОП, тобто

$$f_0 = \frac{f_1}{K_0}. \quad (2.2)$$

Для того щоб визначити частотний діапазон, в якому фактичний коефіцієнт посилення КП підсилювача із зворотним зв'язком відрізняється від свого розрахункового значення не більше ніж на δ_f %, слід визначити частоту зрізу підсилювача із зворотним зв'язком як $f_0 = f_1 / K_{\text{П}}$. На цій частоті похибка підсилювача складе 30 %. Потім, визначаючи

відносну частотну похибку як $\delta_f = \frac{K - K_f}{K}$ і підставивши сюди вираз 2.1, отримаємо

$$f = f_0 \sqrt{2\delta_f}. \quad (2.3)$$

Частотна складова похибки на максимальній частоті сигналу може бути визначена за формулою

$$\delta_f = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{f_{\text{max}}^2}{f_0^2}}}. \quad (2.4)$$

Так, для операційного підсилювача з $K_{\text{П}} = 100$, побудованого на ОП з повною корекцією, що забезпечує частоту одиничного посилення $f_1 = 5$ МГц, отримаємо $f_0 = 50$ кГц, а максимальна частота, на якій сигнал посилюватиметься в 100 разів з похибкою $\delta_f = 0,1$ % не перевищуватиме 2,2 кГц.

Точність різних пристроїв на ОП істотно залежить від точності і стабільності елементів (резисторів, конденсаторів) зовнішніх кіл, які визначають коефіцієнт перетворення.

У схемі існують елементи, для яких точність їх завдання, здавалося б, не відіграє істотної ролі. Проте, навіть якщо прецизійність прямо не потрібна, точність елементів може дати істотний ефект, наприклад, в придушенні синфазних перешкод. Крім того, багато розрахункових формул справедливі при виконанні певних співвідношень між значеннями елементів зовнішніх кіл і їх також слід вибирати з певною точністю.

Елементи зазвичай специфіковані щодо точності, яка, як правило, визначає також температурну і часову залежність їх параметрів. Можна з великої кількості 20%-вих резисторів відібрати деяку кількість елементів, опір яких відрізняється від номінального значення не більше ніж на 1 %. Проте у елементів з кращою початковою точністю, як правило, решта параметрів також краща.

Не можна відбирати для роботи в прецизійній схемі елементи з потрібним значенням параметра, якщо цей тип елемента належить до класу з гіршими характеристиками, оскільки часова і температурна стабільність таких елементів відповідатимуть значенням для даного класу.

Елементи, що випускаються в даний час, мають допуски у відсотках від $\pm 0,001$ до ± 30 .

Вхідний опір підсилювача утворює подільник напруги з опором джерела сигналу, тому коефіцієнт посилення в порівнянні з розрахунковим значенням знижується. Найчастіше це не складає проблеми, оскільки вхідний опір ОП достатньо великий, проте деякі схемні рішення мають вхідний опір, що сумірний з опором джерела сигналу і його вплив необхідно враховувати.

Вихідний опір підсилювача збільшується із зростанням частоти і може зробити помітний вплив на коефіцієнт посилення, оскільки, з одного боку, він складається з опором зворотного зв'язку, а з іншого, утворює подільник напруги з опором навантаження.

Адитивні похибки схем на ОП обумовлені наявністю у реальному операційному підсилювача напруги зсуву нуля, часового і температурного дрейфів зсуву, вхідного струму зсуву, вхідного струму зрушення,

проходженням синфазного сигналу і впливом джерела живлення. При посиленні малих сигналів велике значення може мати і напруга шумів.

Визначимо похибку, обумовлену зсувом нуля підсилювача. Зсув нуля ОП виявляється в наявності постійної напруги на виході підсилювача за відсутності вхідної напруги.

Зсув нуля є результатом дії трьох чинників: власне напруги зсуву $U_{ЗС}$, вхідного струму підсилювача $I_{ВХ}$ і різниці вхідних струмів $\Delta I_{ВХ}$.

Величина $U_{ЗС}$ визначається в основному розкидом напруги емітерно-базових переходів вхідних транзисторів диференціального каскаду в підсилювачах на біполярних транзисторах або напруги затвор-витік в ОП з польовими транзисторами на входах. Ця величина складає 0,1–5 мВ для підсилювачів загального призначення з біполярними транзисторами і 0,5 – 20 мВ з польовими транзисторами на вході.

Шляхом лазерної підгонки вдається зменшити зсув нуля до 10 мкВ (ОР27, ОР177, МАХ400М) у першого типу підсилювачів і до 100 мкВ (ОРА627В) у другого.

Подальше зниження зсуву нуля досягається застосуванням схем автоматичної компенсації зсуву нуля. Наприклад, ОП з перериванням мають типову напругу зсуву нуля менше 1 мкВ (ICL7650S, МАХ430).

Знизити $U_{ЗС}$ можна підстроюванням зовнішнім резистором, для підключення якого деякі операційні підсилювачі (наприклад, 140УД7, 140УД8) мають спеціальні виводи.

Постійні вхідні струми, протікаючи по резисторах зовнішніх кіл, підключених до входів ОП і по опорах джерел сигналів, створюють різницю падінь напруги ΔU . Для зменшення цієї похибки слід вирівнювати значення еквівалентних опорів резисторів, підключених до інвертувального і неінвертувального входів і, по можливості, зменшувати їх номінальні значення.

Для зменшення похибки від синфазного сигналу слід використовувати ОП з максимальним значенням $K_{ОСС}$ і схемні рішення, що забезпечують мінімум коефіцієнта передачі синфазного сигналу.

Якщо підсилювач працює з сигналами змінного струму, то при визначенні похибки від синфазного сигналу слід враховувати залежність $K_{ОСС}$ від частоти. Ця залежність аналогічна залежності $K_{ОП}$ від частоти;

як правило, АЧХ для $K_{\text{ОСС}}$ приводиться в довідкових матеріалах фірм виробників.

Облік зсуву, викликаного зміною напруги живлення, необхідний при визначенні вимог до джерел живлення схем на ОП. Сюди входять вимоги до стабільності напруги живлення і до пульсацій його напруги.

Вимоги до пульсацій особливо важливі при живленні схеми від імпульсних джерел, що працюють на високій частоті, де коефіцієнт ослаблення впливу живлення $K_{\text{ВЖ}}$ має значно гірші значення, ніж на постійному струмі.

Таким чином, для зменшення похибок зсуву застосовують прецизійні ОП, а також спеціальні схемні рішення (підсилювачі з періодичною корекцією зсуву, з додатковим бездрейфовим підсилювачем, з температурною компенсацією, схеми з покращеним значенням коефіцієнта ослаблення синфазної складової, з компенсацією вхідних струмів).

Окрім цього істотне значення має правильний вибір номінальних значень елементів схеми і вимог до їх точності, часової і температурної стабільності.

2.2. Послідовність виконання розрахунків

Аналіз джерел адитивної похибки

Адитивні похибки схем на ОП обумовлені наявністю у реальних операційних підсилювачів напруги зсуву нуля, часовим і температурним дрейфом зміщення, вхідним струмом зміщення, вхідним струмом зсуву, проходженням синфазного сигналу і впливом джерела живлення. При посиленні малих сигналів велике значення може мати і напруга шумів.

Часовий дрейф напруги і вплив джерела живлення виділяються в додаткові похибки. Синфазних сигнал може бути відсутнім, а напругою шумів можна знехтувати, якщо сигнали досить великі.

Тоді вираз для адитивної складової похибки має вигляд

$$\gamma_{\text{ад}} = \gamma_{U_{\text{зс}}} + \gamma_{i_{\text{вх}}} + \gamma_{\Delta i_{\text{вх}}} + \gamma_{\text{др}}, \quad (2.5)$$

де $\gamma_{U_{3c}}$ – похибка, обумовлена напругою зміщення операційного підсилювача

$$\gamma_{U_{3c}} = \frac{U_{3c} \cdot (K+1)}{U_{Bx} \cdot K}, \quad (2.6)$$

K – статичний коефіцієнт підсилення ОП;

$\gamma_{i_{Bx}}$ – похибка від вхідних струмів ОП, викликана різницею значень опорів, підключених до інвертувального і неінвертувального входів

$$\gamma_{i_{Bx}} = \frac{i_{Bx} \cdot \Delta R_e \cdot (K+1)}{U_{Bx} \cdot K}, \quad (2.7)$$

$\gamma_{\Delta i_{Bx}}$ – похибка, викликана різницею вхідних струмів

$$\gamma_{\Delta i_{Bx}} = \frac{\Delta i_{Bx} \cdot R_e \cdot (K+1)}{U_{Bx} \cdot K}, \quad (2.8)$$

ΔR_e – абсолютне відхилення еквівалентного опору джерела сигналу;

$\gamma_{др}$ – похибка, викликана температурним дрейфом напруги зсуву

$$\gamma_{др} = \frac{\partial U_{3c}}{\partial T} \cdot \frac{\Delta T \cdot (K+1)}{U_{Bx} \cdot K} \quad (2.9)$$

ΔT – абсолютне відхилення температури.

Аналіз джерел мультиплікативної похибки

Мультиплікативна складова похибки обумовлена початковим розкидом і нестабільністю коефіцієнта посилення ОП, впливом опору джерела сигналу, неточністю резисторів, що визначають коефіцієнт посилення і частотною залежністю коефіцієнта посилення ОП.

Початковим розкидом і нестабільністю коефіцієнта посилення ОП можна знехтувати, якщо в схемі використовуються повторювачі сигналу, а для них дана похибка практично відсутня.

Частотна залежність коефіцієнта посилення ОП не впливає на похибку, якщо схема працює на постійному струмі.

Вплив опору джерела сигналу можна істотно зменшити, підбираючи досить великі значення опорів, що підключаються до входу.

Похибка від початкового розкиду і нестабільності коефіцієнту посилення ОП з внутрішньою корекцією АЧХ, заснованою на ефекті Міллера, можна визначити виразом

$$\delta_K^0 = \frac{\delta K}{1 + \beta K_0} \quad (2.10)$$

де K_0 – номінальне паспортне значення коефіцієнта посилення;

$\beta = \frac{1}{K_{33}}$ – коефіцієнт зворотного зв'язку;

$$K_{33} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}}.$$

При нормальній температурі типове значення коефіцієнта посилення дорівнює $12 \cdot 10^6$, а мінімальне – $5 \cdot 10^6$. Беручи в якості розрахункового значення середнє між типовими і мінімальним отримаємо $K_{0 \text{ CP}} = 8,5 \cdot 10^6$, а його абсолютні зміни становлять $\Delta K = 3,5 \cdot 10^6$, тобто зміни по відношенню до $K_{0 \text{ CP}}$ становлять 42%. $\delta K = 42\%$.

Похибка від неточності виготовлення резисторів R_1 і R_2 при однаковій точності резисторів (що забезпечує рівність відносних температурних і часових нестабільностей) можна визначити для схеми інвертувального підсилювача як

$$\delta_K^R = \sqrt{(\delta_{R1}^2 + \delta_{R2}^2)} = 1,41 \cdot \delta R. \quad (2.11)$$

Похибка від нестабільності опору джерела сигналу

$$\delta_K^C = \frac{\delta_{Rc}}{1 + \frac{R_{\text{вх}}}{R_c}}. \quad (2.12)$$

Частотна похибка, зумовлена зменшенням коефіцієнту посилення зі зростанням частоти, при однополюсній АЧХ ОП з частотою полюсу ω_0 , може бути визначена з виразу

$$\delta_K^f = \frac{\sqrt{(1+v^2)} - 1}{K_{min} \cdot \beta + \sqrt{(1+v^2)}}, \quad (2.13)$$

де ω_m – максимальна робоча частота підсилювача, $v = \frac{\omega_m}{\omega_0}$,

β – коефіцієнт негативного зворотного зв'язку, який може бути знайдений за спрощеною формулою

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Сумарна мультиплікативна похибка може бути визначена шляхом геометричного підсумовування всіх її складових, тобто

$$\delta_M = \sqrt{\left((\delta_K^0)^2 + (\delta_K^R)^2 + (\delta_K^C)^2 + (\delta_K^f)^2 \right)}. \quad (2.14)$$

Аналіз джерел додаткових похибок

Додаткову похибку, яка не повинна перевищувати основну, складають: часовий дрейф напруги зсуву і вплив джерела живлення.

Похибка від часового дрейфу:

$$\delta_B = \frac{\partial U_{зс}}{\partial t} \cdot \frac{(K+1) \cdot t}{K} \quad (2.15)$$

де $\frac{\partial U_{зс}}{\partial t}$ – швидкість часового дрейфу напруги зсуву ОП,

t – час роботи ОП без підстроювання нуля.

Визначимо максимальний час роботи підсилювача без підстроювання нуля. Для цього скористаємося виразом для похибки, обумовле-

ної часовим дрейфом і значенням швидкості тимчасового дрейфу ОП

$$\frac{\partial U_{зс}}{\partial t} = 0,2 \text{ мкВ/місяц.}$$

$$t \leq \frac{\delta_v \cdot K_{оп}}{(K_{оп} + 1) \cdot \frac{\partial U_{зс}}{\partial t}}.$$

Похибка зміщення від зміни напруги живлення

$$\delta_{живл} = \frac{U_{живл} \cdot (K_{оп} + 1)}{U_{вх.п} \cdot K_{оп}} \cdot \delta U_{живл} \cdot K_{в.ж}. \quad (12)$$

де $\delta U_{живл}$ – відносна зміна напруги живлення;

$K_{оп}$ – модуль коефіцієнта посилення підсилювача зі зворотним зв'язком

$$(K_{оп} \approx R_2/R_1),$$

де $K_{в.ж}$ – коефіцієнт впливу джерела живлення ОП;

2.3. Варіанти для виконання індивідуального завдання

Варіант для виконання індивідуального завдання обирається виходячи з номеру відповідно до журналу академічної групи.

Варіант 1

Розробити підсилювач для перетворення сигналу з термоелектричного перетворювача температури. В якості перетворювача використовувати хромель-копелеву термопару ТХК з номінальною статичною характеристикою ХК (L). Діапазон вимірювання (0 – 500) °С. Вихідна напруга підсилювача, що відповідає максимальній температурі повинна дорівнювати 2,048 В. Опір термопару разом з проводами і схемою температурної компенсації становить $5 \pm 0,5$ Ом. Наведена похибка перетворення сигналу $\pm 0,2$ %. Діапазон робочих температур підсилювача (10 – 60) °С. Безперервна робота підсилювача без підстроювання нуля 10 год.

Варіант 2

Розробити підсилювач сигналу з тензометричного перетворювача постійного струму фірми "DGcell", призначеного для вимірювання ваги до 1000 кгс. Вихідна напруга підсилювача 2,5 В. Частотний діапазон сигналу (0 – 20) Гц. Похибка мостової схеми 0,03%. Сумарна похибка перетворення деформації $\pm 0,1\%$. Діапазон робочих температур підсилювача (10 – 40) °С. Час безперервної роботи без підстроювання нуля не менше 8 годин.

Варіант 3

Розробити підсилювач сигналу з тензомоста, що живиться змінним струмом частотою 100 Гц. Діапазон вимірюваних деформацій (0 – 1000) о.в.д. Струм живлення моста 10 мА. Все плечі моста активні. Як плечей використані металеві тензорезистори опором $100 \pm 0,5$ Ом. Похибка тензомоста $\pm 0,2\%$. Сумарна приведена похибка перетворення деформації 0,5%. Вихідна напруга підсилювача, відповідне номінальної деформації 1В. Діапазон робочих температур підсилювача (0 – 60) °С.

Варіант 4

Розробити підсилювач для вольтметра змінного струму з межами вимірювання 10, 30, 100, 300 мВ. Діапазон частот 10Гц – 100кГц. Вихідна напруга підсилювача 1В. Вхідний опір не менше 10 МОм. Наведена похибка $\pm 1\%$. Діапазон робочих температур (10 – 40) °С.

Варіант 5

Розробити підсилювач сигналу з диференціального трансформаторного перетворювача переміщень. Діапазон вимірюваних переміщень (0 – 100) мкм. Чутливість перетворювача 0,01% / мкм. Вихідна напруга на напівобмотці – 1В. Частота напруги живлення 1000 Гц. Напруга на виході підсилювача – 2,5 В. Індуктивність обмоток 1мГн, активний опір 10 Ом. Наведена похибка посилення $\pm 0,1\%$. Температура навколишнього середовища (10 – 60) °С.

Варіант 6

Розробити підсилювач для вимірювання температури мідним термометром опору у діапазоні (0 – 100) °С. Опір термометра $10 \pm 0,1$ Ом. Вихідна напруга підсилювача 1В. Наведена похибка перетворення \pm

0,1%. Діапазон зовнішніх температур (10 – 40) °С. Час роботи без підстроювання нуля не менше 12 годин.

Варіант 7

Розробити підсилювач сигналу з електромагнітного витратоміра. Напряга перетворювача, відповідне номінальному витраті 10 мВ. Опір між електродами становить 50 ± 10 кОм. Частота сигналу 16 Гц. Вихідна напруга підсилювача 2,048 В. Наведена похибка посилення $\pm 0,1\%$. Діапазон робочих температур (10 – 60) °С.

Варіант 8

Розробити підсилювач для вимірювача постійного струму в електrolітичному осередку. Номінальне значення струму 100 мкА, опір навантаження 50 ± 10 кОм. Навантаження заземлене. Вихідна напруга підсилювача 1В. Наведена похибка вимірювання струму без урахування наступних перетворень не більше $\pm 0,2\%$. Температура навколишнього середовища (10 – 40) °С.

Варіант 9

Розробити підсилювач магнітометра з перетворювачем Холла. Вихідний сигнал перетворювача 10 мВ. Внутрішній опір перетворювача 500 ± 10 Ом. Частота сигналу 1000 Гц. Вихідна напруга підсилювача 2,5 В. Похибка перетворювача Холла $\pm 0,5\%$. Сумарна наведена похибка $\pm 1\%$. Температура навколишнього середовища (10 – 40) °С.

Варіант 10

Розробити джерело постійного струму для заземленого навантаження, що керований напругою, який забезпечує живлення перетворювача Холла. Вхідний опорний напрузі 1,25 В повинен відповідати струм 10 мА на навантаженні 500 Ом. При зміні опору навантаження на 20 % зміна струму не повинно перевищувати $\pm 0,2\%$. Температура навколишнього середовища (10 – 40) °С.

Варіант 11

Розробити підсилювач сигналів електроенцефалографу. Вхідна напруга 100 мкВ. Опір джерела сигналу 20 ± 2 кОм. Частотний діапазон сигналу 1 Гц – 1 кГц. Вихідна напруга підсилювача 1 В. Похибка посилення $\pm 1\%$. Діапазон робочих температур (20 – 40) °С.

Варіант 12

Розробити підсилювач сигналів для аналізатора спектра вібрацій. Вхідна напруга 100 мВ знімається з підсилювача заряду. Діапазон частот сигналу 10Гц – 10кГц. Вихідна напруга 2,5 В. Наведена похибка посилення $\pm 1\%$. Діапазон робочих температур (20 – 40) °С.

Варіант 13

Розробити підсилювач для вимірювання температури платиновим термометром опору в діапазоні (0 – 200) °С. Опір термометра 50 ± 1 Ом. Вихідна напруга підсилювача 2 В. Наведена похибка перетворення $\pm 0,2\%$. Діапазон зовнішніх температур (10 – 60) °С. Час роботи без підстроювання нуля не менше 12 годин.

Варіант 14

Розробити підсилювач для перетворення сигналу з термоелектричного перетворювача температури. В якості перетворювача використовувати платино-платинородієву термопару. Діапазон вимірювання (0 – 1000) °С. Вихідна напруга підсилювача, що відповідає максимальній температурі 2 В. Опір термопарі разом з сполучними проводами і схемою температурної компенсації становить $5 \pm 0,5$ Ом. Наведена похибка перетворення $\pm 1\%$. Похибка перетворення термопарі $\pm 0,5\%$. Діапазон робочих температур підсилювача (20 – 40) °С. Час безперервної роботи підсилювача без підстроювання нуля не менше 24 годин.

Варіант 15

Розробити підсилювач сигналу з мостового тензометричного перетворювача деформацій в діапазоні від 0 до 2000 о.в.д. В якості первинних перетворювачів деформації використані 4 металевих тензорезистори опором $50 \pm 0,5$ Ом. Вихідна напруга підсилювача 1 В. Частотний діапазон сигналу (0 – 10) Гц. Похибка мостової схеми $\pm 0,1\%$. Сумарна похибка перетворення деформації $\pm 0,2\%$. Діапазон робочих температур підсилювача (10 – 60) °С. Час безперервної роботи без підстроювання нуля не менше 12 годин.

Варіант 16

Розробити підсилювач магнітометру з перетворювачем Холла. Вихідний сигнал перетворювача 5 мВ. Внутрішній опір перетворювача

1000 ± 10 Ом. Частота сигналу (0 – 100) Гц. Вихідна напруга підсилювача 2 В. Похибка перетворювача Холла ± 0,5 %. Сумарна наведена похибка ± 1 %. Температура навколишнього середовища (10 – 40) °С.

Варіант 17

Розробити підсилювач для вимірювання температури мідним термометром опору в діапазоні (0 – 100) °С. Опір термометра 10 ± 0,1 Ом. Вихідна напруга підсилювача 1 В. Наведена похибка перетворення ± 0,1 %. Діапазон зовнішніх температур (10 – 40) °С. Час роботи без підстроювання нуля не менше 10 годин.

Варіант 18

Розробити підсилювач сигналу з диференціального трансформаторного перетворювача переміщень. Діапазон вимірюваних переміщень (0 – 500) мкм. Чутливість перетворювача 0,01% / мкм. Вихідна напруга на напівобмотці 2 В. Частота напруги живлення 100 Гц. Напруга на виході підсилювача 2,5 В. Індуктивність обмоток 5 мГн, активний опір 30 Ом. Наведена похибка посилення ± 0,1 %. Температура навколишнього середовища (10 – 60) °С.

Варіант 19

Розробити підсилювач для вимірювання температури напівпровідниковим термометром опору в діапазоні (0 – 115) °С. Опір термометра 50 ± 0,1 Ом. Вихідна напруга підсилювача 1 В. Наведена похибка перетворення ± 0,2 %. Діапазон зовнішніх температур (10 – 40) °С. Час роботи без підстроювання нуля не менше 10 годин.

Варіант 20

Розробити підсилювач для перетворення сигналу з термоелектричного перетворювача температури. В якості перетворювача використовувати термопару хромель-алюмель (ТХА). Діапазон вимірювання (0 – 800) °С. Вихідна напруга підсилювача, що відповідає максимальній температурі 1 В. Опір термопарі разом з сполучними проводами і схемою температурної компенсації становить 10 ± 0,5 Ом. Наведена похибка перетворення ± 1 %. Похибка перетворення термопарі ± 0,5 %. Діапазон робочих температур підсилювача (20 – 40) °С. Час безперервної роботи підсилювача без підстроювання нуля не менше 24 годин.

2.4. Зміст завдання для курсового проектування з курсу «Аналогова схемотехніка»

У ході курсового проектування необхідно, відповідно до технічного завдання розробити пристрій на операційних підсилювачах, який виконує перетворення вимірювальних сигналів.

Для цього слід:

- на підставі технічного завдання сформулювати технічні вимоги до пристрою (вхідний опір, смуга пропускання, посилення, ослаблення синфазного сигналу і т.і.);
- провести аналіз варіантів вирішення завдання і дати обґрунтування варіанта, що забезпечує виконання вимог ТЗ;
- виконати аналіз джерел похибок пристрою і зробити розподіл похибок за складовими;
- привести розрахункові співвідношення для визначення параметрів елементів, що входять у пристрій;
- виходячи з значень складових похибки, визначити вимоги до параметрів операційного підсилювача (ОП) і навісним елементам;
- виконати розрахунок елементів і сформулювати вимоги до їх точності і стабільності (тобто вибрати тип резисторів і номінальні значення);
- у разі неможливості забезпечення необхідних параметрів, виділити елементи настройки;
- перевірити методом комп'ютерного моделювання відповідність розробленого пристрою вимогам технічного завдання, привести результати моделювання;
- у записці привести схему і перелік елементів;
- зробити висновки про отримані результати.

Обсяг пояснювальної записки 15 – 20 сторінок формату А4. Для усіх 20 мм. Оформлення відповідно до вимог ЄСКД. Набір тексту шрифтом Times New Roman, розмір шрифту 14 пт., Інтервал полуторний. Текстовий редактор Word. Схеми і малюнки виконувати в Multisim або Visio.

ВИМОГИ ДО ЗНАНЬ ТА УМІНЬ СТУДЕНТІВ

В результаті виконання курсового проектування студенти повинні:

- знати фізичні основи роботи, характеристики, параметри і еквівалентні схеми електронних пристроїв на основі операційних підсилювачів, їх призначення, класифікацію, маркування, основні конструкторсько-технологічні та експлуатаційні параметри, типи, схемотехнічні рішення електронних пристроїв;

- вміти використовувати електронні прилади для побудови електронних пристроїв, виконувати їх проектну компоновку;

- бути ознайомленим з новітніми досягненнями в галузі виробництва і використання мікроелектронних елементів;

- освоїти програму Multisim і її використання для створення і аналізу принципових електричних схем різних пристроїв.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Чинков В. М. Основи метрології та вимірювальної техніки / В.М. Чинков. – Харків : НТУ «ХП», 2005. – 524 с.
2. Давиденко О. П. Електроніка у вимірювальній техніці / О. П. Давиденко, І. В. Григоренко, Р. П. Мигушенко. – Харків : Підручник НТУ «ХП». – 2015. – 428 с.
3. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники: Учеб. пособие для вузов. / И. П. Степаненко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 488 с.
4. Шука А .А. Электроника: учеб. пособ. / под ред. проф. А. С. Сигова. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 800 с.
5. Хоровиц П. Искусство схемотехники: В 3-х томах: Т.3. Пер. с англ. – 4-е изд. перераб и доп. / Хоровиц П., Хилл У. – М: Мир, 1993. – 367 с.
6. Москатов Е. А. Электронная техника / Е. А. Москатов. – Таганрог, 2004. – 121 с.
7. Попов Э.Г. Основы аналоговой техники. Учеб. пособие для студ. радиотехнических спец. – Мн.: БГУИР, 2006 – 276 с.
8. Гусев В. Г. Электроника и микропроцессорная техника : учеб. пособ. для вузов / В. Г. Гусев. – 3-е изд., переработано и доп. – М. : Высш. шк., 2005.
9. Лачин В. И. Электроника : учеб. пособ. 4-е изд. / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. – Ростов н/Д: Феникс, 2004.
10. Кардашев Г. А. Виртуальная электроника. Компьютерное моделирование аналоговых устройств / Г. А. Кардашев. - М. : Горячая линия - Телеком, 2002.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
1. Курсове проектування з курсу «основи електроніки».....	5
1.1. Масштабні вимірювальні перетворювачі.....	5
1.2. Емітерний повторювач.....	8
1.3. Варіанти для виконання індивідуального завдання.....	12
1.4. Зміст завдання для курсового проектування з курсу «Основи електроніки».....	14
2. Курсове проектування з курсу «Аналогова схемотехніка».....	16
2.1. Бюджет похибок вимірювальних підсилювачів.....	16
2.2. Послідовність виконання розрахунків.....	21
2.3. Варіанти для виконання індивідуального завдання.....	25
2.4. Зміст завдання для курсового проектування з курсу «Аналогова схемотехніка».....	29
Список літератури.....	32
Зміст.....	33

Навчальне видання

**Методичні вказівки до курсового проектування з курсів
«Основи електроніки» та «Аналогова схемотехніка»
для студентів спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-
вимірювальна техніка»**

Укладачі: ГРИГОРЕНКО Ігор Володимирович
ТРОХІН Михайло Вікторович

Відповідальний за випуск С.І. Кондрашов

В авторській редакції

План 2019 р., поз. 226

Підп. до друку 21.05.2019 р. Формат 60×84 ¹/₁₆. Папір офісний.
Riso-друк. Гарнітура Times. Ум. друк. арк. 2,0. Наклад 50 прим.
Зам. № _____. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ»

Свідоцтво про державну реєстрацію Д № 5478 від 21.08.2017 р.
м. Харків, вул. Кирпичова, 2.