

**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності**

Ю. О. Борзов, О. О. Смотри

**Комп'ютерна схемотехніка:
Лабораторний практикум (I частина)**

**для студентів, що навчаються за спеціальностями
галузі знань 12 “Інформаційні технології”**

Львів - 2019

Комп'ютерна схемотехніка

Комп'ютерна схемотехніка: лабораторний практикум для студентів, що навчаються за спеціальностями галузі знань 12 “Інформаційні технології” денної та заочної форм навчання / уклад.: Ю.О. Борзов, О.О. Смотр. – Львів, 2019. – 67 с.

Рецензенти :

Батюк А.Є., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизованих систем управління НУ "Львівська політехніка";

Кухарська Н.П., кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри управління інформаційною безпекою Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.

Укладачі:

Борзов Ю.О., кандидат технічних наук, доцент кафедри управління проектами, інформаційних технологій та телекомунікацій Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.

Смотр О.О., кандидат технічних наук, доцент кафедри управління проектами, інформаційних технологій та телекомунікацій Львівського державного університету безпеки життєдіяльності.

Затверджено на засіданні кафедри управління проектами, інформаційних технологій та телекомунікацій, протокол № 9 від «21» березня 2019 р.

Схвалено та рекомендовано до друку Вченою радою Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, протокол № 9 від «17» квітня 2019 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Лабораторна робота №1.....	5
Тема. Знайомство з можливостями програми імітаційного моделювання Multisim за тематикою занять.	5
Лабораторна робота №2.....	13
Тема. Дослідження напівпровідникових діодів за допомогою програмного комплексу Multisim.	13
Лабораторна робота №3.....	20
Тема. Дослідження біполярних транзисторів.....	20
Лабораторна робота №4.....	27
Тема. Визначення основних характеристик випростувачів змінного струму..	27
Лабораторна робота №5.....	32
Тема. Визначення основних характеристик параметричного стабілізатора напруги.	32
Лабораторна робота № 6.....	36
Тема. Дослідження підсилювачів електричних сигналів.	36
Лабораторна робота №7.....	43
Тема. Дослідження операційних підсилювачів.	43
Лабораторна робота №8.....	50
Тема. Дослідження автогенератора на операційному підсилювачі.	50
Лабораторна робота № 9.....	56
Тема. Дослідження автоколивальних мультівібраторів на операційних підсилювачах	56
Лабораторна робота № 10.....	60
Тема Дослідження електронних ключів на базі напівпровідникових транзисторів.....	60

Вступ

Застосування комп'ютерних віртуальних лабораторій в навчальному процесі допомагає студентам закріплювати та підтверджувати теоретичні знання, отримані під час лекцій, моделювати різноманітні електронні схеми та досліджувати їх режими роботи, проводити детальний аналіз отриманих результатів. Використовуючи доступне програмне забезпечення на власних персональних комп'ютерах і необхідне методичне забезпечення у вигляді розроблених лабораторних практикумів, студенти мають можливість проводити моделювання та виконання лабораторних робіт самостійно та дистанційно. Також використання таких програм значно спрощує процес моделювання та дослідження схем і знімає проблему наявності достатньої елементної бази та вимірювальної апаратури. Крім того, у реальному вимірі часу надається можливість вносити зміни в параметри елементів та досліджувати вплив таких змін на функціонування електронних схем.

Лабораторний практикум є збіркою завдань та інструкцій для закріплення теоретичних знань, отриманих на лекційних заняттях з дисципліни "Комп'ютерна схемотехніка і архітектура комп'ютера".

На лекційних заняттях вивчаються теоретичні питання з основ побудови і використання та принципів функціонування аналогових та цифрових пристроїв. Лабораторний практикум є збіркою завдань та інструкцій для закріплення теоретичних знань, отриманих на лекційних заняттях з дисципліни "Комп'ютерна схемотехніка і архітектура комп'ютера".

Лабораторні роботи виконуються із застосування програмного комплексу комп'ютерного моделювання електронних схем та пристроїв Multisim компанії розробника National Instruments. Компанія-виробник випустила безкоштовну версію програми версія NI Multisim Analog Devices Edition, яка має лише обмеження щодо застосування кількості елементів в одній схемі.

Програма NI Multisim має зручний інтерфейс, достатньо проста у застосуванні і імітує досліду лабораторію, яка обладнана робочим столом, елементною базою та вимірювальними приладами для дослідження схем у реальному вимірі часу.

Кожна лабораторна робота практикуму містить тему, мету, короткі теоретичні відомості, завдання, порядок виконання завдань і список питань для самоперевірки. На захист виконаної студентом лабораторної роботи оформлюється окремий звіт та представляється електронний документ, із виконаним завданням. Звіт повинен включати такі пункти:

1. Мета лабораторної роботи.
2. Короткі теоретичні відомості.
3. Індивідуальне завдання (згідно з варіантом) лабораторної роботи.
4. Основні етапи виконання роботи, електронні схеми та отримані результати.
5. Висновки.

Лабораторна робота №1

Тема. Знайомство з можливостями програми імітаційного моделювання Multisim за тематикою занять.

Мета роботи: ознайомлення з можливостями програми імітаційного моделювання в електроніці "NI Multisim".

1.1. Огляд NI Multisim

Програмний пакет схемотехнічного моделювання NI Multisim призначений для імітаційного моделювання та аналізу електронних схем. NI Multisim дає змогу моделювати аналогові, цифрові та цифро-аналогові схеми різного ступеня складності. Її найважливіші особливості:

- інтуїтивний редактор введення схем;
- змішане цифрове і аналогове проектування;
- широкий набір вимірювальних приладів, які максимально наближені до реальних прототипів;
- бібліотеки електронних компонентів;
- можливість створення нових бібліотек електронних компонентів;
- можливість як ідеального, так і реального моделювання;
- єдиний загальноцільовий імітатор для використання з частотами понад 100 МГц;
- можливість застосування більше 15 різноманітних функцій аналізу.

1.2. Запуск та налагоджування NI Multisim

Після запуску програми з меню "Пуск" або з піктограми на робочому столі, з'явиться вікно Multisim (рис. 1.1) з робочими полем та панеллю керування.

Досліджувана схема збирається на робочому полі при одночасному використанні миші і клавіатури. Застосування в роботі лише клавіатури неможливе.

При побудові та редагуванні схем виконуються такі операції:

- вибір компонента з бібліотеки компонентів;
- виділення об'єкта;
- переміщення об'єкта;
- копіювання об'єктів;
- видалення об'єктів;
- поєднання компонентів схеми провідниками;
- установка значень компонентів;
- підключення приладів.

Комп'ютерна схмотехніка

Якщо схема не поміщається на екрані монітора, будь яку ділянку можна переглянути за допомогою лінійок прокрутки, розташованих праворуч і під робочим полем.

Після побудови схеми і підключення приладів аналіз роботи починається після натискання вимикача в лівому верхньому куті вікна програми (рис. 1.2).

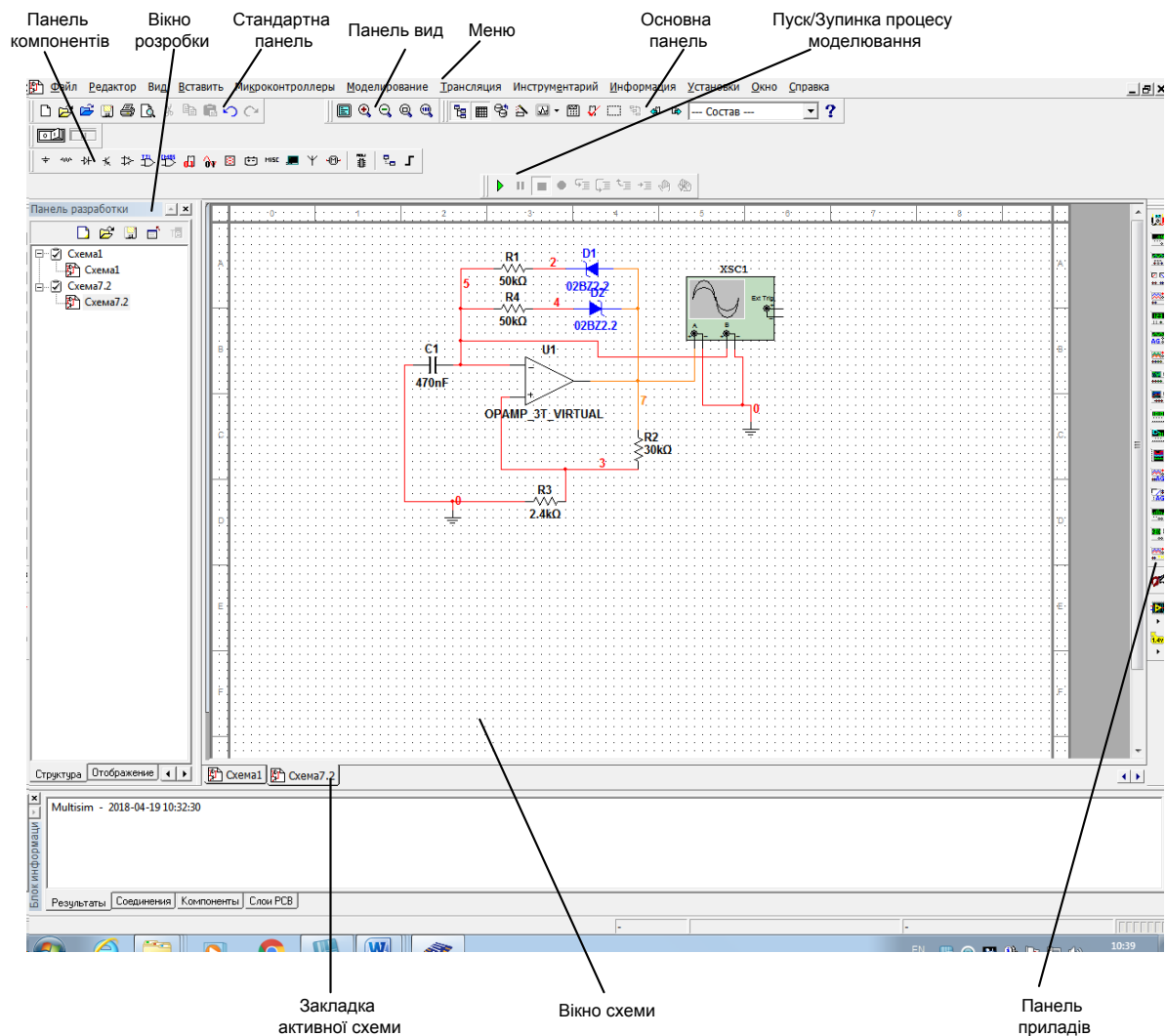


Рис. 1.1. Середовище Multisim

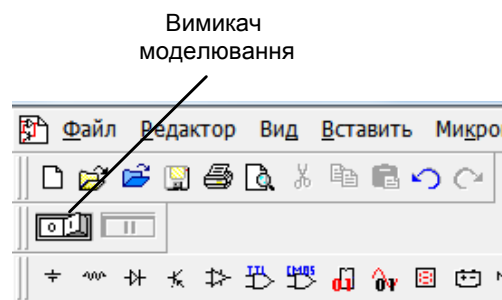


Рис. 1.2. Вимикач процесу аналізу роботи схеми

Панель інструментів "*Стандартна*" складається з піктограм типових дій, передбачених у Windows – "*Новий документ*", "*Відкрити папку*",

"Зберегти", "Роздрукувати", "Попередній перегляд", "Вирізати", "Скопіювати", "Вставити", "Крок назад", "Крок вперед".

Панель інструментів "**Вид**" слугує для масштабування зображення.

Панель інструментів "**Основна**" містить кнопки керування сервісом проекту.

1.3. Компоненти NI Multisim 9

Електронні компоненти Multisim розташовані на панелі інструментів "Компоненти" і систематизовані по групах (рис. 1.3).

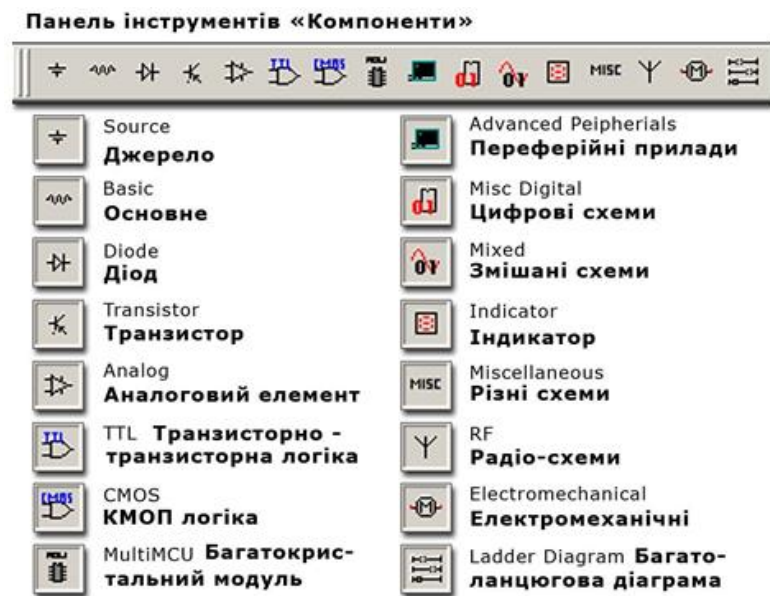


Рис. 1.3. Панель інструментів "Компоненти"

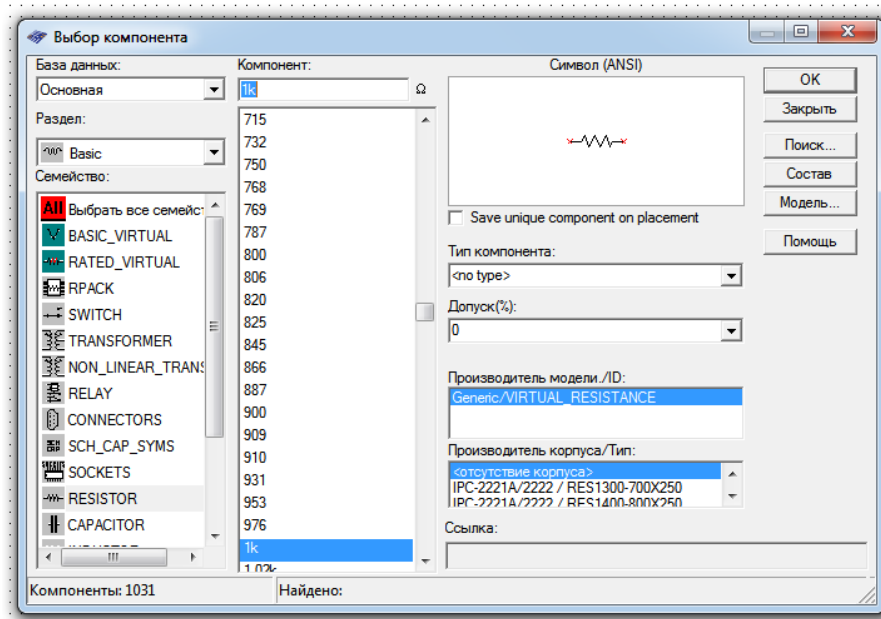


Рис. 1.4. Вікно вибору компонентів

"База даних" – дає змогу обрати компоненти із трьох баз даних – основної (Master Database), корпоративної (Corporate Database), та бази даних користувача (User Database) (рис. 1.4). За замовчуванням викликається основна база даних (Master Database). Нижній список – "Розділ" – дає можливість вибрати іншу групу компонентів. Потрібний компонент обираємо з правого поля, користуючись скролінгом-прокруткою. Відмічаємо компонент курсором і натискаємо кнопку "OK" лівим клацанням миші. Обраний компонент з'явиться на робочому полі Multisim.

Установка значень параметрів компонентів здійснюється в діалоговому вікні властивостей компонента, яке відкривається подвійним клацанням миші по зображенні компонента. У діалоговому вікні за допомогою клавіатури і миші потрібно ввести настройки на власний вибір компонента і натиснути "OK" або "Cancel" для підтвердження або скасування установки значень.

1.4. Інструменти NI Multisim

Потрібні вимірювальні інструменти можна знайти у вертикальній панелі з правого боку робочого поля. Натисканням миші викликаємо обраний інструмент на робоче поле. Під курсором з'являється контур обраного приладу. Ведемо контур курсором миші до місця розміщення, клацанням фіксуємо інструмент на обраному місці.

Мультиметр

Мультиметр призначений для вимірювання змінного або постійного струму або напруги, опору або затухання між двома вузлами схеми. Діапазон вимірювань мультиметра підбирається автоматично. Його внутрішній опір і струм близькі до ідеальних значень, але їх можна змінити.



Рис. 1. 5. Символ мультиметра та передня панель

Генератор сигналів

Генератор сигналів (function generator) – це джерело напруги, яке може генерувати синусоїдальні, пілкоподібні і прямокутні імпульси. Можна змінити форму сигналу, його частоту, амплітуду і постійний зсув. Діапазон генератора достатній, щоб відтворити сигнали з частотами від кількох герц до аудіо і радіочастотного діапазону.

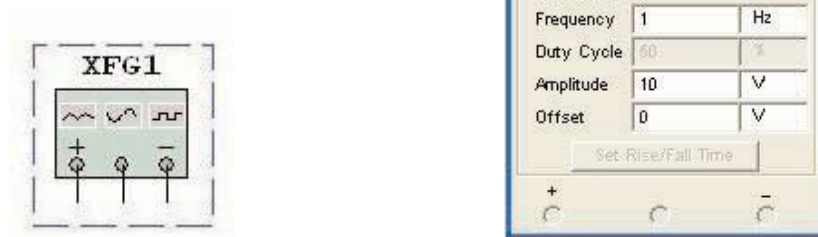


Рис. 1.6. Символ генератора сигналів та передня панель

Осцилографи

У Multisim є кілька модифікацій осцилографів, якими можна управляти як справжніми. Вони дозволяють встановлювати параметри часової розгортки і напруги, вибирати тип і рівень запуску вимірювань.

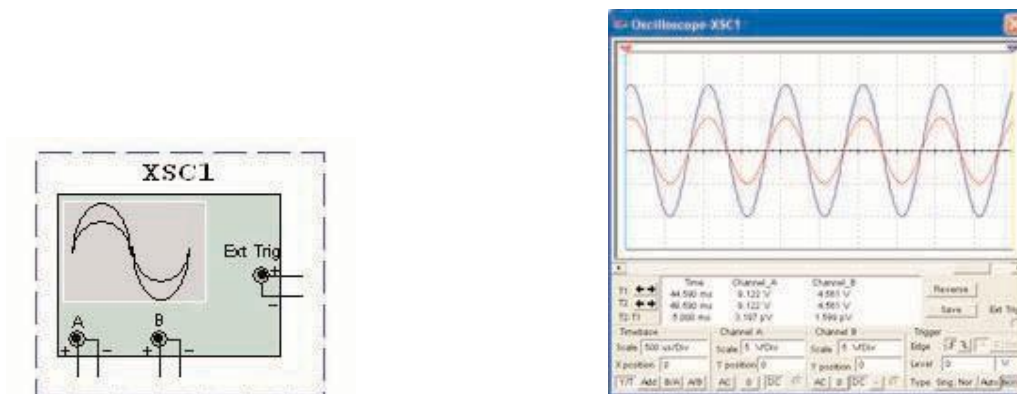


Рис. 1.7. Символ осцилографа та передня панель

У Multisim є такі осцилографи:

- 2- канальний
- 4- канальний
- Осцилограф змішаних сигналів Agilent 54622D.
- 4- канальний цифровий осцилограф із записом Tektronix TDS 2024.

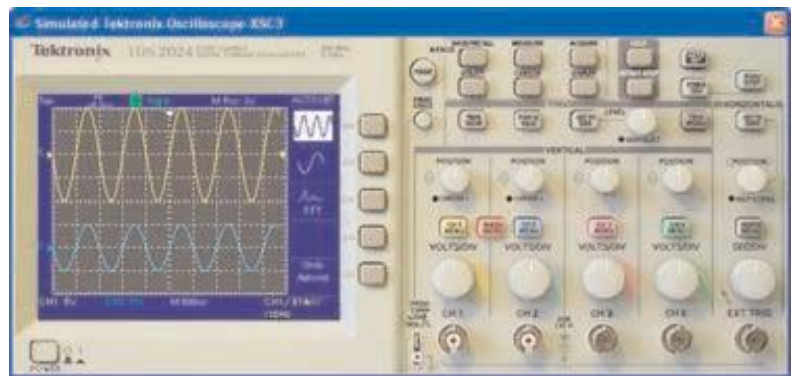
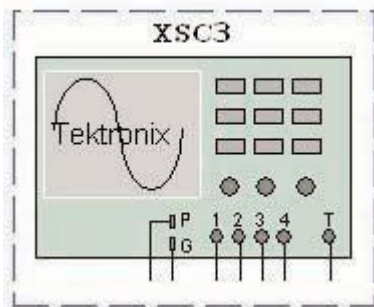


Рис. 1.8. Схематична діаграма осцилографа Tektronix та передня панель

Плоттер Боде

Плоттер Боде відображає відносний фазовий або амплітудний відгук вхідного і вихідного сигналу. Це особливо зручно під час аналізу властивостей смугових фільтрів.

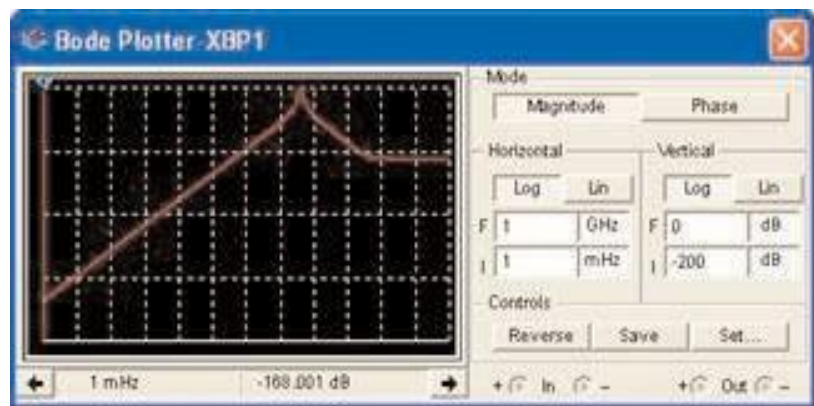
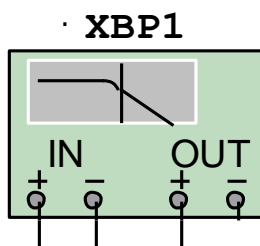


Рис. 1.9. Символ плоттера Боде та передня панель

Спектральний аналізатор

Спектральний аналізатор (spectrum analyzer) служить для вимірювання амплітуди гармоніки із заданою частотою. Також він може виміряти потужність сигналу і частотних компонент, визначити наявність гармонік в сигналі.

Результати роботи спектрального аналізатора відображаються в спектральній області, а не в часовій. Зазвичай сигнал – це функція часу, для її вимірювання використовується осцилограф. Іноді очікується синусоїдальний сигнал, але він може містити додаткові гармоніки. В результаті, неможливо виміряти рівень сигналу. Якщо ж сигнал вимірюється спектральним аналізатором, виходить частотний склад сигналу, тобто амплітуда основної та додаткових гармонік.

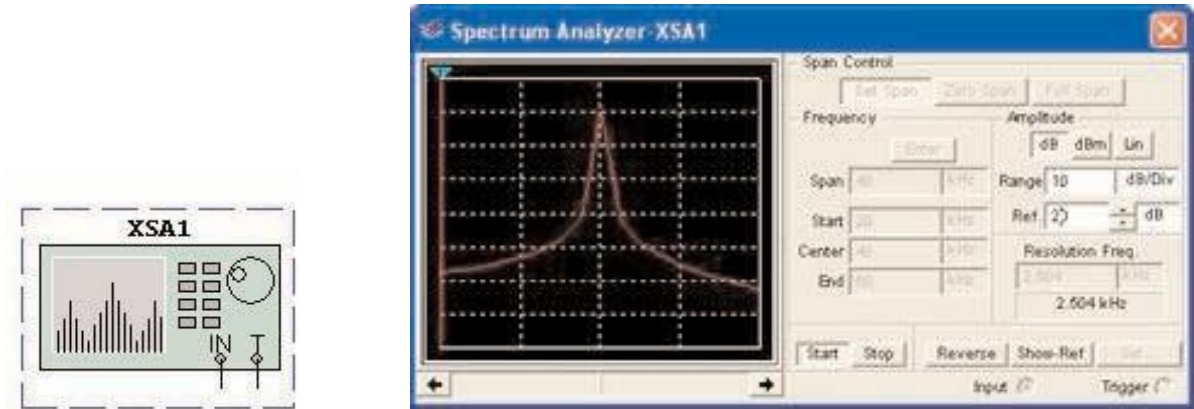


Рис. 1.10. Символ спектрального аналізатора та передня панель

1.5. Прийоми роботи у NI Multisim

Коли необхідні компоненти і прилади розміщені на робочому полі Multisim, треба їх з'єднати відповідно до схеми. З'єднання виконуються мишею. Курсор миші підводиться до одного з виводів приладу або компонента схеми. При наближенні до виводу вигляд курсору змінюється і перетворюється на кульку з перехрестям. Це означає, що "захоплення" виводу здійснено. Кліком миші фіксується перша точка з'єднання і курсор пересувається до наступного виводу. При наближенні до нього також відбувається захоплення (на виводі з'являється червона крапка). Наступним кліком з'єднання фіксується.

Знайомство з NI Multisim

1. Навчитися встановлювати режим відображення елементів згідно з європейським стандартом.
2. Навчитися відкривати файли з результатами моделювання та запускати їх симуляцію.
3. Навчитися будувати електронні схеми.
4. Навчитися робити графічні копії фрагментів роботи.
5. Навчитися досліджувати схеми за допомогою інструментів:
6. Навчитися зберігати результати моделювання в форматі **.ms**

Зміст звіту

1. Тема та мета роботи.
2. Перелік виконаних завдань з графічними копіями екрана.
3. Відповіді на запитання:
 - Як вибрати компонент для побудови схеми?
 - Що містить вікно програми Multisim?
 - Які команди меню програми ви знаєте?
 - Що означає виділення об'єкта?
 - Яким чином можна отримати короткі відомості про модель конкретного компонента?
 - Яким чином вмикається в електричне коло мультиметр?
 - Яким чином за допомогою осцилографа можна отримати значення амплітуди сигналу і його частоти?
 - Яким чином можна отримати різнокольорові осцилограми сигналів на екрані осцилографа і як їх рознести по вертикалі для зручності спостереження?
 - Наведіть класифікацію базових елементів і назвіть їх основні параметри.
 - Які типи логічних пристроїв представлені на панелі бібліотеки компонентів?
4. Висновки з роботи.

Лабораторна робота №2

Тема. Дослідження напівпровідникових діодів за допомогою програмного комплексу Multisim.

Мета роботи: вивчення принципів дії та основних властивостей напівпровідникових діодів, дослідження їх вольтамперних характеристик, ознайомлення з основними параметрами та використанням.

Теоретичні відомості

Розділ “Diodes” (рис. 2.1) містить напівпровідникові діоди, стабілітрони, світлодіоди, тиристори або диністори, симетричний диністор або діак, симетричний триністор або триак, випрямний міст.

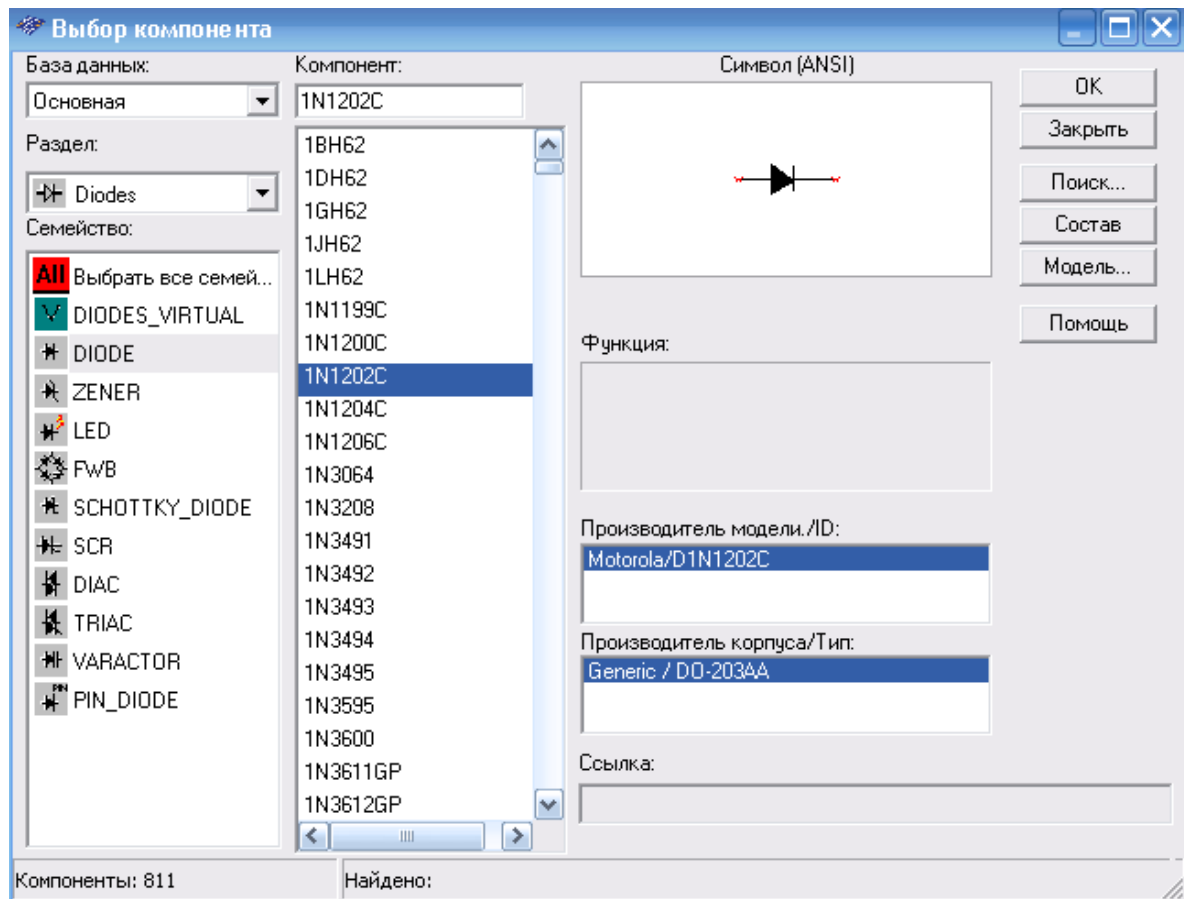


Рис. 2.1. Зовнішній вигляд меню Diodes

Розглянемо властивості діода, які задаються користувачем. Для цього натисніть два рази лівою кнопкою мишки на діоді. Якщо потрібно змінити параметри, то натисніть кнопку “Редактировать модель”. У діалоговому вікні (рис. 2.2) задати такі параметри діода:

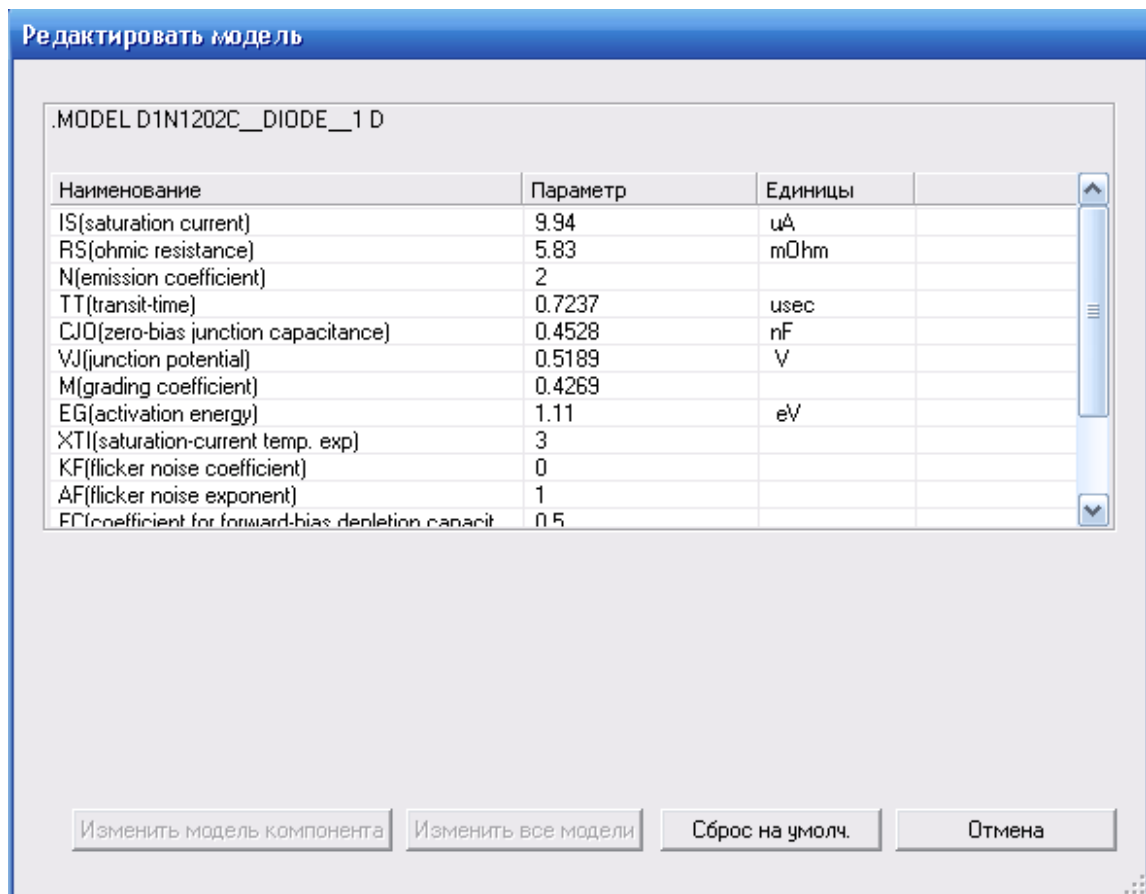


Рис. 2.2. Зовнішній вигляд меню для встановлення параметрів діода

IS – зворотний струм діода, А;

RS – об'ємний опір, Ом;

CJO – бар'єрна ємність *p-n* переходу при нульовій напрузі, Ф;

VJ – контактна різниця потенціалів, В;

TT – час переносу заряду, с;

m – конструктивний параметр *p-n* переходу;

BV – напруга пробою, В;

VZT – напруга стабілізації; параметр використовується для стабілітронів;

N – коефіцієнт інжекції;

EG – ширина забороненої зони, eВ;

XTI – температурний коефіцієнт струму насичення;

KF – коефіцієнт фліккер-шуму;

AF – показник степеня в формулі для фліккер-шуму;

FC – коефіцієнт нелінійності бар'єрної ємності при прямому зміщенні *p-n* переходу;

IZT – початковий струм стабілізації;

IBV – початковий струм пробою при напрузі BV, А; для стабілітронів замість цього параметра використовується параметр IZT;

TNOM – температура діода, °С.

Еквівалентні схеми діода показані на рисунку 2.3 (а, б), на яких позначено: А – анод, К – катод, I – джерело струму, R_s – об’ємний опір, С – ємність переходу, G_{min} – провідність, обумовлена зворотним струмом переходу.

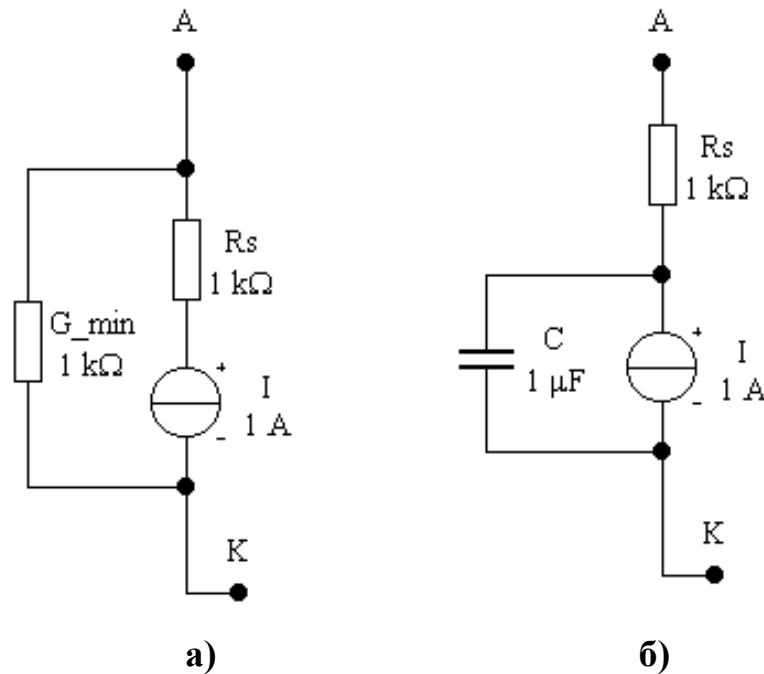


Рис. 2.3. Еквівалентні схеми діода

Вольтамперна характеристика діода визначається такими виразами:

для прямої гілки:

$$I = I_0[\exp(U/(N \cdot U_t)) - 1] + U \cdot G_{min} \quad \text{для } U \geq 0; \quad (2.1)$$

для зворотної гілки;

$$I = I_0[\exp(U/(N \cdot U_t)) - 1] + U \cdot G_{min} \quad \text{для } -5NU_t \leq U \leq 0; \quad (2.2)$$

$$I = -I_0 + U \cdot G_{min} \quad \text{для } -BV < U < -5N \cdot U_t; \quad (2.3)$$

$$I = -IBV \quad \text{для } U = -BV; \quad (2.4)$$

$$I = I_0\{\exp[-(U + BV)/(N \cdot U_t)] - 1 + BV/U_t\} \quad \text{для } U < -BV. \quad (2.5)$$

де:

$I_0 = I_s$ – зворотний струм діода при температурі T_{NOM} ;

N – коефіцієнт інжекції;

BV, IBV – напруга і струм пробою;

U_t – температурний потенціал переходу;

U – напруга на діоді.

При розрахунку перехідних процесів використовується еквівалентна схема діода (рис. 2.3б) для якої ємність переходу визначається за допомогою виразів:

$$C = \tau(dI/dU) + CJO(1 - U/U_t)^{-m} \text{ для } U < FC \cdot VJ; \quad (2.6)$$

$$C = \tau(dI/dU) + CJO(F3 - mU/U_t)/F2 \text{ для } U \geq FC \cdot VJ, \quad (2.7)$$

де:

$$F2 = (1 - FC)^{1+m}; \quad F3 = 1 - FC(1 - m);$$

τ – час переносу заряду;

CJO – бар'єрна ємність при нульовому зміщенні на переході;

VJ – контактна різниця потенціалів;

$m = 0,33 \dots 0,5$ – параметр переходу.

Дослідження прямої гілки ВАХ діода може бути проведено за допомогою схеми, зображеної на рисунку 2.4.

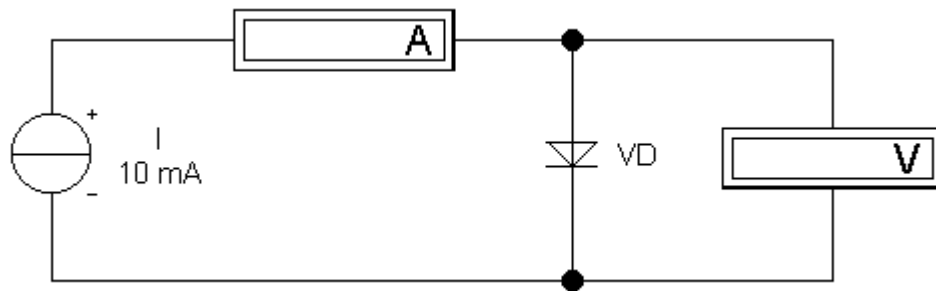


Рис. 2.4. Дослідження прямої гілки ВАХ діода

Вона складається із джерела струму I , амперметра A (можливо обійтись і без нього, оскільки струм в амперметрі точно дорівнює заданому), досліджуваного діода VD і вольтметра V для вимірювання напруги на діоді.

Для дослідження зворотної гілки ВАХ діода використовується схема зображена на рис. 2.5.

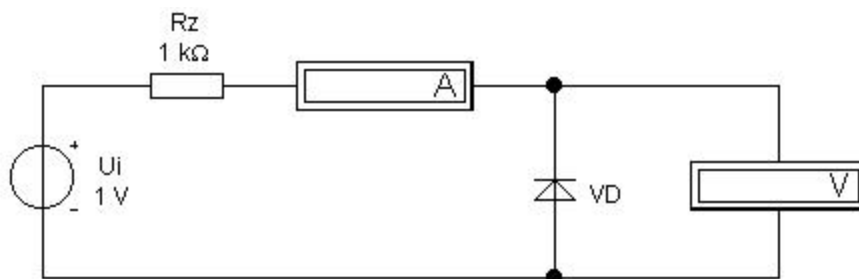


Рис. 2.5. Дослідження зворотної гілки ВАХ діода

У цій схемі використовується джерело напруги U_i із запобіжним резистором R_z для обмеження струму через діод у разі його пробоя.

Порядок виконання роботи

1. Запустіть Multisim.
2. Підготуйте новий файл для роботи. Для цього необхідно виконати такі операції з меню: *File/New* і *File/Save as*. При виконанні операції *Save as* буде необхідно вказати ім'я файлу і каталог, у якому буде зберігатися схема.
3. Розгляньте схеми на рисунках 2.6 - 2.7 і послідовно виконайте їх моделювання.

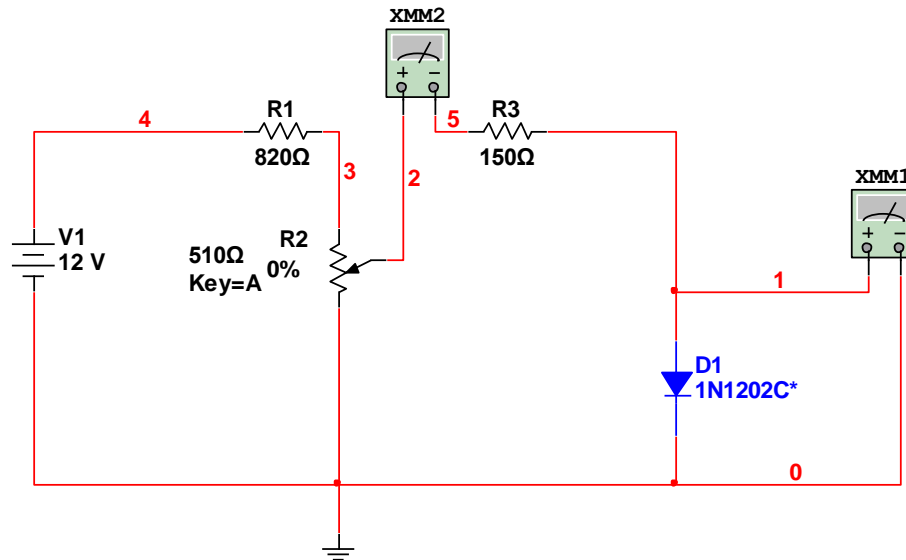


Рис. 2.6. Схема для визначення прямої гілки ВАХ

4. Встановіть крок зміни опору резистора R2 в межах 4 %. Послідовно змінюючи опір резистора R2, зніміть вольт-амперну характеристику діода в прямому вмиканні. Дані занесіть у таблицю.

$U_{пр}$									
$I_{пр}$									

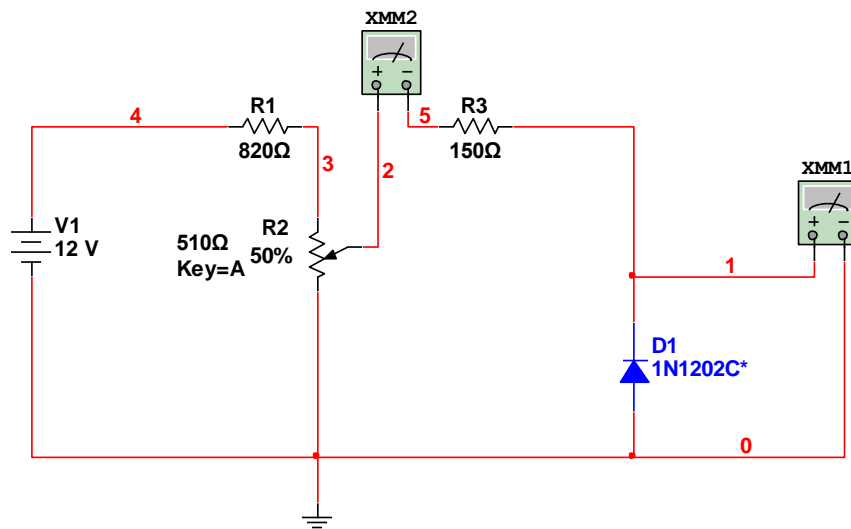


Рис. 2.7. Схема для визначення зворотної гілки ВАХ

5. Послідовно змінюючи опір резистора R2, зніміть вольт-амперну характеристику діода у зворотньому вмиканні. Дані занесіть в таблицю.

$U_{ЗВ}$								
$I_{ЗВ}$								

6. Виставивши в меню параметрів діода напругу пробою, дослідіть електричний пробій діода.

7. Побудуйте на міліметровому папері вольт-амперну характеристику діода. Зробіть висновки.

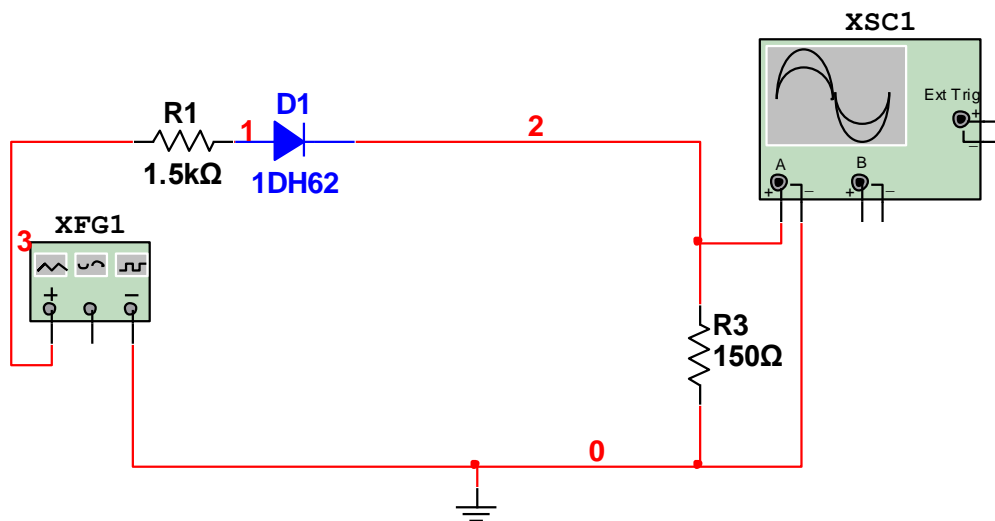


Рис. 2.8. Пряме ввімкнення діода

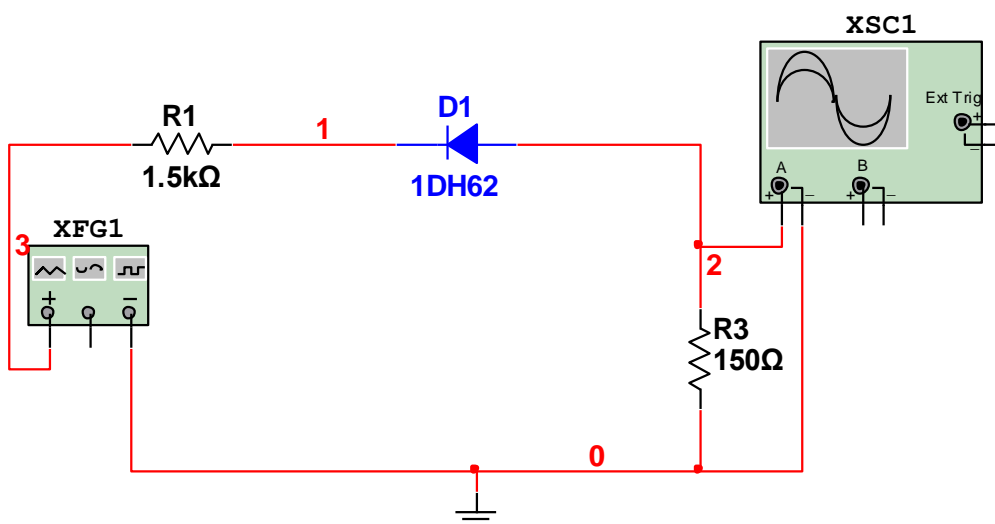


Рис. 2.9. Зворотнє ввімкнення діода

8. Розгляньте схеми на рисунках 2.8 – 2.9 і послідовно виконайте їх моделювання. Поясніть отримані часові діаграми.

9. Зробіть висновки.

Контрольні запитання

1. Як побудований напівпровідниковий діод?
2. Які типи р-n переходів ви знаєте ?
3. Назвіть складові ємності р-n переходу?
4. Назвіть і коротко охарактеризуйте типи напівпровідникових діодів?

Вимоги до оформлення звіту лабораторної роботи.

Зміст звіту

У звіті потрібно відобразити:

- 1) мету лабораторної роботи;
- 2) принципову електричну схему досліджуваного функціонального вузла;
- 3) результати експериментальних досліджень у вигляді таблиць та графіків;
- 4) висновки, що базуються на аналізі отриманих результатів.

Лабораторна робота №3

Тема. Дослідження біполярних транзисторів.

Мета роботи: дослідження характеристик, ознайомлення з основними параметрами та принципами роботи біполярних транзисторів.

Теоретичні відомості

Розділ “Транзистори” (рис. 3.1) містить біполярні та польові транзистори.

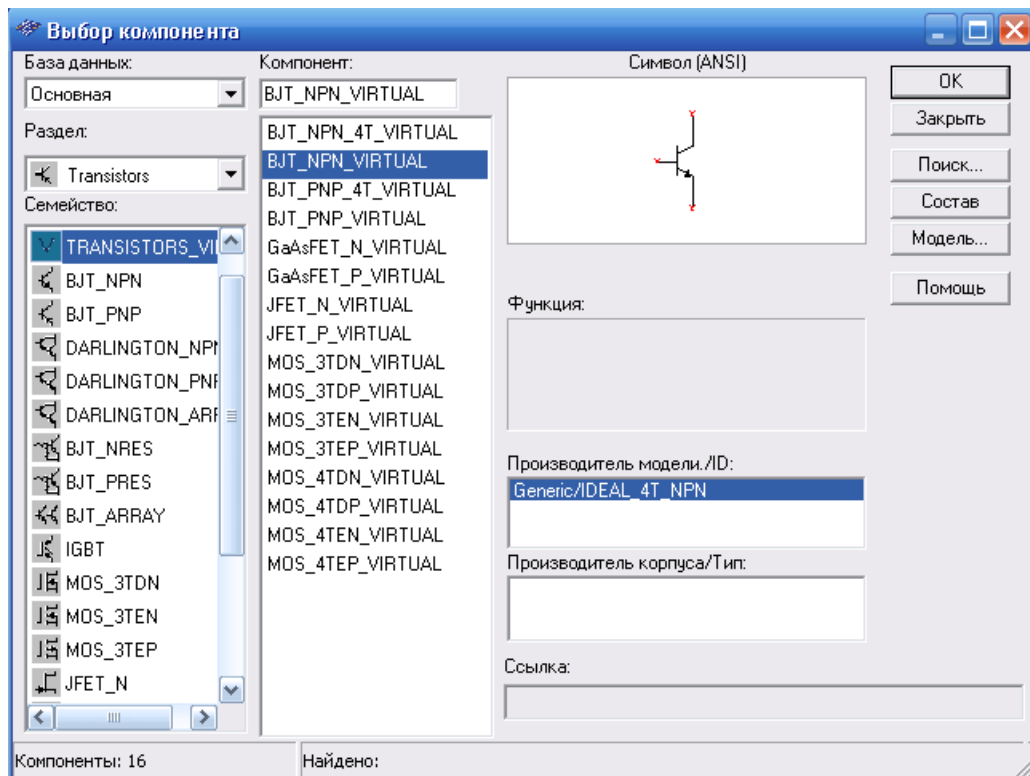


Рис.3.1. Вікно вибору компонентів

Розглянемо властивості біполярного транзистора, які задаються користувачем, для цього потрібно натиснути два рази лівою кнопкою мишки на транзисторі. Якщо потрібно змінити параметри то натисніть кнопку “Редактировать модель”. У діалоговому вікні (рис. 3.2), можна задати такі параметри транзистора:

IS – зворотний струм колекторного переходу, А;

BF – коефіцієнт підсилення струму в схемі з СЕ H_{21} ;

NF – коефіцієнт неідеальності в нормальному режимі;

VAF – напруга Ерлі, близька до параметра $U_{k\max}$, В;

ISE – зворотний струм емітерного переходу, А;

IKF – струм спаду посилення за струмом, близький до параметра $I_{k\max}$, А;

- NE – коефіцієнт неідеальності емітерного переходу;
 BR – коефіцієнт підсилення струму в схемі з CE при інверсному увімкненні транзистора, емітер і колектор міняються місцями;
 NR – коефіцієнт неідеальності в інверсному режимі;
 VAR – зворотна напруга;
 IKR – значення струму, при якому розпочинається зменшення коефіцієнта підсилення в інверсному режимі, А;

Редактировать модель

.MODEL 2N6487__BJT_NPN__1 npn

Наименование	Параметр	Единицы	
IS(transport saturation current)	1.38254	рА	
BF(ideal maximum forward beta)	244.216		
NF(forward current emission coefficient)	0.919906		
VAF(forward Early voltage)	4.08383	V	
IKF(corner for forward beta high current roll-off)	0.641594	A	
ISE(B-E leakage saturation current)	0.000514858	рА	
NE(B-E leakage emission coefficient)	1.56869		
BR(ideal maximum reverse beta)	2.30269		
NR(reverse current emission coefficient)	1.03033		
VAR(reverse Early voltage)	40.8383	V	
IKR(corner for reverse beta high current roll-off)	129.812	mA	
ISC(B-C leakage saturation current)	0.000117835	пА	

Изменить модель компонента Изменить все модели Сброс на умолч. Отмена

Рис. 3.2

- ISC – зворотний струм колекторного переходу;
 NC – коефіцієнт неідеальності колекторного переходу;
 RB – об'ємний опір бази, Ом;
 IRB – струм бази, при якому опір бази зменшується на 50% від різниці RB-RBM, А;
 RBM – мінімальний опір бази при великих струмах, Ом;
 RE – об'ємний опір емітера, Ом;
 RC – об'ємний опір колектора, Ом;
 CJE – ємність емітерного переходу при нульовій напрузі, Ф;
 CJC – ємність колекторного переходу при нульовій напрузі, Ф;
 CJS – ємність колектор-підкладка, Ф;
 XTF – коефіцієнт, що визначає залежність часу TF переносу зарядів через базу від напруги колектор-база;

V_{TF} – напруга колектор-база, при якій починає позначатися його вплив на TF , В;

I_{TF} – струм колектора, при якому починається позначатися його вплив на TF , А;

TF – час переносу заряду через базу, с;

TR – час переносу заряду через базу в інверсному вмиканні, с;

M_{JE} – коефіцієнт плавності емітерного переходу;

M_{JC} – коефіцієнт плавності колекторного переходу;

V_{JC} – контактна різниця потенціалів переходу база-колектор, В;

V_{JE} – контактна різниця потенціалів переходу база-емітер, В;

PTF – додатковий фазовий зсув на граничній частоті транзистора
 $F_{гр} = 1/(2\pi TF)$, град.;

V_{JS} – контактна різниця потенціалів переходу колектор-підкладка, В;

M_{JS} – коефіцієнт плавності переходу колектор-підкладка;

X_{CJC} – коефіцієнт розщеплення ємності база-колектор;

FC – коефіцієнт нелінійності бар'єрної ємності прямозміщених переходів;

EG – ширина забороненої зони, еВ;

X_{TB} – температурний коефіцієнт підсилення струму в нормальному та інверсному режимах;

X_{TI} – температурний коефіцієнт струму насичення;

KF – коефіцієнт флікер-шуму;

AF – показник ступеня у формулі для флікер-шуму;

T_{NOM} – температура транзистора, C^0 .

Розрізняють три схеми увімкнення біполярних транзисторів: із спільною базою (СБ), із спільним емітером (СЕ), із спільним колектором (СК), показані на рисунку 3.3.

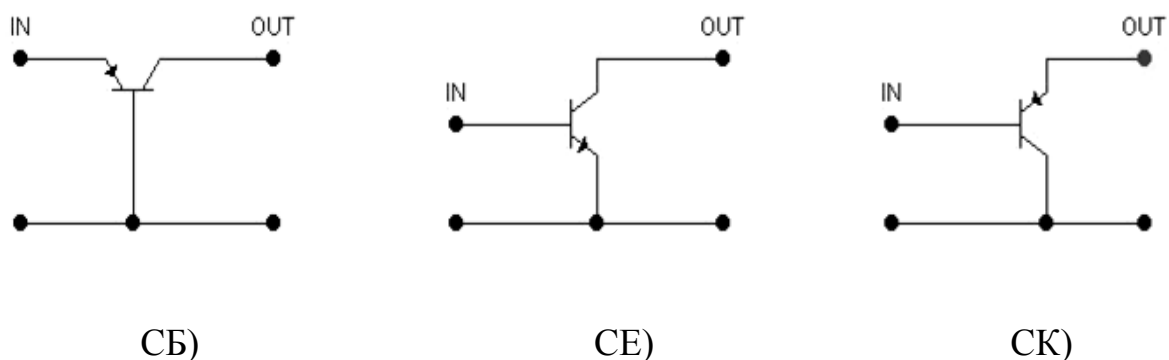


Рис.3.3. Основні схеми увімкнення транзисторів

При цьому кожна схема характеризується двома сім'ями статичних вольт-амперних характеристик, які визначають співвідношення між струмами в колах

електродів транзистора і напругами, що прикладені до цих електродів. Такими характеристиками є:

$$\text{вхідні} \quad I_B = \varphi(U_{BE})_{U_{CE}=\text{const}}$$

та

$$\text{вихідні} \quad I_C = \varphi(U_{CE})_{I_B=\text{const}}$$

У схемі СЕ, яка застосовується найбільш часто, вхідним є струм бази, вихідним – струм колектора, а емітер є загальним електродом для вхідного і вихідного кіл транзистора. Коефіцієнт передачі струму в схемі СЕ (коефіцієнт передачі струму бази) визначається відношенням вихідного струму до вхідного:

$$h_{21E} = (\partial I_C / \partial I_B)_{U_{CE}=\text{const}} \approx I_C / I_B \quad (3.1)$$

Підставивши в формулу (3.1) значення струму бази $I_B = I_E - I_C$ і розділивши чисельник та знаменник на I_E , одержимо

$$h_{21E} = h_{21B} / (1 - h_{21B}) \quad (3.2)$$

При зміні h_{21B} від 0,95 до 0,99 коефіцієнт h_{21E} змінюється в межах 20-100. Отже, схема СЕ дає значне підсилення за струмом. Оскільки ця схема дає також підсилення напруги, то підсилення потужності цієї схеми значно більше, ніж у схемі СБ.

Струм колектора

$$I_C = [h_{21B} / (1 - h_{21B})] I_B + I_{C0} / (1 - h_{21B}). \quad (3.3)$$

Другий член у правій частині рівняння (3.3) – це наскрізний тепловий струм колектора I_{C0}^* при розімкненому колі бази ($I_B = 0$) аналогічно струму I_{C0} у схемі ЗБ при $I_E = 0$, тобто

$$I_{C0}^* = I_{C0} / (1 - h_{21B}) = I_{C0} [1 + h_{21B} / (1 - h_{21B})] = I_{C0} (h_{21E} + 1), \quad (3.4)$$

Загальний струм колектора з урахування (3.2) та (3.4) визначається з виразу (3.3):

$$I_C = h_{21E} I_B + I_{C0} (h_{21E} + 1) = h_{21E} I_B + I_{C0}^* \quad (3.5)$$

При $U_{CE} = 0$ вхідна вольт-амперна характеристика аналогічна прямій вітці характеристики діода. Зі збільшенням напруги на базі базовий струм експоненціально збільшується, переходячи в лінійну залежність при порівняно невеликому струмі бази.

Вихідні характеристики транзистора для схеми СЕ відображають залежність $I_C = \varphi(U_{CE})_{I_B = const}$ і описуються співвідношенням (3.5). При малих напругах на колекторі 0,2 - 0,3 В струм колектора не залежить від струму бази, а характеристики зливаються в одну лінію (область насичення). При $I_B = 0$ $I_C = I^*_{CO}$. Зі збільшенням вхідного струму бази, згідно з рівнянням (3.5) збільшується струм колектора, тому при $I_B > 0$ криві зміщуються вгору від характеристики I^*_{CO} . Струм I_C при $U_{CE} > 0,2 - 0,3$ В дещо зростає з підвищенням напруги U_{CE} .

Порядок виконання роботи

1. Розгляньте схему, зображену на рисунку 3.4, і виконайте її моделювання.

2. Перенесіть необхідні елементи з заданої схеми на робочу область Multisim.

3. З'єднайте виводи елементів і розташуйте елементи в робочій області для одержання необхідної вам схеми. Для з'єднання двох контактів необхідно клацнути на один з контактів лівою кнопкою миші і, не відпускаючи клавішу, довести курсор до другого контакту. У разі потреби можна додати додаткові вузли (розгалуження).

4. Проставте необхідні номінали і властивості кожного елемента згідно з варіантом. Варіант обираєте відповідно до вашого номера за списком у журналі. Для цього потрібно двічі виконати подвійне натискування лівою кнопкою миші на зображенні елемента.

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Тип тр-ра	2N3947	2N4014	2N4123	2N4264	2N4286	2N4400	2N4409	2N4424	2N4921	2N4923	2N5038	2N5058
№ вар.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Тип тр-ра	2N5088	2N5172	2N5191	2N5209	2N5223	2N5232	2N5302	2N5550	2N5581	2N5629	2N5655	2N5671
№ вар.	25	26	27	28	29	30	31	32				
Тип тр-ра	2N4264	2N4286	2N5038	2N5058	2N5655	2N5671	2N5088	2N5172				

5. Коли схема зібрана і готова до запуску, натисніть кнопку пуску процесу моделювання на панелі інструментів.

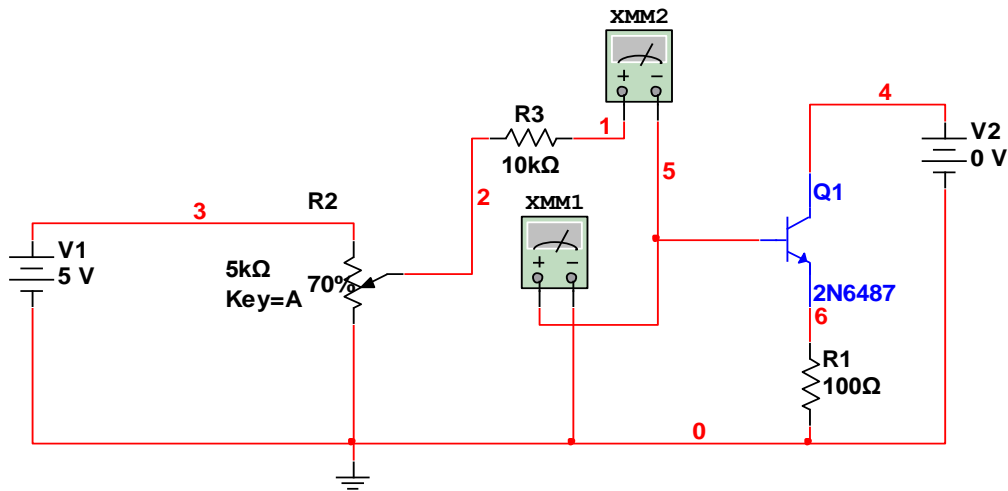


Рис. 3.4. Схема для визначення вхідної ВАХ

6. Змінюючи опір резистора R2 з кроком 5%, зніміть вхідну ВАХ $I_B = \varphi(U_{BE})_{U_{CE} = const}$ при $U_{CE} = 0$ В. Дані запишіть у таблицю. Повторіть дослідження для $U_{CE} = 5$ В та $U_{CE} = 10$ В.

7. Побудуйте вхідну ВАХ на міліметровому папері.

8. Зробіть висновки.

9. Розгляньте схему відображену на рисунку 3.5, і виконайте її моделювання згідно з заданим варіантом.

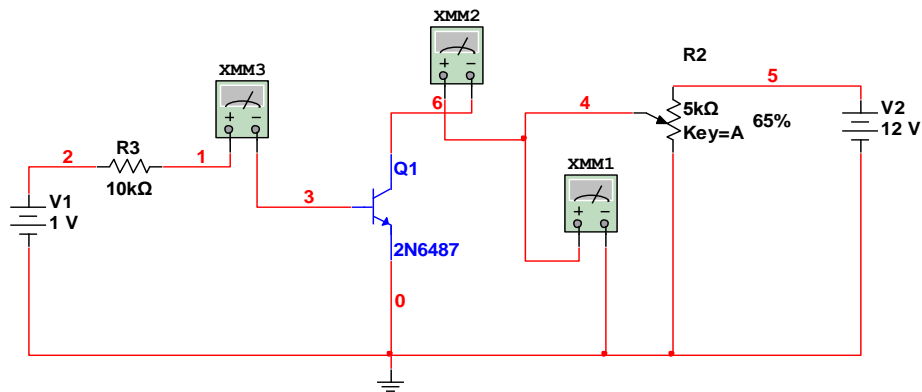


Рис. 3.5. Схема для визначення вихідної ВАХ

10. Змінюючи опір резистора R2 з кроком 5%, зніміть вихідну ВАХ $I_C = \varphi(U_{CE})_{I_B = const}$ при $U_{BE} = 1$ В. Дані запишіть у таблицю. Повторіть дослідження для $U_{BE} = 4$ В та $U_{BE} = 8$ В.

11. Побудуйте вихідну ВАХ на міліметровому папері.

12. По отриманих ВАХ визначте $h_{21E} = (\partial I_C / \partial I_B)_{U_{CE} = const} \approx I_C / I_B$.

13. Зробіть висновки.

Контрольні запитання

1. Опишіть принцип дії БТ, наведіть схеми його увімкнення та статичні ВАХ.
2. Які три режими роботи має БТ?
3. Чим визначаються частотні властивості БТ?
4. Які схеми увімкнення БТ ви знаєте?

Вимоги до оформлення звіту лабораторної роботи

Зміст звіту

У звіті потрібно відобразити:

- 1) мету лабораторної роботи;
- 2) принципову електричну схему досліджуваного функціонального вузла;
- 3) результати експериментальних досліджень у вигляді таблиць та ВАХ;
- 4) здійснити необхідні розрахунки;
- 5) зробити висновки, що базуються на аналізі отриманих результатів.

Лабораторна робота №4

Тема. Визначення основних характеристик випростувачів змінного струму.

Мета роботи: вивчення принципу дії, властивостей та використання випростувачів змінного струму.

Теоретичні відомості

Випростувач призначений для перетворення змінного струму (напруги) в постійний. Він складається з трьох блоків: трансформатора, який забезпечує гальванічне розв'язування мережі, що живить його, від навантаження і перетворює напругу живлення мережі в необхідну величину для блока діодів, який перетворює змінний струм в пульсуючий; згладжуючого фільтра, який призначений для зменшення пульсуючого струму до значення, необхідного для нормальної роботи споживача. Всі випростувачі діляться на три типи: однопівперіодні, двопівперіодні з нульовим виводом, тобто із середньою точкою вторинної обмотки трансформатора, та мостові. Найбільшого застосування набули мостові схеми.

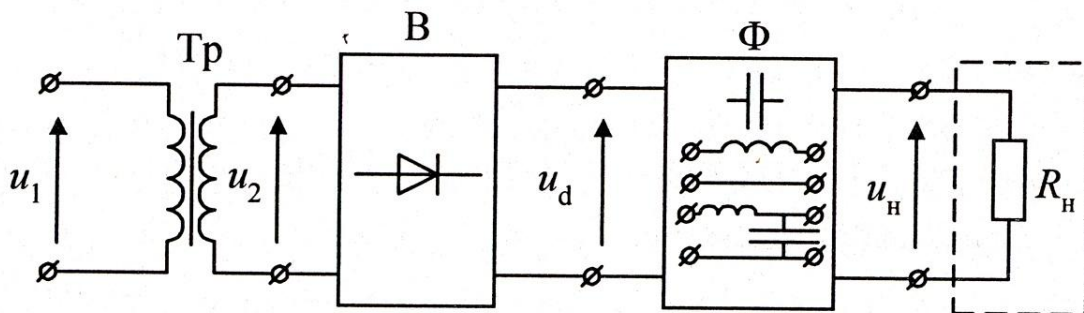


Рис.4.1. Структурна схема випростувача

Часові діаграми вхідної та вихідної напруг різних схем випростувачів з виразами їх розкладу в ряд Фур'є подано на рисунку 4.2.

Вхідними величинами випростувача є напруга U_2 і струм I_2 вторинної обмотки трансформатора, а вихідними – U_d , I_d . Співвідношення між вхідними та вихідними величинами випростувача залежить від схеми та характеру навантаження. В таблиці 4.1 подано основні співвідношення між цими величинами для некерованих однофазних випростувачів при резистивному навантаженні.

Середнє значення випростаної напруги

$$U_d = \frac{1}{T} \int u_d dt \quad (4.1)$$

фактично визначається величиною постійної складової.

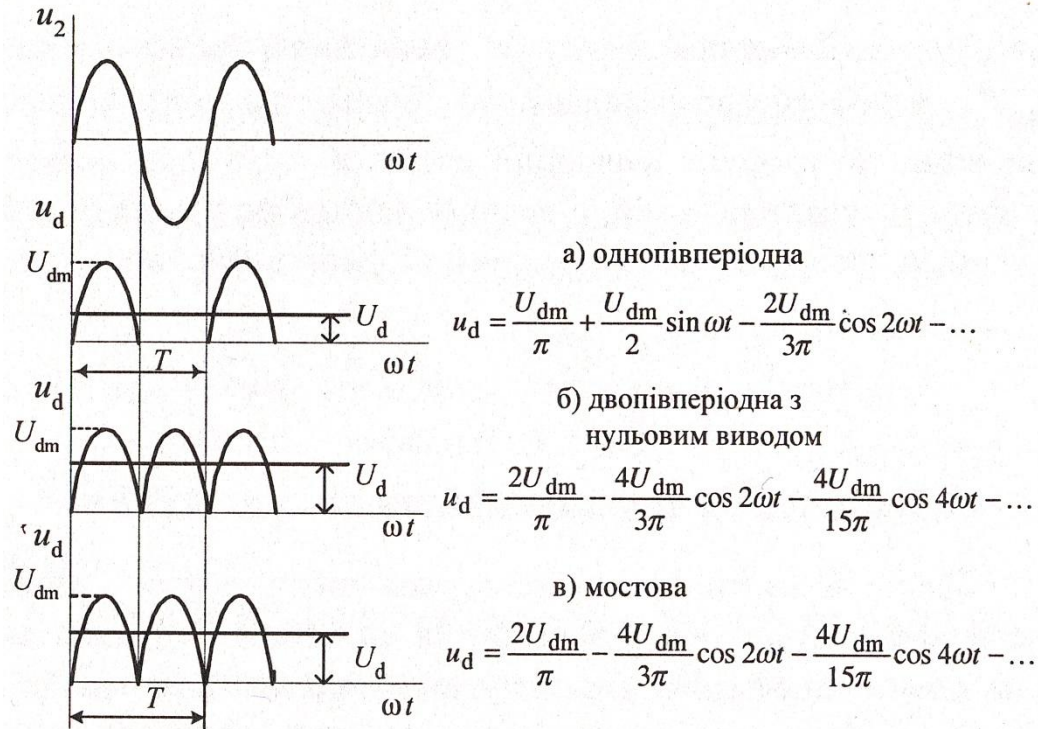


Рис. 4.2. Часові діаграми випростаних напруг однофазних випростувачів

Таблиця 4.1

**Основні співвідношення параметрів схем випростувачів
(резистивне навантаження)**

№ схеми	Назва схеми випростувача	$\frac{I_2}{I_d}$	$\frac{U_2}{U_d}$	$\frac{I_V}{I_d}$	$\frac{U_{ЗВ.МАКС}}{U_d}$	$\frac{S_T}{P_d}$	K_{Π}
1	Однопівперіодна	1,57	2,22	1	3,14	3,5	1,57
2	Двопівперіодна з нульовим виводом	0,785	1,11	0,5	3,14	1,48	0,667
3	Мостова	1,11	1,11	0,5	1,57	1,23	0,667
4	Трифазна з нульовим виводом (схема Міткевича)	0,583	0,855	0,33	2,09	1,35	0,25
5	Трифазна мостова (схема Ларіонова)	0,82	0,425	0,33	1,045	1,05	0,057

Для оцінки якості випростаної напруги використовують коефіцієнт пульсації, що характеризує відношення амплітуди i -тої гармоніки до середнього значення напруги U_d . Він визначається за амплітудою першої гармоніки:

$$K_0 = \frac{U_{dm}^{(0)}}{U_d}, \quad (4.2)$$

Випростаний струм визначається із співвідношення:

$$I_d = \frac{U_d}{R_H} \quad (4.3)$$

Максимальна зворотна напруга визначається через амплітудне значення напруги U_2 :

$$U_{\max} = \sqrt{2} \cdot U_2 \quad (4.4)$$

Вихідна зовнішня характеристика випростувача - залежність вихідної напруги від струму навантаження:

$$U_d = f(I_d) \quad (4.5)$$

Порядок виконання роботи

1. Розгляньте схему на рисунку 4.3 і виконайте її моделювання. Встановіть в схему діод згідно з варіантом (за списком у журналі). Запишіть його параметри.

№ в.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Тип діода	1N1199C	1N1202C	1N1206C	1N3208	1N3492	1N4006	1N4151	1N4936	1N5617	1N6482	1N914A	1S1830
№ в.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Тип діода	1N1200C	1N1204C	1N3064	1N3491	1N3493	1N4005	1N4446	1N5059	1N5823	1N6481	1S1553	1S954

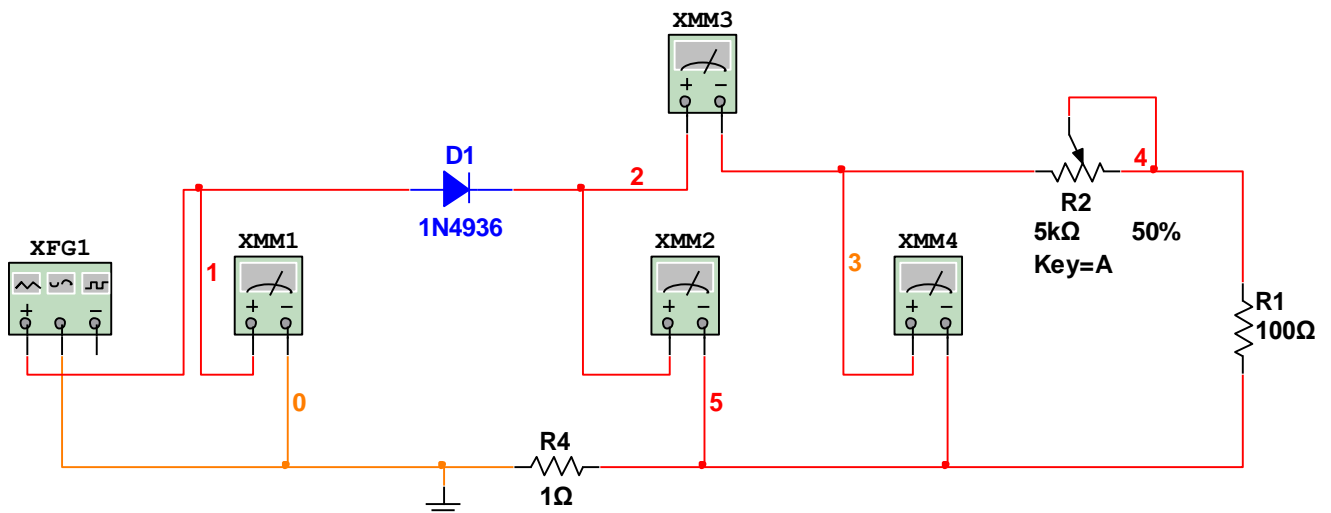


Рис. 4.3

На схемі амперметр ХММ3 призначений для вимірювання постійної складової струму навантаження I_n , ХММ2 і ХММ4 – відповідно постійної U_n і змінної (пульсацій) U_n складових напруги навантаження, ХММ1 – для вимірювання вхідної змінної напруги генератора. Напругу на генераторі встановити $U=10В$, $f=1кГц$. Опір навантаження R_n складається з опорів $R1$, $R2$ і опору $R4=10м$, який призначений для вимірювання амплітуди струму через діод. Опір $R1=U_{ген}/2I_{доп}$, $R2=U_{ген}/I_{мін}$, де $I_{доп}$ – допустимий струм через діод, $I_{мін}=2-3мА$.

2. Змінюючи величину опору $R2$, зніміть залежність U_n і U_n від струму навантаження. Результати вимірювань занесіть в таблицю 4.2. Побудуйте графіки залежності $U_n=f(I_n)$ і $U_n=f(I_n)$. Визначте вихідний опір випростувача без фільтра.

Таблиця 4.2

$I_n, мА$												
$U_n, В$												
$U_n, В$												

3. Порівняйте отримані результати з розрахунковими результатами таблиці та зробіть висновки.

4. До схеми підключіть осцилограф і зніміть осцилограми вхідної напруги і напруги на виході випростувача.

5. В схему випростувача додайте ємнісний фільтр, як показано на рис. 4.4. Змінюючи значення ємності від 0 до 500мкФ, зніміть залежність $U_n=f(C)$ і $U_n=f(C)$. Результати занесіть у таблицю 4.3. Побудуйте графіки залежності $U_n=f(C)$ і $U_n=f(C)$.

Таблиця 4.3.

$C, мкФ$	0	5	10	20	50	100	200	500
$U_n, В$								
$U_n, В$								

6. За отриманими результатами зробіть висновки.

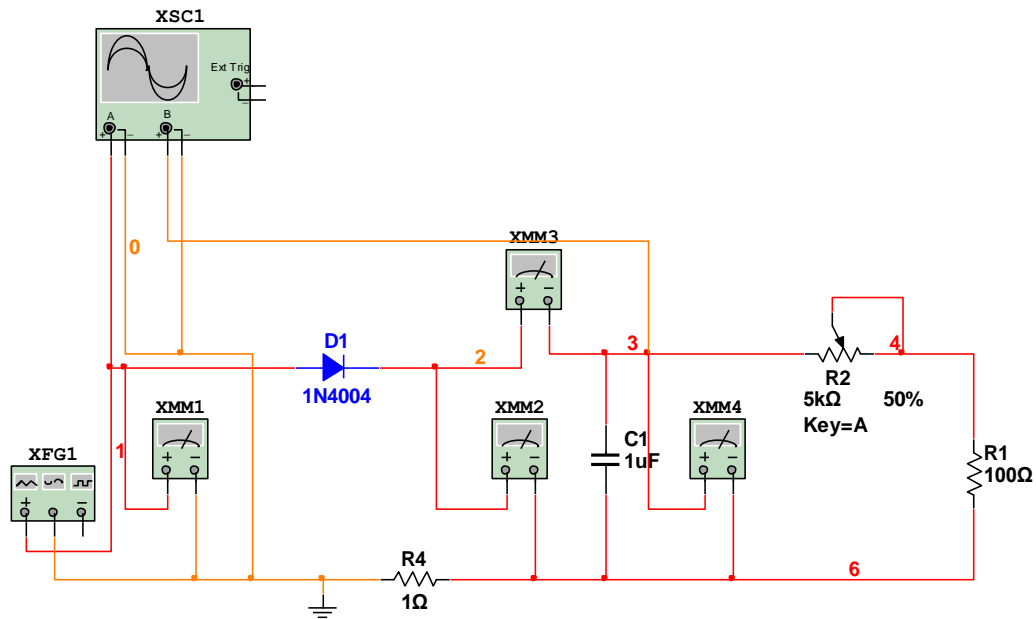


Рис.4.4

Контрольні запитання

1. Поясніть принцип роботи та назвіть основні складові частини випростувачів змінного струму.
2. Поясніть принцип роботи некерованого та керованого однофазного випростувача та назвіть їх основну відмінність.
3. Наведіть класифікацію згладжувальних фільтрів і поясніть принцип роботи пасивних та активних згладжувальних фільтрів.
4. Як і чому змінюється форма струмів у схемах випростувачів з вмиканням C, L, LC – фільтрів ?
5. Для чого застосовують електричні фільтри?

Вимоги до оформлення звіту лабораторної роботи

Зміст звіту

У звіті потрібно відобразити:

- 1) мету лабораторної роботи;
- 2) принципову електричну схему досліджуваного функціонального вузла;
- 3) результати експериментальних досліджень у вигляді таблиць та графіків;
- 4) здійснити необхідні розрахунки;
- 5) висновки, що базуються на аналізі отриманих результатів.

Лабораторна робота №5

Тема. Визначення основних характеристик параметричного стабілізатора напруги.

Мета роботи: вивчення принципу дії, властивостей стабілізаторів напруги.

Теоретичні відомості

Параметричний стабілізатор напруги на базі стабілітрона показано на рисунку 5.1.

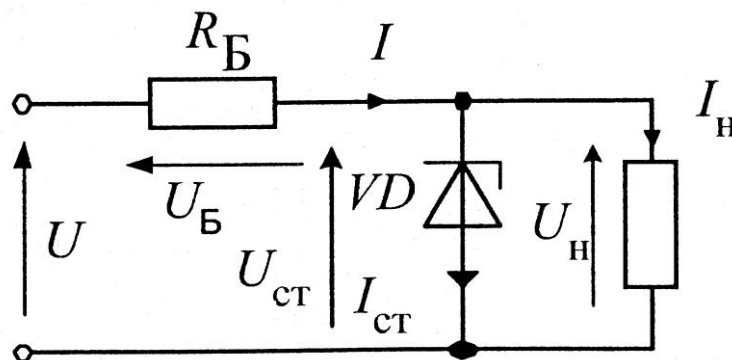


Рис. 5.1. Схема параметричного стабілізатора напруги

Рівняння електричної рівноваги для такого стабілізатора має вигляд: $U = U_H + R_B I$, де R_B – баластний опір, необхідний для зменшення дестабілізуючих чинників на напругу навантаження. Параметричний стабілізатор характеризується коефіцієнтом стабілізації:

$$K_{CT.U} = \frac{\Delta U_{BX} / U_{BX}}{\Delta U_{VIX} / U_{VIX}} \quad (K_{CT.U} = 20 \div 30) \quad (5.1)$$

Очевидно, що для покращення стабілізації необхідно збільшувати R_B і зменшувати динамічний опір стабілітрона R_D . Проте збільшення баластного опору R_B призводить до зменшення коефіцієнта корисної дії. Тому опір баластного резистора R_B вибирають таким, щоб при номінальному значенні напруги джерела напруга і струм стабілітрона дорівнювали теж номінальним значенням $U_{CT.H}, I_{CT.H}$. Величину $I_{CT.H}$ визначають за паспортними даними та виразом $I_{CT.H} = (I_{CT.MIH} + I_{CT.MAKC})/2$. Тоді за рівнянням електричної рівноваги визначаємо баластний опір за виразом (5.2)

$$R_6 = \frac{U - U_{CT.H}}{I_{CT.H} - I_H} \quad (5.2)$$

де $I_H = P_H / U_H$; $U \approx U_d$; $I = I_{CT.H} + I_H$.

Роботу параметричного стабілізатора зручно ілюструвати за допомогою вольт-амперної характеристики (ВАХ) стабілітрона та відповідної графічної побудови навантажувальної лінії (рис. 5.2).

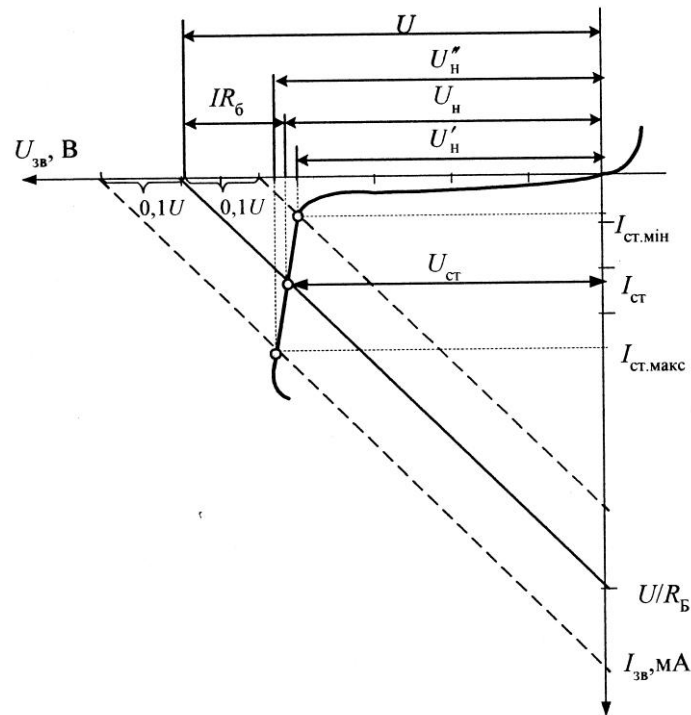


Рис. 5.2. Графічна інтерпретація роботи параметричного стабілізатора напруги

Для побудови ВАХ стабілітрона за його паспортними даними через точку з координатами $U_{CT.H}, I_{CT.H}$ проводимо пряму лінію під кутом $\alpha = \arctan(R_D * m_i / m_U)$ до осі координат від $I_{CT.МІН}$ до $I_{CT.МАКС}$, де m_i, m_U – масштаби струму і напруги, відповідно. Далі будемо навантажувальну характеристику при номінальній напрузі джерела. Для цього на осі абсцис відкладемо значення напруги U , на осі ординат – значення струму, яке визначається за виразом $I = U / R_B$. Через ці точки проведемо навантажувальну пряму.

Роботу стабілізатора перевіряють за умови його здатності забезпечувати задане значення U_H при коливаннях вхідної напруги U . Для прикладу, якщо вхідна напруга змінюється в межах $\pm 10\%$, то на виході стабілізатора коливання напруги U_H становить $\pm 0,1\%$ (рис. 5.2).

Побудова навантажувальних прямих при зміні напруги мережі в межах $\pm 10\%$ здійснюється шляхом паралельного зсуву навантажувальної

характеристики при номінальній напрузі мережі відповідно ліворуч і праворуч на $0,1U$. За допомогою цієї побудови можна з'ясувати, чи при таких коливаннях напруги мережі забезпечуються умови стабілізації, тобто чи точки перетину зсунених навантажувальних характеристик з вольт-амперних характеристик стабілітрона не виходять за межі значень струмів стабілітрона $I_{СТ.МИН}, I_{СТ.МАКС}$.

Порядок виконання роботи

1. Розгляньте схему на рисунку 5.3 і виконайте її моделювання. Встановіть в схему стабілітрон згідно з варіантом (за списком в журналі). Запишіть його параметри.

№ в.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Тип стабілітрона	BZV55-B10	BZV55-B12	BZV55-B15	BZV55-B18	BZV55-B2V4	BZV55-B2V7	BZV55-B3V3	BZV55-B3V9	BZV55-B4V3	BZV55-B4V7	BZV55-B5V1	BZV55-B5V6
№ в.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Тип стабілітрона	BZV55-B6V2	BZV55-B6V8	BZV55-B7V5	BZV55-B8V2	BZV55-B9V1	BZV55-C10	BZV55-C12	BZV55-C13	BZV55-C16	BZV55-C3V0	BZV55-C3V9	BZV55-C9V1

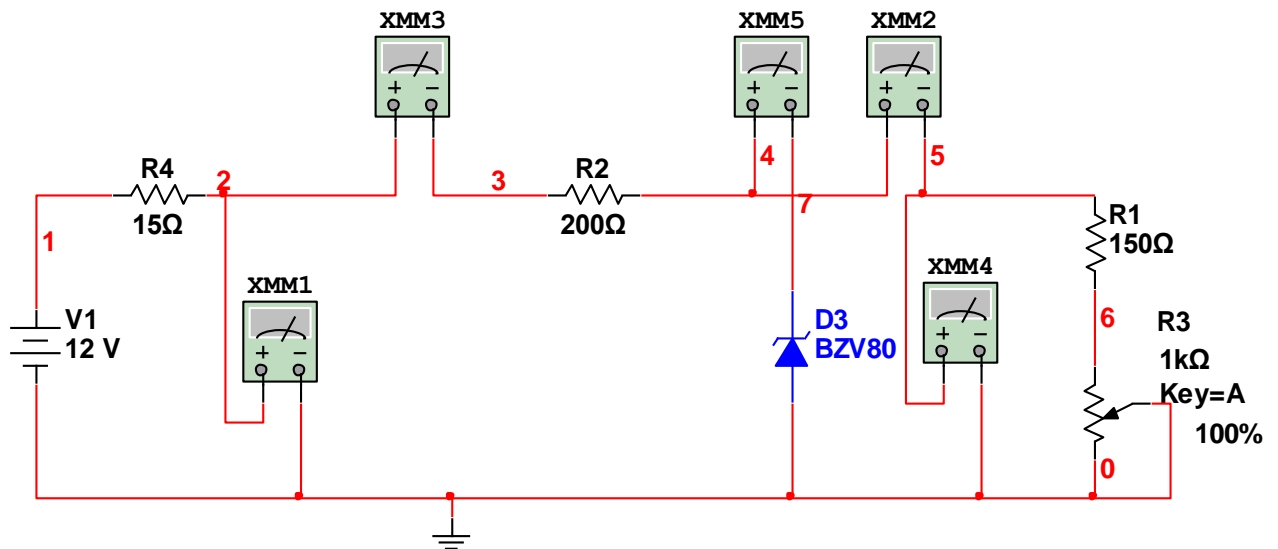


Рис. 5.3.

На схемі вольтметр ХММ1 призначений для вимірювання напруги джерела живлення $U_{вх}$, ХММ2, ХММ3 і ХММ5 – відповідно струми навантаження $I_{н}$, джерела живлення $I_{вх}$ і струм стабілізації $I_{ст}$, ХММ4 – для вимірювання напруги навантаження $U_{н}$. Напругу джерела встановіть $U_{дж}=2U_{ст}$. Опір навантаження $R_{н}$ складається з суми опорів R_1, R_3 . Вхідний опір амперметрів встановіть $0,001\Omega$.

2. Змінюючи положення регулятора навантаження R3 від початкового положення до кінцевого через 5%, зніміть покази міліамперметрів $I_{ст}$, I_n та покази вольтметра U_n (напруга на виході стабілізатора). Покази приладів занесіть у таблицю 5.1.

Таблиця 5.1

$I_{ст}$ (мА)									
U_n (В)									
I_n (мА)									

3. За результатами вимірювань побудуйте ВАХ стабілітрона. Визначте мінімальний струм стабілізації для заданого стабілітрона.

4. За результатами вимірювань побудуйте залежність $U_n=f(I_n)$. Визначте вихідний опір стабілізатора при струмі I_n , який відповідає середині робочої ділянки $U_n=f(I_n)$.

Контрольні запитання

1. Які схеми стабілізаторів ви знаєте?
2. Навести вольт-амперну характеристику стабілітрона.
3. Як вмикається стабілітрон в електричну схему?
4. Які бувають типи компенсаційних стабілізаторів?
5. З яких основних блоків складається компенсаційний стабілізатор?
6. За якими вихідними даними розраховується параметричний стабілізатор?
7. Яку функцію виконує баластний резистор в параметричному стабілізаторі?

Вимоги до оформлення звіту лабораторної роботи

Зміст звіту

У звіті потрібно відобразити:

- 1) мету лабораторної роботи;
- 2) принципову електричну схему досліджуваного функціонального вузла;
- 3) результати експериментальних досліджень у вигляді таблиць та графіків;
- 4) здійснити необхідні розрахунки;
- 5) висновки, що базуються на аналізі отриманих результатів.

Лабораторна робота № 6

Тема. Дослідження підсилювачів електричних сигналів.

Мета роботи: вивчення принципу дії, властивостей та характеристик підсилювальних каскадів.

Теоретичні відомості

Структурна схема електронного підсилювача зображена на рис. 6.1. На цій схемі підсилювач має вигляд активних чотирьохполюсників, до вхідних затискачів (1, 2) яких приєднують джерело вхідного сигналу у вигляді джерела напруги (рис. 6.1 а) або джерела струму (рис. 6.1 б). Зовнішнє навантаження R_n , яке споживає енергію підсиленого сигналу, під'єднується до виходу підсилювача (затискачі 3, 4). Джерело вхідного сигналу навантажується вхідним опором підсилювача $R_{вх}$, на якому виділяється потужність вхідного сигналу. Цей сигнал керує енергією джерела живлення значно більшого рівня потужності. Таким чином, використання активного керуючого елемента (наприклад, транзистора) та більш потужного джерела живлення дає можливість підсилувати *потужність* вхідного сигналу.

Розглядаючи вхідне коло підсилювача з джерелом напруги (рис. 6.1 а), можемо записати

$$U_{вх} = E_D \frac{R_{вх}}{R_{вх} + R_D} \quad (1)$$

звідки випливає, що спад напруги на внутрішньому опорі R_D джерела вхідного сигналу незначний $U_{вх} \approx E_D$, якщо виконується умова $R_{вх} \gg R_D$.

Для вхідного кола підсилювача (рис. 6.1 б)

$$I_{вх} = I_D \frac{R_D}{R_D + R_{вх}} \quad (2)$$

Тобто весь струм джерела вхідного сигналу відгалужується у вхідний опір підсилювача за умови, що $R_{вх} \gg R_D$. Отже, при великому вхідному опорі підсилювача керування в навантаженні здійснюють джерелом напруги, а при малому $R_{вх}$ – джерелом струму.

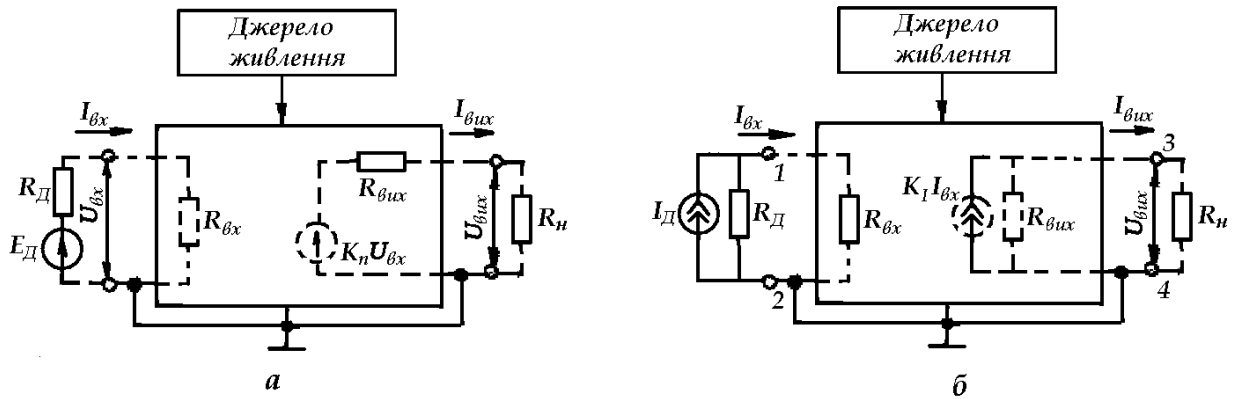


Рис. 6.1

Вихідне коло підсилювача також може бути *джерелом напруги* $K_n U_{вх}$ (рис. 6.1 а) або *джерелом струму* $K_n I_{вх}$ (рис. 6.1 б) з внутрішнім опором $R_{вих}$. Ці джерела відображають властивості підсилювача, які характеризуються коефіцієнтом прямої передачі K_n , що в першому випадку є коефіцієнтом підсилення напруги, а в другому – струму.

Всі електронні підсилювачі підвищують потужність. Але в ряді випадків основним показником є підсилення струму або напруги. Тому електронні підсилювачі умовно поділяють на підсилювачі напруги, струму та потужності. Підсилювач напруги забезпечує на навантаженні задане значення вихідної напруги. В такому режимі підсилювач працює, якщо виконуються умови $R_{вх} \gg R_d$ та $R_n \gg R_{вих}$, що забезпечує відносно великі зміни напруги на навантаженні при невеликих змінах струму у вхідному та вихідному колах. В режимі підсилення струму необхідне виконання умов $R_{вх} \ll R_d$ та $R_n \ll R_{вих}$, щоб у вихідному колі при малих значеннях напруги протікав струм заданого значення. Для підсилювача потужності умови узгодження вхідного кола з джерелом вхідного сигналу та вихідного кола з навантаженням для передавання максимальної потужності мають вигляд $R_{вх} \approx R_d$ та $R_n \approx R_{вих}$.

Характер роботи підсилювального каскаду і його параметри залежать від режиму роботи активного елемента за постійним струмом. Розглянемо це на прикладі транзисторного підсилювального каскаду за схемою ЗЕ, який є основою більшості схем підсилювачів, включаючи й операційні підсилювачі.

Початковий режим транзистора (режим спокою) визначається положенням робочої точки P на динамічній характеристиці транзистора. Від положення робочої точки залежать значення постійних складових струмів вхідного та вихідного електродів транзистора (I_{0B} , I_{0C}) і напруг на цих електродах (U_{0B} , U_{0C}), тобто потужність, яку споживає підсилювач від джерела E_C . Для цього необхідно побудувати навантажувальну характеристику (тобто лінію навантаження) за рівнянням $U_{CE} = E_C - R_C I_C$. Точка перетину цієї лінії з

характеристикою транзистора визначає необхідний струм бази I_B . В свою чергу, вибір робочої точки в значній мірі регламентується амплітудою, формою і полярністю вхідного змінного сигналу. Розрізняють три основні режими роботи підсилюючого каскаду – A , B і C . Розглянемо особливості режимів роботи підсилюючого каскаду при дії на вході змінного сигналу синусоїдальної форми.

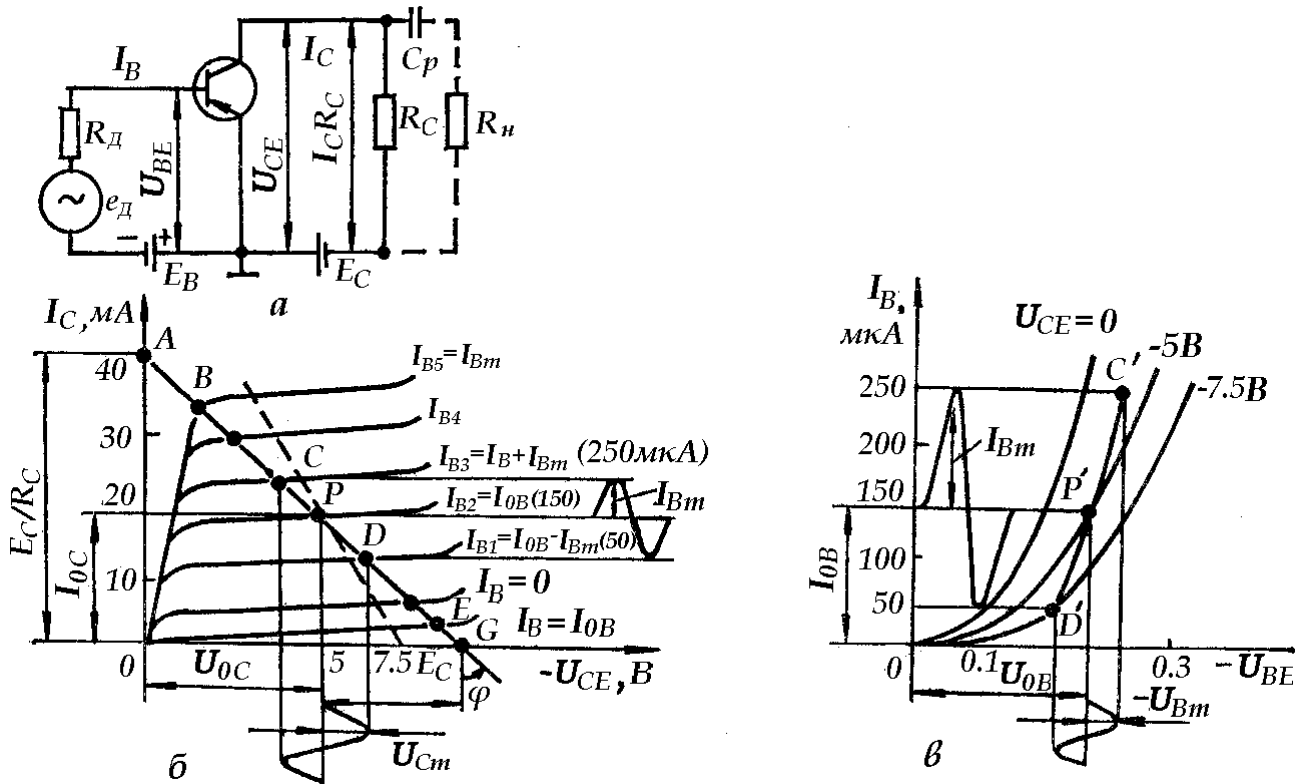


Рис. 6.2

В режимі підсилення A початкове положення робочої точки вибирають приблизно посередині відрізка динамічної характеристики, де зміні базового (вхідного) струму відповідає пропорційна зміна колекторного (вихідного) струму, а її переміщення, пов'язане з дією подвійної амплітуди вхідного сигналу $2U_{Bm}$ ($2I_{Bm}$), обмежується цим відрізком. На рис. 6.2 цей відрізок відмічений лінією CD на вихідній динамічній характеристиці і $C'D'$ – на вхідній. Слід зазначити, що, залежно від нахилу динамічної характеристики, переміщення робочої точки в режимі підсилення A може проходити навіть в межах відрізка BE динамічної характеристики, що показує на нечутливість амплітуди підсилюваного сигналу в цьому режимі. Так чи інакше напруга зміщення в колі бази $|U_{0B}|$ більша за $|U_{Bm}|$ вхідного сигналу, а струм спокою в колекторному колі I_{0C} перевищує амплітуду змінної складової колекторного струму I_{Cm} . Тому вихідний колекторний струм протікає за час всього періоду підсилюваного сигналу, що є характерною особливістю режиму підсилення A .

Оскільки робоча точка не виходить за межі лінійного відрізка вхідної динамічної характеристики, то лінійні спотворення, які вносяться підсилювачем, невеликі і тим менші, чим менша амплітуда вхідного сигналу. Але при цьому ККД підсилювача низький, оскільки корисна потужність $P_{\text{вих}}$, яка віддається в навантаження, задається змінною складовою колекторного струму з амплітудою I_{cm} . При цьому I_{cm} менший за постійну складову струму I_{oc} – яка обумовлює потужність P_{cn} , що споживається від джерела живлення. ККД підсилювачів в режимі *A*, які, як правило, використовуються як попередні підсилювачі або як малопотужні кінцеві каскади, не перевищує 20 %.

В режимі підсилення *B* початкове положення робочої точки на динамічній характеристиці вибирають при струмі колектора близькому до I_{oc} (рис. 6.3). Тому при наявності змінного вхідного сигналу змінна складова колекторного струму з амплітудою I_{cm} протікає лише за половину періоду сигналу, а в другій половині періоду транзистор закритий, тобто працює з відсічкою струму. При цьому кут відсічки струму θ приблизно дорівнює $\pi/2$ електричних градусів.

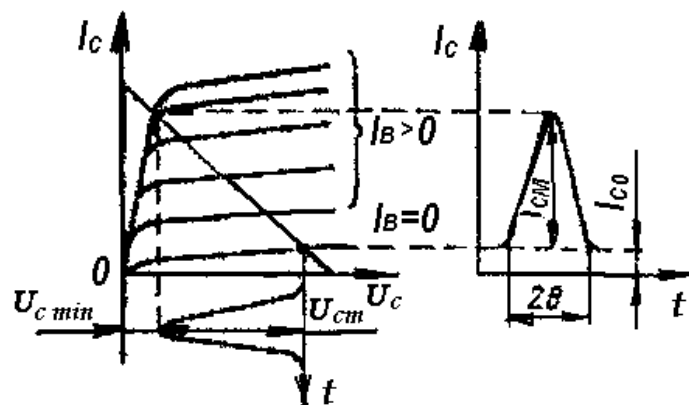


Рис. 6.3.

Важливою особливістю режиму *B* є високий ККД підсилювача (60...70%), оскільки постійна складова колекторного струму від джерела живлення за відсутності підсилюваного сигналу приблизно дорівнює нулю. Тому такий режим найкраще використовувати в каскадах підсилення великої потужності, коли вони працюють при великих рівнях підсилюваних сигналів, незважаючи на високий рівень нелінійних спотворень у підсилювачі. Внаслідок високої економічності підсилювачі в режимі *B* застосовують в переносних пристроях навіть при вихідній потужності в сотні міліват, mB_m .

У деяких випадках використовують проміжний режим підсилення *AB*, який характеризується кутом відсічки в 120 ...130 ел. град., і меншими нелінійними спотвореннями, але виявляється економічнішим ніж режим підсилення *A*.

Початкове зміщення і положення робочої точки в транзисторі, що працює в режимі підсилення С, відповідає режиму відсічки, а кут відсічки $\theta < \pi/2$. Цей режим найекономічніший (ККД 85 %), оскільки за відсутності підсилюваного сигналу транзистор практично не споживає енергії. Режим С використовують у підсилювачах – формувачах, які працюють при перевищенні вхідним сигналом деякого порогового значення, а також в автогенераторах.

При виборі параметрів робочої точки активного елемента необхідно враховувати розкид його параметрів і їхню залежність від температури (зворотний струм переходів, коефіцієнт передачі за струмом), а також схильність до зміни в часі (через старіння). Усе це потребує вживання спеціальних заходів для стабілізації коефіцієнта підсилення й інших параметрів підсилювачів.

Тому в більшості транзисторних підсилювачів для стабілізації положення робочої точки вводять стабілізуючий зворотний зв'язок або використовують методи температурної компенсації (зокрема, введенням термозалежних опорів).

Порядок виконання роботи

1. Розгляньте схему на рисунку 6.4 і виконайте її моделювання. Транзистор виберіть згідно з заданим варіантом. Запишіть його параметри.

№ в.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Тип тр-ра	2N1711	2N2219	2N2222	2N2369	2N2712	2N2923	2N2925	2N3020	2N3390	2N3392	2N3414	2N3417
№ в.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Тип тр-ра	2N3501	2N3700	2N3711	2N3859	2N3879	2N3904	2N4014	2N4123	2N4264	2N4286	2N4401	2N4424

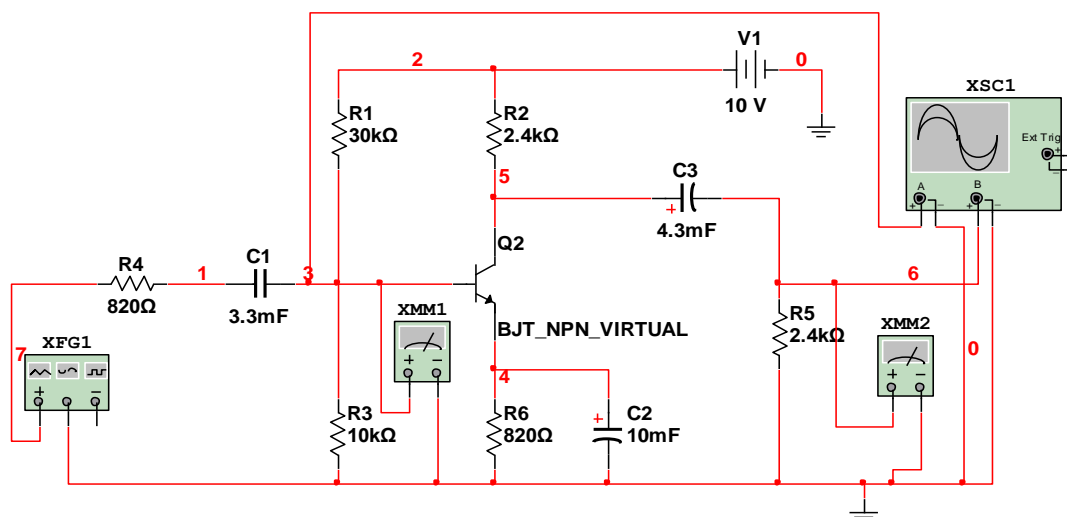


Рис. 6.4

На схемі зі спільним емітером амперметр ХММ1 призначений для вимірювання змінної напруги вхідного сигналу, ХММ2 – для вимірювання змінної напруги навантаження U_n на виході підсилювача. Напругу генератора встановіть $U_{ген}=5мВ$, частоту $f=1кГц$.

2. За допомогою осцилографа зняти і замалювати осцилограми вхідного і вихідного сигналів.

3. Встановіть напругу генератора $U_{ген}=0,5В$. Зніміть і замалюйте осцилограми вхідного і вихідного сигналів. Проаналізуйте отримані осцилограми і зробіть висновки.

4. За допомогою вольтметрів ХММ1 та ХММ2 зніміть амплітудні значення напруги вхідного та вихідного сигналів. Розрахуйте коефіцієнт підсилення по напрузі K_u за отриманими значеннями.

5. Розрахуйте коефіцієнт підсилення по напрузі K_u за отриманими осцилограмами.

6. Порівняйте отримані результати.

7. Розгляньте схему на рисунку 6.5 і виконайте її моделювання. ХММ1 і ХММ3 призначені для вимірювання постійних значень струму і напруги живлення підсилювального каскаду, ХММ2 і ХММ4 – для вимірювання змінних значень струму і напруги вихідного сигналу підсилювача.

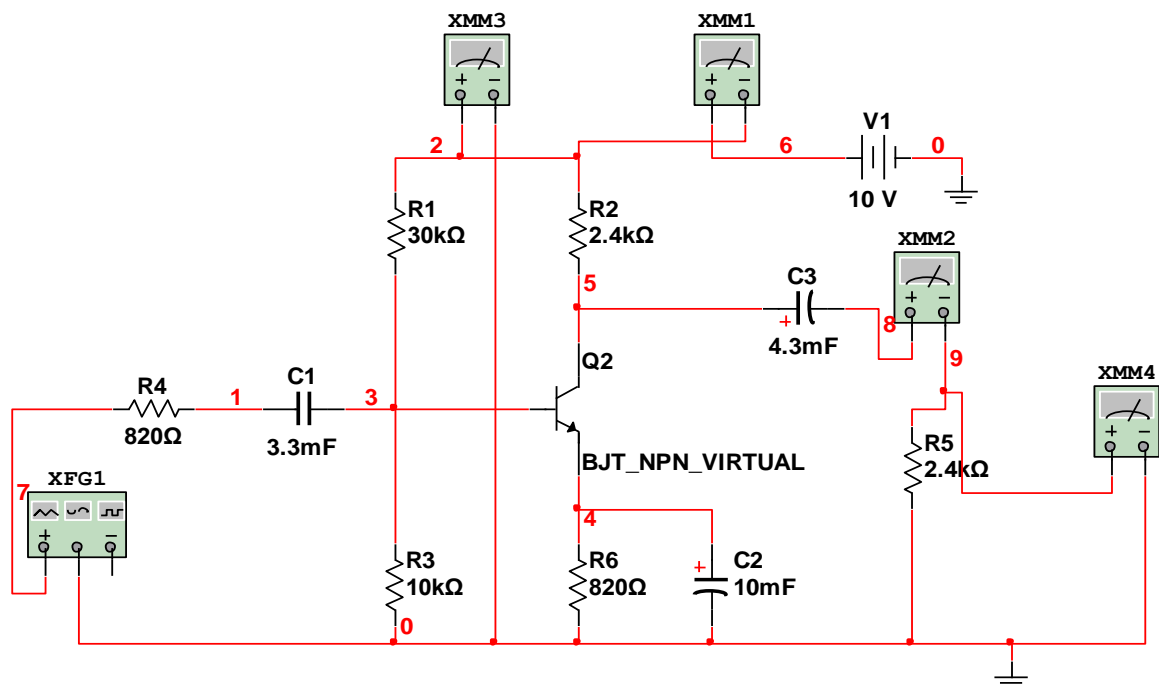


Рис. 6.5

8. За отриманими значеннями струмів і напруг розрахуйте споживану потужність $P_{сн}$ і корисну вихідну потужність $P_{вих}$ підсилювача.

9. Знайдіть значення коефіцієнта корисної дії цього підсилювача.

Контрольні запитання

1. Які базові схеми ввімкнення біполярних транзисторів ви знаєте?
2. Поясніть, яким чином стабілізується режим спокою каскаду.
3. Поясніть відмінність параметрів $R_{вх}$, $R_{вих}$, K_u , K_i для різних схем ввімкнення біполярних транзисторів.
4. Наведіть та поясніть вигляд АЧХ транзисторних каскадів.
5. Від яких елементів схем залежить f_H ?

Вимоги до оформлення звіту лабораторної роботи

Зміст звіту

У звіті потрібно відобразити:

- 1) мету лабораторної роботи;
- 2) принципову електричну схему досліджуваного функціонального вузла;
- 3) результати експериментальних досліджень у вигляді таблиць та графіків;
- 4) здійснити необхідні розрахунки;
- 5) висновки, що базуються на аналізі отриманих результатів.

Лабораторна робота №7

Тема. Дослідження операційних підсилювачів.

Мета роботи: вивчення принципів дії та основних властивостей операційних підсилювачів, ознайомлення з основними параметрами та використанням.

Теоретичні відомості

Схема інвертуючого ввімкнення ОП показана на рис. 7.1 а, Через те, що підсилення ОП дуже велике, то з невеликою похибкою можна вважати таку модель ідеальною, що відповідає виконанню умов $K_{пU} \rightarrow \infty$ та $K_{пI} \rightarrow \infty$, де $K_{пU}$ та $K_{пI}$ – коефіцієнти підсилення за напругою і струмом без зворотного зв'язку. Якщо при цьому охопити підсилювач паралельним зворотнім зв'язком за напругою через резистор R_2 , то будь-який незначний сигнал на вході підсилюється і передається по колу зворотнього зв'язку у вхідне коло ОП, компенсуючи вхідний сигнал таким чином, що в стані рівноваги (в стаціонарному режимі) $U_{вх} = 0$. Оскільки вхідний опір підсилювача також великий, то можна вважати, що струм джерела сигналу I_d протікає лише через резистор R_2 , спад напруги на якому відбувається завдяки цьому струму

$$U_{R_2} = I_2 R_2 = - I_d R_2 = - E_d (R_2 / R_1). \quad (7.1)$$

Оскільки потенціал у точці A , де додаються струми, практично дорівнює нулю, то

$$U_{вих} = U_{R_2} = - E_d (R_2 / R_1), \quad (7.2)$$

звідки одержимо коефіцієнт підсилення ОП з врахуванням того, що коефіцієнт передачі напруги зворотного зв'язку $\beta_U = R_1 / R_2$.

$$K_{пUзз} = U_{вих} / E_d = - R_2 / R_1 = - (1 / \beta_U). \quad (7.3)$$

Знак "-" у рівнянні (7.3) вказує на інвертування фази (полярності) вхідного сигналу.

Вхідний і вихідний опори такої моделі в першому наближенні визначаються рівняннями

$$R_{вх} \approx R_1; \quad R_{вих} = 0. \quad (7.4)$$

Співвідношення (7.1) - (7.4) для реального ОП виконуються з деякими наближеннями.

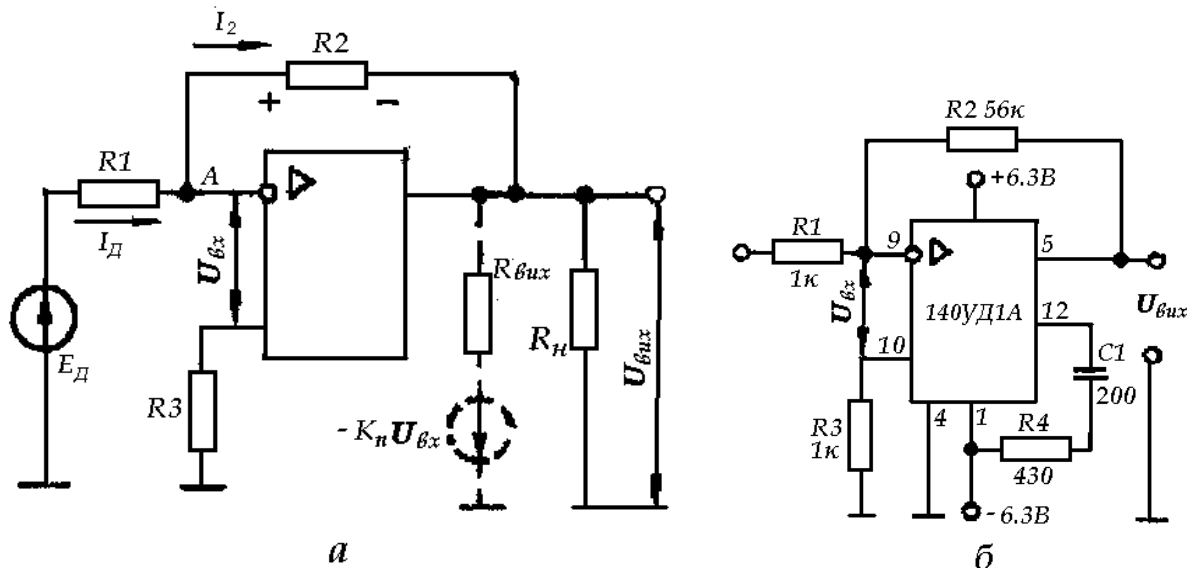


Рис. 7.1

На рисунку 7.1 б зображена принципова схема підсилювального каскаду на мікросхемі 140УД1А. При вказаних номіналах навісних компонентів схеми підсилення відбувається в смузі частот до 2МГц з коефіцієнтом підсилення 60, що досить точно відповідає формулі (7.3). Ланка $C1, R4$ призначена для корекції частотної характеристики підсилювача.

Модель неінвертуючого ввімкнення ОП показана на рисунку 7.2 а. Напряга зворотнього зв'язку, що знімається з подільника напруги $R1, R2$, пропорційна вихідній напрузі підсилювача

$$U_{зз} = U_{вих} R_2 / (R_1 + R_2) = \beta_U U_{вих} \quad (7.5)$$

Беручи до уваги, що коефіцієнт підсилення ідеального ОП визначається рівнянням (7.3), для неінвертуючого підсилювача одержимо

$$K_{пU} = 1/\beta_U = (R_1 + R_2)/R_2 = 1 + R_1/R_2. \quad (7.6)$$

Якщо $R_1 = 0$, то $K_{пU} = 1, R_{вх} = R_2$ і ОП стає неінвертуючим повторювачем напруги. Однак такий повторювач передає постійну напругу, не вносячи додаткового зсуву фази.

Вхідний опір реального неінвертуючого підсилювача з врахуванням зворотнього зв'язку великий:

$$R_{вх} = R_{вх.м} (1 + \beta_U K_{пU}), \quad (7.7)$$

де $R_{вх.м}$ – власний вхідний опір мікросхеми;

$K_{пU}$ – коефіцієнт підсилення мікросхеми без зворотнього зв'язку.

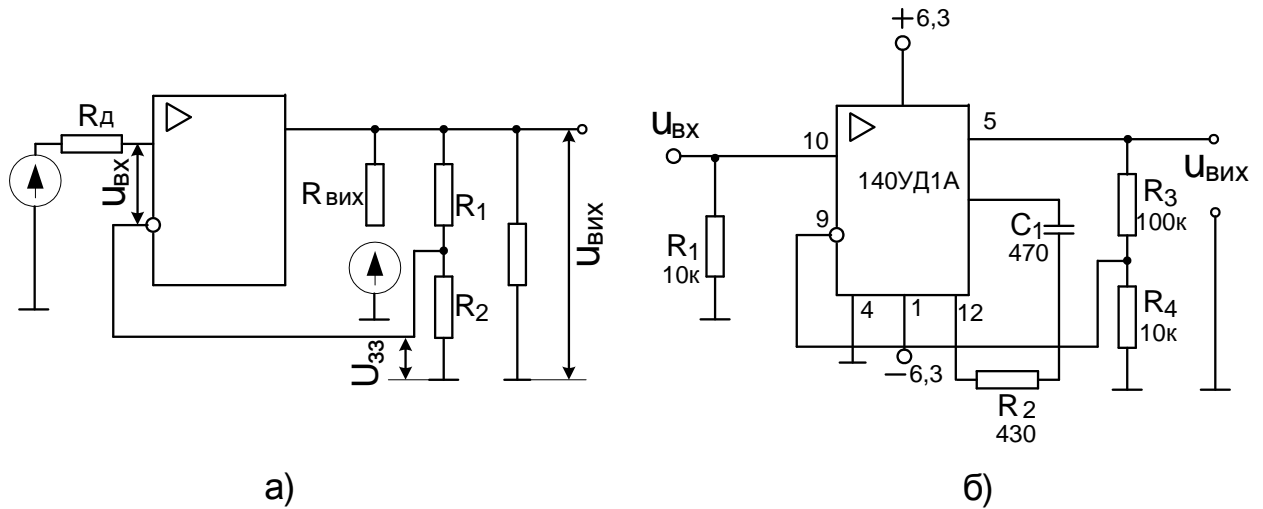


Рис.7.2

Вихідний опір реального неінвертуючого підсилювача

$$R_{\text{вих}} = R_{\text{вих. м}} [1/(1 + \beta_U K_{\text{пУ}})], \quad (78)$$

де $R_{\text{вих. м}}$ – власний вихідний опір мікросхеми.

Принципова схема неінвертуючого підсилювача змінного струму на мікросхемі 140УД1А показана на рис. 7.2 б. Верхня частота смуги пропускання підсилювача така сама, як і в підсилювачі на рис. 7.1 б.

Порядок виконання роботи

1. Введіть задані значення опору R_1 та опору зворотного зв'язку підсилювача R_2 та амплітуди $U_{\text{вх}}$ і частоти f вхідного сигналу згідно з варіантом.

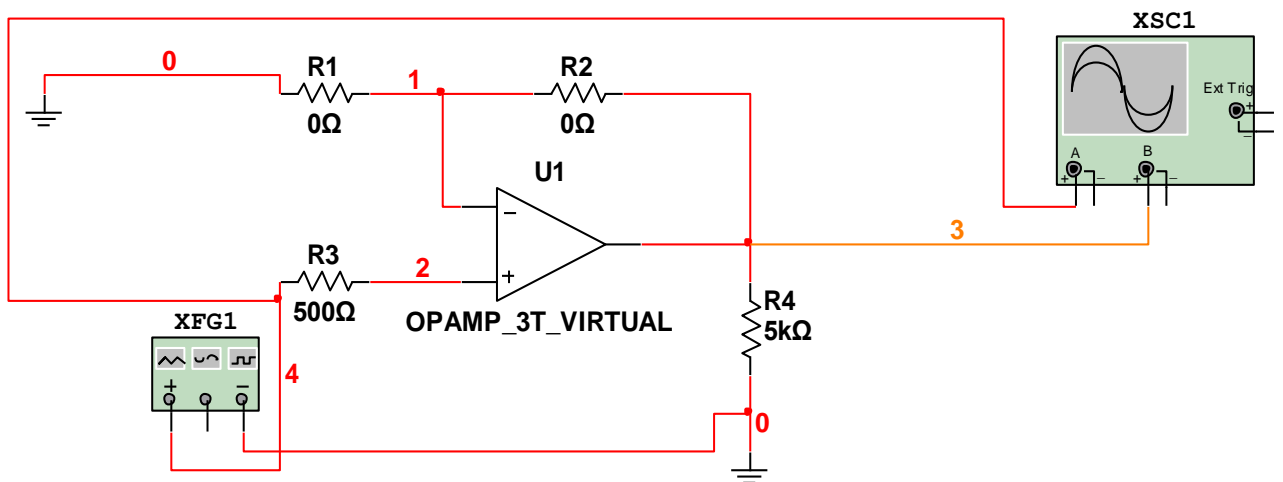


Рис. 7.3. Схема операційного підсилювача з неінвертувальним ВХОДОМ

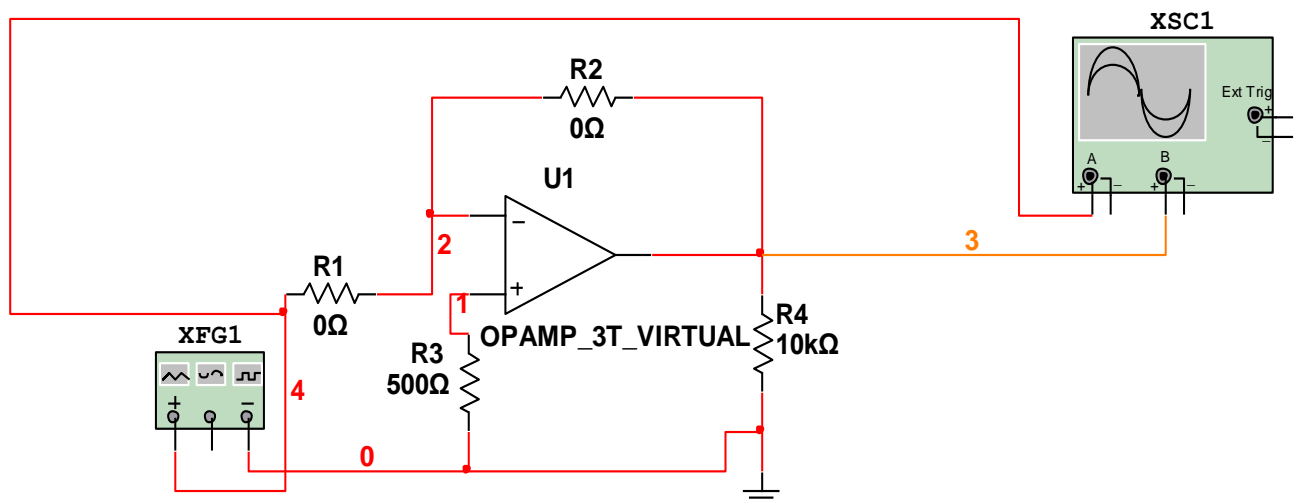


Рис. 7.4. Схема операційного підсилювача з інвертувальним ВХОДОМ

2. Нарисуйте амплітудні характеристики підсилювача окремо в режимі прямого підсилення сигналу та в інвертувальному режимі.
3. За отриманими амплітудними характеристиками визначте коефіцієнт підсилення за напругою K_U обох схем.
4. Дослідіть залежність коефіцієнтів підсилення K_U обох підсилювачів від опорів зворотних зв'язків R_1 і R_2 .
5. Проведіть теоретичні розрахунки коефіцієнта підсилення K_U та вихідної напруги $U_{\text{вих}}$ заданих схем.
6. Порівняйте отримані результати практичного дослідження з теоретичними розрахунками.

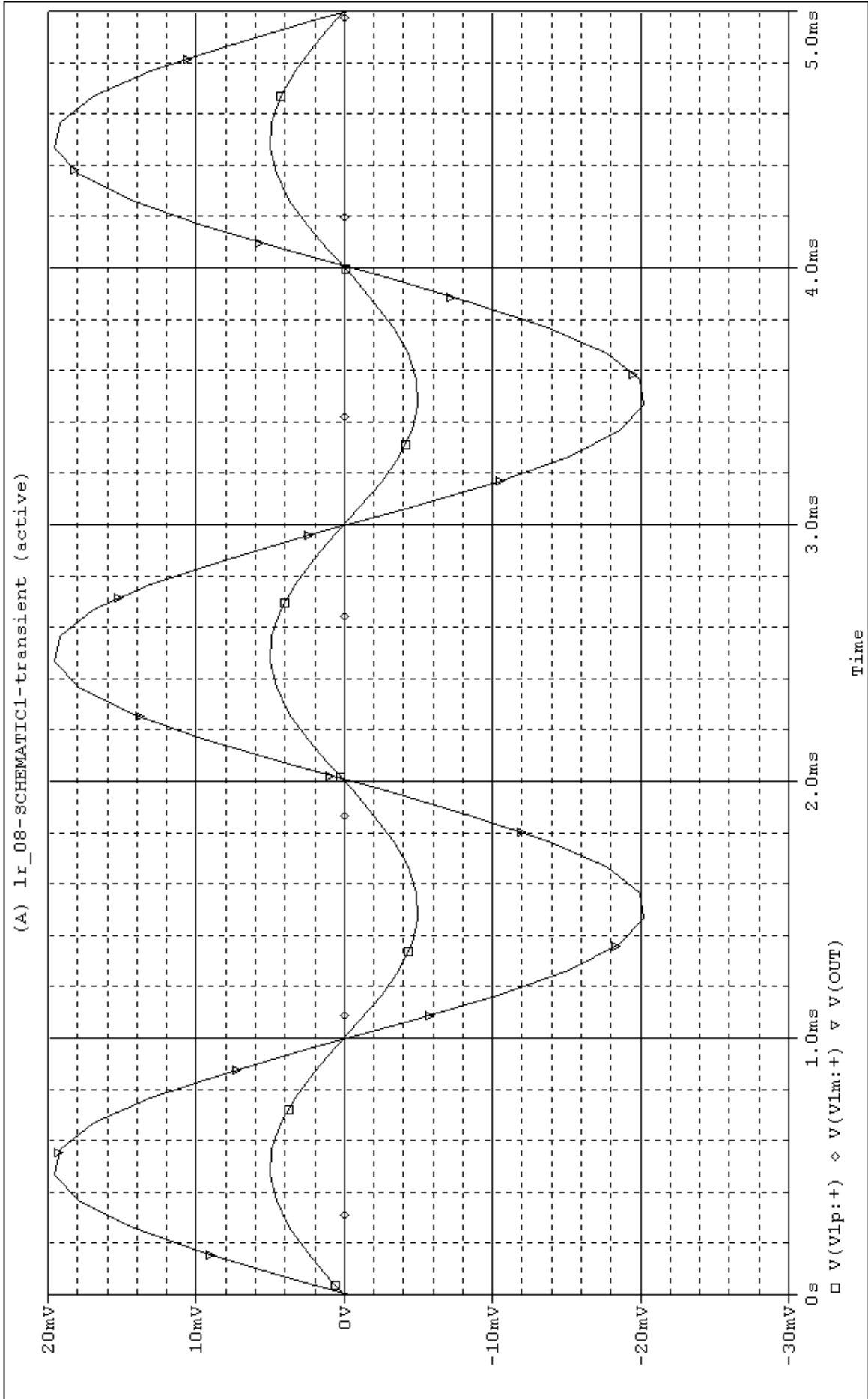


Рис. 7.5. Часова залежність вихідного сигналу операційного підсилювача в неінвертувальному режимі

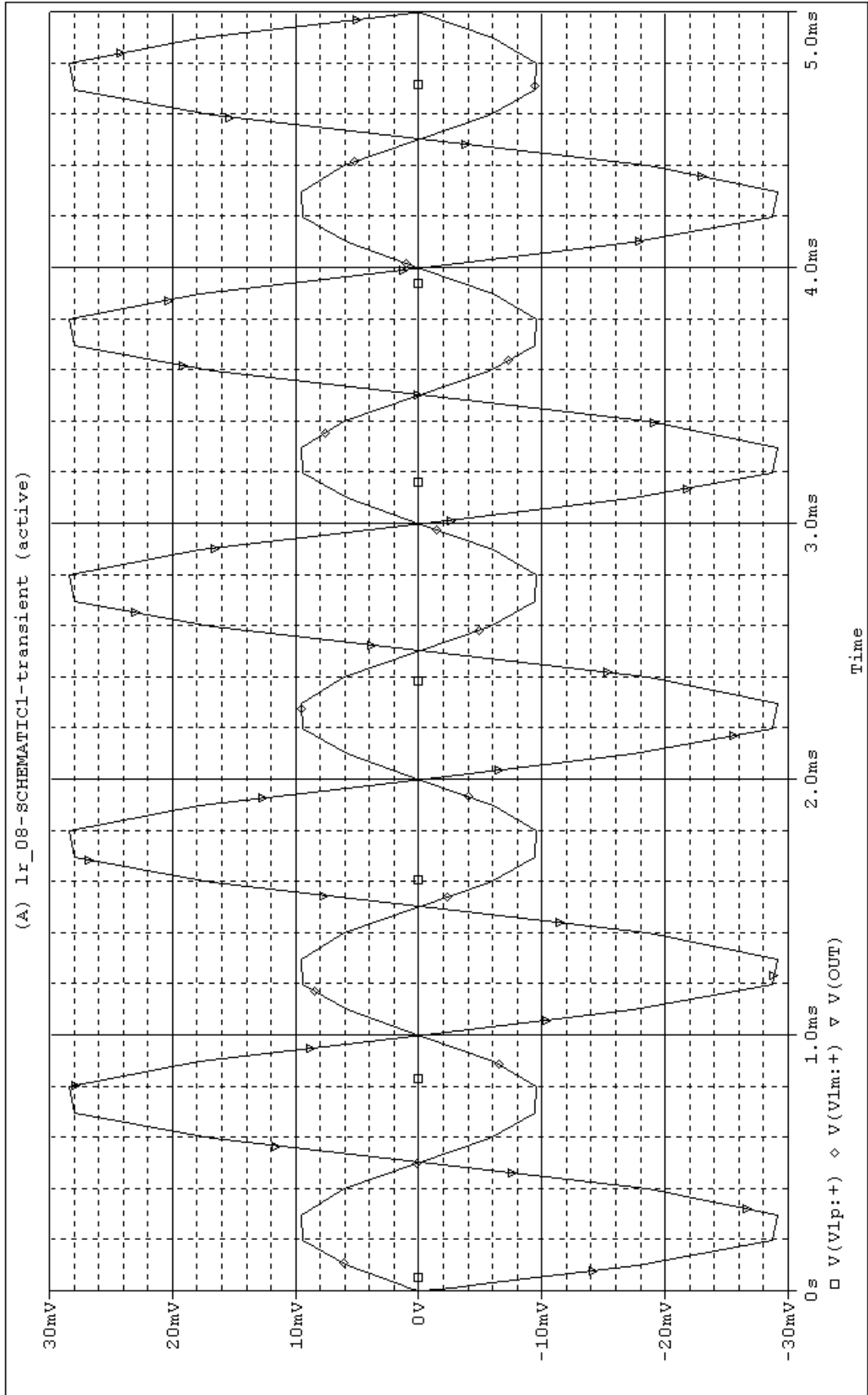


Рис. 7.6 Часова залежність вихідного сигналу операційного підсилювача в інвертувальному режимі

Вихідні дані для виконання лабораторної роботи

Варіант	Вихідні дані					Вихідні дані					
	U _{вх} , мВ	f, кГц	R ₁ , Ом	R ₂ , кОм		Варіант	U _{вх} , мВ	f, кГц	R ₁ , кОм	R ₂ , кОм	
1	5,7	35	430	5		9	15,2	12	1,3	51	
2	2,5	32	470	2,5		10	12,5	17	1,7	29	
3	2,0	3,9	390	6		11	21,0	9	3,4	62	
4	5,5	30	450	2,7		12	15,0	25	1,5	22	
5	5,1	37	370	4,7		13	22,1	14,2	2,7	41	
6	3,7	5,3	450	3,9		14	13,5	9,5	1,5	37	
7	4,5	3,5	250	4,5		15	14,0	13,8	2,1	25	
8	4,2	25	790	5,8		16	18,2	7,5	2,9	48	

Контрольні запитання

1. Яке призначення операційних підсилювачів?
2. Яка структурна схема операційного підсилювача?
3. Ідеальний операційний підсилювач. Назвіть його характеристики.
4. Наведіть і поясніть передатну характеристику операційного підсилювача.
5. Від чого залежить коефіцієнт підсилення при інвертуючому ввімкненні операційного підсилювача?
6. Від чого залежить коефіцієнт підсилення при неінвертуючому ввімкненні операційного підсилювача?
7. Які методи забезпечення зменшення дрейфу нуля в ОП?

Вимоги до оформлення звіту лабораторної роботи**Зміст звіту**

У звіті потрібно відобразити:

- 1) мету лабораторної роботи;
- 2) принципову електричну схему досліджуваного функціонального вузла;
- 3) результати експериментальних досліджень у вигляді таблиць та графіків;
- 4) розрахунки параметрів підсилювача;
- 5) висновки, що базуються на аналізі отриманих результатів.

Лабораторна робота №8

Тема. Дослідження автогенератора на операційному підсилювачі.

Мета роботи: вивчення принципів дії та основних властивостей автогенераторів, ознайомлення з основними параметрами та використанням.

Теоретичні відомості.

Високі технічні показники мають LC - автогенератори гармонійних коливань, в яких використані як підсилювальні ланки операційні підсилювачі. В зв'язку з надлишковістю коефіцієнта підсилення таких підсилювачів є можливість, крім позитивного зворотнього зв'язку через частотно-вибірковий резонансний контур, вводити досить глибокий негативний зворотній зв'язок, що суттєво підвищує стабільність частоти вихідних коливань.

LC-генератори (рис. 8.1) містять резонансний контур LC, який визначає частоту коливань вихідної напруги

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (8.1)$$

Практично задану частоту коливань отримують шляхом налаштування контура в резонанс струмів, який визначається рівністю реактивних провідностей $b_L = b_C$.

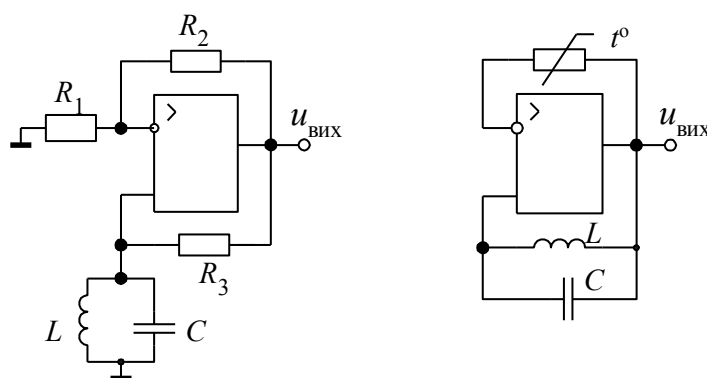


Рис. 8.1. Схеми LC-генераторів

Технічні характеристики LC-автогенераторів у діапазоні низьких частот суттєво знижуються, оскільки непомірно збільшуються індуктивність і ємність коливального контура. Це призводить до збільшення омичного опору обмотки котушки і струмів витоку конденсатора, зниженню добротності коливального контура і стабільності частоти автогенератора. Тому в автогенераторах

гармонічних коливань низькочастотного діапазону використовують частотно-вибіркові кола з елементів R та C і, залежно від створюваного ними зсуву фази на квазірезонансній частоті, інвертуючі або неінвертуючі підсилювачі.

На відміну від резонансної частоти ω_0 коливального LC -контура для частотно-вибіркових RC -кіл частоту ω_0 , кратну πn , де $n = 0$ або 1 , називають квазірезонансною частотою. Такі автогенератори й називають RC -генераторами. За габаритними і ваговими характеристиками в області частот від частин герца до десятків кілогерц вони мають значні переваги перед LC -автогенераторами.

Для того, щоб із всього можливого спектра частот автогенератор генерував лише одну гармонічну складову, умови самозбудження генератора ($K_n \beta_U = 1$, $\varphi_k + \varphi_\beta = 2\pi n$) повинні виконуватися на цій частоті.

Як фазуючі використовують кола, що складаються з простих Γ -подібних RC -ланок (звичайно трьох або чотирьох). На рисунку 8.2 а зображений триланковий ланцюжок, так звана R -паралель, а на рисунку 8.2 б – його частотна і фазова характеристики. Як видно з рисунка 8.3 б на квазірезонансній частоті фазовий зсув φ_β для цього ланцюжка дорівнює 180 ел. град., а коефіцієнт передачі напруги має дійсне значення β_0 , що дорівнює $1/29$. При цьому квазірезонансна частота ланцюжка $\beta_U = \dot{U}_{вих} / \dot{U}_{вх}$, визначається параметрами R і C .

$$f_0 = \omega_0 / 2\pi = 1 / 2\pi RC \sqrt{6}. \quad (8.2)$$

Таким чином, підсилювальний каскад із зсувом фази напруги підсилюваного сигналу на 180 ел. град, за допомогою триланкового ланцюжка R -паралель може генерувати гармонічні коливання з частотою f_0 (формула 8.2), якщо його коефіцієнт підсилення перевищує 29 , що відповідає також виконанню умови балансу амплітуд.

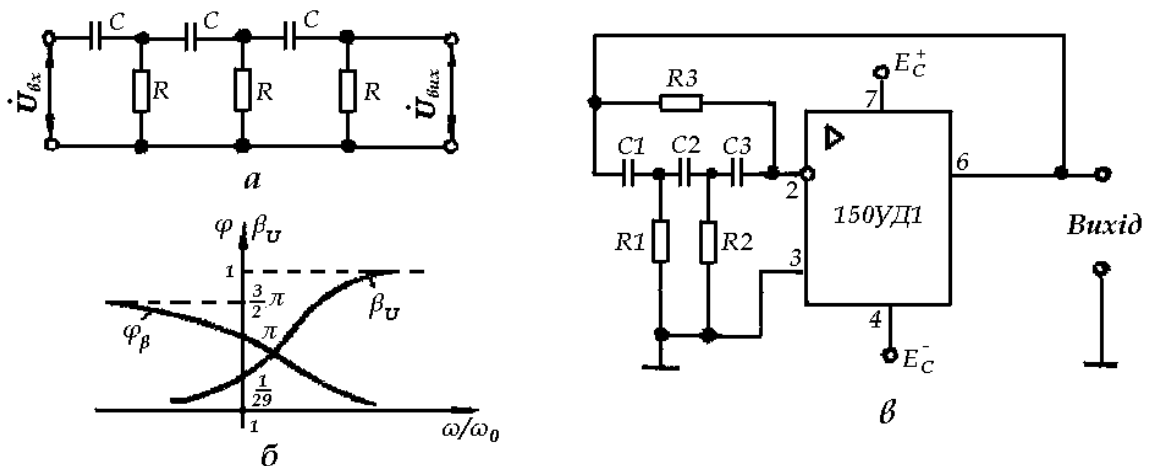


Рис. 8.2

Для чотириланкового ланцюжка R -паралель $\beta_0 = 1/18,4$. Тому коефіцієнт підсилення підсилювальної ланки RC -генератора не може бути меншим ($K_{пУ} \geq 18,4$). Подальше збільшення числа ланок фазуючого ланцюжка не дає суттєвого зменшення затухання, ускладнюючи схему.

На рисунку 8.2 в показана схема RC -генератора на ОП 153УД1 з фазуючим ланцюжком. Оскільки фазуючий RC -ланцюжок увімкнений між виходом і інвертуючим входом ОП, загальний фазовий зсув у замкнутій петлі дорівнює 360 ел. град., що забезпечує виконання балансу фази без утруднення в зв'язку з надлишковістю коефіцієнта підсилення ОП. Великий вхідний і малий вихідний опори ОП дозволяють здійснювати режим практично ідеального узгодження фазуючого ланцюжка з підсилювальною ланкою.

Найбільш часто застосовують RC -автогенератори, що використовують послідовно-паралельний частотно-вибірковий RC -ланцюжок (рис. 8.3 а). Квазірезонансна частота для цього ланцюжка,

$$f_0 = \omega_0 / 2\pi = 1/2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2} \quad (8.3)$$

і коефіцієнт передачі напруги на квазірезонансній частоті

$$\beta = \frac{u_{\text{вих}}}{u_{\text{вх}}} = \frac{1}{1 + R_1/R_2 + C_1/C_2} \quad (8.4)$$

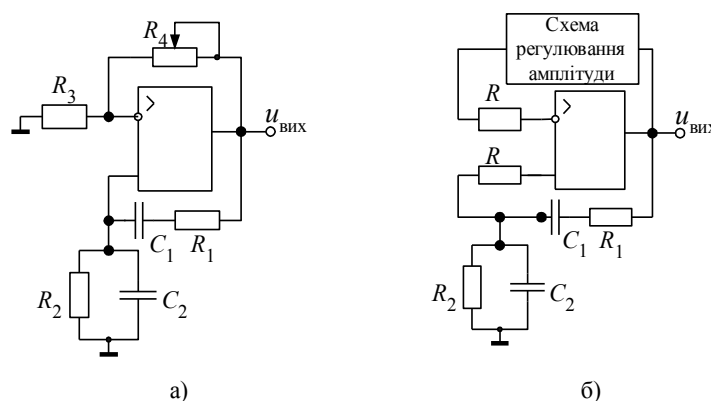


Рис. 8.3. Схеми RC -генераторів

Через те, що дуже часто $R_1 = R_2 = R$ і $C_1 = C_2 = C$, співвідношення (8.3) і (8.4) для цього випадку відповідно мають вигляд

$$\beta = \frac{1}{3}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (8.5)$$

Широко використовують RC -генератори за схемою Віна (генератор Віна), (рис. 8.3 б). Цей генератор має схему регулювання амплітуди, що надає йому ширші можливості.

Порядок виконання роботи

1. Електрична схема RC-автогенератора наведена на рисунку 8.4. Операційний підсилювач охоплений колом додатного зворотного зв'язку (ДЗЗ) резисторів R і конденсаторів C , а також колом від'ємного зворотного зв'язку (ВЗЗ), утвореного діодами $D1$ і $D2$ і резистором $R1$. Нелінійний ВЗЗ призначений для обмеження амплітуди автоколиваний.

2. Частота коливаний автогенератора дорівнює N кГц, де N – номер згідно зі списком. Опори резисторів і ємності конденсаторів розраховуються згідно з формулою $\omega_0 = 1/RC$, при цьому вважаємо: $R_2=R_3=R=1\dots 10$ кОм і $C_1=C_2=C$.

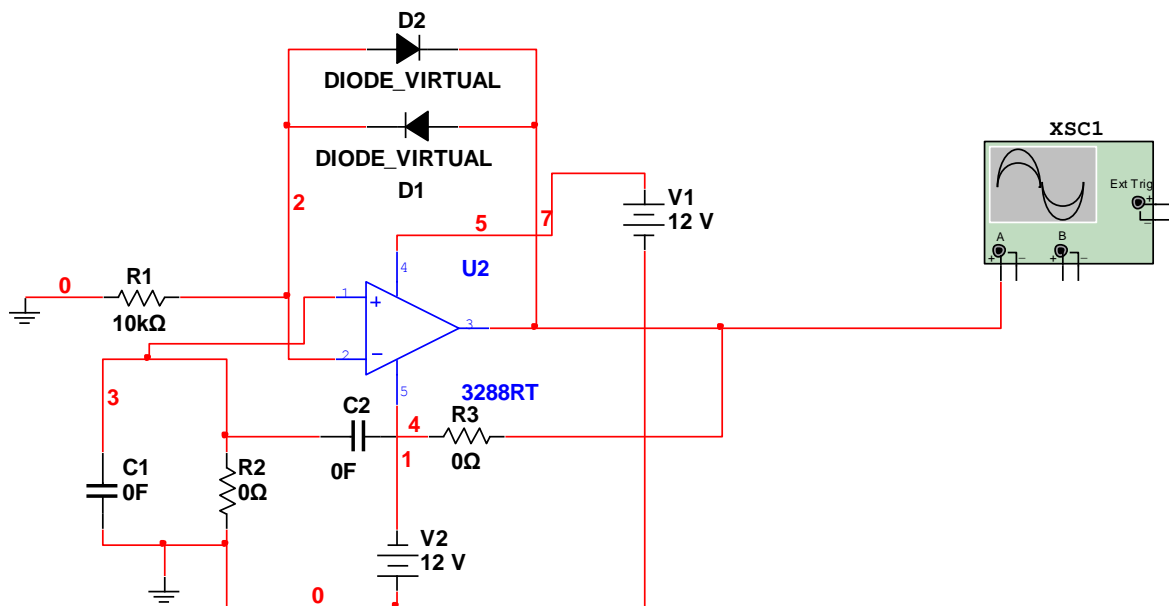


Рис. 8.4. Схема RC-автогенератора

3. Отримайте стабільний режим роботи автогенератора. Визначте з отриманої осцилограми основні показники: частоту і амплітуду автоколиваний. Порівняйте отриману частоту автоколиваний з заданою.

4. Збільшити або зменшити опори чи ємності в колі ДЗЗ. Визначте нову частоту коливаний. За отриманими результатами зробіть висновки.

5. Аналізуючи початок осцилограми, визначити тривалість перехідного процесу встановлення автоколиваний. Коливання вважається встановленим, якщо його амплітуда відрізняється від стаціонарної не більш як на 10%.

6. Включіть паралельно діодам змінний резистор з опором 60 кОм (рис. 8.5) збільшуючи і зменшуючи його опір, спостерігайте за процесом виникнення і зриву автоколиваний. Визначте опір резистора, при якому відбувається самозбудження, і розрахуйте коефіцієнт підсилення неінвертуючого підсилювача (опори діодів не враховуємо). Перевірте умови виникнення автоколиваний.

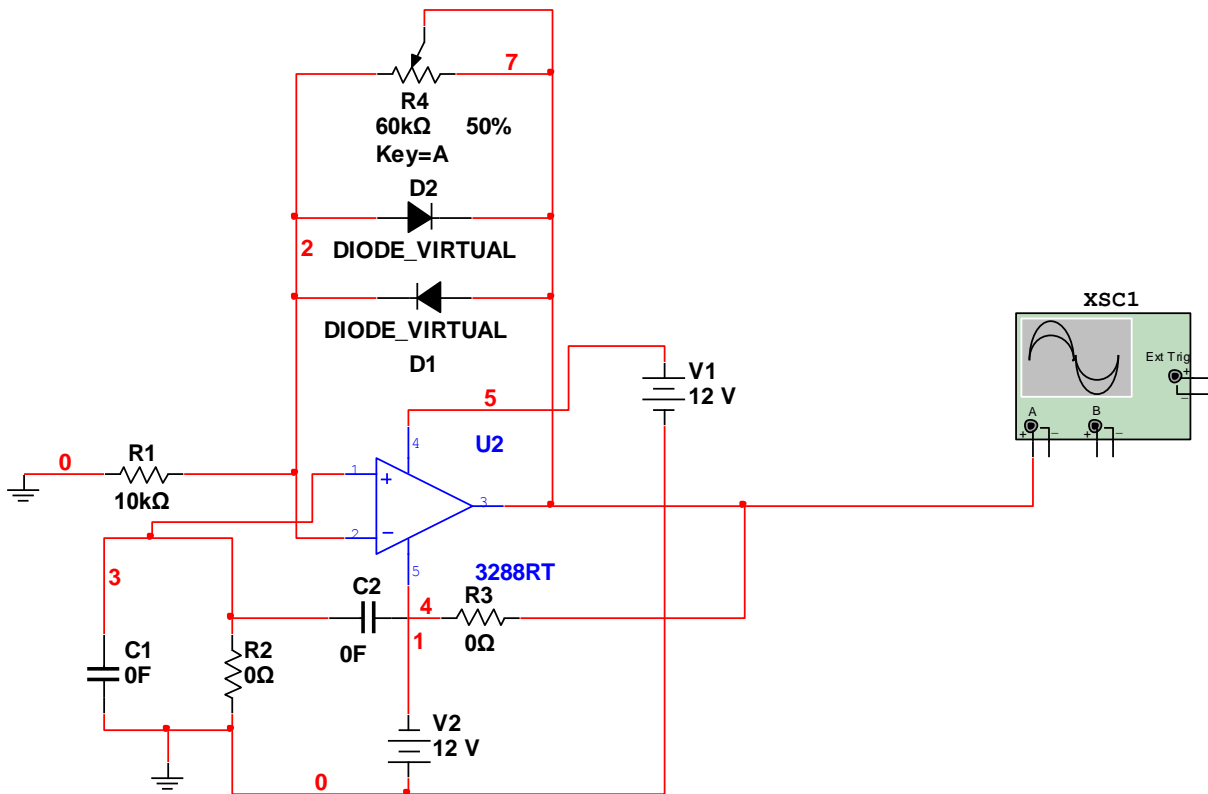


Рис. 8.5. Схема автогенератора з регулюванням амплітуди коливань

7. Від'єднайте коло позитивного зворотнього зв'язку від автогенератора. Подайте гармонійний сигнал на неінвертуючий вхід підсилювача. Отримайте на частоті автоколивань на виході операційного підсилювача таку ж амплітуду вихідного сигналу, як і у випадку автоколивань. Розрахуйте коефіцієнт підсилення підсилювача, який відповідає стаціонарному стану автогенератора.

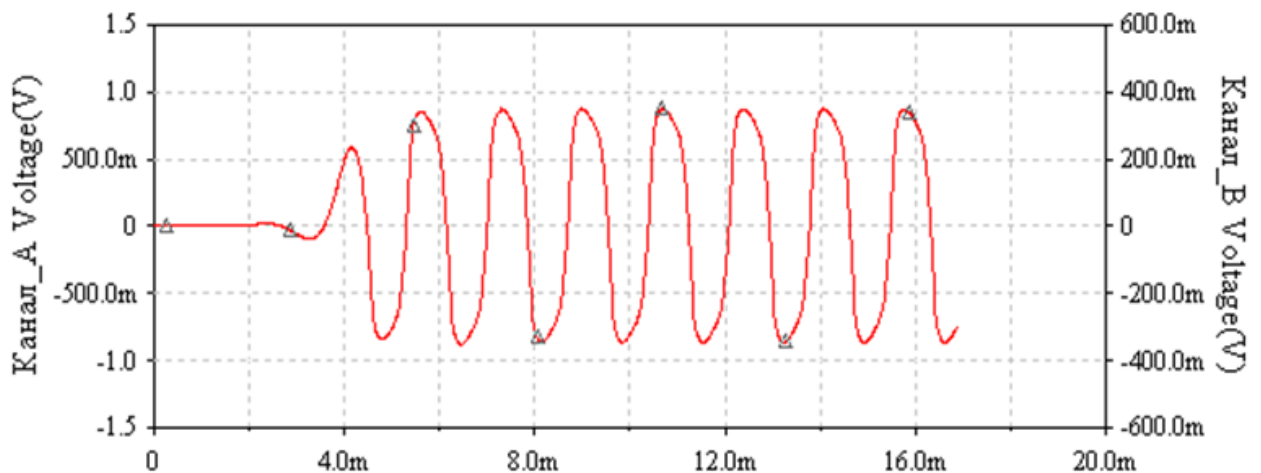


Рис. 8.6. Часова залежність вихідного сигналу автогенератора

Контрольні запитання

1. Які обов'язкові структурні елементи входять до складу автогенератора і в чому полягає їх принцип взаємодії?
2. Які умови самозбудження треба задовольнити для одержання незатухаючих коливань?
3. Як можна змінювати амплітуду і фазу коливань у колі зворотного зв'язку автогенератора?
4. У чому особливості самозбудження RC-схем автогенераторів?
5. Чим зумовлені спотворення сигналу в автогенераторах? Яким чином можна усунути причини спотворень?

Вимоги до оформлення звіту лабораторної роботи

Зміст звіту

У звіті потрібно відобразити:

- 1) мету лабораторної роботи;
- 2) принципову електричну схему досліджуваного функціонального вузла;
- 3) результати експериментальних досліджень у вигляді таблиць та графіків;
- 4) розрахунки параметрів автогенератора, на які вказано в порядку виконання роботи;
- 5) висновки, що базуються на аналізі отриманих результатів.

Лабораторна робота № 9

Тема. Дослідження автоколивальних мультівібраторів на операційних підсилювачах

Мета роботи: вивчення принципів, методів розрахунку і особливостей налаштування автоколивальних мультівібраторів.

Теоретичні відомості

Мультівібратори – це генератори релаксаційного типу з прямокутною формою імпульсів, які широко використовуються як задавальні генератори в системах керування.

Мультівібратори переважно реалізуються на операційному підсилювачі $DA1$, містять часозадавальну ланку $R_1-R_2-C_1$ та ланку додатного зворотного зв'язку R_3-R_4 (рис. 9.1 *а*). Наявність цього зв'язку та діодів $VD1$ і $VD2$ забезпечує під час увімкнення мультівібратора переведення операційного підсилювача $DA1$ у стан із граничним значенням вихідної напруги (рис. 9.1 *б*) додатної полярності ($U_{\text{вих.макс}}^+$) чи від'ємної полярності ($U_{\text{вих.макс}}^-$). Нехай під час подання напруги живлення на виході ОП встановилася додатна напруга $U_{\text{вих.макс}}^+$, тоді на неінвертувальний вхід $DA1$ подається напруга зворотного зв'язку, яка визначається

$$U_{\text{зв.з}}^+ = \frac{U_{\text{вих.макс}}^+}{R_3 + R_4} R_3. \quad (9.1)$$

Конденсатор C_1 заряджається через діод $VD1$ і резистор R_1 вихідною напругою $U_{\text{вих.макс}}^+$. Напруга конденсатора u_c подається на інвертувальний вхід $DA1$. В момент часу t_1 напруга конденсатора набирає значення $u_c = U_{\text{зв.з}}^+$ і операційний підсилювач $DA1$ переходить у стан із від'ємною вихідною напругою $U_{\text{вих.макс}}^-$ (рис. 9.1 *б*). Відповідно змінює свою полярність напруга зворотного зв'язку $U_{\text{зв.з}}^- = \frac{U_{\text{вих.макс}}^-}{R_3 + R_4} R_3$. Після цього відбувається перезаряд конденсатора C_1 через резистор R_2 і діод $VD2$ доти, доки напруга на ньому не дорівнюватиме $u_c = U_{\text{зв.з}}^-$ (момент часу t_2). Далі ОП знову переходить у стан із додатною вихідною напругою $U_{\text{вих.макс}}^+$.

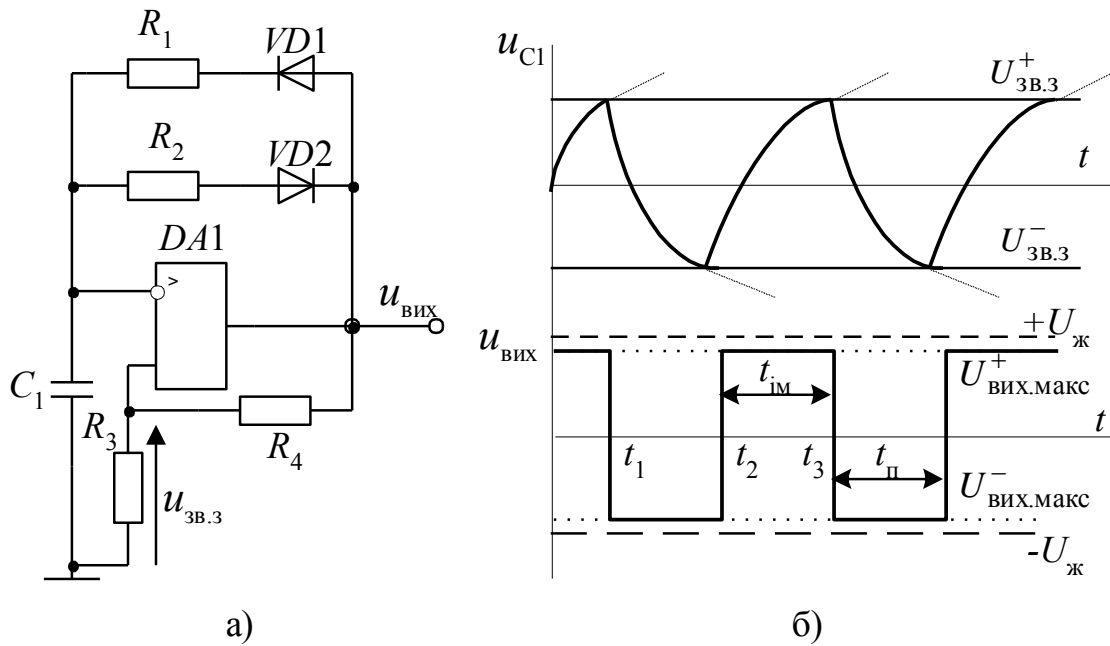


Рис. 9.1. Схема (а) та часові діаграми (б) мультивібратора

Діоди $VD1$ і $VD2$ виконують функцію порогових елементів й використовуються для покращення форми вихідної напруги мультивібратора. Параметри резистора R_1 визначають тривалість імпульсу (додатне значення вихідної напруги)

$$t_{им} = R_1 C \ln\left(1 + \frac{2R_3}{R_4}\right), \quad (9.2)$$

а резистора R_2 – тривалість паузи (від’ємне значення вихідної напруги)

$$t_{п} = R_2 C \ln\left(1 + \frac{2R_3}{R_4}\right). \quad (9.3)$$

Порядок виконання роботи

1. Запустіть Multisim.
2. Підготуйте новий файл для роботи. Для цього необхідно виконати такі операції з меню: File/New і File/Save as. При виконанні операції Save as буде необхідно вказати ім'я файлу і каталог, у якому буде зберігатися схема.
3. Зберіть схему мультивібратора, наведену на рисунку 9.2, де $R_1=50\text{кОм}$, $R_2=30\text{кОм}$, $R_3=2.4\text{кОм}$, $R_4=50\text{кОм}$, $C_1=0,47\text{мкФ}$.

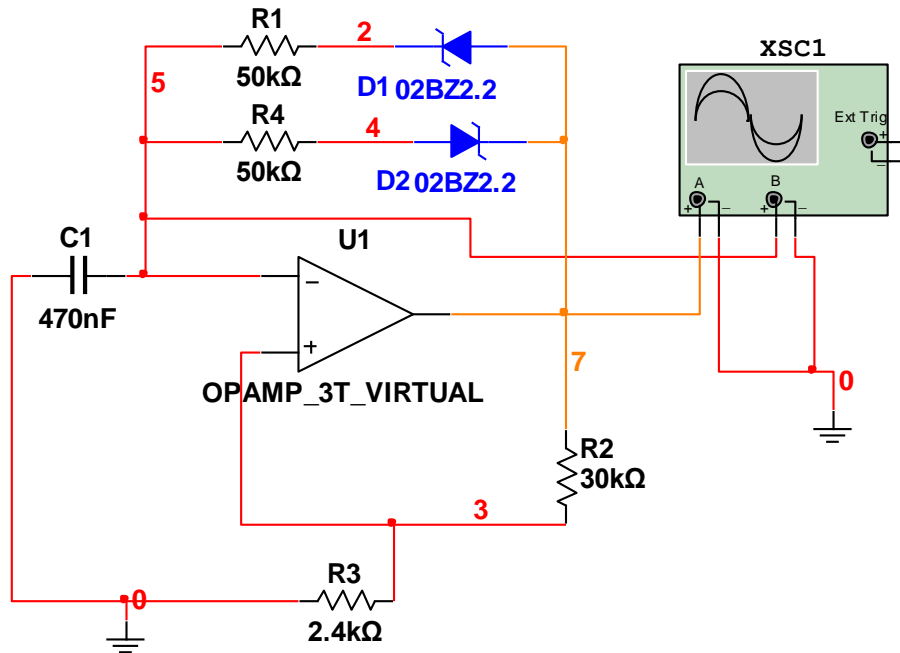


Рис. 9.2

4. Зніміть часові діаграми мультивібратора.
5. Змініть опір резистора $R_4=200\text{k}\Omega$ (рис. 9.3).

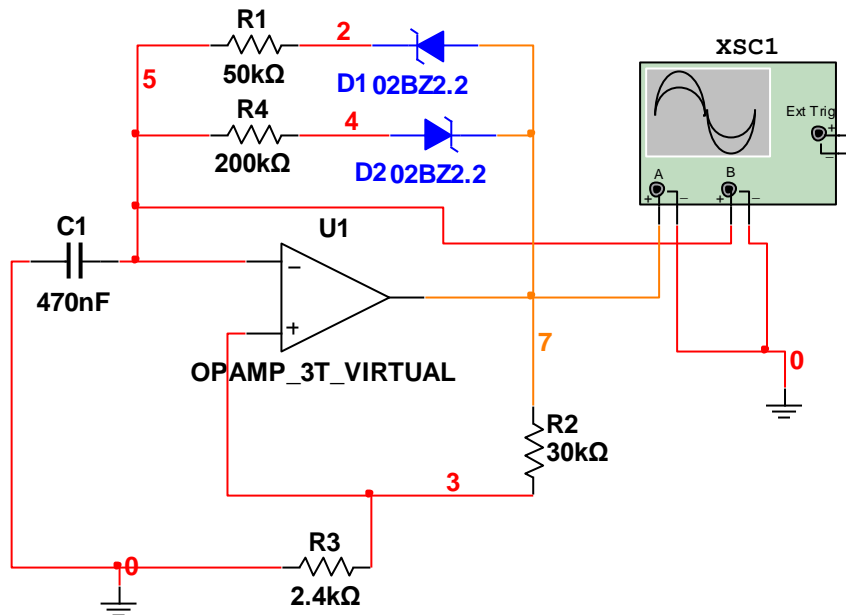


Рис.9.3

6. Зніміть часові діаграми мультивібратора. Як змінюється тривалість генерованих негативних імпульсів в схемі МВ на ОП при зміні опорного резистора R_4 . Зробіть висновки.

7. Зменшіть ємність конденсатора C_1 в два рази. Як змінюється тривалість генерованих негативних імпульсів в схемі МВ на ОП при зміні ємності.

Контрольні запитання

1. Які обов'язкові структурні елементи входять до складу мультівібратора і в чому полягає їх принцип взаємодії?
2. Від яких факторів залежить тривалість імпульсу?
3. Від яких факторів залежить тривалість паузи?
4. Назвіть способи регулювання частоти та щільності імпульсів мультівібратора.
5. В чому різниця між автоколивним та загальмованим мультівібраторами?

Вимоги до оформлення звіту лабораторної роботи

Зміст звіту

У звіті потрібно відобразити:

- 1) мету лабораторної роботи;
- 2) принципову електричну схему досліджуваного функціонального вузла;
- 3) часові діаграми автоколивального мультівібратора на ОП для обох схем;
- 4) висновки, що базуються на аналізі отриманих результатів.

Лабораторна робота № 10

Тема Дослідження електронних ключів на базі напівпровідникових транзисторів

Мета роботи: вивчення принципів побудови та дослідження статичних і динамічних характеристик електронних ключових схем.

Теоретичні відомості

Електронними ключами називаються нелінійні елементи, вольт-амперні характеристики яких мають вигляд нелінійних функцій, а процеси описуються нелінійними рівняннями різного вигляду. Нелінійним елементом електронного ключа є напівпровідниковий прилад (діод, тиристор, транзистор), нелінійний опір якого – змінна величина. Електронний ключ (рис. 10.1 *а, б*) виконує операції вмикання та вимикання різних електронних кіл після подачі керуючих сигналів. Тому режим роботи ключа характеризується одним з двох станів: "ввімкнено" – "вимкнено". Якщо ключ розімкнутий, то $U_{\text{вих}} = E$ та $I = 0$. У цьому стані електронний ключ перебуває до моменту часу t_1 (рис. 10 *в*). В замкненому стані ключа $U_{\text{вих}} = 0$, $I = E/R$. В обох станах електронний ключ вважається ідеальним, тобто опір ($R_{\text{пр}}$) замкненого ключа дорівнює нулю, а розімкненого ($R_{\text{звор}}$) – нескінченності, що недосяжно.

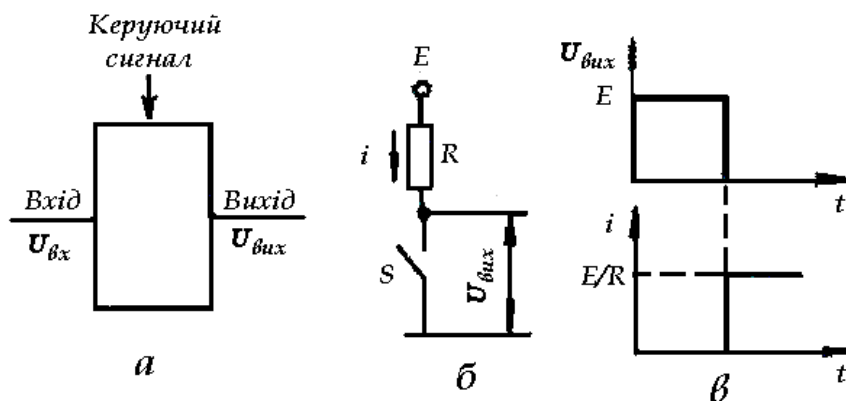


Рис.10.1

Значення часу увімкнення та вимкнення для тиристорів подано в паспортних даних, а для транзисторів час увімкнення приймають таким, що дорівнює часу вимкнення, який визначають за виразом

$$t_{\text{ув}} \approx t_{\text{вим}} \approx \frac{1}{4f_{\text{зр}}}, \quad (10.1)$$

де f_{cp} – гранична частота передатного коефіцієнта за струмом, яка подається в паспортних даних.

Вибір того чи іншого типу ЕК здійснюють за величиною струму навантаження: якщо $I_H \leq 100$ А, то рекомендуються транзисторні ключі; якщо $I_H \geq 100$ – тиристорні.

Транзисторні електронні ключі

Найпоширеніша схема силових транзисторних ключів зображена на рисунку 10.2 а, у якій транзистор VT увімкнено із спільним емітером. Часові діаграми (рис. 10.2 б) пояснюють режим роботи, що визначається двома станами: відсіку (транзистор закритий) та насичення (транзистор відкритий).

Стан відсіку (ЕК розімкнений). Для реалізації цього стану необхідно забезпечити умову $U_{BE} < 0$ (для транзисторів типу $n-p-n$) або $U_{BE} > 0$ (для транзисторів типу $p-n-p$). На часових діаграмах стан відсіку відповідає інтервалам часу: $0 < t < t_1$; $t_2 < t < t_3$; $t_4 < t < t_5$.

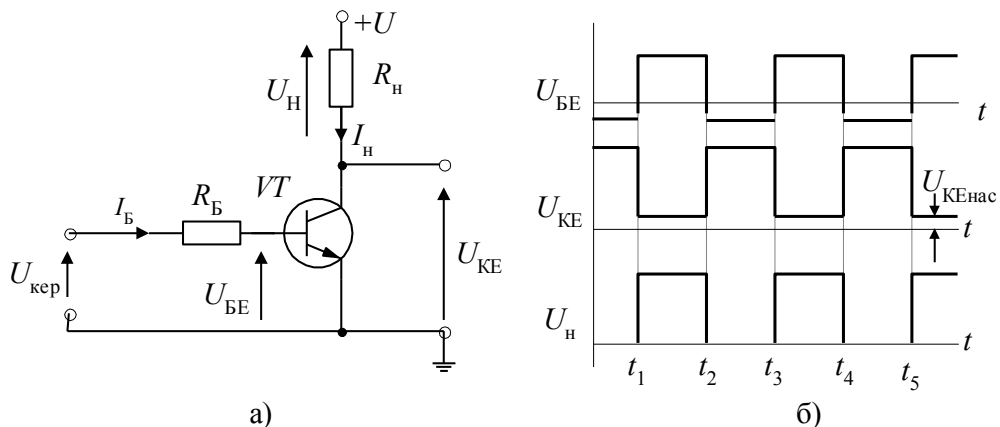


Рис. 10.2. Схема транзисторного ключа (а) та часові діаграми напруг (б)

При цьому

$$U_H = 0, \quad U_{KE} = U \quad \text{і} \quad I_K = I_H = 0, \quad (10.2)$$

де U – напруга джерела живлення; I_H – номінальний струм навантаження.

Стан насичення (ЕК замкнений). Цей стан забезпечується за умови $I_{\bar{b}} = I_{\bar{b}нас}$. Величина струму насичення бази транзистора визначається за виразом

$$I_{\bar{b}нас} = \frac{k_H P_H}{U_H h_{21E}}, \quad (10.3)$$

де $k_H = 1,2$ – коефіцієнт насичення струму бази;

P_H – номінальна потужність навантаження;

h_{21E} – статичний передатний коефіцієнт за струмом транзистора, увімкненого із спільним емітером. На рисунку цьому стану відповідають часові інтервали $t_1 < t < t_2$; $t_3 < t < t_4$; $t_5 < t < t_6$, а цей режим характеризується: $U_{BE} = U_{BEнас}$, $U_{KE} = U_{KEнас}$, а $I_K = I_H$.

Вибір транзистора, що працює в режимі ЕК, здійснюється за двома основними параметрами:

$$I_{K,доп} > I_H; \quad U_{KE,доп} > U, \quad (10.4)$$

де $I_{K,доп}$ – допустимий струм колектора; $U_{KE,доп}$ – допустима напруга між колектором та емітером транзистора, значення яких подано в паспортних даних.

Резистор R_B у колі бази транзистора використано для спрямлення вхідної характеристики транзистора. Залежно від потужності транзистора опір цього резистора вибирають в межах (5÷10) Ом (чим більша потужність транзистора, тим більший опір резистора).

Широко застосовуються ключі на польових транзисторах. На рисунку 10.3 наведено схему на МОН-транзисторі із вбудованим каналом n -типу та лінію навантаження, побудовану на вихідних (стокових) характеристиках польового транзистора. Ключі на польових транзисторах інших типів будуються аналогічно.

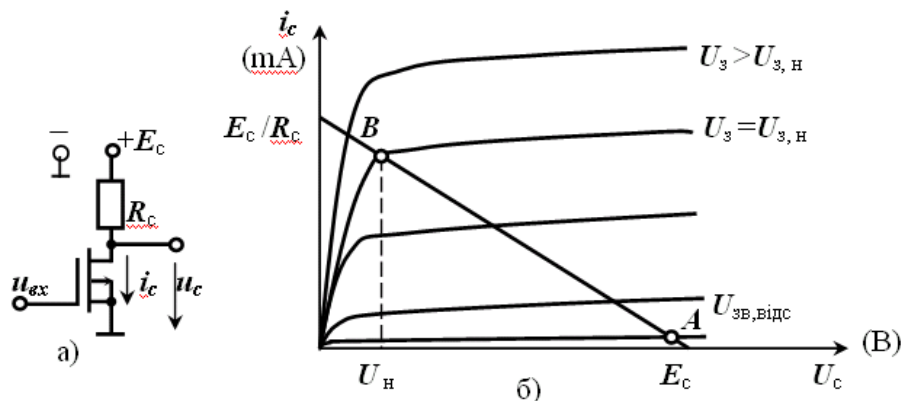


Рис. 10.3. Ключ на МОН-транзисторі :
а – найпростіша схема; б – положення робочої точки

У відкритому стані ключа напруга на транзисторі мала ($U_H \approx 0$), а струм

$$I_{c,н} = (E_c - U_H) / R_c \approx E_c / R_c. \quad (10.5)$$

Цей струм можна записати у вигляді

$$I_{c,н} = S(U_{з,н} - U_{зв,від}), \quad (10.6)$$

де S та $U_{зв,від}$ – крутість та напруга відсікання польового транзистора.

Відкритий стан ключа підтримується при виконанні умови

$$U_3 \geq U_{3,н} = (E_c / S R_c) + U_{зв,від}. \quad (10.7)$$

Для замкненого стану ключа, при якому $i_c = 0$, а $u_c = E_c$, необхідно подати на затвор транзистора напругу $u_3 < U_{зв,від}$.

Порядок виконання роботи

1. Запустіть Multisim.
2. Підготуйте новий файл для роботи. Для цього необхідно виконати такі операції з меню: **File/New** і **File/Save as**. При виконанні операції **Save as** буде необхідно вказати ім'я файлу і каталог, у якому буде зберігатися схема.
3. Зберіть схему електронного ключа, наведену на рисунку 10.4. Транзистор для схеми оберіть з таблиці 10.1 згідно з варіантом.

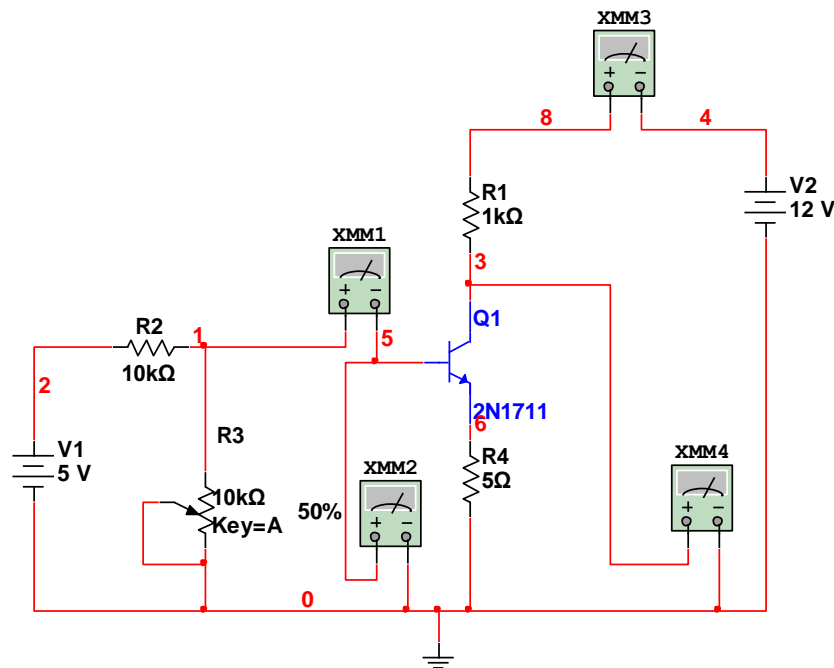


Рис. 10.4

4. XМ1 та XМ3 встановіть для вимірювання постійного струму, а XМ2 та XМ4 – для вимірювання постійної напруги.
5. Змінюючи опір резистора R_3 , зафіксуйте значення струму і напруги входу $I_{вх}$, $U_{вх}$, які визначають перемикання ключа із закритого стану у відкритий.
6. Зберіть схему електронного ключа, наведену на рисунку 10.5. Зніміть осцилограми вхідного та вихідного сигналів та проведіть аналіз отриманих результатів. Проведіть аналіз перехідних процесів у схемі. Для цього необхідно

Комп'ютерна схемотехніка

виконати команду «Аналіз перехідних процесів» з меню «Моделювання». Після виконання цієї команди на робочому столі з'явиться діалогове вікно установки параметрів режиму моделювання. Встановіть параметри режиму моделювання згідно з даними, наведеними на рисунку 10.6. З отриманого графіка зробіть аналіз тривалості перехідних процесів у схемі.

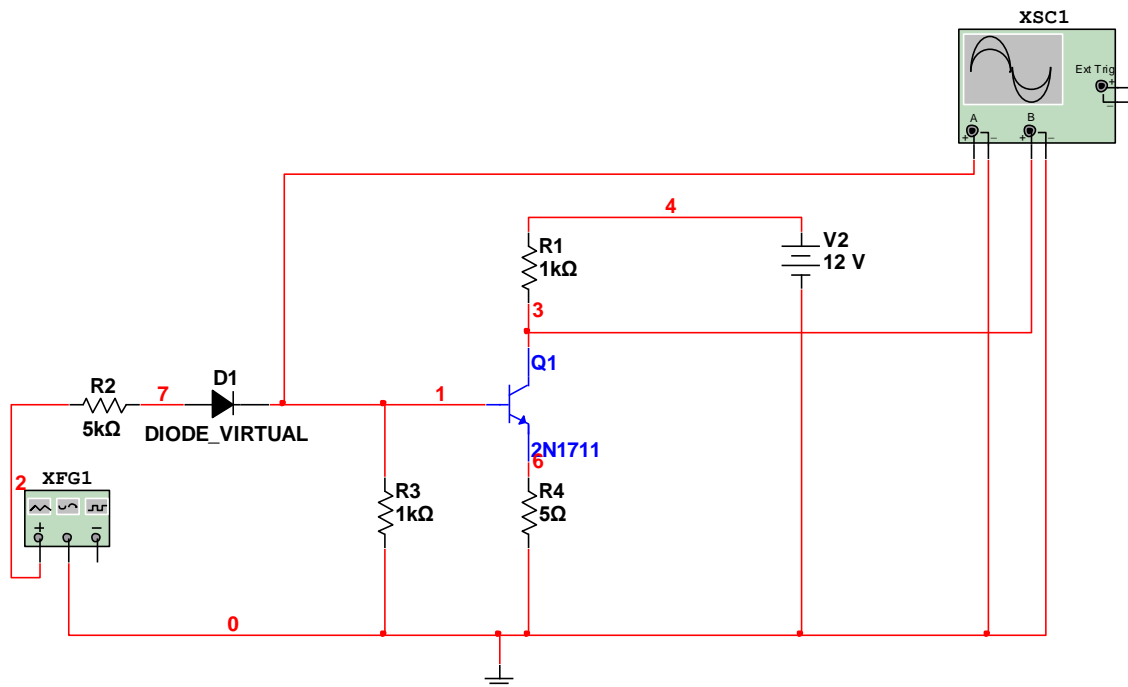


Рис. 10.5

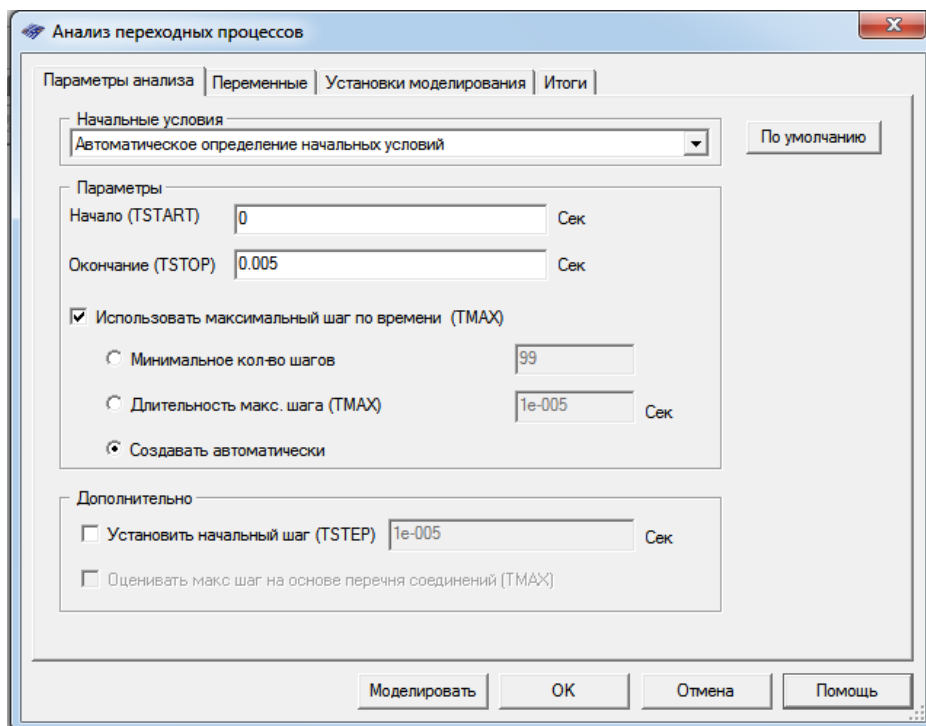


Рис. 10.6

7. Зберіть схему електронного ключа, наведену на рисунку 10.7, Транзистор для схеми оберіть з таблиці 10.1 згідно з варіантом.
8. Виконайте пункти 4-6 для схеми ключа на польовому транзисторі.

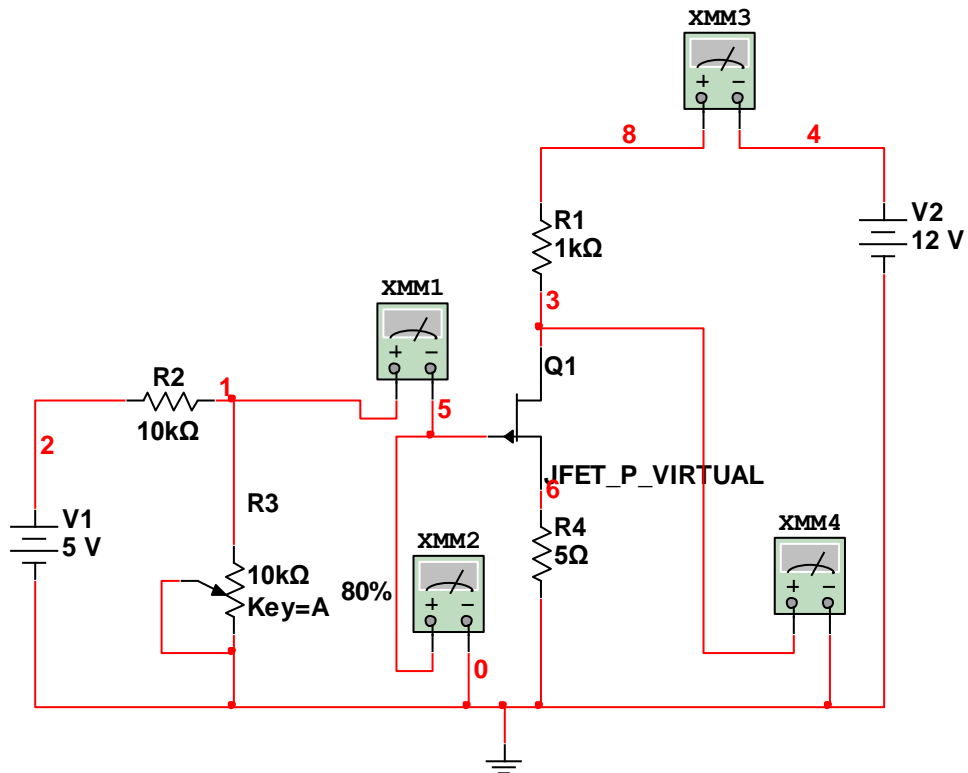


Рис. 10.7

9. Зберіть схему електронного ключа, наведену на рисунку 10.8. Зніміть осцилограми вхідного та вихідного сигналів та проведіть аналіз отриманих результатів.

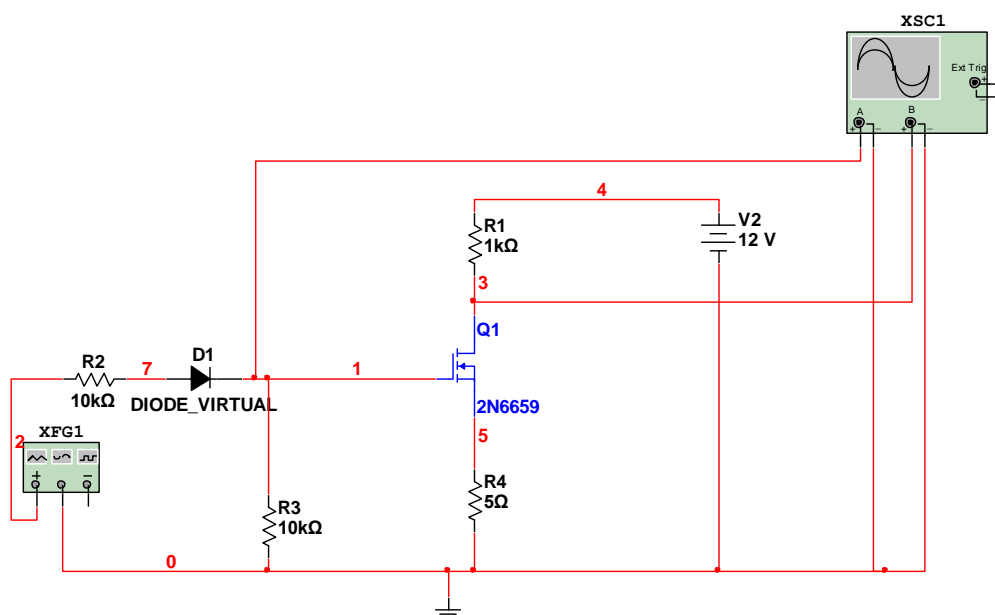


Рис. 10.8

Контрольні запитання

1. У чому полягає призначення ключових схем у схемотехніці цифрових пристроїв?
2. Назвіть різновиди електронних ключових схем.
3. Якому значенню дорівнює напруга на виході ключової схеми на біполярному транзисторі, якщо транзистор перебуває в режимі насичення?
4. Якому значенню дорівнює напруга на виході ключової схеми на рольовому транзисторі, якщо транзистор перебуває в режимі відсічки?
5. Якими засобами можна зменшити час перемикання ключових схем на біполярних транзисторах?
6. Назвіть статичні та динамічні параметри електронного ключа.

Вимоги до оформлення звіту лабораторної роботи

Зміст звіту

У звіті потрібно відобразити:

- 1) мету лабораторної роботи;
- 2) принципову електричну схему досліджуваного функціонального вузла;
- 3) отримані значення струмів і напруг та часові діаграми для обох схем;
- 4) висновки, що базуються на аналізі отриманих результатів.

Таблиця 10.1

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Тип тр-ра	2N2102	2N2218	2N2219	2N2221	2N2222	2N2369	2N2712	2N2714	2N2923	2N2924	2N2925	2N3019
	2N22608	2N22609	2N4381	2N5019	2N5020	2N5021	2N5114	2N5115	2N5116	2SJ108	2SJ108BL	J174
№ вар.	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Тип тр-ра	2N3020	2N3390	2N3391	2N3392	2N3393	2N3394	2N3414	2N3415	2N3416	2N3417	2N3439	2N3441
	2SJ108V	2SJ108GR	J175	J176	J177	PMBFJ174	PMBFJ175	SST174	SST175	SST176	2N5114	J175

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Хернитер М. Е. Электронное моделирование в Multisim / М. Е. Хернитер. — М. : ДМК, 2010. – 488 с.
2. Бабич М. П. Компьютерная схемотехника : учебн. пособ. / М. П. Бабич. – К. : МК-Пресс, 2004. – 412 с.
3. Дэвид М. Харрис и Сара Л. Харрис. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера / пер. с англ. 2-е изд. – Morgan Kaufman, 2013. – 1621 с.
4. Дмитрів В.Т. Електроніка і мікросхемотехніка: лабораторний практикум / В.Т. Дмитрів, В.М. Шиманський – Львів, 2008. – 100 с.
5. Гончаренко Б.М. Електроніка та мікросхемотехніка: навч. посіб./ Б.М.Гончаренко, К.В.Коновалов.- К.: НУХТ, 2006.- 565с.
6. Приходько В. М. Комп'ютерна схемотехніка / В. М. Приходько, С. П. Євсєєв, К. В. Садовий. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2011. – 299 с.
7. Воробйова О.М., Іванченко В.Д. Основи схемотехніки: У двох частинах: навчальний посібник. - Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова. - 2004, Ч. 2. – 172с.

Навчальне видання

Ю. О. Борзов, О. О. Смотр

**Комп'ютерна схемотехніка:
Лабораторний практикум (I частина)**

для бакалаврів спеціальності 122 “Комп'ютерні науки”

Літературний редактор Галина Падик
Верстка Ольга Смотр
Графічний дизайн обкладинки Марія Семьонова

Підписано до друку
Формат 60x84/16. Гарнітура Times New Roman.
Друк на різнографі. Папір офсетний