

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»
Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни
“Схемотехніка аналогової та цифрової радіоелектронної апаратури - 1”
для студентів напряму підготовки
6.050902 «Радіоелектронні апарати»

Рекомендовано
Вченою радою ФЕЛ НТУУ «КПІ»
Протокол № __/__ від __.__.____ р.

Київ
2016

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Схемотехніка аналогової та цифрової радіоелектронної апаратури - 1” для студентів напрямку підготовки 6.050902 «Радіоелектронні апарати» [Текст] / Уклад.: Є. В. Короткий. – 2015 р. – __ с.

Електронне навчальне видання

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни
“Схемотехніка аналогової та цифрової радіоелектронної апаратури - 1”
для студентів напрямку підготовки 6.050902 «Радіоелектронні апарати».

Укладачі: Короткий Євген Васильович, канд. техн. наук

Відповідальний редактор:

Рецензент:

Редакція викладача

ЗМІСТ

1. Загальні положення	4
2. Лабораторна робота №1. Дослідження суматора напруг на резисторі та RC фільтрів	7
3. Лабораторна робота №2. Дослідження ВАХ діоду, одно- та двохполуперіодного випрямляча, подвоювача напруги	13
4. Лабораторна робота №3. Дослідження підсилювачів на польовому транзисторі	21
5. Лабораторна робота №4. Дослідження підсилювачів на біполярному транзисторі.....	39

1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Відповідно до положення про організацію навчального процесу в «КПІ ім. Ігоря Сікорського», **лабораторне заняття** – вид навчального заняття, на якому студент під керівництвом викладача проводить натурні або імітаційні експерименти чи дослідження з метою практичного підтвердження окремих теоретичних положень, набуває практичних навичок роботи з лабораторним обладнанням, оснащенням, обчислювальною технікою, вимірювальною апаратурою, оволодіває методикою експериментальних досліджень в конкретній предметній галузі та обробки отриманих результатів.

Перелік тем лабораторних занять визначається робочою навчальною програмою дисципліни.

Лабораторне заняття включає проведення контролю підготовленості студентів до виконання конкретної лабораторної роботи, виконання досліджень, оформлення індивідуального звіту про виконану роботу та його захист перед викладачем. Виконання лабораторної роботи оцінюється викладачем.

Підсумкова оцінка ставиться в журналі обліку виконання лабораторних робіт і враховується при виставленні семестрової підсумкової оцінки (рейтингу) з даної дисципліни. Наявність позитивних оцінок, одержаних студентом за всі лабораторні роботи, передбачені робочою навчальною програмою, є необхідною умовою його допуску до семестрового контролю по даній дисципліні.

Дисципліна «Схемотехніка аналогової та цифрової радіоелектронної апаратури - 1» належить до циклу професійної та практичної підготовки нормативної частини навчального плану.

Предметом даної навчальної дисципліни є методи методів аналізу та синтезу аналогових схем.

Дисципліна викладається в 4-му семестрі навчання бакалаврів. До забезпечуючих дисциплін відносяться “Метрологія радіоелектронної апаратури”, “Основи радіоелектроніки, моделювання радіоелектронних кіл”, “Матеріалознавство радіоелектронних апаратів” та “Прикладна електродинаміка”. У свою чергу даний кредитний модуль забезпечує необхідними

знаннями студентів для вивчення таких дисциплін, як “Обчислювальні та мікропроцесорні засоби в радіоелектронній апаратурі”, “Вимірювальні перетворювачі фізичних величин”, “Електронно-обчислювальні пристрої та системи”, “Периферійні пристрої” та “Конструювання електронних засобів”.

Метою навчальної дисципліни є підготовка студентів у галузі розробки та застосування методів аналізу і синтезу аналогових схем з використанням вимірювальної техніки та необхідних програмно-апаратних засобів.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти після засвоєння навчальної дисципліни мають продемонструвати такі результати навчання:

знати:

- характеристики аналогових схем;
- принципи роботи компонентів аналогових схем;
- моделі компонентів аналогових схем;
- методи розрахунку характеристик аналогових схем;
- методи моделювання аналогових схем;
- базові схемотехнічні рішення для побудови більш складних аналогових схем;
- принципи побудови складних аналогових схем з заданими характеристиками.

уміти:

- обирати елементну базу для створення аналогових схем з заданими характеристиками;
- застосовувати вивчені методи розрахунку характеристик аналогових схем;
- створювати аналогові схеми з заданими характеристиками відповідно до технічного завдання;
- будувати адекватні моделі аналогових схем;
- моделювати функціонування аналогових схем за допомогою сучасного програмного забезпечення (LTSpice);
- користуватись вимірювальним обладнанням для оцінки характеристик аналогових систем;
- складати розроблені аналогові схеми з дискретних компонентів, з використанням аналогових модулів ASLK-PRO;

мати досвід:

- створення аналогових схем з заданими характеристиками;
- розрахунку характеристик аналогових схем;
- створення моделей аналогових схем;
- створення та моделювання аналогових схем в LTSpice;
- реалізації аналогових схем з заданими характеристиками на базі дискретних компонентів та аналогового модуля ASLK-PRO.

Лабораторний практикум по дисципліні «Схемотехніка аналогової та цифрової радіoeлектронної апаратури - 1» включає 4 роботи:

Лабораторна робота №1. Дослідження суматора напруг на резисторі та RC фільтрів;

Лабораторна робота №2. Дослідження ВАХ діоду, одно-та
двохполуперіодного випрямляча, подвоювача напруги;

Лабораторна робота №3. Дослідження підсилювачів на польовому транзисторі;

Лабораторна робота №4. Дослідження підсилювачів на біполярному транзисторі;

Лабораторна робота №1

Тема: “Дослідження суматора напруг на резисторах, RC ланцюжка та RC фільтрів”

1.1. Практичне застосування досліджуваних схем

Суматор напруг на резисторах не є дуже розповсюдженою схемою, але це гарна схема яка має ефектний результат роботи та дозволяє одержати практику користування макетною платою і згадати методи розрахунку електричних кіл з джерелами напруги і резисторами. Суматор напруг можна використовувати у якості найпростішого мікшера для додавання довільних електричних сигналів у вигляді напруг. А можна на базі суматора напруг створити примітивний калькулятор для додавання і віднімання чисел (якщо поставити у відповідність кожному числу певну напругу). Числа на вході можна задавати за допомогою регульованих джерел напруги, а результат зчитувати за допомогою вольтметра.

RC ланцюжки дуже широко використовуються в електроніці, оскільки обумовлюють затримки розповсюдження напруг через схему (напруга змінюється не миттєво, а лише після заряду/розряду ємності, для чого необхідний час, що і обумовлює затримку). Вихід будь якої лінійної схеми можна замінити моделлю у вигляді джерела напруги з послідовно підключеним до нього вихідним опором схеми. Вхід будь якої схеми має вхідну ємність. З'єднувальні провідники на друкованій платі також мають певну ємність. Якщо підключити вихід однієї схеми до входу іншої схеми, одержимо RC ланцюжок і напруга на вході другої схеми буде змінюватись не миттєво, а у міру заряду-розряду вхідної ємності. Зокрема RC ланцюжки визначають затримку розповсюдження сигналу всередині мікросхем і врешті решт максимально допустиму тактову частоту. Також RC ланцюжок можна застосовувати для автоматичного скидання (ресету) цифрових схем (наприклад, мікроконтролерів).

RC фільтри є найпростішим типом фільтрів. А фільтри в електроніці використовуються дуже широко. Наприклад для прибирання з аналогового сигналу шумів та наводок, на вході аналого-цифрового перетворювача.

1.2. Теоретична частина

Принцип роботи суматора напруг розглянутий в [1].

Принцип роботи RC ланцюжка розглянутий в [2, розд.1.13], [3].

Принцип роботи RC фільтрів розглянутий в [2, розд.1.19], [4].

Робота з макетною платою розглянута в [5-6].

11Робота в LTSpice розглянута в [7].

1.3. Завдання на лабораторну роботу

1. Дослідження суматора напруг на резисторах

1.1. Побудувати суматор напруг на 2 входи з резисторів однакових номіналів (рис.1.1).

Для гарного узгодження за напругою та з метою зниження струму, що протікатиме у колі, номінали резисторів необхідно обирати порядку кількох десятків КОм (50-100 КОм);

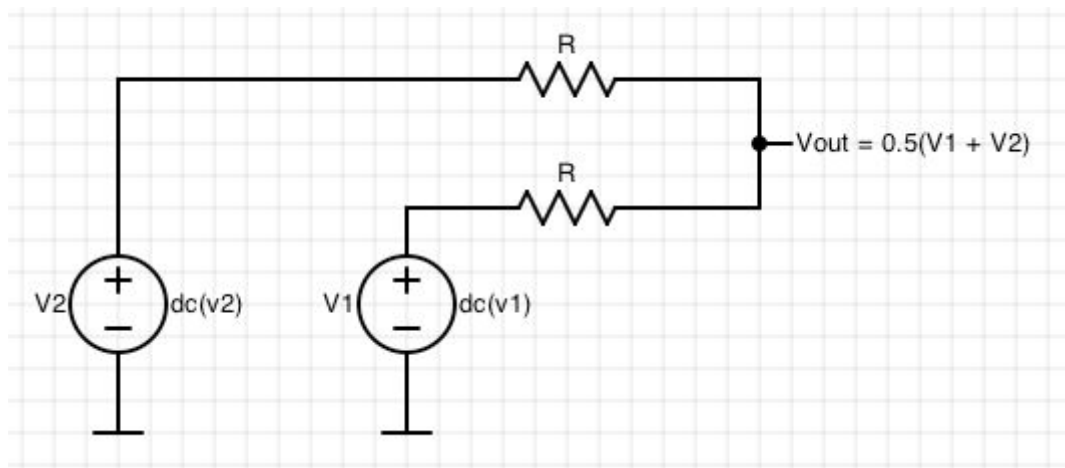


Рис.1.1. Схема суматора напруг на резисторах

1.2. Подати на вхід дві довільні напруги з джерел постійної напруги та за допомогою вольтметра виміряти напругу на виході суматора. Порівняти одержане значення з

теоретичним результатом $U_{вих} = (U_1 + U_2)/2$. Результати вимірювань занести до протоколу.

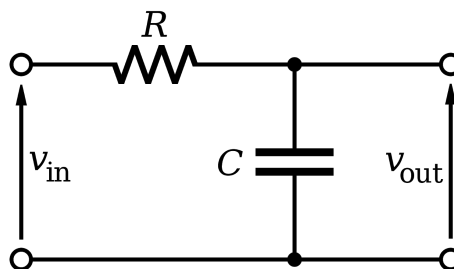
1.3. Про моделювати роботу суматора в LTSpice для тих же вхідних напруг, що були використані при проведенні вимірювань на реальних приладах. Порівняти одержані результати з результатами реальних вимірювань. Результати симуляції (схема, графіки) занести до протоколу.

1.4. Подати на входи суматора два сигнали з генераторів ГЗ-112. Перший сигнал імпульсний (меандр) з частотою 1 КГц, амплітудою 1В. Другий сигнал синусоїдальний з частотою 5 КГц, амплітудою 1В. За допомогою двохпроменевого осцилографа необхідно зафіксувати сигнали на входах суматора (сфотографувати картинку) та сигнал на виході суматора (сфотографувати картинку). При цьому необхідно записати налаштування осцилографа на яких ви проводили вимірювання (В/поділку, час/поділку) та параметри сигналів, що подаються на входи суматора (частота, амплітуда). Результати занести до протоколу.

1.5. Про моделювати роботу суматора в LTSpice для тих же змінних вхідних сигналів, що були використані при проведенні вимірювань на реальних приладах у попередньому завданні. Результати симуляції занести до протоколу. Порівняти сигнал, одержаний шляхом моделювання, з результатами реальних вимірювань.

2. Дослідження RC ланцюжка

2.1. Скласти схему RC ланцюжка для довільних значень ємності і опору (опір резистора можна брати порядку кілоома, ємність конденсатора порядку десятків нанофарад).



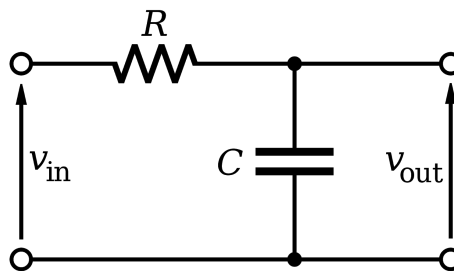
2.2. Розрахувати тривалість заряду та розряду ємності для цього ланцюжка. Результати занести до протоколу.

2.3. Подати на вхід RC ланцюжка імпульсну напругу з генератора ГЗ-112 з амплітудою 1 В та такою частотою, щоб період був в 4-6 разів більший за розраховану тривалість заряду-розряду. На двохпроменевому осцилографі подивитися на вхідний та вихідний сигнали RC ланцюжка (сфотографувати картинку). Записати налаштування осцилографа на яких ви проводили вимірювання (В/поділку, час/поділку) та параметри імпульсного сигналу. Перевірити, що тривалість заряду-розряду дорівнює розрахованому значенню. Результати вимірювань занести до протоколу.

2.4. Про моделювати роботу схеми в LTSpice. Пересвідчитись, що затримка заряду-розряду ємності при симуляції дорівнює затримці заряду при реальних вимірюваннях. Результати симуляції занести до протоколу.

3. Дослідження RC фільтру низької частоти.

3.1. Скласти схему RC фільтру низької частоти для довільних значень опору і ємності.



3.2. Розрахувати значення частоти зрізу. Результат занести до протоколу.

3.3. Виміряти амплітудно-частотну характеристику фільтра. Для цього необхідно подати на вхід фільтру синусоїдальний сигнал з генератора ГЗ-112 з амплітудою 1В та частотою зрізу. Визначити амплітуду синусоїдального сигналу на виході фільтру. Розрахувати коеф. передачі за напругою (K_u) для даної частоти (відношення амплітуди вихідного сигналу до амплітуди вхідного сигналу). Розбити інтервал частот від 0 до частоти зрізу на 3-4 відрізки і для частот на кінцях цих відрізків визначити значення K_u . При цьому необхідно слідкувати, щоб амплітуда вхідного сигналу завжди дорівнювала 1 В. Розрахувати K_u для нульової частоти. Взяти 4-5 значень частоти вище частоти зрізу та визначити для них K_u . Перевірити, що K_u на частоті близькій до нуля в корінь з двох

раз більший ніж K_u на частоті зрізу. Результат вимірів занести до протоколу у вигляді таблиці частота- $\rightarrow K_u$. Побудувати графік амплітудно-частотної характеристики.

3.4. Побудувати графік амплітудно-частотної характеристики в LTSpice. Додати цей графік до протоколу. Порівняти з графіком одержаним для реальних вимірювань.

1.4. Контрольні запитання

1. Виведіть формулу напруги на виході суматора напруг на резисторах з трьома входами;
2. Які недоліки суматора напруг на резисторах?
3. Виведіть формули заряду-розряду ємності RC ланцюжка;
4. Намалюйте графік заряду-розряду ємності RC ланцюжка;
5. Що таке постійна часу RC-ланцюжка? Як вона виражається через R і C?
6. Як розрахувати час заряду/розряду ємності RC ланцюжка?
7. Де застосовується RC ланцюжок?
8. Намалюйте схеми RC фільтрів високої і низької частоти;
9. Що таке амплітудно-частотна характеристика?
10. Намалюйте амплітудно-частотні характеристики RC фільтрів високої і низької частоти;
11. Напишіть формули частот зрізу RC фільтрів високої і низької частоти;
12. На якій полосі частот RC фільтр високої частоти пропускає сигнали? На якій полосі не пропускає?
13. На якій полосі частот RC фільтр низької частоти пропускає сигнали? На якій полосі не пропускає?
15. Яка швидкість затухання сигналу в RC фільтрів високої і низької частоти?
16. Що таке децибели? Як перейти від відношення в разях до відношення в децибелах?
17. Де використовують децибели?
18. Де використовують фільтри?

1.5. Рекомендовані джерела

1. Суматор напруг:
<https://www.youtube.com/watch?v=qOG1Xnor4Lw>
2. Хоровіц, Хіл “Мистецтво схемотехніки” 5-те видання.

3. RC ланцюжок:

<http://easyelectronics.ru/kondensator-i-rc-cepochka.html>

http://www.iatephysics.narod.ru/Lab_practice/Lab3.pdf

<https://www.youtube.com/watch?v=Kry-Z3BZOwU>

<https://www.youtube.com/watch?v=JotftUXxJ6c>

<https://www.youtube.com/watch?v=Jo95WooQB78>

<https://www.youtube.com/watch?v=uYO6q1qQmWs>

<https://www.youtube.com/watch?v=8iKfzGSUCqE>

4. RC фільтри

<http://www.diagram.com.ua/list/beginner/beginner216.shtml>

<https://www.youtube.com/watch?v=Yt4e9O7UkG8>

<https://www.youtube.com/watch?v=n7zYT4s4l1I>

https://www.youtube.com/watch?v=rIG_OOQNBEM

5. Опис макетної плати Pro'sKit BX-4135

<http://masteram.com.ua/ru/Round-Hole-Bread-Board-Pro-sKit-BX-4135-2420-Tie-Points.php>

6. Інструкція по користуванню макетною платою Breadboard

<http://habrahabr.ru/post/150257/>

7. Інструкція по користуванню LTSpice

<https://www.youtube.com/watch?v=wNHsKDn6Y3A>

<https://www.youtube.com/watch?v=tJn63ScpS2M>

Лабораторна робота №2

Тема: “Дослідження схем побудованих на базі кремнієвих діодів”

Досліджувані схеми: однонапівперіодний та двонапівперіодний випрямлячі, подвоювач напруги, обмежувач напруги.

В досліджуваних схемах будуть використовуватись кремнієві діоди, пряме падіння напруги на яких складає 0.7 вольт.

1.1. Практичне застосування досліджуваних схем

Досліджувані схеми дуже широко застосовуються в електроніці. Одно- та двонапівперіодні випрямлячі є основою блоків живлення, що перетворюють змінну напругу 220В в постійну напругу на виході (для зменшення величини напруги застосовують трансформатор). Обмежувачі напруги застосовують для захисту входів схем від перевищення напруги на них, що могло б привести до виходу схем з ладу. У випадку наявності обмежувача напруги, напруга на провіднику знаходить в певних межах, заданих обмежувачем. Це стандартний спосіб захисту, наприклад, входів цифрових та аналогових мікросхем від високої напруги. Помножувачі (у найпростішому випадку подвоювачі) напруги застосовують для підвищення постійної напруги без трансформатора для живлення лічильників Гейгера, іонізаторів повітря, електрошокерів, телевізійних електронно-променених трубок.

1.2. Теоретична частина

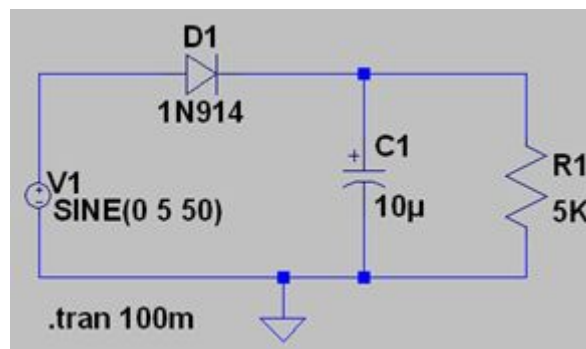
- Принцип роботи діода, який розглянуто в [1], [2: лекція 4].
- Принцип роботи однонапівперіодного та двонапівперіодного діодних випрямлячів розглянуто в [2: лекція 4], [3: стр.218-222], [4].

- Принцип роботи подвоювача напруги розглянуто в [5].
- Принцип роботи обмежувача напруги на діодах розглянуто в [2: лекція 4].

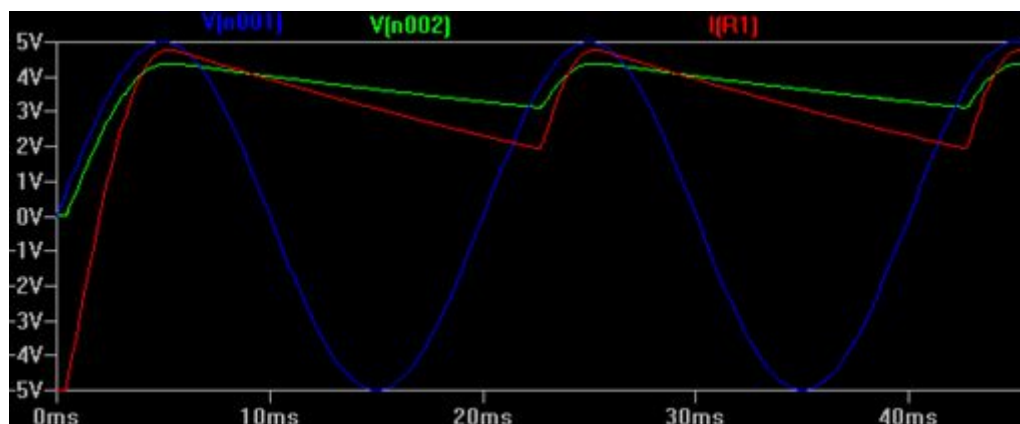
1.3. Завдання на лабораторну роботу

1. Дослідження однонапівперіодного випрямляча.

1.1. Побудуйте в LTSpice схему однонапівперіодного_випрямляча. Джерело напруги – синусоїдальний гармонічний сигнал з частотою 50 Гц, амплітудою 5 В. Діод кремнієвий, конденсатор електrolітичний (10 мкФ).



1.2. Перевірте, що напруга на резисторі та струм через нього змінюється по наступному закону. На графіку показана напруга джерела, напруга на резисторі та струм через нього.



1.3. Знайдіть амплітуду пульсацій напруги на резисторі навантаження (dU). Амплітуда пульсацій – це різниця між найбільшим та найменшим значеннями напруги на резисторі за період.

1.4. Знайдіть середнє значення струму через резистор навантаження (I_{av}). Для цього знайдіть найбільший та найменший струм через навантаження за період та розрахуйте середнє значення цього струму

1.5. Перевірте формулу, яка пов'язує амплітуду пульсацій напруги на навантаженні (dU) однопівперіодного_випрямляча, струм навантаження (I_{av}), ємність конденсатора на виході однопівперіодного випрямляча (C) та частоту сигналу, що випрямляється (f):

$$dU = I_{av} / (C * f)$$

З цієї формули знаходять ємність конденсатора на виході випрямляча, яку необхідно використовувати для досягнення необхідної амплітуди пульсації. Зазвичай чим більша ємність, тим менша амплітуда пульсацій.

1.6. Складіть схему однонапівперіодного_випрямляча на макетній платі.

1.7. Замалюйте (сфотографуйте) форму напруги на резисторі навантаження;

1.8. З одержаного малюнка визначте амплітуду пульсацій сигналу на резисторі навантаження;

1.9. Знайдіть середній струм через навантаження. Знаючи як змінюється напруга на резисторі навантаження, за законом Ома знайдіть найбільший та найменший струм через навантаження за період та розрахуйте середнє значення цього струму.

1.10. Порівняйте виміряні значення з одержаними під час симуляції;

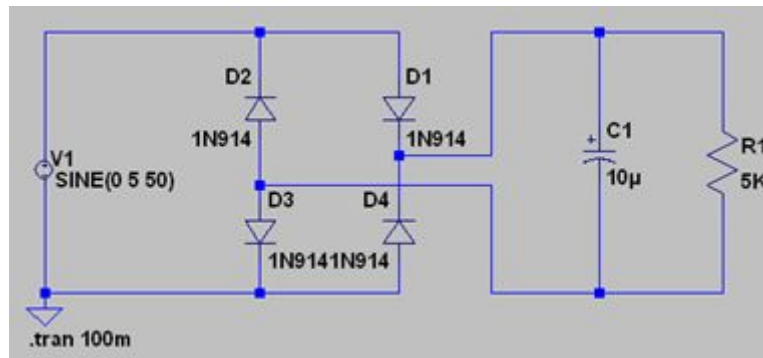
1.11. Порівняйте розраховану раніше та виміряну експериментально амплітуду пульсацій.

1.12. Ви

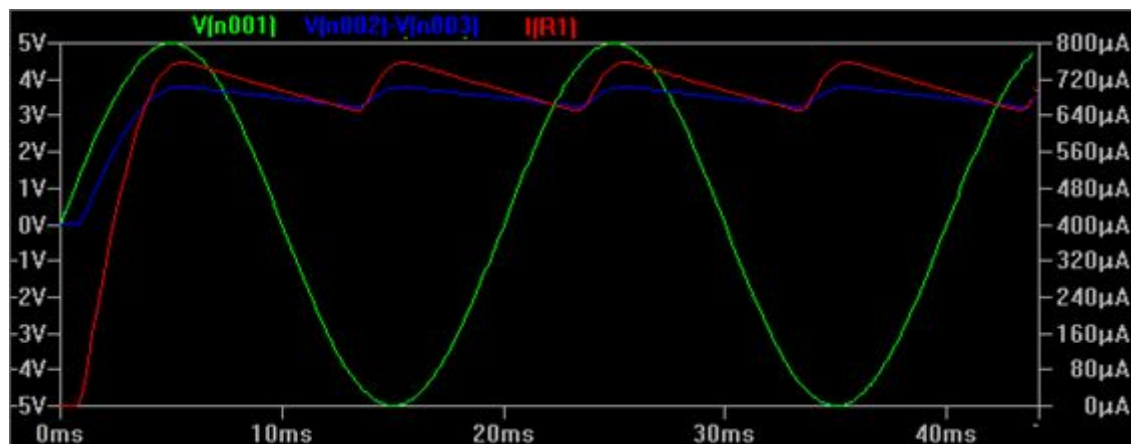
конайте попередні пункти також для схеми з опором резистору навантаження 20КОм.

2. Дослідження двонапівперіодного випрямляча.

2.1. Побудуйте в LTSpice схему двонапівперіодного_випрямляча. Джерело напруги – синусоїдальний гармонічний сигнал з частотою 50 Гц, амплітудою 5 В. Діоди кремнієві.



2.2.Перевірте, що напруга на резисторі та струм через нього змінюється по наступному закону. На графіку показана напруга джерела, напруга на резисторі та струм через нього. Зверніть увагу, що для визначення напруги на резисторі необхідно відняти напругу вузла верхнього контакту резистора від напруги вузла нижнього контакту резистора. Нагадаю, що вузлові напруги в LTSpice відраховуються від символу GND.



- 2.3. Знайдіть амплітуду пульсацій напруги на резисторі навантаження (dU).
- 2.4. Знайдіть середнє значення струму через резистор навантаження (I_{av}).
- 2.5. Перевірте формулу, як пов'язує амплітуду пульсацій напруги на навантаженні двонапівперіодного випрямляча (dU), струм навантаження (I_{av}), ємність конденсатора на виході двонапівперіодного випрямляча (C) та частоту сигналу, що випрямляється (f):

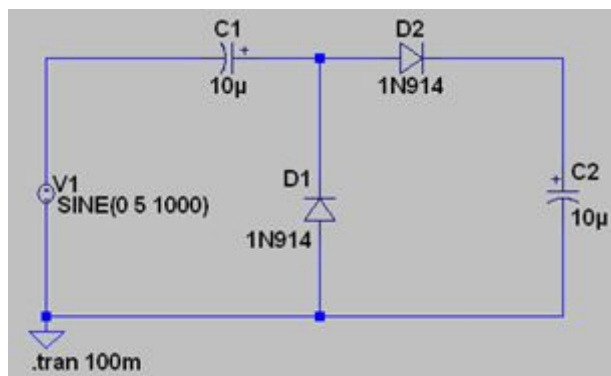
$$dU = I_{av} / (2 * C * f)$$

- 2.6. Складіть схему двонапівперіодного випрямляча на макетній платі;
- 2.7. Замалуйте (сфотографуйте) форму напруги на резисторі навантаження;
- 2.8. З одержаного малюнка визначте амплітуду пульсацій напруги на виході;

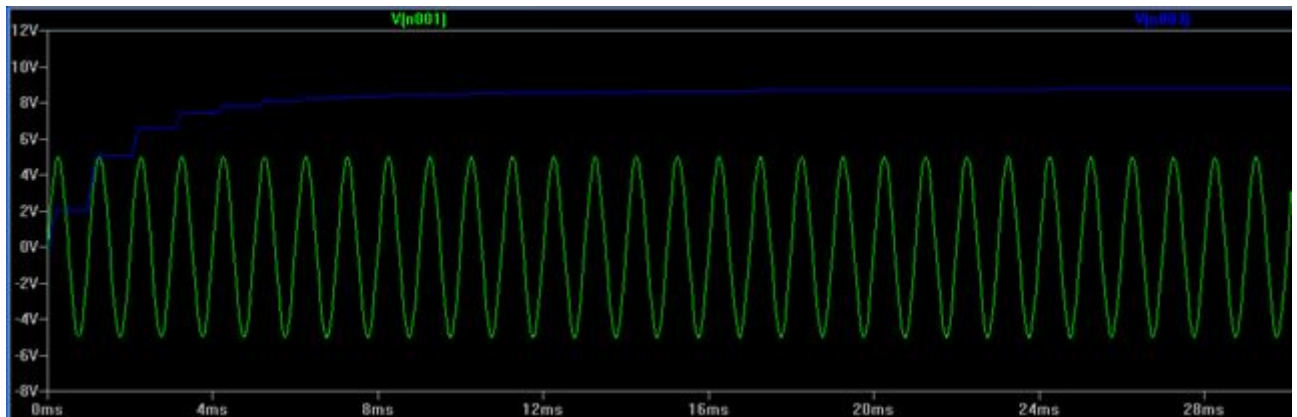
- 2.9. Знайдіть середній струм через навантаження. Знаючи як змінюється напруга на резисторі навантаження, за законом Ома знайдіть найбільший та найменший струм через навантаження за період та розрахуйте середнє значення цього струму.
- 2.10. Порівняйте виміряні значення з одержаними під час симуляції;
- 2.11. Порівняйте розраховану раніше та виміряну експериментально амплітуди пульсацій.
- 2.12. Виконайте попередні пункти також для схеми з опором резистору навантаження 20КОм.

3. Дослідження подвоювача напруги.

- 3.1. Складіть в LTSpice схему подвоювача напруги. Джерело напруги на вході повинно видавати гармонічний сигнал з частотою 1 КГц та амплітудою 5 В.



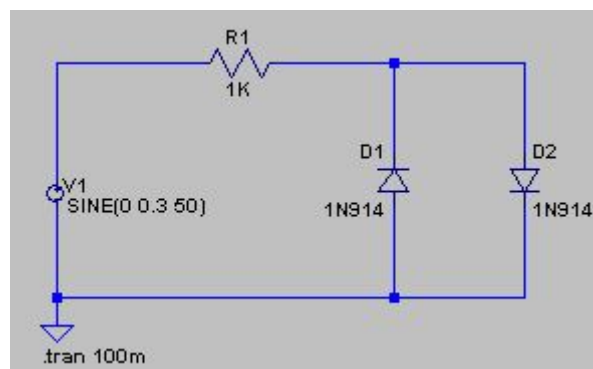
- 3.2. Перевірте, що форма напруги на виході подвоювача напруги (конденсатор C2) має наступну форму та є постійною напругою 8.8 В (ця напруга на виході стане постійною через певний час після ввімкнення живлення).



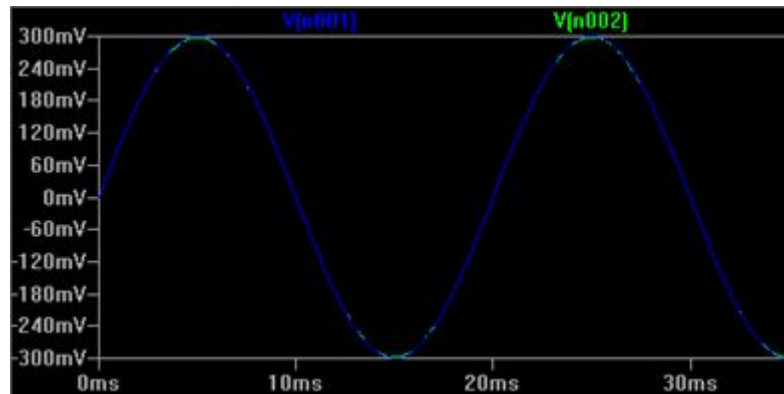
- 3.3. Чому напруга на виході подвоювача приймає значення саме 8.8 В, а не 10 В?
- 3.4. Складіть схему подвоювача напруги на макетній платі.
- 3.5. Виміряйте напругу на виході та порівняйте зі значеннями одержаними під час симуляції.

4. Дослідження обмежувача напруги.

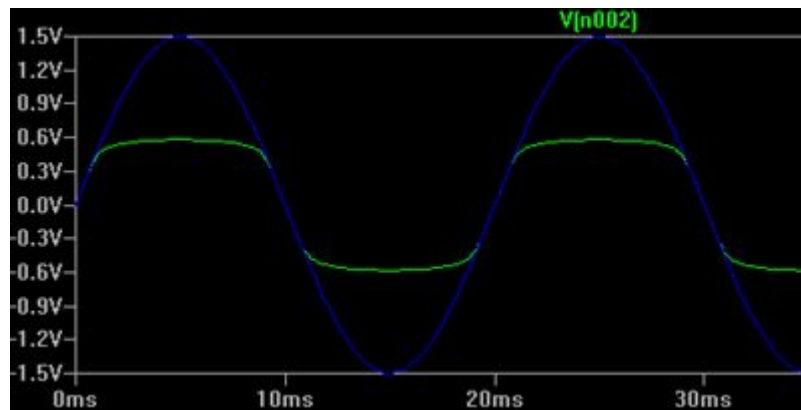
- 4.1. Складіть схему обмежувача напруги на діодах в LTSpice.



- 4.2. Перевірте, що для амплітуди вхідного синусоїдального сигналу 0.3 В (частота 50 Гц) сигнал на виході схеми буде повторювати вхідний сигнал:



4.3.Перевірте, що для амплітуди вхідного синусоїдального сигналу більшої ніж 0.6 В (наприклад, 1.5 В) сигнал на виході схеми не буде виходити за межі -0.6 В ... 0.6 В:



4.4. Поясніть принцип роботи даної схеми. На якому компоненті буде виділятися решта вхідної напруги? Чому?

1.4. Контрольні запитання

1. В чому полягають вентильні властивості напівпровідникового діода?
2. Яка напруга виділяється на напівпровідниковому кремнієвому діоді при його прямому зміщенні?
3. Яка напруга виділяється на напівпровідниковому германієвому діоді при його прямому зміщенні?
4. Яка напруга виділяється на напівпровідниковому діоді Шотткі при його прямому зміщенні?
5. Що таке максимальна напруга зворотного зміщення напівпровідникового діода? Що відбудеться, якщо до діоду прикласти зворотну напругу більшу ніж це значення?

6. Що таке максимальний прямий струм напівпровідникового діода? Що буде. Якщо через діод протікатиме струм більший за це значення?
7. Намалюйте вольт-амперну характеристику напівпровідникового діода.
8. Напишіть формулу вольт-амперної характеристики напівпровідникового діода.
9. Що таке зворотній струм напівпровідникового діода?
10. Поясніть принцип роботи однонапівперіодного випрямляча.
11. Поясніть принцип роботи двонапівперіодного випрямляча.
12. Намалюйте схему однонапівперіодного випрямляча, а також графіки напруг на вході і виході схеми. Як зміниться графік напруги на виході, якщо прибрати згладжуючий конденсатор?
13. Намалюйте схему двонапівперіодного випрямляча, а також графіки напруг на вході і виході схеми. Як зміниться графік напруги на виході, якщо прибрати згладжуючий конденсатор?
14. Від яких параметрів залежить амплітуда пульсацій напруги на виході однонапівперіодного випрямляча? Як зменшити амплітуду пульсацій?
15. Від яких параметрів залежить амплітуда пульсацій напруги на виході двонапівперіодного випрямляча? Як зменшити амплітуду пульсацій?
16. Виведіть формулу розрахунку ємності згладжуючого конденсатору на виході однонапівперіодного випрямляча в залежності від необхідної амплітуди пульсацій.
17. Виведіть формулу розрахунку ємності згладжуючого конденсатору на виході двонапівперіодного випрямляча в залежності від необхідної амплітуди пульсацій.
18. Поясніть принцип роботи подвоювача напруги.
19. Поясніть принцип роботи обмежувачів напруги на діодах.
20. Де застосовуються обмежувачі напруги на діодах?

1.5. Рекомендовані джерела

1. Принцип роботи діода.
<http://radiomaster.ru/articles/view/131>
<https://www.youtube.com/watch?v=EnK81tXpNVM>
2. Лекції з аналогової схемотехніки.

<https://drive.google.com/file/d/0B9fI2BqoGDwTSDdiaHlCYVpqVUE/view?usp=sharing>

3. Титце, Шенк “Полупроводниковая схемотехника”, 12 изд. Том 2.

<https://drive.google.com/file/d/0B9fI2BqoGDwTUjU2aE5sOkFhd2M/view?usp=sharing>

4. Однонапівперіодний та двонапівперіодний випрямлячі.

<https://www.youtube.com/watch?v=vcaBhLhiul0>

<https://www.youtube.com/watch?v=pNR4SPQb4Fg>

5. Помножувачі напруги.

<http://radiomaster.ru/articles/view/447>

<http://katod-anod.ru/articles/66>

<https://www.youtube.com/watch?v=LFbh8qvmmBc>

Лабораторна робота №3

Тема: “Дослідження польового МДН транзистора з індукованим n-каналом”

Досліджувані схеми: польовий транзистор 2N7000, підсилювач на польовому транзисторі 2N7000.

1.1. Теоретичні відомості

Графічне позначення польового МДН транзистора з індукованим n-каналом наведено на рис.2.1. Абревіатура МДН розшифровується як Метал-Діелектрик-Напівпровідник і описує

внутрішню структуру польового транзистора такого типу. В даній лабораторній роботі внутрішня структура польового транзистора і принцип його функціонування на рівні фізики процесів не розглядається. Бажаючи можуть вивчити ці питання самостійно, дослідивши джерела [1-3].

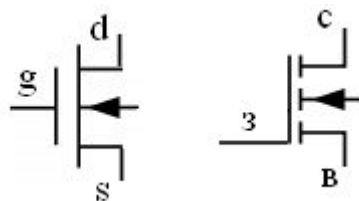


Рис.2.1. – Графічне позначення польового МДН транзистора з індукованим n-каналом (а – вітчизняне позначення, б – закордонне позначення).

Польовий МДН транзистор, зображений на рис.2.1, містить електроди з (затвор), в (виток), с (сток). Англійською мовою ці електроди називаються **g** (gate), **s** (source) і **d** (drain). Стрілочкою показано контакт до підложки. У багатьох дискретних МДН транзисторів з n-каналом (тобто транзисторів в окремому корпусі) окремого контакту до підложки немає, а підложка з'єднана з витоком транзистора. Якщо стрілочка направлена в сторону затвора, це означає, що МДН транзистор має канал n-типу.

При розрахунку схем з польовим МДН транзистором використовують наступні напруги і струми:

I_с – струм, який протікає від витоку до стоку транзистора (іноді цей струм позначають **I_d**);

I_з – струм, який втікає в затвор транзистора (іноді цей струм позначають **I_g**);

U_{зв} – напруга між затвором і витоком (іноді цю напругу позначають **U_{gs}**);

U_{вс} – напруга між витоком і стоком польового транзистора (іноді цю напругу позначають **U_{sd}**);

U_п – порогова напруга (threshold voltage – **U_t**). Це напруга, яку необхідно прикласти між затвором і витоком польового МДН транзистора, щоб почав протікати струм між витоком і стоком.

U_{нас} – напруга насичення. $U_{нас} = U_{зв} - U_{п}$. Доки $U_{вс} < U_{нас}$, польовий МДН транзистор з індукованим n-каналом веде себе, як резистор. Якщо $U_{вс} \geq U_{нас}$, польовий МДН транзистор веде себе, як джерело струму **I_с** кероване напругою **U_{зв}**.

Струм I_g настільки малий, що можна вважати його рівним нулю. Це обумовлено структурою польового МДН транзистора. Нульовий струм затвора обумовлює величезний вхідний опір такого транзистора (одиниці десятки мільйонів Ом – МОм).

Польовий МДН транзистор з індукованим n-каналом працює наступним чином. Якщо $U_{зв} < U_{п}$, опір між витокom і стоком буде дуже великий і струм від витoku до стоку не протікатиме. Можна вважати, що в такому випадку між витокom і стоком розрив кола. Наприклад, якщо порогова напруга n-канального МДН транзистора дорівнює 0.8В, а до затвора відносно витoku прикладена напруга 0В (тобто затвор і виток закорочені), або напруга 0.5В, в такому випадку транзистор буде закритий і струм між витокom і стоком не протікатиме ($I_c = 0$). Якщо ж $U_{зв} \geq U_{п}$ (більше, або дорівнює), тоді в такому транзисторі утворюється канал, що може проводити струм і сполучає затвор з витокom. Внаслідок цього опір між витокom і стоком різко зменшується і починає дорівнювати опору каналу (R_k). Опір каналу лежить в межах від долей Ом до одиниць Ком (в залежності від розмірів і технології виготовлення транзистора). Оскільки опір між витокom і стоком став дуже маленьким, якщо прикласти ненульову напругу між витокom і стоком, між цими виводами почне протікати струм $I_c > 0$. Існує одне важливе обмеження – у польовому МДН транзисторі з n-каналом, потенціал стоку повинен бути завжди більшим ніж потенціал витoku (наприклад, підключаємо виток до мінуса джерела живлення, а сток – до плюса джерела живлення).

Таким чином, у найпростішому вигляді польовий транзистор можна розглядати перемикач, який буде розімкнутий ($I_c = 0$), якщо $U_{зв} < U_{п}$ і замкнутий ($I_c > 0$), якщо $U_{зв} \geq U_{п}$. При цьому опір перемикача, коли він замкнутий, дорівнює R_k .

В реальності, залежність I_c від $U_{зв}$ та $U_{вс}$ трохи складніша і наведена на рис.2.2.

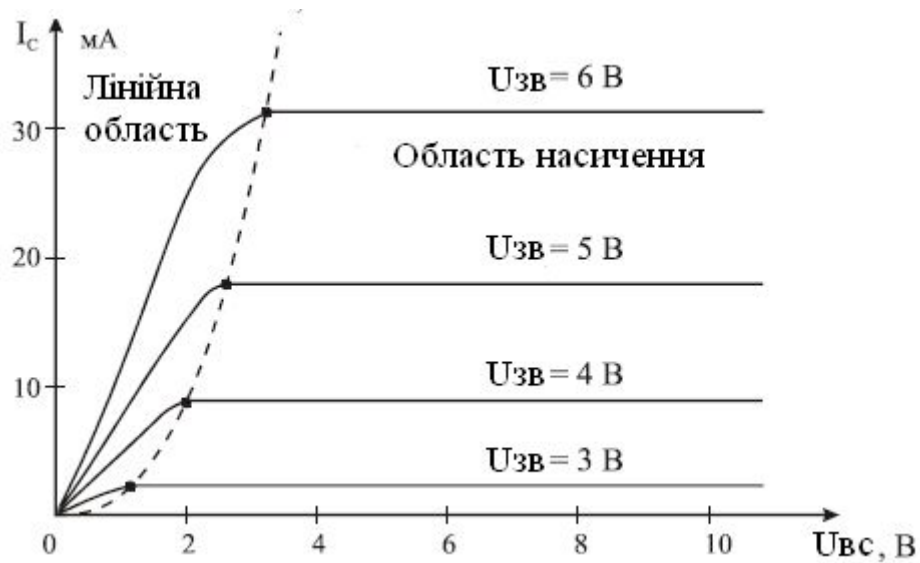


Рис.2.2. – Залежність току стоку від напруги $U_{дс}$ (між витоком і стоком) та від напруги $U_{зв}$ (між затвором і витоком)

З наведеного вище рисунка видно, що доки $U_{зв} > U_{п}$ і $U_{дс} < U_{нас}$, де $U_{нас} = U_{зв} - U_{п}$ ($U_{нас}$ – напруга насичення), струм стоку збільшується лінійно зі збільшенням напруги, тобто область між витоком і стоком веде себе як резистор. Цю залежність можна апроксимувати формулою:

$$I_c = b \cdot [(U_{зв} - U_{п}) \cdot U_{дс} - 0.5 \cdot U_{дс}^2]$$

де b – питома крутизна, що залежить від геометрії транзистора, його розмірів та технології виготовлення:

$$b = \mu \cdot C_0 \cdot \frac{W}{L}$$

μ - рухливість електронів в каналі n-типу;

C_0 - питома ємність між затвором та каналом;

W - ширина каналу;

L - довжина каналу.

Оскільки $U_{дс} < U_{нас}$ – величина мала, квадратичним доданком в наведеній вище формулі можна знехтувати і I_c буде залежати від $U_{дс}$ лінійно:

$$I_c = b \cdot (U_{зв} - U_{п}) \cdot U_{дс}$$

де $b \cdot (U_{зв} - U_{п})$ називають провідністю каналу, а обернену до неї величину опором каналу.

$$R_k = \frac{1}{b \cdot (U_{зв} - U_{п})}$$

Зверніть увагу, що опір каналу залежить від напруги на затворі $U_{зв}$.

Такий режим роботи польового МДН транзистора, коли область між витоком і стоком можна замінити опором R_k , називають **лінійним**, або тріодним.

Якщо $U_{зв} < U_{п}$, транзистор буде закритий і $I_c = 0$. Цей режим роботи польового МДН транзистора називають **режимом відсічки** (на рис.2.2 цей режим не позначено).

Лінійний режим і режим відсічки, використовуються в цифрових схемах.

Режим насичення польового МДН транзистора з індукованим n-каналом виникає, коли $U_{зв} > U_{п}$ і $U_{вс} > U_{нас}$, де $U_{нас} = U_{зв} - U_{п}$. В такому випадку $I_c = f(U_{зв}) = \text{const}$ і не залежить від зміни $U_{вс}$. Тобто польовий транзистор веде себе, як джерело струму I_c , кероване напругою $U_{зв}$:

$$I_c = \frac{b}{2} \cdot (U_{зв} - U_{п})^2$$

Ця залежність графічно проілюстрована на рис.2.3.

Режим насичення використовується в аналогових схемах для побудови підсилювачів сигналу, джерел струму і напруги, тощо.

Отже, якщо виконуються умови $U_{зв} > U_{п}$ і $U_{вс} > U_{зв} - U_{п}$, польовий МДП транзистор з індукованим n-каналом можна замінити моделлю джерела струму, керованого напругою – рис.2.4. Зазвичай так і роблять при розрахунку підсилювачі на польових МДН транзисторах.

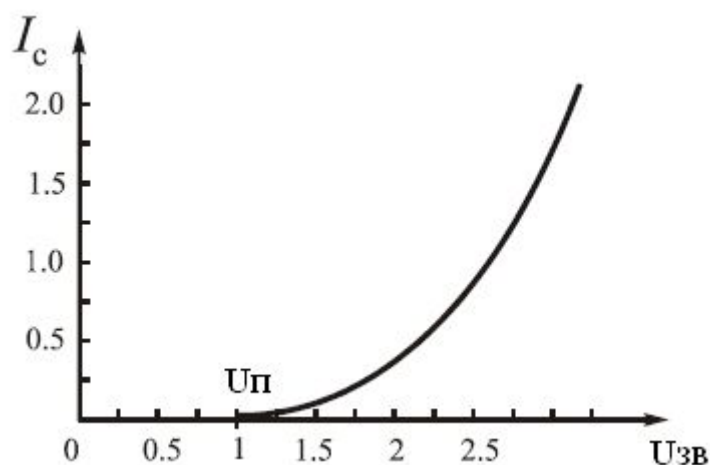


Рис.2.3. – Залежність току стоку польового МДН транзистора з індукованим n-каналом

від напруги на затворі

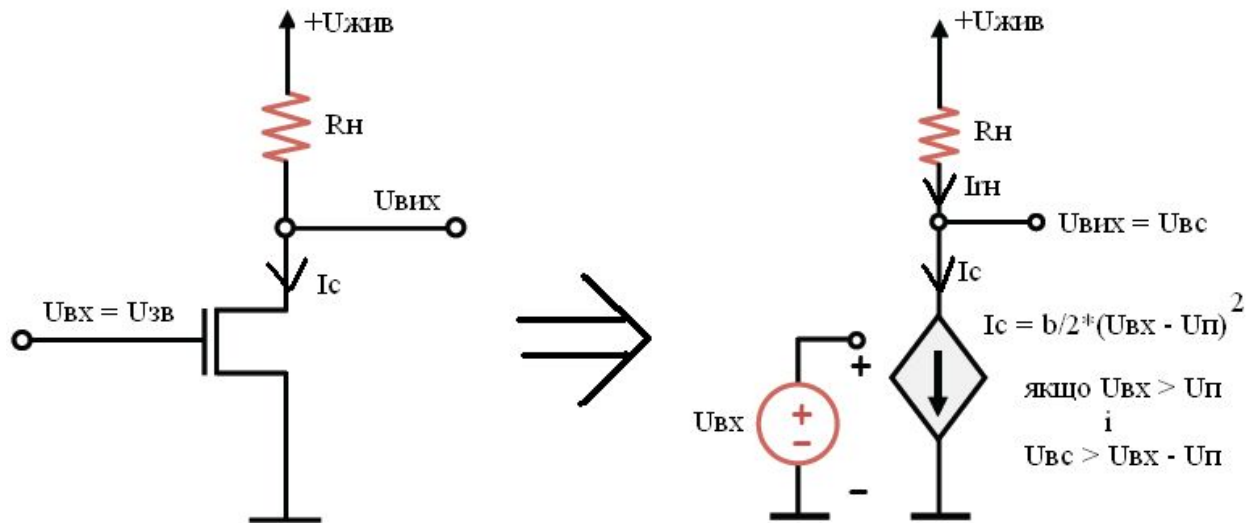


Рис.2.4. Схема підсилювача зі спільним витоком на польовому МДН транзисторі з індукованим n-каналом і заміна транзистора в такій схемі джерелом струму

Схема на рис.2.4 представляє собою підсилювач зі спільним витоком на польовому МДН транзисторі з індукованим n-каналом. До стоку такого транзистора, через резистор R_H , підключаємо плюс джерела живлення. До витоку підключаємо мінус джерела живлення (мова йде про однополярне джерело з двома виводами). Вхідну напругу на такий підсилювач подаємо між затвором і витоком, а вихідні напругу знімаємо між витоком і стоком. Тому така схема і називається схемою зі спільним витоком, оскільки вивід витоку є спільним (відносно нього відраховуються вхідна і вихідна напруги). Для розрахунку такої схеми в режимі великого сигналу замінимо польовий транзистор джерелом струму, що керується напругою U_{BX} . Важливо пам'ятати, що така заміна правомірна лише при виконанні умов, наведених на рис.2.4.

Припустимо, що вхідна напруга складається з великої постійної складової і малої змінної складової. Це потрібно, щоб підсилювач працював, як лінійний компонент і не спотворював сигнал. В такому випадку:

$$U_{BX} = U_{BX0} + u_{BX}$$

де U_{BX} – сигнал, що прикладається між затвором і витоком транзистора;

$U_{BX0} = \text{const}$ – постійна складова сигналу на вході підсилювача;

$u_{\text{вх}}$ – змінна складова сигналу на вході підсилювача, яку необхідно підсилити. Для того, щоб даний підсилювач працював, як лінійна схема, $u_{\text{вх}}$ повинна бути не більше ніж кілька сотень мілівольт.

Для розрахунку підсилювача в режимі великого сигналу приймемо $u_{\text{вх}}=0$. В такому випадку $U_{\text{вх}} = U_{\text{вх0}}$. Такі вхідні напрузі буде відповідати струм стоку $I_{\text{с0}}$ і наруга між витоком і стоком $U_{\text{вс0}}$.

Розрахуємо $I_{\text{с0}}$ та $U_{\text{вс0}}$. Для цього запишемо закон Кірхгофа для наруг для вихідного кола:

$$U_{\text{жив}} - U_{\text{РН}} - U_{\text{вс0}} = 0$$

Звідки випливає, що:

$$U_{\text{вс0}} = U_{\text{жив}} - U_{\text{РН}}$$

При цьому $U_{\text{РН}} = I_{\text{РН}} \cdot R_{\text{Н}}$, $I_{\text{РН}} = I_{\text{с0}}$, а $I_{\text{с0}} = \frac{b}{2} \cdot (U_{\text{вх0}} - U_{\text{п}})^2$

Отже:

$$U_{\text{вс0}} = U_{\text{жив}} - U_{\text{РН}} = U_{\text{жив}} - I_{\text{с0}} \cdot R_{\text{Н}} = U_{\text{жив}} - R_{\text{Н}} \cdot \frac{b}{2} \cdot (U_{\text{вх0}} - U_{\text{п}})^2$$

Таким чином, якщо подати між затвором і стоком напругу $U_{\text{вх0}}$, отримаємо наступні $I_{\text{с0}}$ та $U_{\text{вс0}}$, які будуть залежати від констант $U_{\text{жив}}$, $R_{\text{Н}}$, b , $U_{\text{п}}$:

$$U_{\text{вс0}} = U_{\text{жив}} - R_{\text{Н}} \cdot \frac{b}{2} \cdot (U_{\text{вх0}} - U_{\text{п}})^2$$

$$I_{\text{с0}} = \frac{b}{2} \cdot (U_{\text{вх0}} - U_{\text{п}})^2$$

Важливо пам'ятати, що наведені вище рівняння мають зміст лише при виконанні умов $U_{\text{зв}} > U_{\text{п}}$ і $U_{\text{вс}} > U_{\text{зв}} - U_{\text{п}}$.

Можна піти іншим шляхом. Задатися значеннями $I_{\text{с0}}$ і $U_{\text{вс0}}$ та розрахувати необхідні $R_{\text{Н}}$ і $U_{\text{вх0}}$.

Наведені вище розрахунки можуть мати графічну інтерпретацію. Спочатку намалюємо сімейство вольт-амперних характеристик виходу польового транзистора (тобто залежність $I_{\text{с}}$ від $U_{\text{вс}}$) для різних значень $U_{\text{вх}}=U_{\text{зв}}$ (рис.2.5). На рис.2.5. пунктиром показана лінія, лівіше якої транзистор працює в лінійному режимі (який є неприйнятним для підсилювачі), а правіше – в режимі насичення, що нам і потрібно.

Далі нам необхідно виразити $I_{\text{РН}}$ через $U_{\text{вих}}$:

$$I_{\text{РН}} = \frac{U_{\text{РН}}}{R_{\text{Н}}} = \frac{U_{\text{жив}} - U_{\text{вс}}}{R_{\text{Н}}} = \frac{U_{\text{жив}} - U_{\text{вих}}}{R_{\text{Н}}}$$

Отже $I_{\text{РН}} = \frac{U_{\text{жив}} - U_{\text{вих}}}{R_{\text{Н}}}$. Ця залежність ображена на рис.2.6.

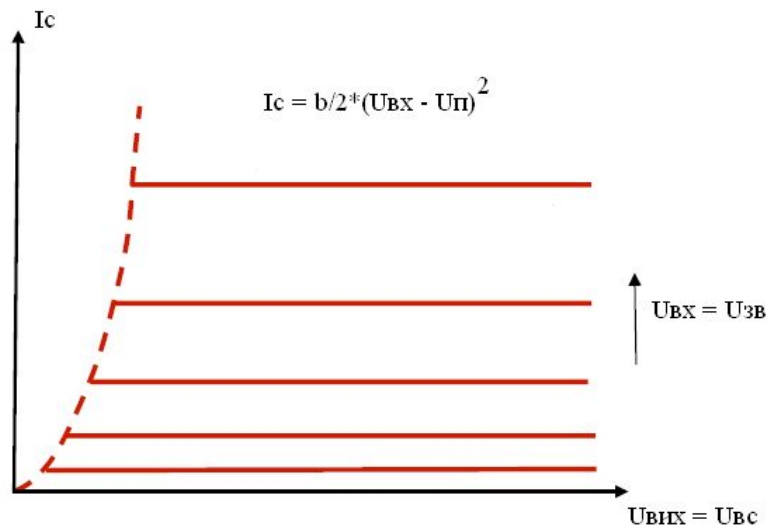


Рис.2.5. Сімейство вихідних вольт-амперних характеристик польового МДН транзистора з індукованим n-каналом, що працює в режимі насичення

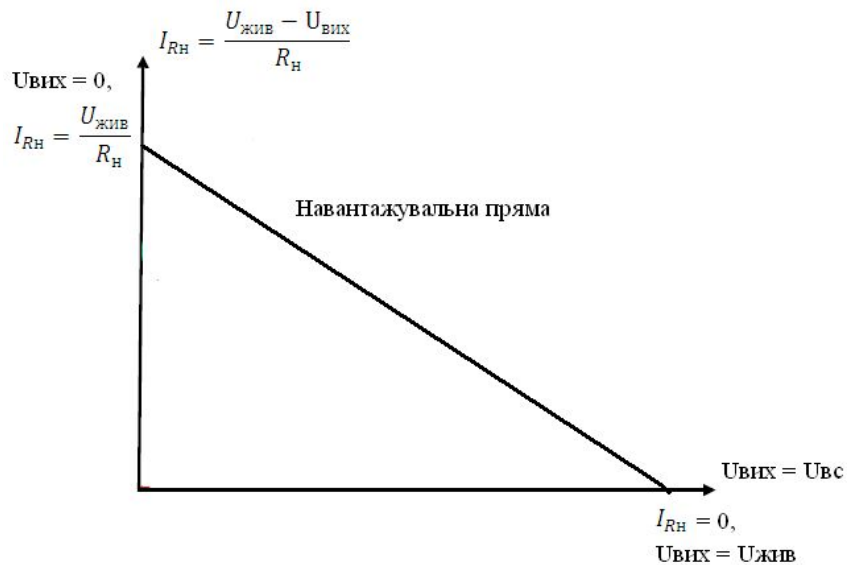


Рис.2.6. – Залежність I_{RH} від $U_{вих}$

Оскільки за законом Кірхгофа для струмів для нашої схеми $I_{RH} = I_c$, для виконання цього закону через резистор і польовий транзистор повинен протікати струм, який відповідає точці перетину двох вище наведених графіків. Тобто в точці перетину цих графіків буде виконуватись умова закону Кірхгофа для струмів ($I_{RH} = I_c$). Точка перетину, наведена на рис.2.7., називається робочою точкою покою підсилювача і визначає I_{c0} , $U_{вс0}$ $U_{вх0}$, які ми раніше розраховували. Тобто робоча точка покою підсилювача на транзисторі визначає струми і напруги на цьому транзисторі при відсутності вхідного сигналу.

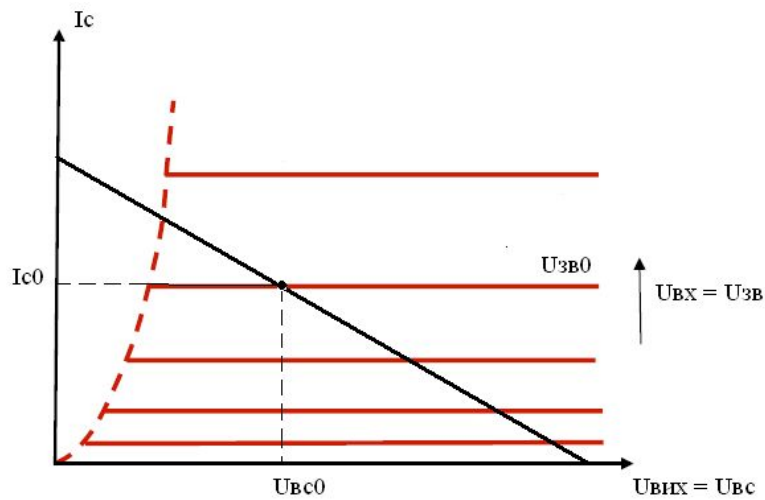


Рис.2.7. Робоча точка покою підсилювача на польовому транзисторі

Тепер розрахуємо даний підсилювач в режимі малого сигналу. Нагадаємо, що раніше ми записали $U_{ВХ} = U_{ВХ0} + u_{ВХ}$. Схоже співвідношення можна записати і для сигналу на виході:

$$U_{ВІХ} = U_{ВІХ0} + u_{ВІХ} = U_{ВС0} + u_{ВІХ}$$

$U_{ВС0}$ ми розраховували раніше, а $u_{ВІХ}$ дорівнює приросту сигналу на виході, якщо сигнал на вході збільшується на $u_{ВХ}$ відносно $U_{ВХ0}$. Тобто $u_{ВІХ} = K_u \cdot u_{ВХ}$, де K_u – коефіцієнт підсилення за напругою.

Знайдемо K_u .

Для цього пригадаємо знайдене раніше рівняння для великого сигналу:

$$U_{ВІХ0} = U_{ВС0} = U_{ЖІВ} - R_H \cdot \frac{b}{2} \cdot (U_{ВХ0} - U_{П})^2$$

Замінімо в цьому рівнянні $U_{ВІХ0}$ на $U_{ВІХ}$ і $U_{ВХ0}$ на $U_{ВХ}$:

$$U_{ВІХ} = U_{ЖІВ} - R_H \cdot \frac{b}{2} \cdot (U_{ВХ} - U_{П})^2$$

Маємо нелінійну залежність $U_{ВІХ}(U_{ВХ})$.

Для того, щоб при підсиленні не виникало спотворень корисний сигнал $u_{ВХ}$ на вході повинен змінюватись відносно $U_{ВХ0}$ не більше ніж на кілька десятків мілівольт. Застосування такого обмеження дозволить замінити виведену вище нелінійну функцію $U_{ВІХ}(U_{ВХ})$ її лінійним еквівалентом.

Для цього розкладемо функцію $U_{ВІХ}(U_{ВХ})$ в ряд Тейлора в околі точки $U_{ВХ0}$. Якщо $U_{ВХ}$ буде змінюватись відносно $U_{ВХ0}$ на дуже маленьку величину, це дозволить залишити лише перші два

доданки ряду Тейлора, а іншими знехтувати, оскільки вони будуть дуже малі (прямуватимуть до нуля):

$$U_{\text{вих}}(U_{\text{вх}}) = U_{\text{вих}}(U_{\text{вх0}} + u_{\text{вх}}) = U_{\text{вих}}(U_{\text{вх0}}) + \frac{U_{\text{вих}}'(U_{\text{вх0}})}{1!} \cdot u_{\text{вх}}$$

Знайдемо першу похідну функції $U_{\text{вих}}(U_{\text{вх}})$ в точці $U_{\text{вх0}}$:

$$U_{\text{вих}}'(U_{\text{вх}}) = -R_{\text{н}} \cdot \frac{b}{2} \cdot 2 \cdot (U_{\text{вх}} - U_{\text{п}})$$

Отже:

$$U_{\text{вих}}'(U_{\text{вх0}}) = -R_{\text{н}} \cdot b \cdot (U_{\text{вх0}} - U_{\text{п}})$$

Підставимо отримане значення в ряд Тейлора, отримаємо:

$$U_{\text{вих}}(U_{\text{вх}}) = U_{\text{вих}}(U_{\text{вх0}}) - R_{\text{н}} \cdot b \cdot (U_{\text{вх0}} - U_{\text{п}}) \cdot u_{\text{вх}}$$

Згадаємо, що $U_{\text{вих}}(U_{\text{вх}}) = U_{\text{вих0}} + u_{\text{вих}}$, а $U_{\text{вих}}(U_{\text{вх0}}) = U_{\text{вих0}}$.

Отже:

$$U_{\text{вих}}(U_{\text{вх}}) = U_{\text{вих0}} + u_{\text{вих}} = U_{\text{вих0}} - R_{\text{н}} \cdot b \cdot (U_{\text{вх0}} - U_{\text{п}}) \cdot u_{\text{вх}}$$

Звідки випливає, що:

$$u_{\text{вих}} = -R_{\text{н}} \cdot b \cdot (U_{\text{вх0}} - U_{\text{п}}) \cdot u_{\text{вх}}$$

Значить:

$$K_U = \frac{u_{\text{вих}}}{u_{\text{вх}}} = -R_{\text{н}} \cdot b \cdot (U_{\text{вх0}} - U_{\text{п}})$$

Величину $b \cdot (U_{\text{вх0}} - U_{\text{п}})$ часто позначають g_m і називають передаточною провідністю.

Отже:

$$K_U = \frac{u_{\text{вих}}}{u_{\text{вх}}} = -R_{\text{н}} \cdot g_m$$

$$g_m = b \cdot (U_{\text{вх0}} - U_{\text{п}})$$

Як бачимо, у випадку, коли $u_{\text{вх}}$ змінюється у межах кількох десятків мілівольт, $u_{\text{вих}}$ і $u_{\text{вх}}$ пов'язані лінійною залежністю і спотворень сигналу, що підсилюється, не буде. K_U для підсилювача такого типу зазвичай дорівнює кілька десятків, або сотень разів. Зверніть увагу, що ми отримали від'ємний K_U . Це означає, що даний підсилювач зсуває фазу вихідного сигналу відносно вхідного сигналу на 180° . Тобто збільшення вхідного сигналу приводить до зменшення вихідного сигналу і навпаки. Такий зсув фаз між вхідним і вихідним сигналом зазвичай не впливає на якість підсилювачів звуку.

1.2. Завдання на лабораторну роботу

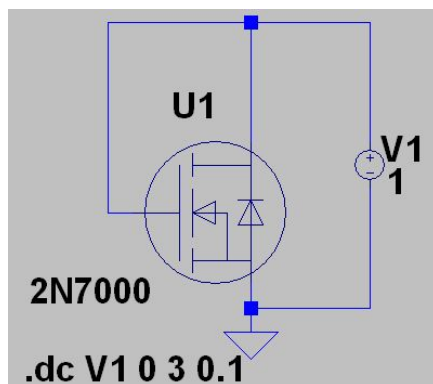
Перед виконанням завдань ознайомтеся з теоретичною частиною. Спершу виконайте всі завдання в LTSpice. Покажіть результати викладачу. Далі виконайте ті самі завдання на реальних схемах. Покажіть результати викладачу. Результати одержані в LTSpice і на реальній схемі можуть відрізнятися, оскільки модель транзистора 2N7000 в LTSpice не досить точна. Однак симуляцію в LTSpice необхідно виконувати, щоб розуміти, як схема себе поводить. Таке розуміння значно полегшить налаштування та дослідження реальної схеми.

1. Дослідження залежності $I_c(U_{зв})$ для n-канального польового МДН транзистора 2N7000

Як пам'ятаєте, у випадку, коли виконується умова $U_{вс} > U_{зв} - U_{п}$, польовий МДН транзистор можна вважати джерелом струму, яке керується напругою і залежність струму стоку від напруги між витком і затвором описується наступною формулою:

$$I_c = \frac{b}{2} \cdot (U_{зв} - U_{п})^2$$

Перевіримо цю залежність експериментально. Для цього побудуйте схему, для якої завжди виконується умова $U_{вс} > U_{зв} - U_{п}$. Схема наведена на рисунку нижче:



У випадку симуляції, у вашій версії LTSpice може бути відсутня модель транзистора 2N7000. У такому випадку вам необхідно завантажити та підключити бібліотеку компонентів для LTSpice так, як це вказано в [4].

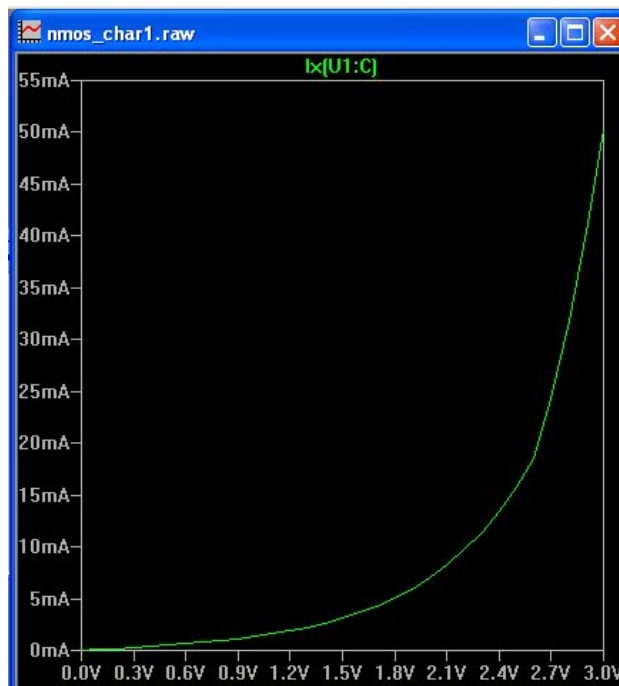
Документація на транзистор 2N7000, зокрема розміщення його контактів (виток, сток, затвор), доступна за посиланням [5].

Схема на рисунку вище особлива тим, що у неї затвор закорочений зі стоком, тому завжди справедлива рівність $U_{вс} = U_{зв}$, а отже завжди виконується необхідна нам умова $U_{вс} > U_{зв} - U_{п}$

$U_{п}$ і транзистор знаходиться в режимі насичення (працює як джерело струму) при будь якій напрузі джерела, яка більша за $U_{п}$.

Для одержання залежності $I_c(U_{зв})$ для даного транзистора, необхідно поступово збільшувати напругу $U_{зв}$, яка задається джерелом V1 (від 0 В з кроком 0.1 вольт) і для кожного значення $U_{зв}$ записувати в таблицю значення струму стоку I_c . Очевидно, що струм стоку почне зростати, після того, як $U_{зв}$ перевищить порогову напругу даного транзистора ($U_{п}$). Напругу $U_{зв}$ можна збільшувати до тих пір, доки величина I_c не досягне 60-70 мА.

У випадку симуляції, ви можете вручну змінювати напругу джерела V1, проводити моделювання в часовій області (transient analysis) та дивитися на графіку величину струму через сток в залежності від часу. Однак це не професійний підхід, оскільки всі ітерації необхідно проводити вручну. Краще скористатися режимом аналізу DC Sweep, коли ви задаєте діапазон і крок зміни напруги джерела, вказуєте фізичну величину (напругу чи стум), вимірювання якої вас цікавить і LTSpice автоматично визначає залежність шуканої фізичної величини від зміни напруги вказаного джерела. Для переходу в режим симуляції DC sweep, необхідно замінити директиву симуляції в часовій області **.tran 10m** на нову директиву **.dc V1 0 3 0.1**. Перший параметр директиви .dc є іменем джерела, параметри якого будуть змінюватись з вказаним кроком (це може бути джерело напруги, або струму). В нашому випадку це буде джерело напруги V1. Другий параметр – початкове значення напруги джерела V1. Третій параметр – кінцеве значення напруги джерела V1. Останній параметр – крок зміни напруги джерела V1. Після цього запускаємо симуляцію. Після закінчення симуляції необхідно обрати фізичну величину, яка нас цікавить, клацнувши на відповідний вузол схеми (для напруги у вузлі), або на відповідний вивід компоненту (для струму, який протікає через цей вивід). В нашому випадку обираємо струм стоку та одержуємо наступний графік залежності $I_c(U_{зв})$:



Ваше завдання полягає у тому, щоб одержати такий графік (як в LTSpice, так і на реальній схемі) та записати в таблицю 10 значень струму стоку для 10-ти значень напруги $U_{зв}$ з діапазону від 0 до 3В.

Далі з цього графіку необхідно визначити величину порогової напруги транзистора та константу b з формули $I_c = \frac{b}{2} \cdot (U_{зв} - U_{п})^2$.

Розрахувати порогову напруги $U_{п}$ можна наступним чином.

Крок 1. Обираємо якесь значення струму стоку I_{c1} (наприклад 10 мА) та фіксуємо значення напруги $U_{зв1}$ при якому через сток протікатиме такий струм. Ці значення напруги і струму можна знайти з одержаного вище графіку залежності $I_c(U_{зв})$.

Крок 2. Обираємо значення струму стоку I_{c2} , яке в 4 рази більше за I_{c1} (тобто $I_{c2} = 4 \cdot I_{c1}$). Фіксуємо значення напруги $U_{зв2}$ при якому через сток протікатиме такий струм.

Крок 3. Справедливі будуть наступні формули:

$$I_{c1} = \frac{b}{2} (U_{зв1} - U_{п})^2$$

$$I_{c2} = 4 \cdot I_{c1} = \frac{b}{2} (U_{зв2} - U_{п})^2$$

Крок 4. З формул наведених на попередньому кроці можна визначити порогову напругу:

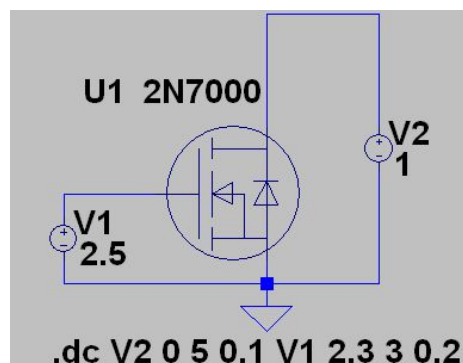
$$U_{п} = 2U_{зв1} - U_{зв2}$$

Знаючи порогову напругу можна визначити коефіцієнт b .

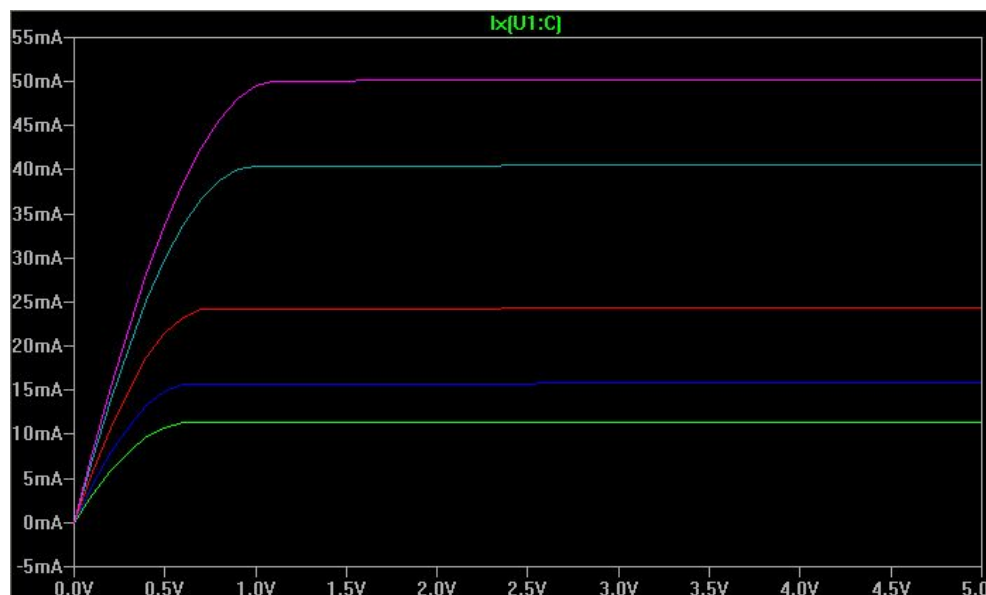
Ваше завдання полягає у тому, щоб визначити порогову напругу та коефіцієнт b транзистора 2N7000 з одержаного вище графіка залежності $I_c(U_{зв})$ за записати формулу $I_c = \frac{b}{2} \cdot (U_{зв} - U_{п})^2$ підставивши в неї ці значення. Перевірте, чи вірно описує формула знайдена для реальної схеми залежність $I_c(U_{зв})$, одержану під час симуляції.

2. Дослідження залежності $I_c(U_{вс})$ для п-канального польового МДН транзистора 2N7000

Складіть наступну схему:



Варіюючи напругу $U_{зв}$ (джерело V1) в діапазоні від 1.2 до 2 В з кроком 0.2 В та варіюючи напругу $U_{вс}$ (джерело V2) в діапазоні від 0 до 5 В з кроком 0.1 В, визначте залежність $I_c(U_{вс})$ для різних значень напруг на затворі, одержавши сімейство вихідних статичних характеристик транзистора:

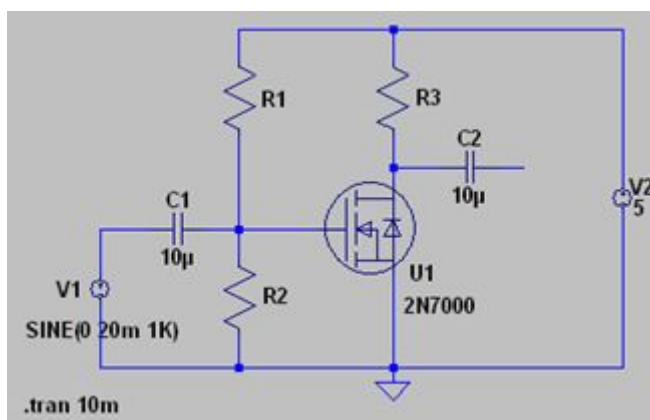


Чим більша буде напруга $U_{зв}$, тим вище буде розташований графік залежності $I_c(U_{вс})$, оскільки більше значення напруги на затворі приводить до більшого значення струму стоку.

Ваше завдання полягає у тому, щоб одержати такі ж графіки, як на рисунку (як в LTSpice, так і на реальній схемі) та перевірити, що для всіх кривих зупинка росту струму стоку (насичення) настає за умови $U_{вс} > U_{зв} - U_n$.

3. Дослідження підсилювача з загальним витоком на польовому МДН транзисторі 2N7000

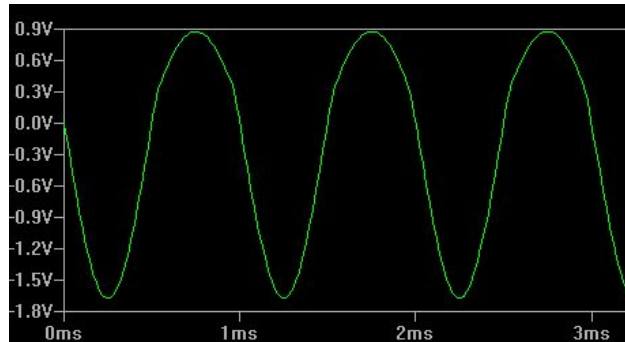
3.1. Складіть підсилювач з загальним витоком на польовому МДН транзисторі 2N7000 за схемою, яка наведена нижче. Запишіть номінали виданих вам резисторів R1, R2, R3. Напруга джерела живлення (V2) має бути 5В. Джерелом вхідної напруги (V1) маж бути генератор ГЗ-112. Підсилений змінний вихідний сигнал повинен зніматися між землею та не підключеним виводом конденсатора C2. Зазвичай R1 має найбільший опір (порядку 100 КОм), R3 має найменший опір (менше 1.5 КОм). Опір R2 складає кілька десятків КОм.



3.2. Виставте напругу генератора V1 рівну 0 В (або взагалі відключіть джерело V1 від схеми). Виміряйте та запишіть напругу між витоком і затвором $U_{зв0}$ (напруга на резисторі R2) при відсутності вхідного сигналу. Виміряйте та запишіть напругу між витоком і стоком $U_{вс0}$ при відсутності вхідного сигналу. Виміряйте струм стоку $I_{с0}$ при відсутності вхідного сигналу. Це будуть параметри робочої точки спокою вашого підсилювача, які визначають його коефіцієнт підсилення.

3.3. Виставте на генераторі ГЗ-112 (джерело V1) гармонічну синусоїдальну напругу вхідного сигналу амплітудою 20 мВ та частотою 1 КГц. На один канал двохканального осцилографа виведіть вхідну гармонічну напругу з джерела V1, а на інший канал виведіть підсилений гармонічний сигнал на виході. Замалюйте (сфотографуйте) ці сигнали. Переконайтесь, що схема зсуває фазу сигналу на 180 градусів. Визначте коефіцієнт підсилення за напругою, як відношення амплітуди гармонічного сигналу на виході до амплітуди гармонічного сигналу на вході.

- 3.4. Знайдіть значення амплітуди гармонічного сигналу на вході, при якій починається спотворення форми вихідного сигналу на виході (форма вихідного сигналу починає відрізнятися від синусоїдальної). Ці спотворення вихідного сигналу можуть виглядати приблизно так:



- Знайдене значення визначає максимальну величину змінної напруги на вході, при якій схема виходить з лінійного режиму підсилення і починають виникати нелінійні спотворення сигналу на виході.
- 3.5. Визначте передаточну провідність транзистора g_m для обраної робочої точки спокою. Збільшіть напругу між затвором і витоком на $\Delta U_{зв}$ (це може бути 0.05...0.2 В на ваш вибір) шляхом збільшення опору резистору R2. Далі знайдіть нове значення струму стоку $I_{c1}(U_{зв0} + \Delta U_{зв})$. Далі розрахуйте $\Delta I_c = I_{c1} - I_{c0}$. Після цього знайдіть передаточну провідність за формулою $g_m = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зв}}$. Передаточну провідність також можна розрахувати за формулою $g_m = b \cdot (U_{зв0} - U_{п})$. Величини b та $U_{п}$ ви визначили в минулих завданнях.
- 3.6. Розрахуйте теоретичний коефіцієнт підсилення за напругою даної схеми за формулою $K_U = \frac{u_{вих}}{u_{вх}} = -R_3 \cdot g_m$. Порівняйте розраховане значення з коефіцієнтом передачі за напругою, який раніше був визначений експериментально.

1.3. Контрольні запитання

1. Намалюйте умовне графічне позначення польового МДН транзистора з індукованим n-каналом та позначте його контакти;
2. Напишіть формулу залежності $I_c(U_{вс})$ для польового МДН транзистора з індукованим n-каналом в режимі насичення;

3. Намалуйте залежність струму стоку від напруги між затвором і витоком для польового МДН транзистора з індукованим n-каналом;
4. Що таке передаточна провідність польового МДН транзистора з індукованим n-каналом? По якій формулі її можна розрахувати? Як її визначити з графіку залежності $I_c(U_{зв})$?
5. Намалуйте залежність струму стоку від напруги між витоком і стоком польового МДН транзистора з індукованим n-каналом для різних значень напруг між витоком і затвором;
6. Яку умову необхідно виконати, щоб між витоком і стоком польового МДН транзистора з індукованим n-каналом почав протікати струм?
7. Від чого залежить опір каналу польового МДН транзистора з індукованим n-каналом?
8. Що таке порогова напруга польового МДН транзистора з індукованим n-каналом?
9. Чому дорівнює струм затвору для польового МДН транзистора з індукованим n-каналом?
10. Чому дорівнює вхідний опір польового МДН транзистора з індукованим n-каналом?
11. Намалуйте конструкцію польового МДН транзистора з індукованим n-каналом.
12. Чому дорівнює опір каналу відкритого польового МДН транзистора?
13. Позначте область лінійного зростання струму та область насичення на графіку залежності $I_c(U_{вс})$.
14. Що таке режим відсічки польового МДН транзистора з індукованим n-каналом?
15. При якій напрузі $U_{вс}$ струм I_c досягає насичення і далі не збільшується?
16. За яких умов польовий МДН транзистор з індукованим n-каналом можна замінити керованим джерелом струму?
17. Що таке робоча точка спокою підсилювача на польовому МДН транзисторі з індукованим n-каналом? Які струми і напруги характеризують цю робочу точку? Як їх задати?
18. Виведіть формулу залежності $U_{вих}(U_{вх})$ для підсилювача з загальним витоком на польовому МДН транзисторі з індукованим n-каналом та намалуйте графік такої залежності;
19. Що таке навантажувальна пряма підсилювача на польовому МДН транзисторі з індукованим n-каналом? Виведіть її формулу.
20. Виведіть формулу коефіцієнта підсилення за напругою для польового МДН транзистора з індукованим n-каналом;
21. Чому дорівнює зсув фаз між вхідною та вихідною напругою в підсилювачі на польовому МДН транзисторі з індукованим n-каналом?

22. Поясніть появу нелінійних спотворень вихідного сигналу у підсилювачі на польовому МДН транзисторі з індукованим n-каналом?
23. Від чого залежить коефіцієнт підсилення за напругою у підсилювачі на польовому МДН транзисторі з індукованим n-каналом?
24. Намалуйте схему для вимірювання залежності $I_c(U_{зв})$, яку ви використовували в лабораторній роботі;
25. Як можна експериментально визначити порогову напругу польового МДН транзистора з індукованим n-каналом та його коефіцієнт b в формулі залежності $I_c(U_{зв})$?
26. Чому дорівнює максимальний струм стоку для транзистора 2N7000, який використаний в лабораторній роботі?
27. Опишіть режим аналізу (моделювання) DC Sweep в LTSpice.

1.4. Рекомендована література

1. Борисов О.В. Основи твердотіЛЬНОЇ електроніки: посібник для вищих навчальних закладів. – Київ: Освіта України, 2011, 462 с.
2. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. Второе издание. – Москва, 2001, 488с.
3. Відео-лекції по властивостям кремнію і фізиці роботи польового МДН транзистора з індукованим n-каналом.
<https://www.youtube.com/watch?v=Y1ZD6zbEIw0>
https://www.youtube.com/watch?v=fl_LTmkOYGI
4. Завантаження та підключення бібліотек для LTSpice:
<https://www.youtube.com/watch?v=tJn63ScpS2M>
5. Документація на транзистор 2N7000:
<https://www.fairchildsemi.com/datasheets/2n/2n7000.pdf>

Лабораторна робота №4

Дослідження підсилювача на біполярному транзисторі з загальним емітером.

1. Складіть схему підсилювача, зображеного на рис.3.1. з виданих вам деталей. Серед трьох резисторів R1, R2, Rk, резистор R1 має найбільший опір. Резистор Rk має найменший опір. Опір резистора R2 більший ніж у Rk, але менший ніж у R1. Подайте на вхід схеми синусоїдальний сигнал з генератора, з амплітудою 10мВ і частотою 1КГц. Переконайтеся, що схема підсилює сигнал без спотворень. Під час налагодження схеми майте на увазі, що при відсутності вхідного сигналу (при відключеному генераторі), напруга між колектором і емітером повинна приблизно дорівнювати половині напруги живлення: $U_{ке} = U_{жив}/2$. Досягти цього можна змінюючи $U_{бе} = U_{R2}$. Зі збільшення $U_{бе}$, $U_{ке}$ буде зменшуватись і навпаки.

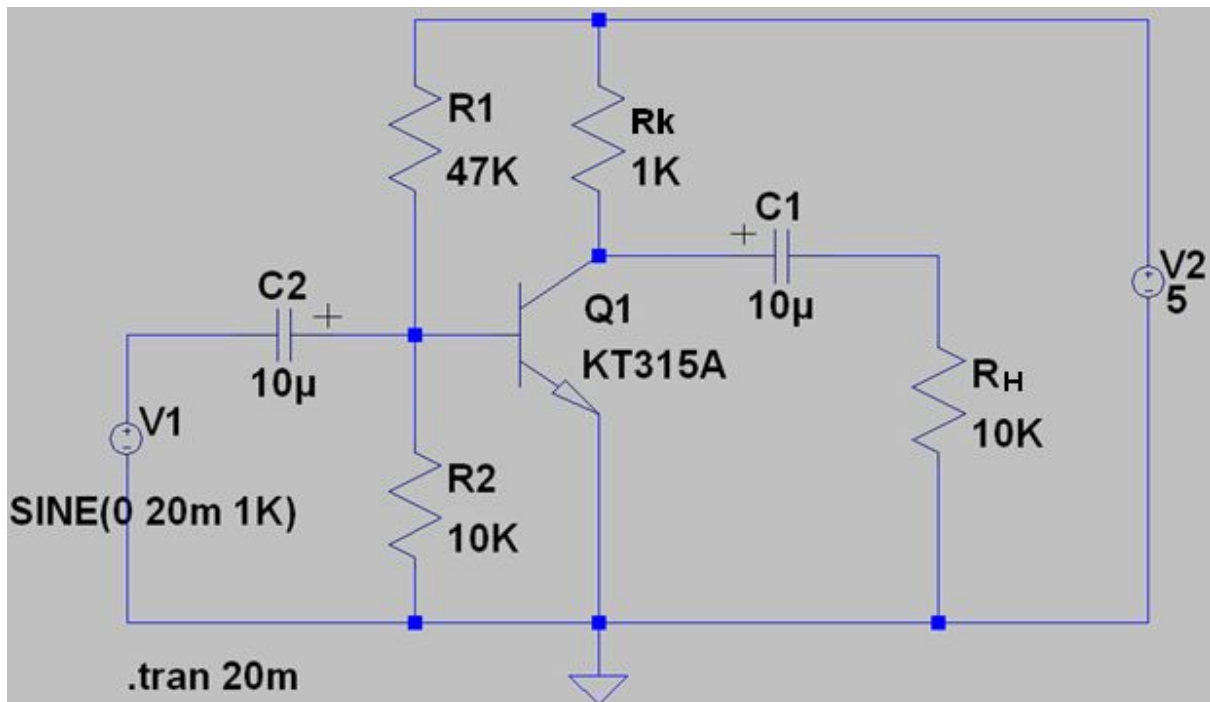


Рис.3.1 – Схема підсилювача

2. Визначте характеристики робочої точки спокою підсилювача (при відсутності сигналу з генератора). Для цього відключіть генератор від схеми і виміряйте $U_{бе0}$, $I_{б0}$, $U_{ке0}$, $I_{к0}$ (рис.3.2).

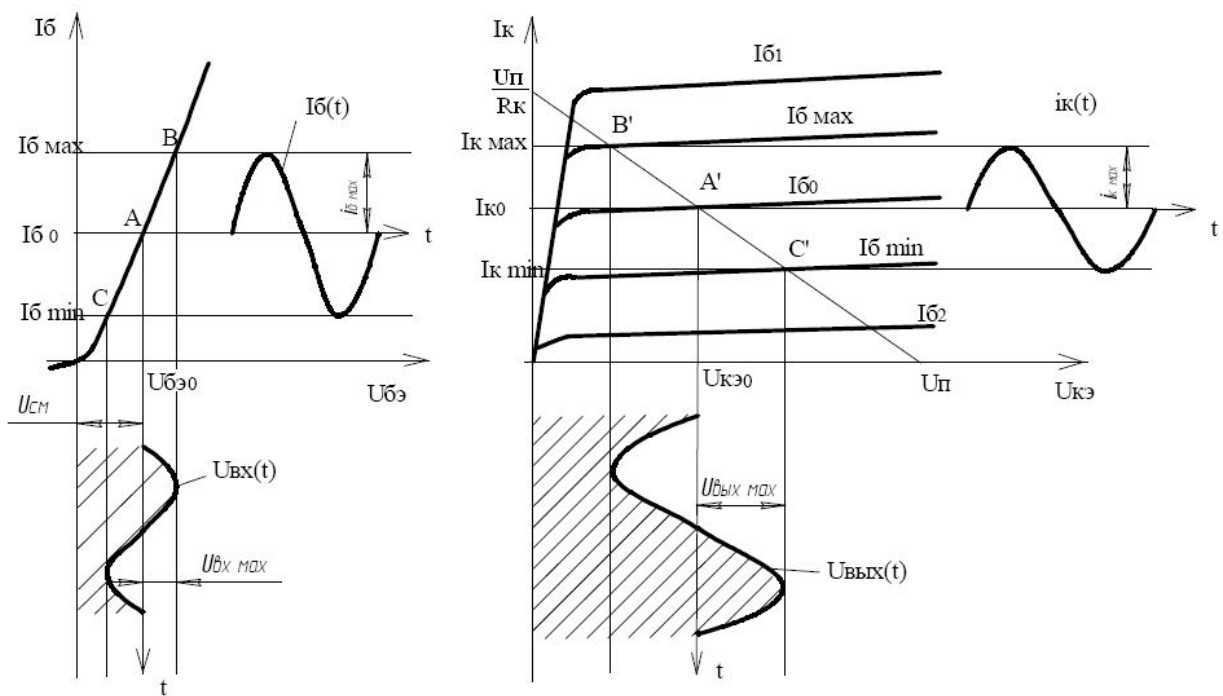


Рис.3.2 – Вхідна та вихідна характеристики підсилювача на біполярному транзисторі з загальним емітером, що ілюструють принцип його роботи.

3. **Виміряйте вхідний опір підсилювача $R_{вх}$.** Для вимірювання вхідного опору підсилювача, послідовно з джерелом вхідного змінного сигналу (генератором) необхідно ввімкнути змінний резистор $R_{вар}$. Резистори $R_{вар}$ і $R_{вх}$ утворять подільник напруги. Якщо резистори подільника напруги мають однаковий опір, на виході подільника напруги виділиться половина напруги, прикладеної до його входу.

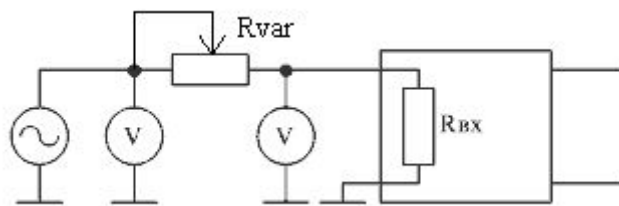


Рис.3.3 – Схема вимірювання вхідного опору підсилювача

Алгоритм визначення вхідного опору підсилювача за схемою наведеною на рис.3.3 наступний. Встановити на виході генератора змінний сигнал амплітудою 20мВ, частотою 1КГц (амплітуду напруги проконтролювати осцилографом). Обертаючи ручку змінного резистора, досягти на вході підсилювача половини напруги генератора, тобто 10 мВ (амплітуду напруги на вході підсилювача можна визначити осцилографом). В цьому випадку опір змінного резистора $R_{вар}$ буде дорівнювати вхідному опору схеми. Половина прикладеного від генератора змінного

сигналу виділиться на змінному резисторі R_{var} , а половина на входному опорі $R_{вх}$. Від'єднуємо R_{var} від схеми і вимірюємо його значення омметром. Це і буде значення входного опору. Отримане значення входного опору підсилювача повинно лежати в межах кількох КОм (не більше 3 КОм).

4. **Виміряйте вихідний опір підсилювача $R_{вих}$.** Вихідний опір підсилювача вимірюється таким же методом, як і входний опір. Спочатку необхідно **відключити** резистор навантаження від виходу підсилювача і змінюючи напругу на генераторі встановити на виході підсилювача напругу холостого ходу $U_{хх}=1В$ (або іншу круглу цифру). Після цього до виходу підсилювача необхідно **підключити** у якості навантаження змінний резистор і обертаючи його ручку (змінюючи опір) необхідно домогтися, щоб напруга яка виділяється на ньому досягла значення половини визначеної раніше напруги холостого ходу ($U_{Rн} = U_{rvar} = U_{хх}/2 = 0.5В$). В такому випадку опір змінного резистора навантаження буде дорівнювати вихідному опору підсилювача. Половина ЕРС еквівалентного генератора ($U_{хх}$), яким можна замінити вихід підсилювача в режимі малого сигналу, буде виділятися на вихідному опорі підсилювача, а друга половина – на змінному резисторі навантаження. Далі необхідно від'єднати змінний резистор від виходу (не чіпаючи його ручку налаштування опору) і виміряти його опір омметром. Це і буде вихідний опір підсилювача. Вихідний опір повинен приблизно дорівнювати R_k .
5. **Виміряти амплітудну характеристику підсилювача.** Амплітудна характеристика підсилювача зображена на рис.3.4 і являє собою залежність напруги на виході підсилювача від напруги на вході підсилювача: $U_{вих}(U_{вх})$.

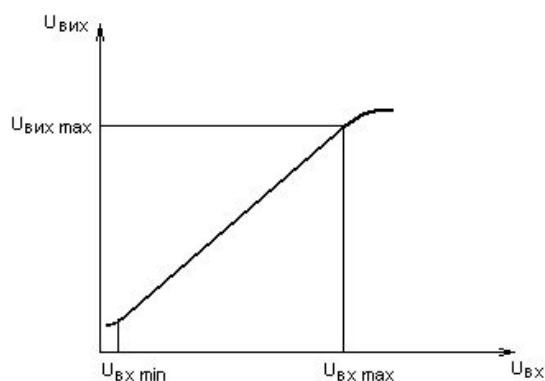


Рис.3.4 – Амплітудна характеристика підсилювача: $U_{вих}(U_{вх})$

Як видно з рис.3.4, по мірі збільшення $U_{вх}$, відбувається лінійне зростання $U_{вих}$. Ця залежність описується формулою $U_{вих} = K_u * U_{вх}$, де K_u – коефіцієнт підсилення за напругою. Така залежність спостерігається до моменту досягнення входною напругою певного

критичного значення $U_{\text{вх}} = U_{\text{вх max}}$. При подальшому збільшенні вхідної напруги, вихідна напруга вже не зростає, а залишається постійною. Дана ситуація підтверджує той факт, що напруга на виході підсилювача звука не може зростати нескінченно і не може бути більшою за напругу джерела живлення. Напруга на вході $U_{\text{вх max}}$, при якій напруга на виході перестає зростати називається напругою насичення. Для вимірювання амплітудної характеристики нашого підсилювача потрібно спершу визначити $U_{\text{вх max}}$. Для цього необхідно збільшувати амплітуду змінної синусоїдальної напруги на вході підсилювача з 10мВ, доки сигнал на виході підсилювача не почне спотворюватись (його форма почне відрізнятися від синусоїди). Як тільки почнуться спотворення вихідного сигналу, необхідно запам'ятати значення амплітуди сигналу на вході підсилювача. Це і буде $U_{\text{вх max}}$ (повинно вийти значення рівне кільком десяткам мілівольт). В діапазоні амплітуд вхідної напруги від 4мВ до $U_{\text{вх max}}$ необхідно обрати 6-8 точок, рівновіддалених одна від одної. Для кожного зі знайдених значень амплітуди вхідної синусоїдальної напруги потрібно визначити амплітуду напруги на виході підсилювача. Виміряні значення для всіх точок звести в таблицю і побудувати графік залежності $U_{\text{вих}}(U_{\text{вх}})$. З графіку визначити K_u .

6. Для всіх значень вхідної і вихідної напруги, визначених у попередньому пункті, необхідно знайти значення вхідного і вихідного струму за формулами $I_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/R_{\text{вх}}$ і $I_{\text{вих}} = U_{\text{вих}}/R_{\text{н}}$. Занести отримані значення до таблиці. Намалювати графік залежності $I_{\text{вих}}(I_{\text{вх}})$. З графіку визначити коефіцієнт підсилення за струмом K_I .
7. Розрахувати параметри підсилювача теоретично. Порівняти розраховані значення зі значеннями, отриманими експериментально.

Формули для розрахунку:

$$g_m = \frac{I_{\text{к0}}}{\varphi_T}; \quad K_U = -g_m \cdot (R_k \parallel R_{\text{н}}); \quad K_I = K_U \cdot \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{н}}}; \quad R_{\text{вих}} = R_k; \quad R_{\text{вх}} = R_1 \parallel R_2 \parallel r_i$$

$r_i = \frac{\beta}{g_m}$ - вхідний опір транзистора, ввімкненого по схемі з загальним емітером.

$$\beta = \frac{I_{\text{к0}}}{I_{\text{б0}}}$$

Контрольні запитання

1. Якою моделлю можна замінити біполярний транзистор в режимі великого сигналу?

2. Наведіть відомі вам коефіцієнти біполярних транзисторів;
3. Порівняйте підсилювач з загальним емітером (ЗЕ) і підсилювачі з загальною базою (ЗБ) та загальним колектором (ЗК) за критеріями вхідного та вихідного опорів, коефіцієнтів передачі за струмом і напругою. В якій зі схем найбільший вхідний опір (K_u , K_i) і т.д.?
4. Яка з трьох схем підсилювачів на біполярному транзисторі (ЗЕ, ЗБ та ЗК) інвертує фазу сигналу?
5. В якій з трьох схем підсилювачів на біполярному транзисторі (ЗЕ, ЗБ та ЗК) найбільший коефіцієнт підсилення за потужністю і чому?
6. Виконайте розрахунок підсилювача з ЗЕ по постійному струму (необхідно вміти розрахувати значення резисторів підсилювача, щоб задати необхідні U_{be0} , I_{b0} , U_{ce0} , I_{c0}).
7. Як впливає опір навантаження (R_n) на значення K_u ?
8. Як впливає опір R_k на значення K_u ?
9. Як повинні бути зміщені р-п переходи транзистора для того, щоб він працював як підсилювач?
10. Намалюйте схему підсилювача з ЗЕ для малого сигналу і виведіть формулу K_u ;
11. Намалюйте схему підсилювача з ЗЕ для малого сигналу і виведіть формулу вхідного опору;
12. Намалюйте схему підсилювача з ЗЕ для малого сигналу і виведіть формулу вихідного опору;
13. Виведіть формулу K_i для схеми підсилювача з ЗЕ, якщо відомий K_u , R_n , $R_{вх}$;
14. Як впливає опір навантаження (R_n) на K_i для схеми підсилювача з ЗЕ?
15. Виведіть формулу $g_m = \frac{I_{c0}}{\varphi_T}$;
16. За яких умов можна використовувати малосигнальну модель біполярного транзистора? В яких межах повинна лежати амплітуда вхідного сигналу?
17. Намалюйте вхідні та вихідні статичні характеристики біполярного транзистора, ввімкненого за схемою з загальним емітером;
18. Виведіть формулу навантажувальної прямої для підсилювача з ЗЕ;
19. Як залежать параметри підсилювача з ЗЕ (g_m , $R_{вх}$, $R_{вих}$, K_u , K_i) від значення I_{c0} ?
20. Як залежать параметри підсилювача на біполярному транзисторі від температури?

21. Поясніть методику вимірювання вхідного і вихідного опору, яка була застосована в лабораторній роботі;
22. Від чого залежать спотворення сигналу на виході підсилювача?