

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

В. Й. Котовський, Т. В. Семікіна, Н. В. Слободян,
А.В. Немировський, В. А. Клименко

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів, які навчаються за спеціальностями
104 «Фізика та астрономія» за освітньо-професійною програмою
«Комп'ютерне моделювання фізичних процесів»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Основи електроніки
Лабораторний практикум

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2021

Основи електроніки. Лабораторний практикум – методичні вказівки до лабораторних та практичних занять з курсу основи електроніки. [Електронний ресурс] : Лаб. практи. для студ. спеціальності 104 «Фізика та астрономія» освітньо-професійної програми «Комп'ютерне моделювання фізичних процесів» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.Й. Котовський, Т. В. Семікіна, Н. В. Слободян, А.В. Немировський В.А. Клименко. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,21 МБайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 84 с.

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (прот. № 3 від 27.01.2022 р.) за поданням Вченої ради Фізико-математичного факультету (прот. № 01 від 18.01.2022 р.)

Електронне мережне навчальне видання

Основи електроніки

Лабораторний практикум

Укладачі: *Котовський Віталій Йосипович, доктор. техн. наук, професор*
Семікіна Тетяна Вікторівна, канд. техн. наук, ст. наук. спів.,
Слободян Ніна В'ячеславівна, канд. техн. наук.,
Немировський Анатолій Володимирович, ст. викладач
Клименко Владислав Анатолійович, аспірант

Рецензенти: *Воронов Сергій Олександрович, д. т. н., професор*

Решетняк Сергій Олександрович, д. ф.-м. наук, професор

Відповідальний

редактор: *Писаренко Леонід Дмитрович, д. т. н., професор*

Анотація: Лабораторний практикум являє собою методичні вказівки до лабораторних та практичних занять з кредитного модулю «Основи електроніки». Лабораторний практикум включає загальну характеристику програми Multisim та інструкцію роботи з нею, детальний опис лабораторних та практичних занять, присвячених роботі приладів напівпровідникової електроніки, правила оформлення та приклади виконання завдань. Практикум буде корисним студентам денної та заочної форм навчання спеціальності 104 «Фізика та астрономія», 171 «Електроніка», освітньо-професійних програм «Комп'ютерне моделювання фізичних процесів», «Електронні компоненти і системи» та суміжних областей знань.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021

ЗМІСТ

1.	Як оформляти протоколи до лабораторних та практичних робіт	5
2.	Загальна характеристика програми MULTISIM	7
2.1.	Введення схеми	8
2.2.	Структура бази даних компонентів	9
2.3.	Загальні правила моделювання	13
2.4.	Симуляція	13
2.5.	Режими аналізу даних симуляції	15
3.	Опис завдань до занять лабораторна+практична робота	18
	Заняття 1. Розробка схеми на основі випрямного діода	18
	Заняття 2. Розрахунок однофазного некерованого випрямляча	19
	Заняття 3. Розрахунок однофазного керованого випрямляча	20
	Заняття 4. Розрахунок параметричного стабілізатора напруги	21
	Заняття 5. Розробка схеми зі світлодіодним індикатором	22
	Завдання 6. Розрахунок режиму роботи схеми включення біполярного транзистора із загальним емітером (ЗЕ) по постійному струму	23
	Заняття 7. Розрахунок режиму роботи схеми включення польового транзистора із загальним витоком (ЗВ) по постійному струму	24
	Заняття 8. Розрахунок електронного ключа на біполярному транзисторі	25
4.	Приклади розв'язання завдань	26
4.1.	Завдання 1.	26
4.1.1.	Приклад рішення	26
4.1.2.	Інструкція для виконання роботи в програмному середовищі Proteus	29
4.2.	Завдання 2.	32
4.2.1.	Приклад виконання	32
4.2.2.	Інструкція по виконанню роботи в Proteus	37

4.3. Завдання 3.	38
4.3.1. Приклад виконання	39
4.4. Завдання 4.	43
4.4.1. Приклад виконання	44
4.4.2. Інструкція по моделюванню схеми в середовищі Proteus	46
4.5. Завдання 5.	52
4.5.1. Приклад виконання	52
4.6. Завдання 6.	54
4.6.1. Приклад виконання	54
4.6.2. Інструкція до виконання моделювання схеми в середовищі Proteus	57
4.7. Завдання 7.	64
4.7.1. Приклад виконання	64
4.7.2. Інструкція до виконання роботи в середовищі Proteus	67
4.8. Завдання 8.	72
4.8.1. Приклад виконання	72
4.8.2. Інструкція до виконання роботи в середовищі Proteus	75
Список рекомендованої літератури	82
Додаток А Числовий ряд опорів резисторів і конденсаторів	83

1. Як оформляти протоколи до лабораторних та практичних робіт

Кожне заняття вміщує в себе завдання до лабораторної роботи та практичного заняття. Таким чином лабораторні та практичні доповнюють вивчення конкретної теми. Після опису завдань надано приклади рішення завдань із конкретними схемами та числовими значеннями. Для виконання моделювання схем пропонується використовувати середовища Proteus або Multisim. Частина завдання, котра виконується в програмних середовищах відноситься до виконання лабораторних робіт. Виконання розрахунків є частиною практичних завдань.

В разі вивчення курсу в дистанційному режимі протоколи оформлюють в електронному варіанті в форматі документу doc, docx.

При аудиторному вивченні курсу завдання виконують в окремому зошиті або на аркушах паперу формату А4.

На першій сторінці (обкладинці або титульному аркуші) обов'язково слід вказати наступну інформацію: назва і порядковий номер завдання, що виконується, варіант, своє прізвище, ініціали та навчальну групу, прізвище викладача, рік. Роботи без цих відомостей на перевірку не приймаються.

На наступних сторінках необхідно вказати умову задачі, привести схему, розмістити розв'язання задачі з необхідними графіками і діаграмами, а також короткими поясненнями. Моделі пристроїв, що розробляються, і результати моделювання, роздруковуються на принтері і вклеюються в текст завдання. Схеми та діаграми виконують за допомогою креслярських приладь або в графічному редакторі у відповідності з вимогами ГОСТ 2.723-68, ГОСТ 2.747-68. Розрахункові формули слід записувати спочатку в символічному вигляді, а потім здійснювати підстановку чисельних даних із зазначенням одиниць виміру, отриманих в ході обчислювання, результатів. Рекомендована кількість значущих цифр при округленні - дві. При здійсненні вибору елементів слід його результати зводити в таблицю, вказавши в ній розрахункове значення основного параметру елемента і скорочене умовне

позначення вибраного елемента. Під час вибору елементів за результатами проведених розрахунків слід користуватися довідниковою літературою і доступними базами даних, що містять інформацію з електронних елементів.

Перед тим як будувати схеми рекомендуємо ознайомитися з умовними графічними позначеннями на електричних схемах за посиланням [1].

Перед виконанням завдання необхідно ознайомитися з теоретичним матеріалом наданим на лекціях, а також в методичній та навчальній літературі, що розміщена в посиланнях.

Завдання виконуються і надаються на перевірку у встановлені навчальним графіком терміни.

Оскільки лабораторні роботи виконуються в програмних середовищах на вибір студента, ми вважаємо доцільним дати коротку інформацію та інструкцію по роботі в Multisim.

2. Загальна характеристика програми MULTISIM

Multisim - це редактор схем і додаток для їх симуляції, що входить в систему розробки електричних схем, систему засобів EDA (Electronics Design Automation), які допоможуть у виконанні основних кроків в послідовній розробці схеми (рис. 2.1). Multisim розроблена для введення схеми, симуляції і підготовки до наступного етапу, такого як розведення плати.

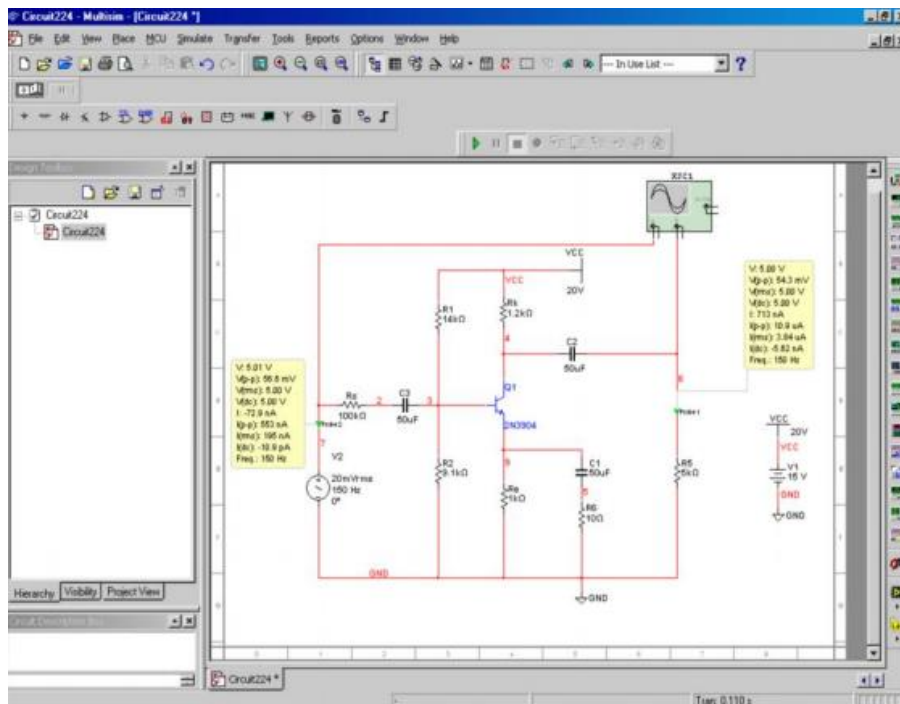


Рис. 2.1. Середовище Multisim.

NI Multisim дозволяє об'єднати процеси розробки електронних пристроїв і тестування на основі технології віртуальних приладів для навчальних і виробничих цілей. Ця платформа пов'язує процеси тестування і проектування, надаючи розробнику електронного обладнання гнучкі можливості технології віртуальних приладів. Спільне використання програмного забезпечення для моделювання електричних ланцюгів Multisim компанії National Instruments з середовищем розробки вимірювальних систем LabVIEW, дозволяє порівнювати теоретичні дані з реальними, безпосередньо в процесі створення схем звичайних друкованих плат, що знижує кількість проектних ітерацій, число помилок в прототипах і прискорює вихід продукції на ринок. Можна використовувати Multisim для інтерактивного створення принципових електричних схем і моделювання їх режимів роботи. База даних компонентів включає більше 1200 SPICE-моделей елементів від провідних виробників, таких як Analog Devices, Linear Technology і Texas Instruments, а також понад 100 нових моделей імпульсних джерел живлення. Крім цього, в новій версії програмного забезпечення з'явився помічник Convergence Assistant, який автоматично коригує параметри SPICE, виправляючи помилки

моделювання. Додана підтримка моделей МОП-транзисторів стандарту BSIM4, а також розширені можливості відображення і аналізу даних, включаючи новий «пробник» для значень струму і оновлені статичні пробники для диференціальних вимірювань [2].

2.1. Введення схеми

Введення схеми – перший етап в розробці схеми. На цій стадії обираються необхідні компоненти, здійснюється їх розміщення в робочому полі креслення в потрібних місцях з відповідною орієнтацією, з'єднання їх разом і здійснення решти необхідного для розробки. Multisim дозволяє модифікувати параметри компонентів, зорієнтувати схему по сітці, додати текст і штамп, додати підсхеми і шини, керувати кольором фону, компонентів і з'єднань. Є можливість відкривати кілька схем одночасно, кожна з яких з'являється в власному вікні програми. Для вибору елементів з бази даних і розміщення їх на схемі використовується оглядач компонентів. Елементи організовані в базі даних, групи і моделі (наприклад, Master, Database, Digital group, TTL Family). Для звуження списку пошуку пропонують фільтри, що базуються на діапазоні значень і допусків, де це можливо застосувати (рис. 2.2). Введення з клавіатури дозволяє ввести декілька літер для переходу до потрібного компоненту. Можливості пошуку дозволяють знайти елементи, використовуючи узагальнений шаблон пошуку по всіх базах даних.

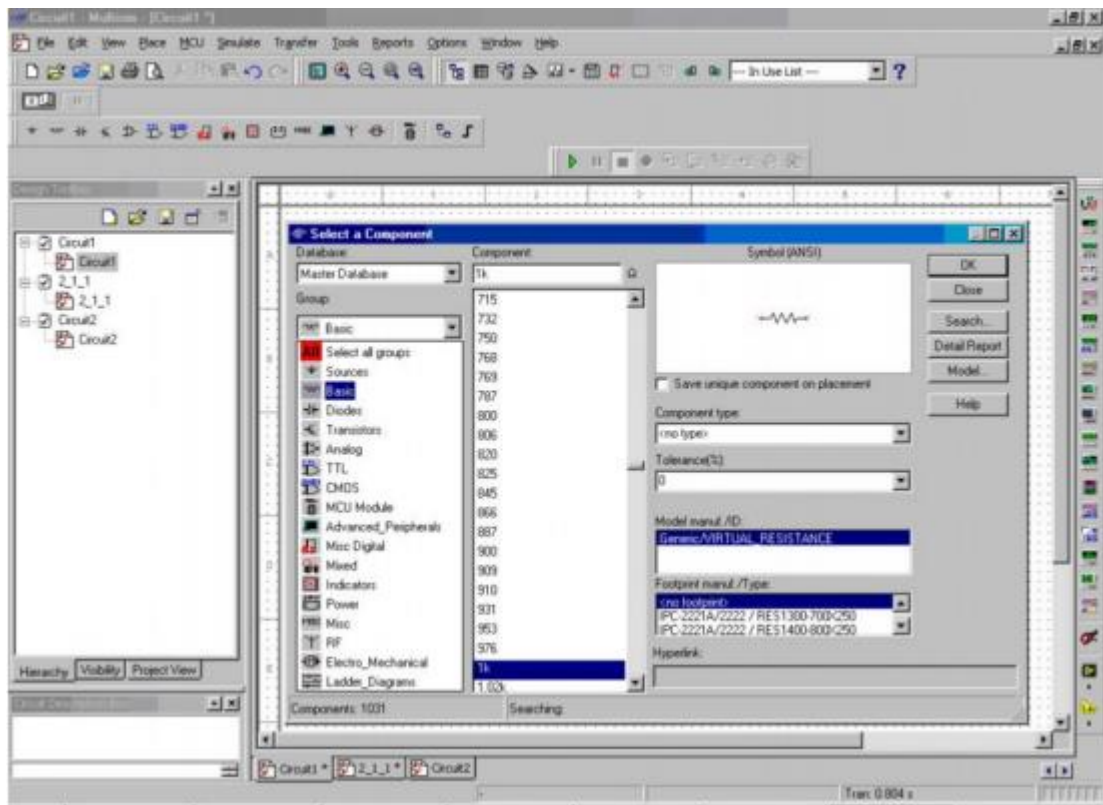


Рис. 2.2. Список пошуку компонентів.

2.2. Структура бази даних компонентів

База даних компонентів Multisim розроблена для підтримки інформації, необхідної для опису будь-якого компонента. Вона містить все необхідне для введення схем, симуляції моделі й розведення друкованих плат, і, крім цього, всю іншу електричну інформацію. Є три рівні бази даних, підтримуваних Multisim. Master Database, тільки для читання, що містить компоненти, поставлені Electronics Workbench. User Database - це приватна база індивідуального користувача. Вона використовується для компонентів створених індивідуально і не призначених для загального користування. Corporate Database - використовується для зберігання призначених для користувача компонентів, призначених для загального використання в організації. Надано різні інструменти обслуговування: для переміщення компонентів між базами даних, злиття баз і редагування їх. Всі бази даних поділені на групи, потім на сімейства всередині цих груп.

Кожен компонент, розміщений у вікні схеми, має набір властивостей, котрі керують деякими його аспектами і зберігаються в базі даних Multisim. Ці властивості ефективні тільки для розміщених компонентів, а не для інших зразків цього компоненту в інших схемах або інших місцях цієї схеми. В залежності від типу компоненту ці властивості визначають щось або все з наступного:

- ідентифікаційна інформація і етикетки розміщеного компоненту, котрі відображаються у вікні схеми;
- модель розміщеного компоненту;
- для декількох компонентів, як розміщені компоненти будуть використовуватися при аналізі;
- значення або модель і розпіновка (схема розташування виводів) компонента;
- користувацьке поле.

У Multisim наявна можливість редагувати компоненти (рис. 2.3), застосовуючи наступні методи:

- Component Wizard – використовується для створення і редагування нових компонентів;
- Діалогове вікно Component Properties – використовується для редагування існуючих компонентів і доступне з діалогового вікна Database Manager.

Коли розробник вибирає компонент з бази даних і розміщує його в схемі, відбувається копіювання компонента для вставки в схему. Будь-які правки, зроблені для компонента в схемі не позначаються на оригіналі в базі даних або таких же компонентах, перш розміщених в схемі. Аналогічно, будь-які правки компонента, зроблені в базі даних, після того, як копія розміщена в схемі, не позначаються на раніше розміщених компонентах, але тільки на тих, що будуть розміщені після правки. Коли схема зберігається, інформація про компоненти зберігається разом з нею. При завантаженні

користувач отримує можливість завантажити всі частини, як є, або зробити копії для розміщення в призначеній для користувача корпоративній базі даних, або оновити схожі за назвою компоненти з останніми значеннями із бази даних.

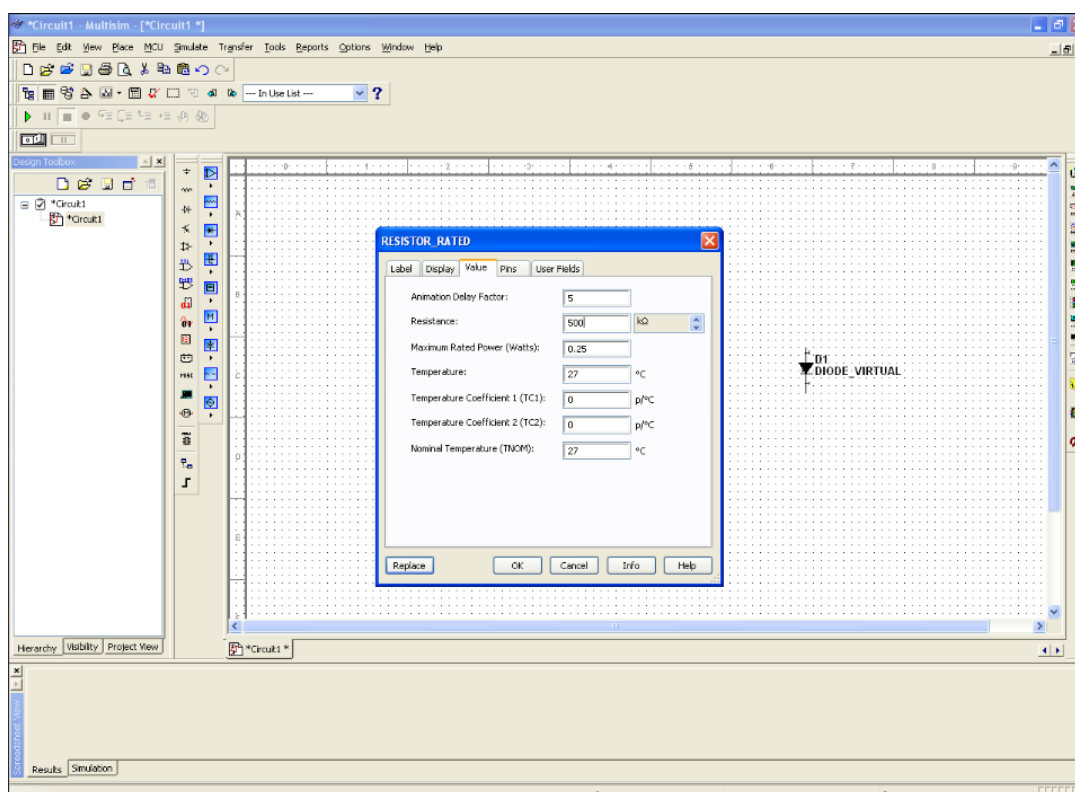


Рис. 2.3. Редагування компонента

Ви можете редагувати компоненти в Multisim, використовуючи такі методи:

- Component Wizard - використовується для створення та редагування нових компонентів. Детально описано в розділі «Створення компонентів за допомогою помічника»;
- Діалогове вікно Component Properties - використовується для редагування існуючих компонентів і є з діалогового вікна Database Manager.

Ви можете модифікувати будь-який компонент, що зберігається в базі даних Multisim. Ви можете також створити ваш власний компонент і помістити його в базу даних або завантажити компонент з іншого джерела. Ви не можете редагувати Master Database, однак ви можете копіювати компоненти в корпоративну або призначену для користувача базу даних, а потім модифікувати їх, як потрібно.

Кожен компонент в базі даних ідентифікується наступного типу інформацією, що розміщена на відповідній закладці діалогового вікна Component Properties:

- Основна інформація (як ім'я, виробник, дата і автор);
- Символ (графічне представлення компонента для введення в схему);
- Модель (інформація, яка використовується для представлення конкретних операцій / поведінки компонента в процесі симуляції) - необхідна тільки для компонентів, які будуть симулювати;
- Модель виводів (інформація використовується для представлення поведінки виводів в процесі симуляції);
- Розпіновка (footprint, упаковка, яку Multisim використовує, коли експортує схему, яка містить цей компонент, в програму розведення плати, таку як Ultiboard);
- Електричні параметри компонента;
- Користувальницькі поля (якщо використовуються для подальшого визначення компонентів). Додатково компоненти можуть бути організовані з використанням Database Manager, що дозволяє вам:
- Додавати і видаляти сімейства компонентів з User або Corporate database;
- Модифікувати заголовки призначених для користувача полів в будь-якій базі даних;
- Додавати і змінювати іконки сімейств.

2.3. Загальні правила моделювання

При моделюванні схем необхідно дотримуватися таких загальних правил:

1. Будь-яка схема повинна обов'язково містити хоча б один символ заземлення.
2. Будь-які два кінця провідника або контакту пристрою, що зустрічаються в точці, завжди вважаються з'єднаними. При з'єднанні трьох кінців (Т-з'єднання) необхідно використовувати символ з'єднання (Вузол). Ті ж правила застосовуються при з'єднанні чотирьох і більше контактів.
3. У схемах повинні бути присутніми джерела сигналу (струму або напруги), що забезпечують вхідний сигнал, і не менше однієї контрольної точки (за винятком аналізу схем постійного струму) [3].

Топологія схем:

1. У схемі не повинні бути контури складені із котушок індуктивності і джерел напруги.
2. Джерела струму не повинні з'єднуватися послідовно.
3. Не повинно бути коротко-замкнених котушок.

Джерело напруги повинно з'єднуватися з котушкою індуктивності і трансформатором через послідовно включений резистор. До конденсатору, підключеному до джерела струму, обов'язково повинен бути паралельно приєднаний резистор.

2.4. Симуляція

Симуляція - це математичний метод емуляції поведінки схеми. За допомогою симуляції ви можете визначити багато властивостей схеми без фізичної збірки схеми або використання реальних приладів (рис. 2.4). Хоча Multisim робить симуляцію інтуїтивно простою, технологія, що підтримує швидкість і точність симуляції, як і простоту використання, досить складна. Multisim об'єднує ядро системи симуляції SPICE3F5 і XSPICE з додатками,

розробленими Electronics Workbench спеціально для оптимізації процесу при цифровій і змішаній симуляції. І SPICE3F5, і XSPICE – промислово прийняті загальнодоступні стандарти. SPICE3F5 – остання редакція ядра SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), розроблена каліфорнійським університетом в Берклі. XSPICE – це набір унікальних розширень, зроблених до SPICE за контрактом з US Air Force, який включає покроково-орієнтований змішаний режим симуляції і підсистему моделювання, розширену кінцевими користувачами. Модуль Multisim RF Design симулює радіосхеми, моделює машину SPICE. Немає потреби говорити Multisim, що ваша схема – це RF схема. Симуляція радіосхем використовує засоби моделювання SPICE, але оптимізовані для ретельної симуляції схем, що розробляються для підвищення частот. Оптимізація використовує елементи, спеціально розроблені і змодельовані для точної симуляції на цих частотах.

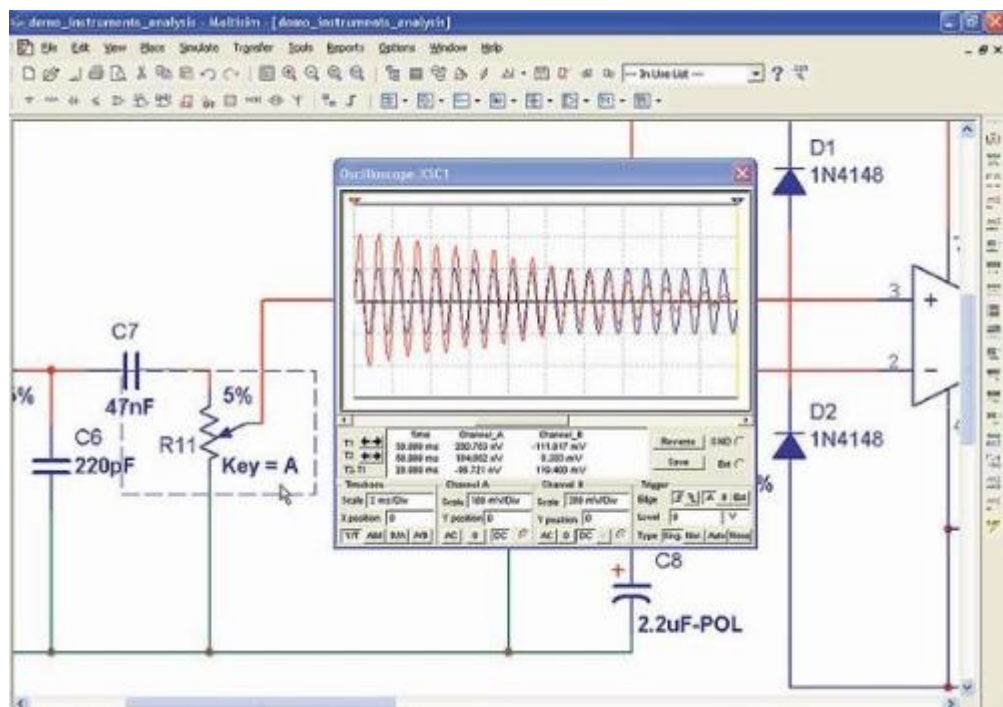


Рис 2.4. Приклад роботи в середовищі.

Multisim пропонує достатню кількість віртуальних інструментів, які можна використовувати для вимірювань і дослідження поведінки схеми. Ці інструменти встановлюються, використовуються і показують подібно їх реальним еквівалентам. Використання віртуальних інструментів - найпростіший спосіб перевірити поведінку вашої схеми і побачити результати симуляції. В додаток до стандартних інструментів, які є в Multisim, ви можете створити свої власні, використовуючи LabVIEW - графічне оточення для створення гнучких і масштабованих стендів, вимірювачів і керуючих додатків. Віртуальні інструменти мають два види: іконка інструменту, яку ви підключаєте до вашої схеми, і панель інструменту, де ви встановлюєте параметри приладу. Ви можете показувати або приховувати панель інструменту подвійним клацанням по його іконці. Панелі інструментів завжди розташовуються поверх основного робочого поля, так що вони не приховані. Ви можете розмістити панель в будь-якому місці робочого столу. Коли ви зберігаєте вашу схему, положення панелі інструменту і стан «приховати» або «показати» зберігаються разом зі схемою. Також зберігаються всі дані, отримані приладом, до деякого максимального розміру.

2.5. Режими аналізу даних симуляції

У Multisim передбачено безліч режимів аналізу даних симуляції, від простих до найскладніших, в тому числі і вкладених. Основні види аналізу:

1. DC - аналіз ланцюга по постійному струму. Аналіз ланцюгів по постійному струму здійснюється для резистивних схем. Це правило виходить безпосередньо з теорії електричних ланцюгів; при аналізі по постійному струму конденсатори замінюють розривом, котушки індуктивності - коротким замиканням, нелінійні компоненти, такі як діоди і транзистори, замінюють їх опором по постійному струму в робочій точці. Аналіз ланцюга по постійному струму виявляє вузлові потенціали досліджуваної схеми.

2. AC - аналіз ланцюга по змінному струму. Аналіз ланцюгів по змінному струму полягає в побудові частотних характеристик.
3. Transient - аналіз перехідних процесів. Аналіз перехідних процесів в ланцюгах дозволяє визначити форму вихідного сигналу, тобто побудувати графік сигналу як функції часу.

Крім вбудованих функцій аналізу є можливість визначити свою функцію за допомогою команд SPICE. Щоб використовувати аналізи, потрібно слідувати основним інструкціям доступу і запуску аналізу, описаним нижче. Також кожен аналіз має специфічні опції, які ви можете встановити:

- параметри аналізу (всі мають бути попередньо налаштовані);
- як вихідні змінні будуть підтримані (необхідно);
- заголовок аналізу (вибірково);
- змінні для опцій аналізу (вибірково).

Установки аналізу зберігаються разом зі схемою.

При підготовці до аналізу необхідно налаштувати його параметри, наприклад, діапазон частот для аналізатора змінного струму (AC analysis). Необхідно також вибрати вихідні канали (traces). Плоттер (Grapher) - основний інструмент перегляду результатів емуляції. Він відкривається з меню View / Grapher та автоматично при роботі емуляції. Безліч налаштувань плоттера знаходяться у вікні властивостей. наприклад, можна змінювати масштаби, діапазони, заголовки, стилі ліній осей [3].

Multisim пропонує користувачу безліч аналізів, всі з яких використовують симуляцію для генерації даних для аналізів, які ви хочете провести. Ці аналізи можуть будуватися від основних до витончених, і можуть часто вимагати, щоб один аналіз проводився (автоматично), як частина іншого (рис. 2.5). Для кожного аналізу вам потрібно вирішити, які з установок зробити, щоб сказати Multisim, що ви хочете, щоб аналіз був зроблений. Додатково до аналізів, які підтримуються Multisim, ви можете створити певні користувацькі аналізи, засновані на командах SPICE,

введених вами. Коли ви активуєте аналіз, результати відображаються в кресленнях Multisim Grapher, поки ви не виставите щось інше, і зберігаються для використання в постпроцесорі [3].

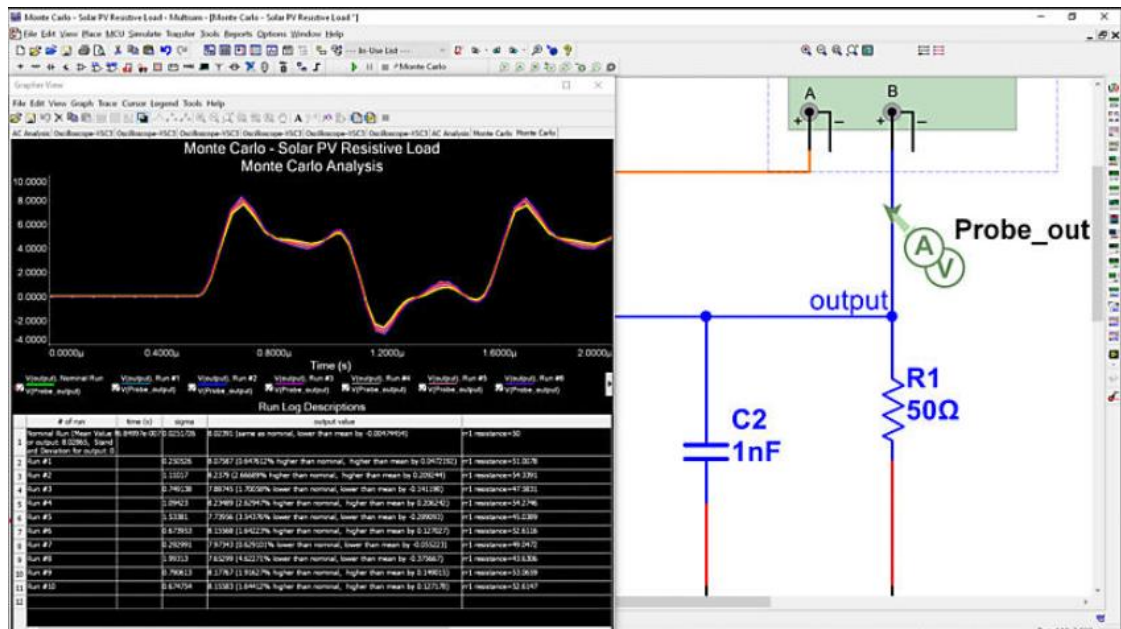


Рис. 2.5. Отримання та аналіз даних.

3. Опис завдань до занять лабораторна + практична робота

Заняття 1. Розробка схеми на основі випрямного діода

Розробити схему включення заданого випрямного діода, забезпечивши протікання через нього струму I при живленні від джерела постійної напруги E_I . Вихідні дані до задачі наведені в таблиці 1. Необхідно: описати принцип роботи схеми; по вольт-амперній характеристиці діода визначити величину обмежувального опору R_I , статичний опір діода $R_{ст}$ в заданій робочій точці і динамічний опір $R_{дин}$ при зміні напруги $\Delta E_I = -1$ В; виконати моделювання роботи схеми в програмному середовищі.

Таблиця 1 - Вихідні дані до заняття 1.

Номер варіанта	Тип діода	I , мА	E_I , В	ΔE_I , В
1	1N3064	40	5	+1
2	1N3595	50	10	-2
3	1N3600	100	12	+2
4	1N4009	50	8	-1
5	1N4149	80	9	+3
6	1N4150	90	10	-2
7	1N4454	70	6	+1
8	1N4446	80	8	-2
9	1N4532	70	7	+2
10	1N4534	30	4	-1
11	1N5711	10	3	+1
12	1N5712	20	4	-1
13	1N914	40	5	+1
14	BA157	150	15	-3
15	BA220	90	9	+2
16	BA316	50	8	-2
17	BA318	60	10	+3
18	BA481	15	4	-1
19	BAV100	100	9	+2
20	BAV101	120	8	-2
21	BAV103	90	12	+3
22	BAV18	80	11	-2
23	BAV19	100	15	+3
24	BA482	50	10	-2
25	BAV62	100	8	+2

Заняття 2. Розрахунок однофазного некерованого випрямляча

Розробити схему мостового випрямляча на напівпровідникових діодах з П-подібним індуктивно-ємнісним фільтром для випрямлення однофазної синусоїдальної напруги. Вихідні дані до задачі (напруга мережі U_1 , номінальна напруга навантаження U_d , номінальна потужність навантаження P_d , допустимий коефіцієнт пульсацій K_u) наведені в таблиці 2. Необхідно: вибрати тип вентилів, трансформатора; розрахувати параметри фільтра; описати принцип роботи схеми і здійснити моделювання її роботи в програмному середовищі.

Таблиця 2 - Вихідні дані до заняття 2.

Номер варіанта	U_1 , В	U_d , В	P_d , Вт	K_u , %
1	220	110	20	0,1
2	220	100	35	0,2
3	220	90	45	0,3
4	110	40	40	0,4
5	110	35	10	0,5
6	220	60	50	0,6
7	220	50	30	0,7
8	110	40	25	0,8
9	110	30	30	0,9
10	110	40	15	1,0
11	220	130	60	0,8
12	110	20	25	0,3
13	220	80	45	0,2
14	220	100	30	0,4
15	110	45	20	0,5
16	220	90	55	0,1
17	110	35	10	0,1
18	110	15	20	0,9
19	220	105	60	0,2
20	220	70	65	0,4
21	220	80	70	0,3
22	110	40	30	0,7
23	110	25	15	0,1
24	220	120	45	0,3
25	220	50	35	0,4

Заняття 3. Розрахунок однофазного керованого випрямляча

Розробити схему однофазного керованого випрямляча з середньою точкою трансформатора при роботі на активне навантаження. Вихідні дані до задачі (напруга мережі U_1 , мінімальна напруга навантаження U_{dmin} , максимальна напруга навантаження U_{dmax} , опір навантаження R_d) наведені в таблиці 3. Необхідно: вибрати тип вентилів, трансформатора; побудувати регулюючу характеристику керованого випрямляча, та по ній визначити необхідні кути регулювання; описати принцип роботи схеми і здійснити моделювання її роботи в середовищі Multisim; привести часові діаграми для режиму максимального струму навантаження.

Таблиця 3 - Вихідні дані до заняття 3.

Номер варіанта	R_d , Ом	U_{dmin} , В	U_{dmax} , В	U_1 , В
1	100	20	50	220
2	100	30	60	110
3	90	10	40	220
4	90	10	30	110
5	80	30	50	220
6	80	20	40	110
7	70	5	30	220
8	70	10	30	110
9	60	20	40	220
10	60	25	40	110
11	50	10	30	220
12	50	15	30	110
13	40	5	25	220
14	40	10	25	110
15	45	3	20	220
16	45	5	20	110
17	55	10	30	220
18	55	15	30	110
19	65	15	40	220
20	65	20	40	110
21	75	15	50	220
22	75	20	50	110
23	85	20	60	220
24	85	40	60	110
25	90	40	70	220

Заняття 4. Розрахунок параметричного стабілізатора напруги

Розробити схему, виконати розрахунок і вибір елементів параметричного стабілізатора напруги на заданому стабілітроні. Вихідні дані до задачі (опір навантаження R_H , мінімальна напруга джерела U_{min} , максимальна напруга джерела U_{max}) наведені в таблиці 4. Необхідно: визначити величину баластного опору R_b ; описати принцип роботи схеми і здійснити моделювання її роботи в програмному середовищі; перевірити працездатність схеми у всьому діапазоні зміни вхідної напруги; визначити коефіцієнт стабілізації.

Таблиця 4 - Вихідні дані до заняття 4.

Номер варіанта	Тип стабілітрона	R_H , Ом	U_{min} , В	U_{max} , В
1	2	3	4	5
1	1N4730A	5	7	10
2	1N4731A	6	8	11
3	1N4732A	7	9	12
4	1N4733A	8	8	13
5	1N4734A	9	10	14
6	1N4735A	10	11	14
7	1N4736A	11	12	14
8	1N4737A	12	12	15
9	1N4738A	13	13	16
10	1N4739A	15	14	17
11	1N4740A	20	16	19
12	1N4741A	25	17	22
13	1N4742A	30	20	24
14	1N4743A	35	21	26
15	1N4744A	40	26	30
16	1N4745A	50	27	32
17	1N4746A	60	30	34
18	1N4747A	70	33	38
19	1N4748A	80	36	42
20	1N4749A	90	39	46
21	1N4750A	100	44	50
22	1N4751A	150	54	60
23	1N4752A	200	57	65
24	1N4753A	250	60	70
25	1N4754A	300	70	80

Заняття 5. Розробка схеми зі світлодіодним індикатором

Розробити схему підключення світлодіодного індикатора, забезпечивши прямий струм I_{np} до навантаження, розробленого в завданні 2 некерваного випрямляча. Вихідні дані до задачі наведені в таблиці 5. Необхідно: вибрати світлодіод; визначити величину опору R_L , який обмежує струм; описати принцип роботи схеми і здійснити моделювання її роботи в середовищі Multisim.

Таблиця 5 - Вихідні дані до заняття 5.

Номер варіанта	Колір світіння	I_{np} , мА
1	2	3
1	Голубий	10
2	Зелений	10
3	Червоний	10
4	Помаранчевий	10
5	Янтарний	10
6	Голубий	12
7	Зелений	12
8	Червоний	12
9	Помаранчевий	12
10	Янтарний	12
11	Голубий	15
12	Зелений	15
13	Червоний	15
14	Помаранчевий	15
15	Янтарний	15
16	Голубий	18
17	Зелений	18
18	Червоний	18
19	Помаранчевий	18
20	Янтарний	18
21	Голубий	20
22	Зелений	20
23	Червоний	20
24	Помаранчевий	20
25	Янтарний	20

Заняття 6. Розрахунок режиму роботи схеми включення біполярного транзистора із загальним емітером (ЗЕ) по постійному струму

Розрахувати вхідну напругу $U_{вх}$ біполярного транзистора, включеного за схемою з загальним емітером (ЗЕ), що забезпечує отримання вихідної напруги $U_{вих} = U_n/2$. Вихідні дані до задачі (напруга живлення $U_{жс}$, опір колекторного навантаження R_K) наведені в таблиці 6. Завдання необхідно вирішити графоаналітичним методом по вхідним і вихідним характеристикам транзистора, здійснити моделювання роботи схеми в середовищі Multisim або Proteus.

Таблиця 6 - Вихідні дані до заняття 6.

Номер варіанта	Тип транзистора	U_n , В	R_K , Ом
1	2	3	4
1	КТ315А	25	700
2	КТ817Г	30	18
3	КТ825Д	60	4
4	КТ928А	20	25
5	КТ3102А	30	1000
6	КТ3117А	60	75
7	КТ972А	30	21
8	КТ973А	25	21
9	КТ973Б	20	14
10	КТ315А	20	500
11	КТ817Г	25	16
12	КТ825Д	50	4
13	КТ928А	30	37
14	КТ3102А	25	800
15	КТ3117А	50	71
16	КТ972А	25	21
17	КТ973А	30	22
18	КТ973Б	25	21
19	КТ315А	30	650
20	КТ817Г	20	14
21	КТ825Д	40	4
22	КТ928А	35	44
23	КТ3102А	20	700
24	КТ3117А	40	67
25	КТ972А	20	25

Заняття 7. Розрахунок режиму роботи схеми включення польового транзистора із загальним витоком (ЗВ) по постійному струму

Виконати розрахунок і вибір елементів схеми включення заданого польового транзистора з керуючим $p-n$ переходом із загальним витоком (ЗВ) по постійному струму, при роботі в режимі класу А, при напрузі джерела живлення E_C . Вихідні дані до задачі наведені в таблиці 7. Необхідно: описати роботу схеми; за аналітичними залежностями визначити опір автоматичного зміщення R_D , опір в ланцюзі стоку R_C і ланцюги затвору R_3 ; здійснити моделювання роботи схеми в програмному середовищі.

Таблиця 7 - Вихідні дані до заняття 7.

Номер варіанта	Тип транзистора	E_C , В
1	2	3
1	2N3970	15
2	2N3971	15
3	2N3972	15
4	2N4091	15
5	2N4092	15
6	2N4093	15
7	2N2608	8
8	2N2609	8
9	2N4381	15
10	2N5114	15
11	2N5115	15
12	2N5116	15
13	2N3970	30
14	2N3971	30
15	2N3972	30
16	2N4091	30
17	2N4092	30
18	2N4093	30
19	2N2608	6
20	2N2609	6
21	2N4381	20
22	2N5114	20
23	2N5115	20
24	2N5116	20
25	2N3971	10

Заняття 8. Розрахунок електронного ключа на біполярному транзисторі

Розробити схему електронного ключа на заданому біполярному транзисторі. Схему зробити в програмному середовищі. Вихідні дані до задачі (напруга живлення $U_{П}$, вхідна (керуюча напруга) $U_{вх} = U_K$, опір навантаження R_H , опір ланцюга бази r_b) наведені в таблиці 8. Необхідно: графо-аналітично визначити опір керування в ланцюзі бази R_K ; описати принцип роботи схеми і здійснити моделювання її роботи схеми в програмному середовищі; визначити тривалість фронту t_f і зрізу імпульсу t_z вихідної напруги.

Таблиця 8 - Вихідні дані до заняття 8.

Номер варіанта	тип транзистора	R_H , кОм	$U_{П}$, В	$\pm U_{вх} = \pm U_y$, В	r_b , Ом
1	2	3	4	5	6
1	КТ973Б	0,014	20	2,2	1
2	КТ973А	0,021	25	2,0	1
3	КТ972А	0,021	30	2,5	1
4	КТ3117А	0,075	60	3,2	3
5	КТ3102А	1,0	30	3,0	3
6	КТ928А	0,025	20	2,8	1
7	КТ825Д	0,004	60	2,4	2
8	КТ817Г	0,018	30	3,4	2
9	КТ315А	0,7	25	3,6	5
10	КТ973Б	0,021	25	2,0	1
11	КТ973А	0,022	30	2,3	1
12	КТ972А	0,021	25	3,0	1
13	КТ3117А	0,071	50	2,5	3
14	КТ3102А	0,8	25	2,2	3
15	КТ928А	0,037	30	3,5	1
16	КТ825Д	0,004	50	2,4	2
17	КТ817Г	0,016	25	2,6	2
18	КТ315А	0,5	20	3,2	5
19	КТ972А	0,025	20	3,0	1
20	КТ3117А	0,067	40	3,4	3
21	КТ3102А	0,7	20	2,4	3
22	КТ928А	0,044	35	2,2	1
23	КТ825Д	0,004	40	2,0	2
24	КТ817Г	0,014	20	2,4	2
25	КТ315А	0,65	30	3,2	5

4. Приклади розв'язання завдань

4.1. Завдання 1.

Розробити схему включення випрямного діода 1N4148, забезпечивши протікання через нього струму $I=50$ мА при живленні від джерела постійної напруги $E_1=3$ В. Визначити величину обмежувального опору R_1 , статичний опір діода $R_{ст}$ в заданій робочій точці і динамічний опір $R_{дин}$ при зміні напруги $\Delta E_1= -1$ В, здійснити моделювання роботи схеми в середовищі Multisim або Proteus. Рекомендована література [4-6].

4.1.1. Приклад виконання

Послідовність роботи:

З довідника визначаємо основні параметри випрямного діода:

$$I_{пр}=150 \text{ мА}; U_{обр\ max}=75 \text{ В}; U_{пр}=1 \text{ В}.$$

Для забезпечення струму $I=50$ мА діод потрібно включити в прямому напрямку ($+E_1$ до анода, а $-E_1$ до катода). Для обмеження прямого струму послідовно з діодом включається опір R_1 . Розроблена схема приведена на рисунку 4.1.

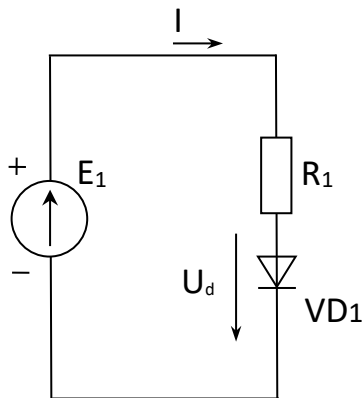


Рис. 4.1. Схема підключення випрямного діода.

Для вирішення завдання запишемо 2-ий закон Кірхгофа для ланцюга:

$$E_1 = I \cdot R_1 + U_d,$$

де U_d — падіння напруги на діоді. Це рівняння містить дві невідомі величини: R_I і U_d . Для визначення U_d скористаємося ВАХ діода. Для її побудови в середовищі Multisim використовуємо характеріограф *XIV1* (див. Рис.4.2, 4.3).

Визначаємо $U_d = 0,78$ В. Тоді:

$$R_I = \frac{E_1 - U_d}{I} = \frac{3 - 0,78}{50 \cdot 10^{-3}} = 44,4 \text{ Ом.}$$

Приймаємо зі стандартного ряду E24 (Додаток А) $R_I = 43$ Ом.

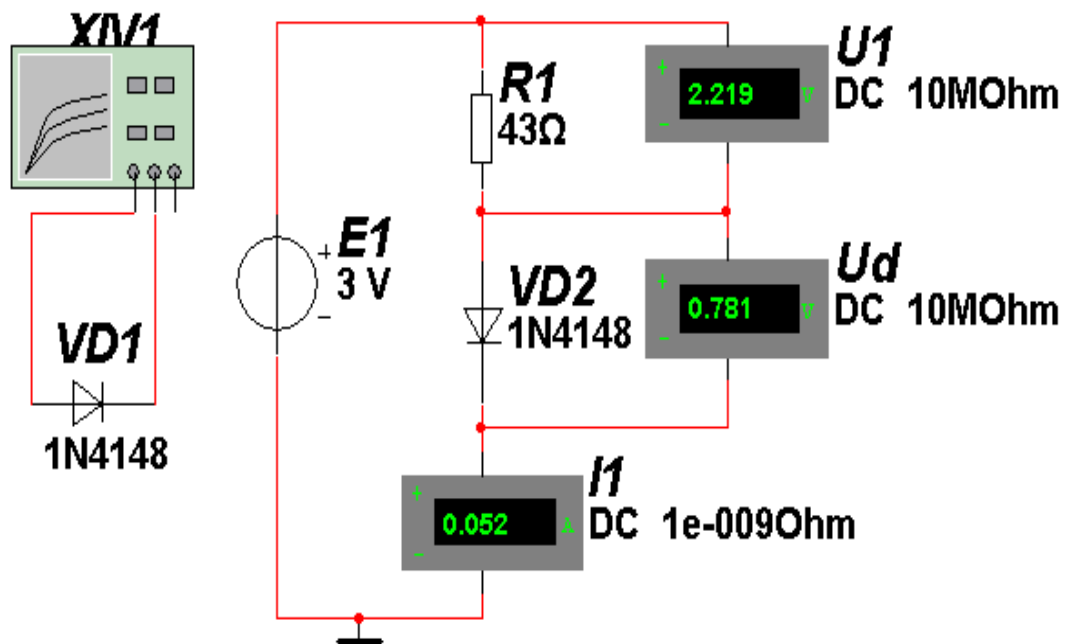


Рис.4.2. Модель схеми підключення випрямного діода.

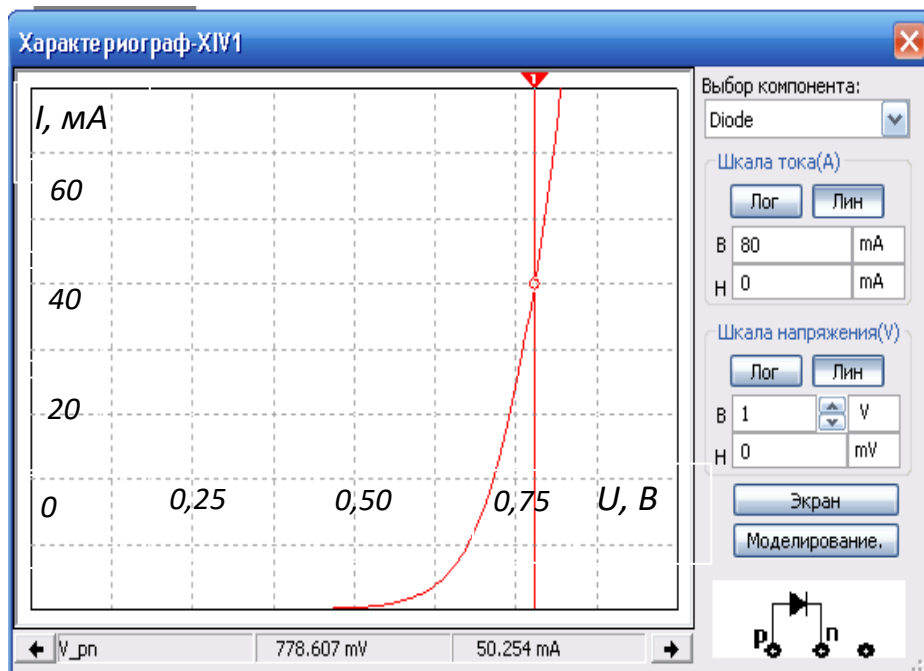


Рис. 4.3. ВАХ випрямного діода

Статичний опір в робочій точці визначимо за результатами моделювання (рисунок 3):

$$R_{ст} = \frac{U_d}{I} = \frac{0,781}{52 \cdot 10^{-3}} = 15 \text{ Ом.}$$

Для визначення динамічного опору зробимо моделювання роботи схеми при $E_I = 3 - 1 = 2$ В. В результаті: $I = 29$ мА, $U_d = 0,74$ В.

Тоді:

$$R_{дин} = \frac{\Delta U_d}{\Delta I} = \frac{0,781 - 0,762}{(52 - 40) \cdot 10^{-3}} = 1,58 \text{ Ом.}$$

4.1.2. Інструкція для виконання роботи в програмному середовищі Proteus

У випадку застосування студентом програмного середовища Proteus наведемо для завдання 1 інструкцію для виконання моделювання схеми.

Хід роботи.

1. Зберемо схему, зображену на рисунку 4.1. Номінал резистора **R1** обрати самостійно у межах 1..100 кОм, у якості діода **VD1** з бібліотеки даних обрати випрямляючий діод.

Для додання джерела живлення у схему у лівому боці вікна натиснути «**Generator Mode**» і обрати «**DC**». Після вибору натискаємо ще раз на робочому полі і розміщуємо джерело живлення. Виставляємо напругу джерела 10 В (подвійне натиснення або ПКМ на елементі, «**Edit Properties**»).

Додання резистора: натискаємо «**Component Mode**», «**P**» і у меню бібліотеки обираємо вкладку «**Resistors**», де вибираємо потрібний резистор. Опір резистора можна змінити у його властивостях (подвійне натиснення по ньому або ПКМ і «**Edit Properties**»).

Додання діода: послідовність дій та сама, що і для резистора, проте з бібліотеки обираємо «**Diodes**» і обираємо випрямляючий діод.

Для додання «землі» можна обрати «**Terminals Mode**», «**GROUND**» або ПКМ на робочому полі, «**Place**», «**Terminal**», «**GROUND**». Ви повинні отримати схему, зображену на рис. 4.4.

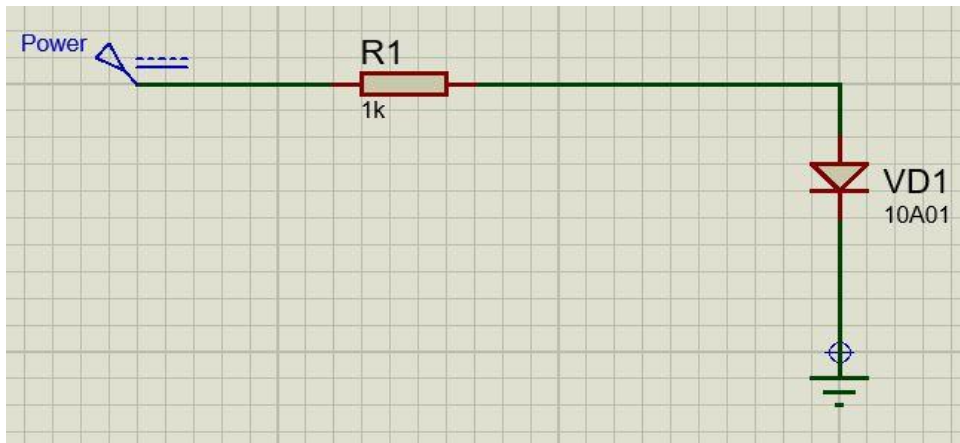


Рис.4.4. Схема для дослідження.

2. Тепер додаємо у схему контрольну точку – пробу струму, щоб можна було побудувати ВАХ діода. Для цього обираємо «**Probe Mode**», «**CURRENT**» або ПКМ, «**Place**», «**Probe**», «**CURRENT**».

Модель схеми, яку ви отримаєте повинна бути такою, як на рис.4.5. *Примітка:* проба струму має бути орієнтована так, щоб стрілка в ній співпадала з напрямом струму, інакше програма може вивести помилку. Для перевірки правильності підключення і взагалі наявності підключення можна запустити симуляцію схеми кнопкою, що знаходиться у нижньому лівому куті.

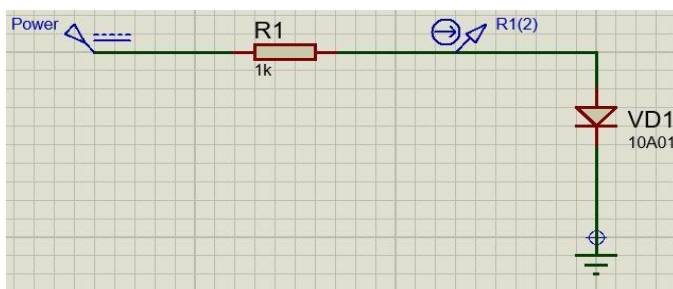


Рис.4.5. Схема з контрольною точкою.

3. Тепер необхідно додати елемент, який графічно зобразить отриману ВАХ діода. Для цього обираємо «**Graph Mode**», «**TRANSFER**» і наносимо прямокутник необхідного розміру біля схеми. Результат відображений на рис. 4.6.

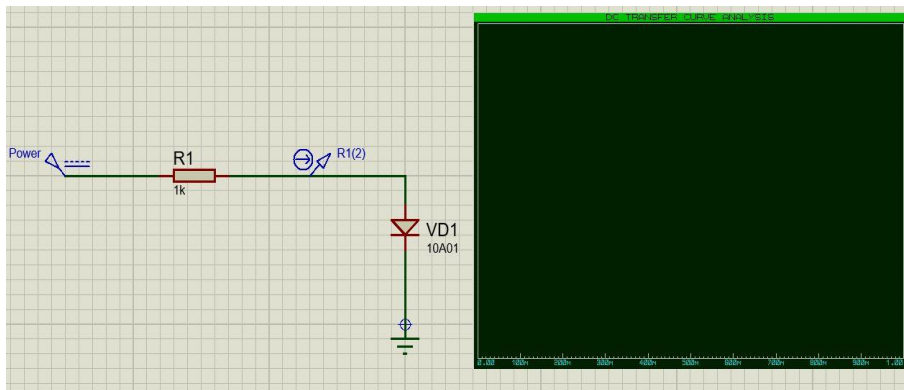


Рис.4.6. Схема з полем для відображення ВАХ.

4. Тепер необхідно задати джерело розгортки (sweep source) та додати контрольну точку **R1(2)** для відображення.

Для додання джерела розгортки двічі натискаємо на граф або ПКМ, «**Edit Properties**» і в «**Source1**» обираємо «**Power**». Додання контрольної точки: ПКМ, «**Add Traces**» або комбінацією клавіш «**Ctrl+T**» і у «**Probe P1**» вказуємо **R1(2)**. Для відображення даних натискаємо один раз на графік і натискаємо «**Space**». Результат наведених дій відображено на рис. 4.7.

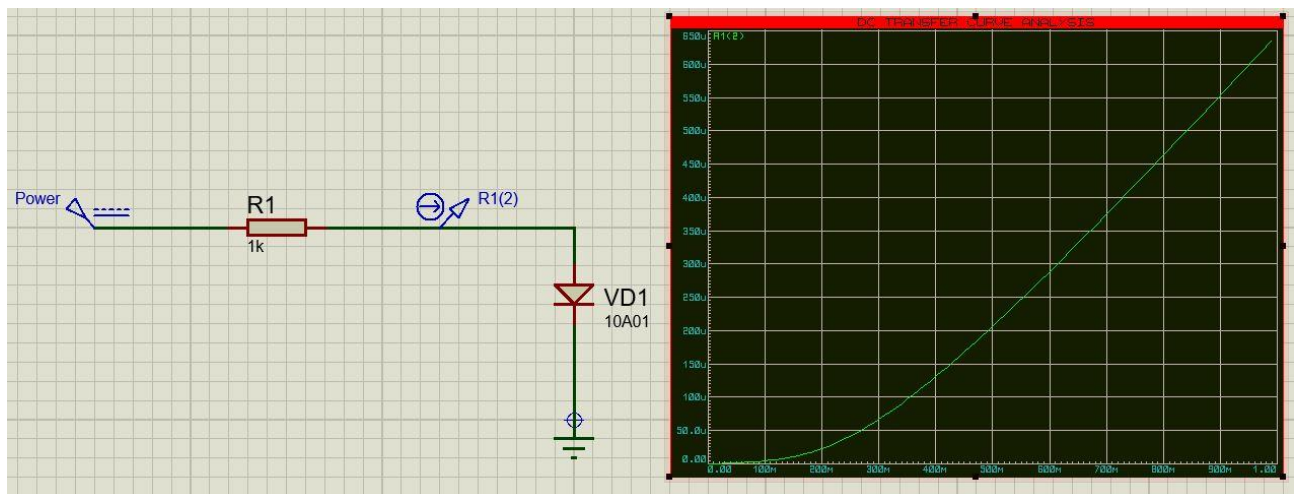


Рисунок 4.7. Схема з відображенням прямої гілки ВАХ.

Для зміни діапазону напруг (вісь абсцис) змінюємо значення у «**Start Value**» і «**Stop Value**» першого стовпця у властивостях графіка.

Робимо розрахунки, оформлюємо звіт та робимо висновки по роботі.

4.2. Завдання 2.

Розробити схему мостового випрямляча на напівпровідникових діодах з П-подібним індуктивно-ємнісним фільтром для випрямлення однофазної синусоїдальної напруги.

Початкові дані: $U_d = 40$ В; $P_d = 10$ Вт; $K_n = 0,5$ %; $U_1 = 220$ В. Необхідно вибрати тип вентилів (діодів), трансформатора, розрахувати параметри фільтра. Здійснити моделювання її роботи в середовищі Multisim або Proteus. Рекомендована література [6, 7].

4.2.1. Приклад рішення

Розроблена схема приведена на рисунку 4.8.

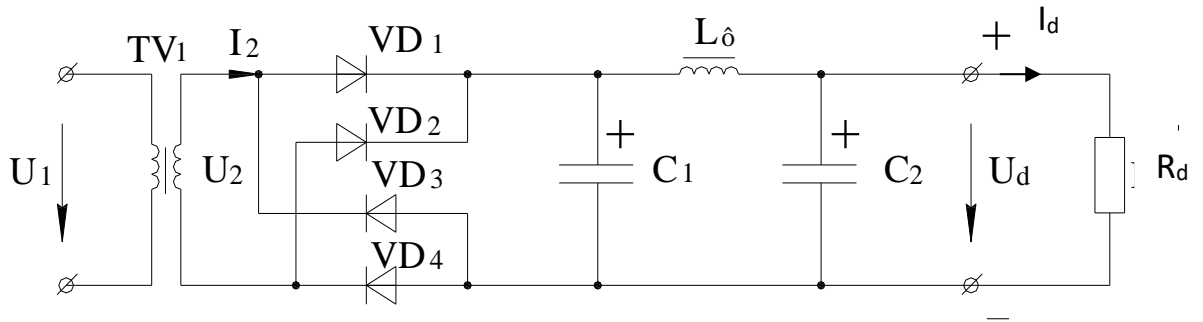


Рис. 4.8. Схема некерованого мостового випрямляча з П-подібним індуктивно-ємнісним фільтром.

Хід виконання:

1. Вибір вентилів (діодів).

Струм навантаження дорівнює:

$$I_d = \frac{P_d}{U_d} = \frac{10}{40} = 0,25 \text{ А.}$$

Для однофазного мостового випрямляча середнє значення прямого струму через вентиль визначається як:

$$I_a = \frac{I_d}{2} = \frac{0,25}{2} = 0,125 \text{ А.}$$

Зворотна максимальна напруга на вентилі дорівнює:

$$U_{зв. \max} = 1,57 \cdot U_d = 1,57 \cdot 40 = 62,8 \text{ В.}$$

Вибираємо вентиля (діоди) 1N4148, для яких

$$I_{a \text{ доп}} = 0,15 \text{ А} > I_a = 0,125 \text{ А};$$

$$U_{зв. \max, \text{ доп}} = 75 \text{ В} > U_{зв. \max} = 62,8 \text{ В.}$$

$$U_{a \text{ нр}} = 1 \text{ В.}$$

2. Визначення параметрів трансформатора.

Для однофазного мостового випрямляча діюче значення вторинної напруги дорівнює:

$$U_2 = 1,11 \cdot U_d + 2 \cdot U_{a \text{ нр}} = 1,11 \cdot 40 + 2 \cdot 7 = 46,4 \text{ В.}$$

Розрахункова потужність визначається як

$$S_{\text{розрах}} = 1,23 \cdot P_d = 1,23 \cdot 10 = 12,3 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

Вибираємо трансформатор: ТПП 248-127/220-50

$$S_{\text{ном}} = 14,5 \text{ В} \cdot \text{А} > S_{\text{розрах}} = 12,3 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

При послідовному з'єднанні вторинних обмоток А, Б, Д, Е отримуємо

$$U_2 = 20 + 20 + 4 + 4 = 48 \text{ В.}$$

Тоді коефіцієнт трансформації

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{48} = 4,58.$$

3. Визначення параметрів фільтра.

Коефіцієнт пульсації на виході однофазного мостового випрямляча –

$$K_{\text{п}} = 0,67.$$

Необхідний коефіцієнт пульсації – $K_{\text{н}} = 0,005$.

Коефіцієнт згладжування фільтру дорівнює:

$$S = \frac{K_n}{K_n} = \frac{0,67}{0,005} = 134.$$

П-подібний фільтр складається з простого С-фільтру і Г-подібного LC-фільтру. Його коефіцієнт згладжування дорівнює:

$$S = S_C \cdot S_{LC} .$$

Застосовуємо ємність конденсаторів фільтра $C_1 = C_2 = 100 \text{ мкФ}$.

Тоді

$$S_C = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot K_n \cdot C_1 \cdot R_d = \frac{2\pi \cdot 50 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \cdot 160}{3} = 3,35,$$

де R_d – опір навантаження:

$$R_d = \frac{U_d}{I_d} = \frac{40}{0,25} = 160 \text{ Ом}.$$

Тоді коефіцієнт згладжування LC-фільтра дорівнює:

$$S_{LC} = \frac{S}{S_C} = \frac{134}{3,35} = 40,3 .$$

Для LC-фільтру

$$L_\phi C_2 = \frac{S_{LC} + 1}{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot m)^2} = \frac{41,3}{(2\pi \cdot 50 \cdot 2)^2} = 104,7 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \cdot \text{Ф},$$

де m – число пульсацій випрямленої напруги за період.

При $C_2 = 100 \text{ мкФ}$

$$L_\phi = \frac{L_\phi C_2}{C_2} = \frac{104,7 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-6}} \approx 1 \text{ Гн}.$$

Параметри фільтру $C_\phi = C_1 = C_2 = 100 \text{ мкФ}$, $L_\phi = 1 \text{ Гн}$ задовольняють умовам ефективної роботи:

$$\frac{1}{2\pi f \cdot m \cdot C_\phi} \ll R_d ; 2\pi f \cdot m \cdot L_\phi \gg R_d .$$

$$15,9 \ll 160 ; 628 \gg 160 .$$

4. Моделювання роботи схеми.

Модель однофазного некерованого мостового випрямляча з фільтром приведена на рис. 4.9.

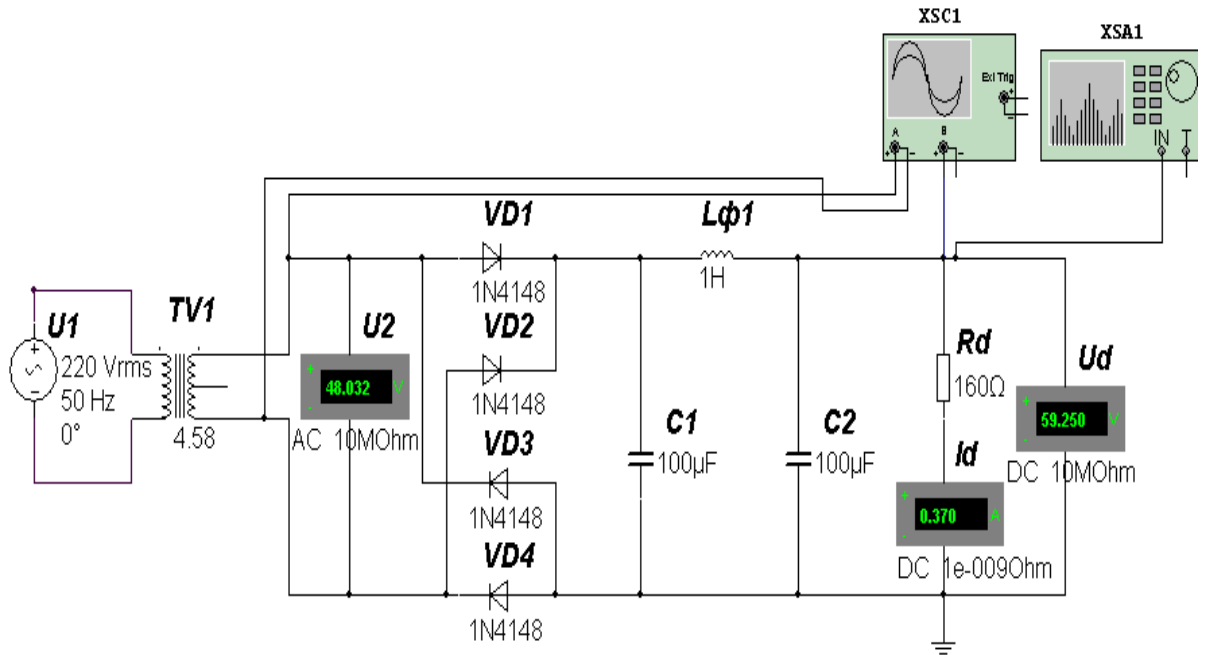


Рис.4.9. Модель некерованого мостового випрямляча з П-подібним індуктивно-ємнісним фільтром.

Результати моделювання: $U_2 = 48,032$ В, $I_d = 0,37$ А, $U_d = 59,25$ В. Великі значення напруги і струму навантаження в порівнянні з розрахунковими пов'язані з дією фільтра, що згладжує.

Коефіцієнт пульсацій в навантаженні:

$$K_H = \frac{U_{1m}}{U_d} = \frac{0,26}{59,29} = 0,0044 < 0,005,$$

що задовольняє завданню.

Амплітуда першої гармоніки випрямленої напруги U_{1m} знаходиться за допомогою аналізатора спектра XSA1 на частоті $f=100$ Гц.

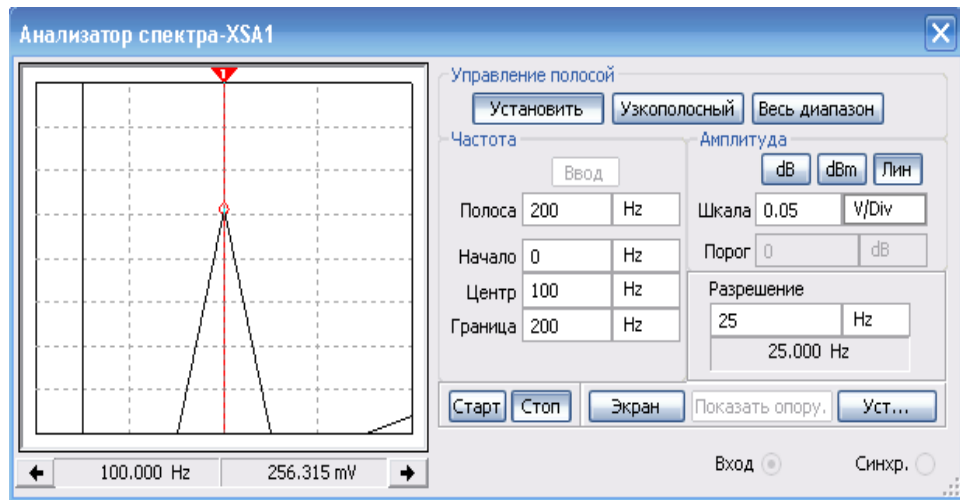
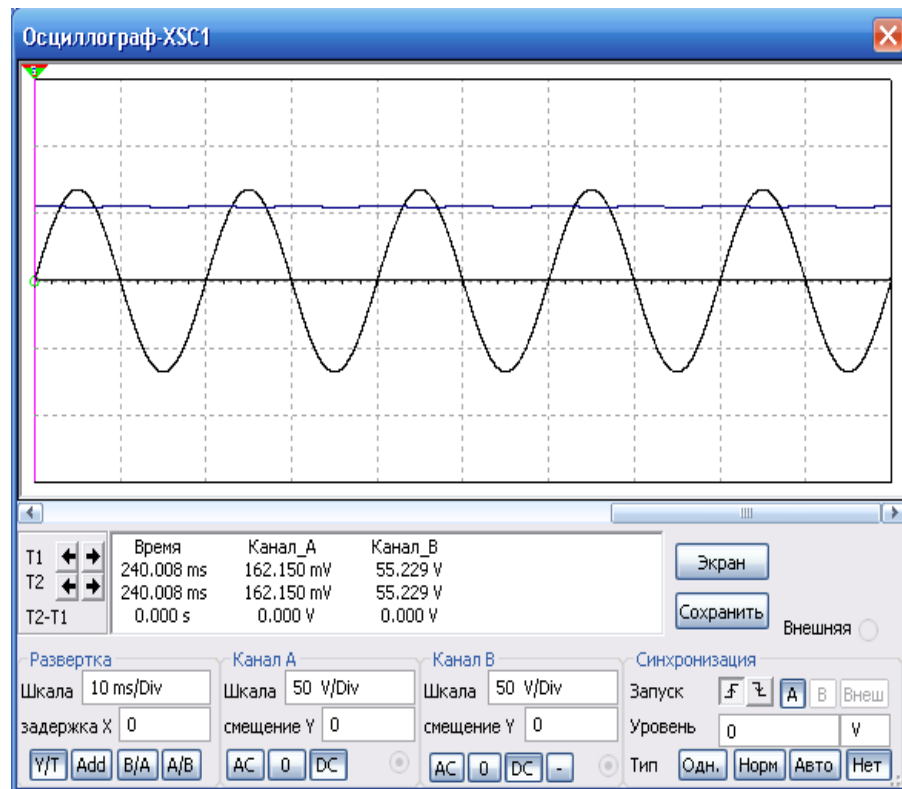


Рис.4.10. Результаты моделирования в Multisim.

4.2.2. Інструкція по виконанню роботи в Proteus

Наведемо хід виконання моделювання схеми в середовищі Proteus з С-фільтром.

1. Для детального дослідження роботи мостового випрямляча та впливу фільтра спочатку збираємо схему з мостовим випрямлячем без фільтра (рис.4.11).

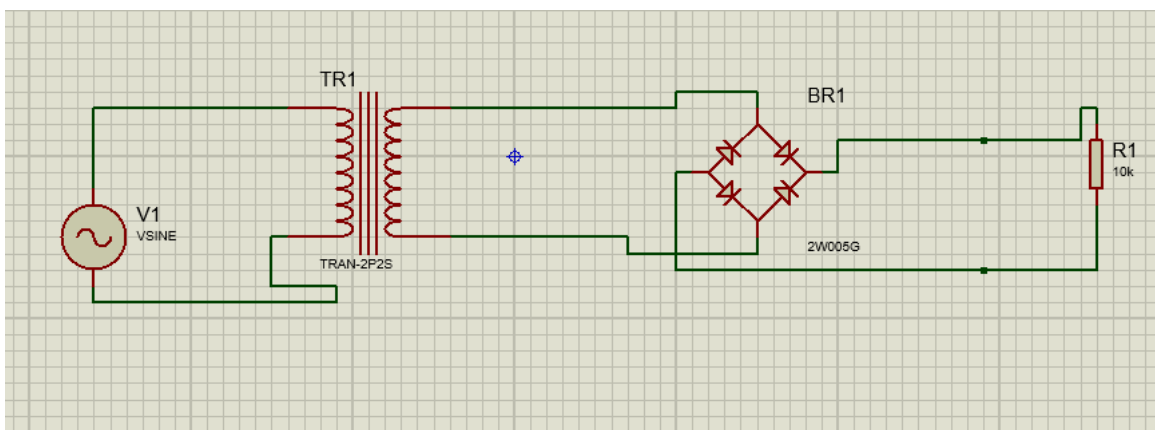


Рис. 4.11. Схема мостового випрямляча без фільтра в середовищі Proteus.

2. Підключаємо осцилограф та досліджуємо сигнал з діодного моста на осцилографі (рис.4.12).

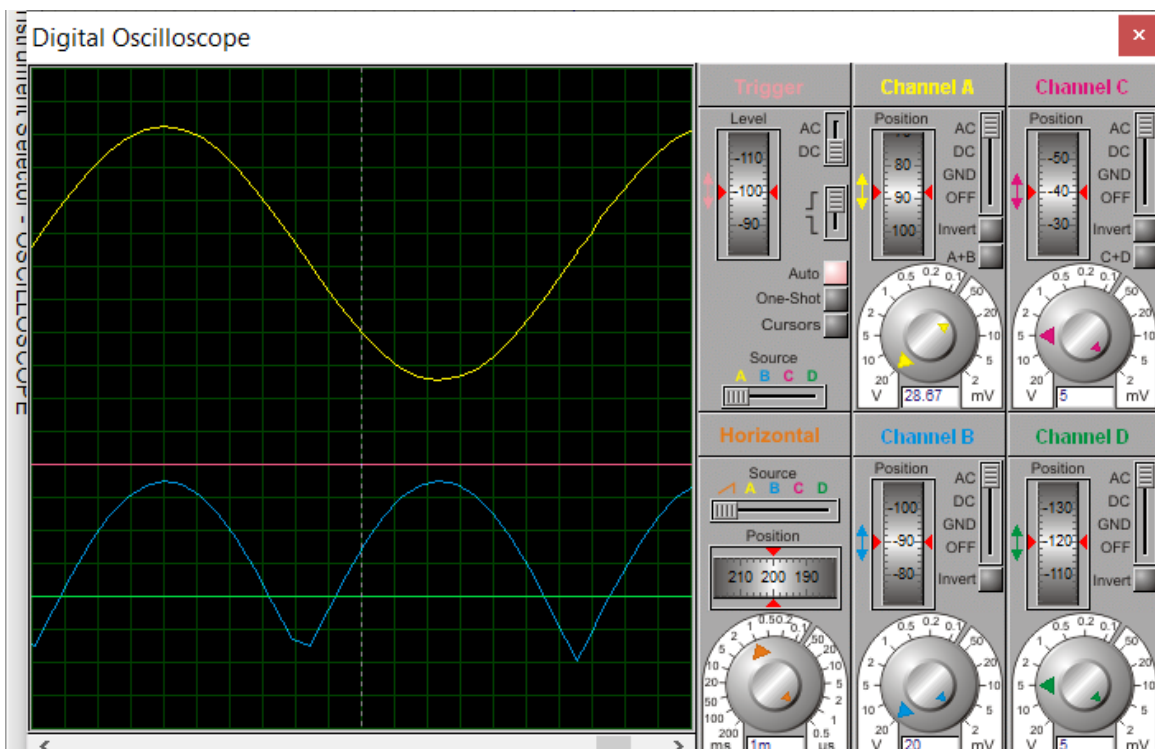


Рис. 4.12. Показання осцилографа з синусо-подібним сигналом з джерела живлення та випрямленим сигналом, після мостового випрямляча.

3. Збираємо схему з конденсатором та також досліджуємо на осцилографі вхідний сигнал та сигнал після діодного мосту (рис. 4.13). Пояснюємо зміни сигналу з навантаження.

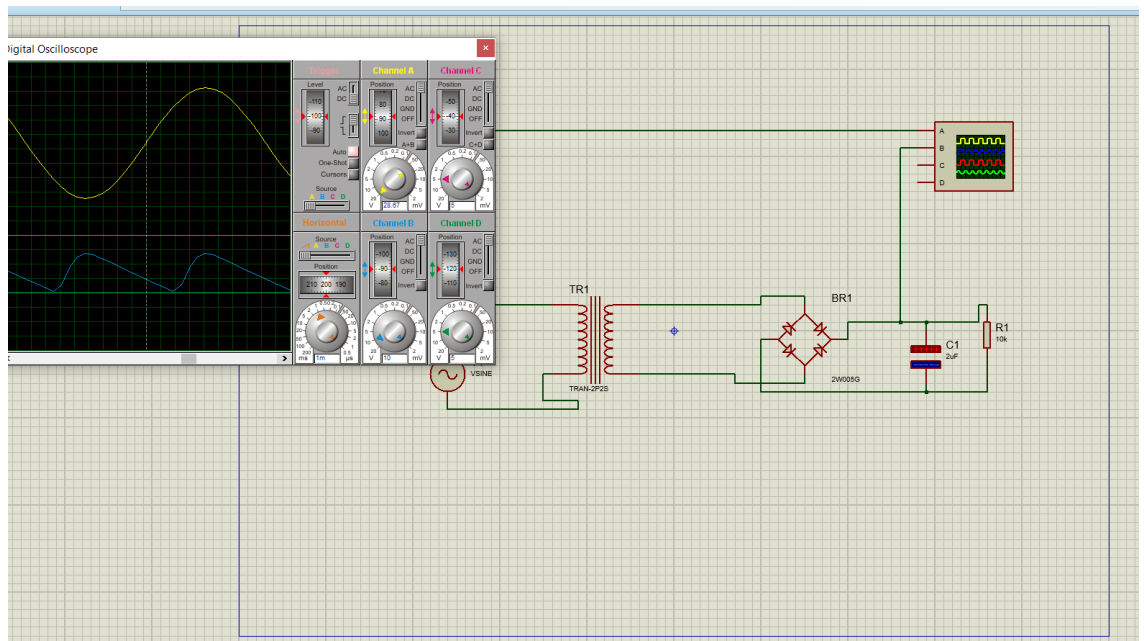


Рис. 4.13. Схема мостового випрямляча з С-фільтром та осцилограми з навантаження та джерела живлення в середовищі Proteus.

Робимо розрахунки, оформлюємо звіт та робимо висновки по роботі.

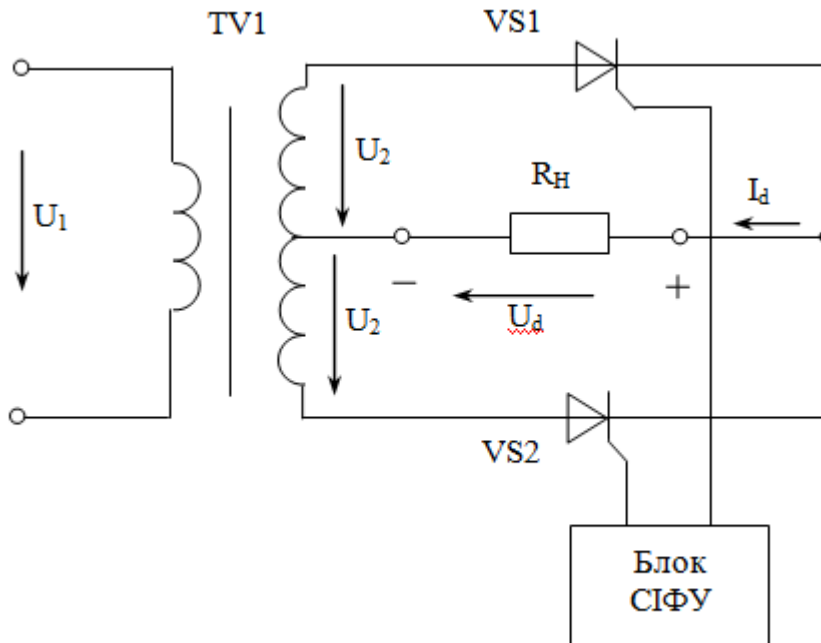
4.3. Завдання 3.

Розробити схему однофазного керованого випрямляча з нульовим виводом трансформатора при роботі на активне навантаження. Вихідні дані до задачі: $U_1 = 220$ В; $U_{dmin} = 10$ В; $U_{dmax} = 40$ В; $R_d = 30$ Ом. Необхідно: вибрати тип вентилів, трансформатора; побудувати регулюючу характеристику керованого випрямляча і по ній визначити необхідні кути регулювання; здійснити моделювання її роботи в середовищі Multisim; привести тимчасові діаграми для режиму максимального струму навантаження.

Рекомендовано виконувати цю роботу тільки в середовищі Multisim, оскільки середовище Proteus не дозволяє варіювати тип трансформатора. Рекомендована література [7, 8].

4.3.1. Приклад виконання

Розроблена схема приведена на рисунку 4.14.



СІФУ – система імпульсно-фазового управління

Рис.4.14. Схема керованого випрямляча з середньою точкою трансформатора.

Хід виконання:

1. Вибір тиристорів.

Струм навантаження максимальний:

$$I_{d \max} = \frac{U_{d \max}}{R_d} = \frac{40}{30} = 1,33 \text{ А.}$$

Для однофазного мостового випрямляча середнє значення прямого струму через вентиль визначається як:

$$I_a = \frac{I_d}{2} = \frac{1,33}{2} = 0,67 \text{ А.}$$

Зворотна максимальна напруга на вентилі дорівнює:

$$U_{zв \max} = 3,14 \cdot U_{d \max} = 1,57 \cdot 40 = 125,6 \text{ В.}$$

Вибираємо вентиля 2N5064, для котрих

$$I_{\text{відкр max}} = 0,8 \text{ A} > I_a = 0,67 \text{ A};$$

$$U_{\text{зкр max}} = 200 \text{ В} > U_{\text{обр max}} = 125,6 \text{ В.}$$

$$U_{\text{откр max}} = 1,7 \text{ В.}$$

2. Визначення параметрів трансформатора.

Для однофазного випрямляча з нульовим виводом трансформатора діюче значення вторинної напруги дорівнює:

$$U_2 = 1,11 \cdot U_{d \text{ max}} + U_{\text{відкр max}} = 1,11 \cdot 40 + 1,7 = 46,1 \text{ В.}$$

Розрахункова потужність визначається як:

$$S_{\text{расч}} = 1,48 \cdot P_{H \text{ max}} = 1,23 \cdot \frac{U_{d \text{ max}}^2}{R_d} = 1,48 \cdot \frac{40^2}{10} = 78,9 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

Вибираємо трансформатор:

Вибираємо трансформатор: ТПП 289-127/220-50

$$S_{\text{ном}} = 90 \text{ В} \cdot \text{А} > S_{\text{розрах}} = 78,9 \text{ В} \cdot \text{А.}$$

При послідовному з'єднанні вторинних обмоток Б, В, Г отримуємо

$$U_2 = 10 + 20 + 20 = 50 \text{ В.}$$

Тоді коефіцієнт трансформації:

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{50} = 4,4.$$

3. Регульовальна характеристика випрямляча.

Регульовальну характеристику керованого випрямляча розраховуємо за формулою:

$$U_d(\alpha) = U_{d_0} \frac{1 + \cos \alpha}{2},$$

де U_{d_0} – максимальне значення випрямленої напруги при куті регулювання $\alpha = 0$. У нашому випадку для вибраного трансформатора

$$U_{d_0} = \frac{U_2 - U_{відкр\ max}}{1,11} = \frac{50 - 1,7}{1,11} = 43,5 \text{ В.}$$

Тоді

$$U_d(\alpha) = 43,5 \cdot \frac{1 + \cos\alpha}{2}.$$

Регулювальна характеристика представлена на рисунку 4.14.

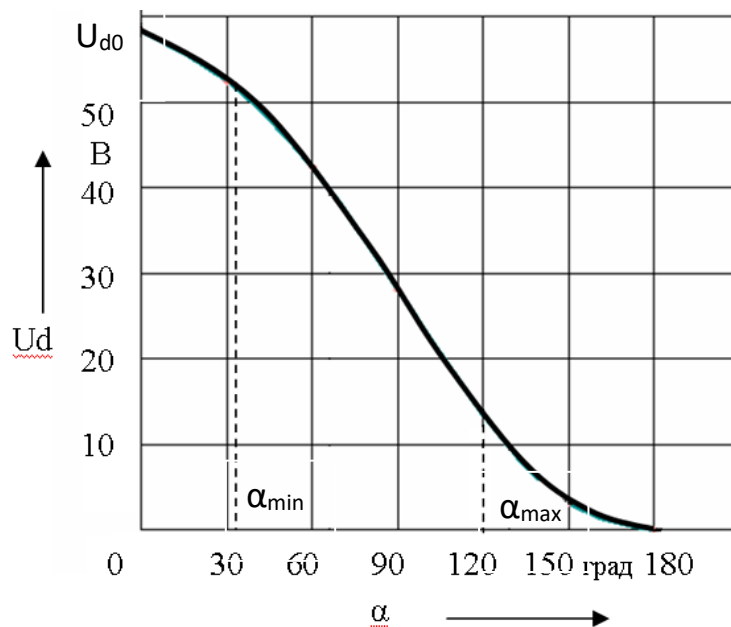


Рис.4.14. Регулювальна характеристика випрямляча.

За характеристикою знаходимо, що для $U_{d\ min} = 10 \text{ В}$ значення $\alpha_{min} = 120^\circ$, а для $U_{d\ max} = 40 \text{ В}$ значення $\alpha_{min} = 33^\circ$.

4. Моделювання роботи керованого випрямляча в середовищі Multisim.

Модель однофазного керованого випрямляча з середньою точкою трансформатора наведена на рисунку 4.15.

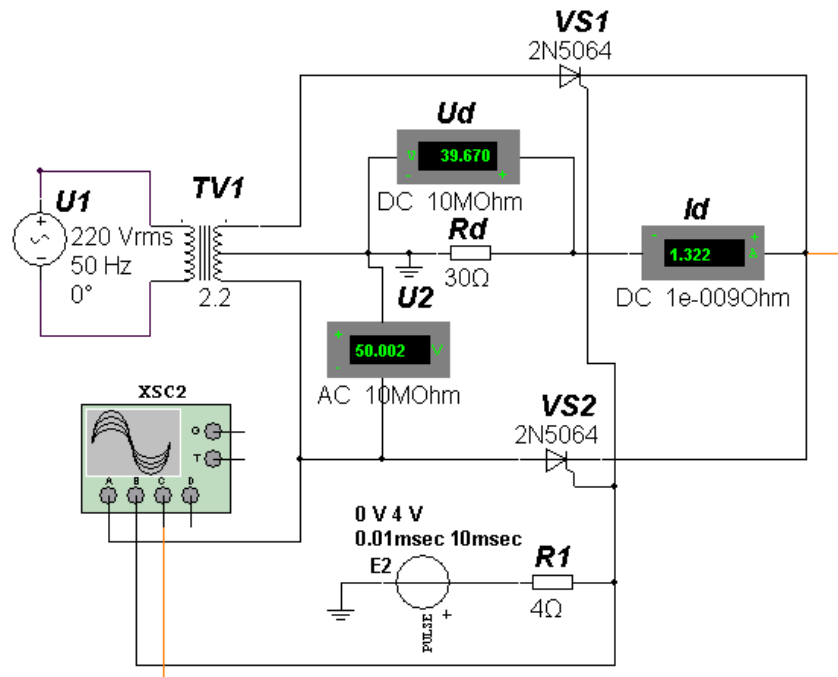


Рис.4.15. Модель керованого випрямляча з середньою точкою трансформатора.

Імпульси управління тиристорами формуються джерелом пульсуючої напруги E2 шляхом задання кута відмикання параметром «затримка»

$$t_3 = \frac{\alpha}{360^\circ \cdot f},$$

де f – частота напруги живлення, $f = 50$ Гц.

Результати моделювання: $U_2 = 50,002$ В, $I_d = 1,322$ А, $U_d = 39,67$ В. Часові діаграми роботи керованого випрямляча для режиму максимального струму навантаження представлені на рисунку 4.16.

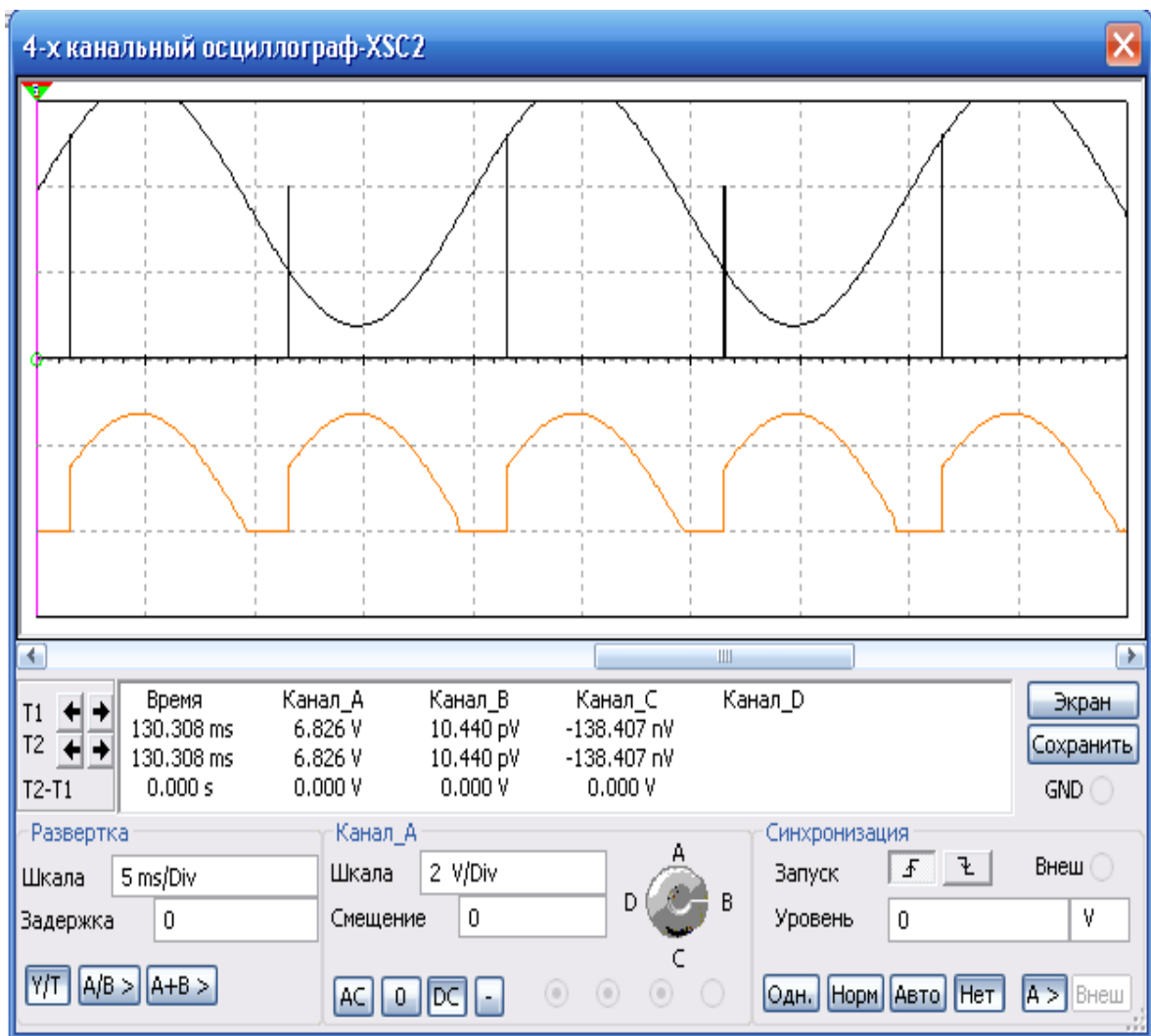


Рис.4.16. Часові діаграми роботи керованого випрямляча.

Робимо розрахунки, оформлюємо звіт та робимо висновки по роботі.

4.4. Завдання 4.

Розробити схему, виконати розрахунок і вибір елементів параметричного стабілізатора напруги на стабілітроні KC512A1 (аналог 1N4742A). Вихідні дані до задачі: $U_{min} = 17$ В; $U_{max} = 23$ В; $R_H = 100$ кОм. Необхідно: визначити величину баластного опору R_0 ; здійснити моделювання роботи схеми в середовищі Multisim або Proteus; перевірити працездатність схеми у всьому діапазоні зміни вхідної напруги; визначити коефіцієнт стабілізації. Рекомендована література [7-9].

4.4.1. Приклад виконання

Схема параметричного стабілізатора напруги наведена на рисунку 4.17.

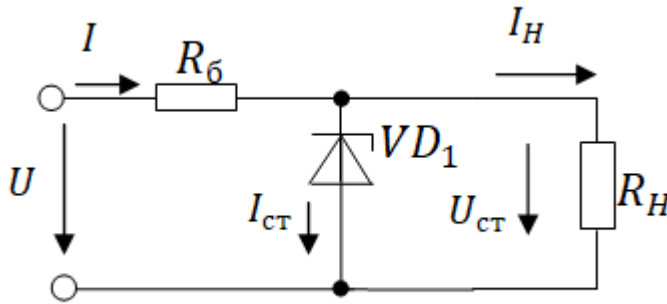


Рис.4.17. Схема параметричного стабілізатора напруги.

З довідника [6-8] визначаємо параметри стабілітрона КС512А1 (1N4742А): $U_{ст} = 12 \text{ В}$; $I_{ст \text{ min}} = 21 \cdot 10^{-3} \text{ А}$; $I_{ст \text{ max}} = 380 \cdot 10^{-3} \text{ А}$.

Знайдемо середнє значення напруги джерела $U_{сп}$ і струму стабілітрона $I_{сп. ст.}$:

$$U_{сп} = \frac{U_{\text{min}} + U_{\text{max}}}{2} = \frac{17 + 23}{2} = 20 \text{ В.}$$

$$I_{сп. ст.} = \frac{I_{ст. \text{ min}} + I_{ст. \text{ max}}}{2} = \frac{21 \cdot 10^{-3} + 380 \cdot 10^{-3}}{2} = 200,5 \text{ мА.}$$

Складемо рівняння за другим законом Кірхгофа:

$$U_{сп} = IR_{\delta} + U_{ст} = (I_{сп. ст.} + I_H)R_{\delta} + U_{ст}.$$

Звідки визначимо R_{δ} :

$$R_{\delta} = \frac{U_{сп} + U_{ст}}{I_{сп. ст.} + I_H} = \frac{20 - 12}{200,5 \cdot 10^{-3} + 120 \cdot 10^{-3}} = 25 \text{ Ом,}$$

де I_H – номінальний струм навантаження

$$I_H = \frac{U_{ст}}{R_H} = \frac{12}{100} = 120 \text{ мА.}$$

Приймаємо зі стандартного ряду Е24 (Додаток А) $R_{\delta} = 24 \text{ Ом}$.

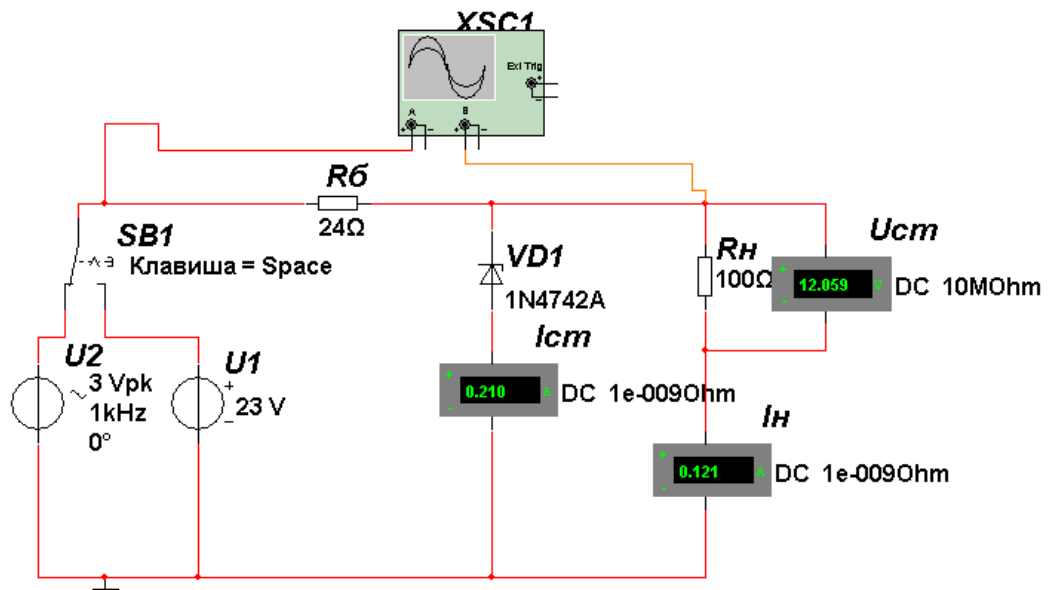
Розглянемо, чи буде забезпечена стабілізація в усьому діапазоні зміни вхідної напруги:

$$U_{BX. \min} = U_{cm} + R_6(I_{cm. \min} + I_H) = 12 + 24 \cdot (21 + 120) \cdot 10^{-3} = 15,38V.$$

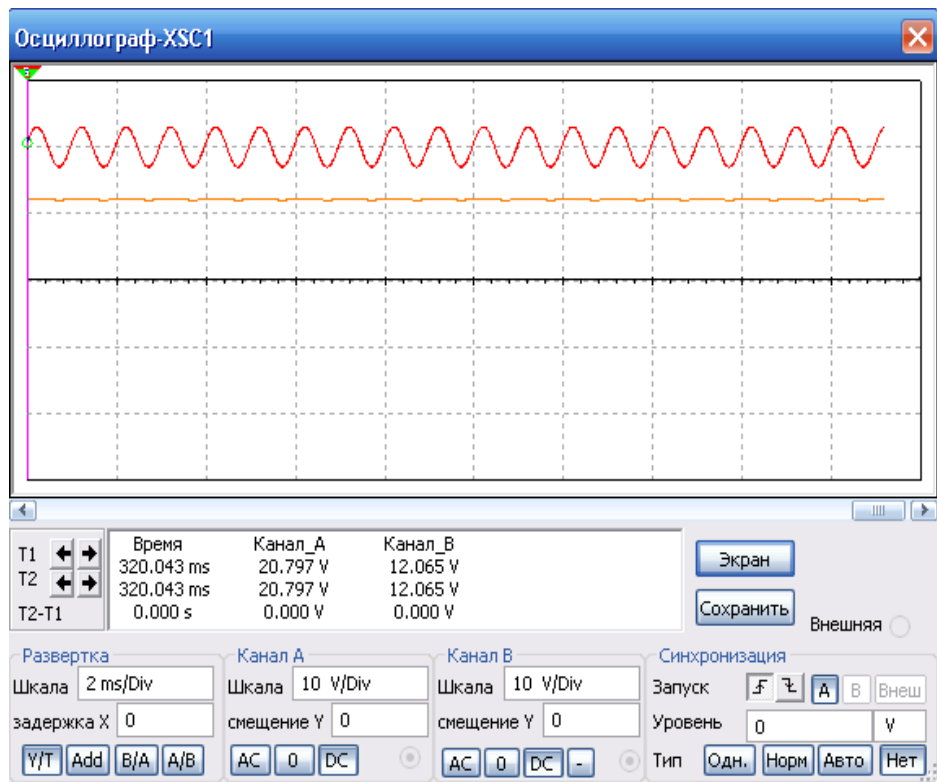
$$U_{BX. \max} = U_{cm} + R_6(I_{cm. \max} + I_H) = 12 + 24(380 + 120) \cdot 10^{-3} = 13 + 11,75 = 24 V.$$

Таким чином, стабілізація забезпечується у всьому діапазоні зміни вхідної напруги.

Модель параметричного стабілізатора напруги в середовищі Multisim приведена на рисунку 4.18. Вхідна напруга задається за допомогою джерела постійної напруги U_1 або за допомогою джерела змінної напруги $U_2 = 3$ В з постійним зміщенням $+20$ В.



a)



б)

Рис.4.18. Модель параметричного стабілізатора напруги а) і діаграми вхідної і вихідної напруг б).

Коефіцієнт стабілізації:

$$K_{cm} = \frac{\Delta U_{ex}/U_{ex}}{\Delta U_{cm}/U_{cm}} = \frac{6/20}{35,3 \cdot 10^{-3}/12,1} = 103.$$

4.4.2. Інструкція по моделюванню схеми в середовищі Proteus

Хід виконання.

1. Складіть схему на рис.4.17, обравши свій стабілітрон. Для цього натисніть правою клавішею миші на робочій області програми. У меню, що з'явилося, виберіть **Place** (далі – виклик меню). Далі виберіть **Component > From libraries**. У списку **Categories**, що зліва, оберіть **Diodes**. Ми отримали список діодів, наявних у бібліотеці. Стабілітрони у колонці **Library** позначені як **ZENERM** (так званий діод Зенера). Відсортуйте список по цій колонці та відшукайте **ZENERM** (рис.4.19). У колонці **Description** описані їх деякі параметри, серед яких напруга стабілізації. Виберіть стабілітрон з напругою

стабілізації не більше 13 В. Натисніть **ОК** і розташуйте його на робочій області.

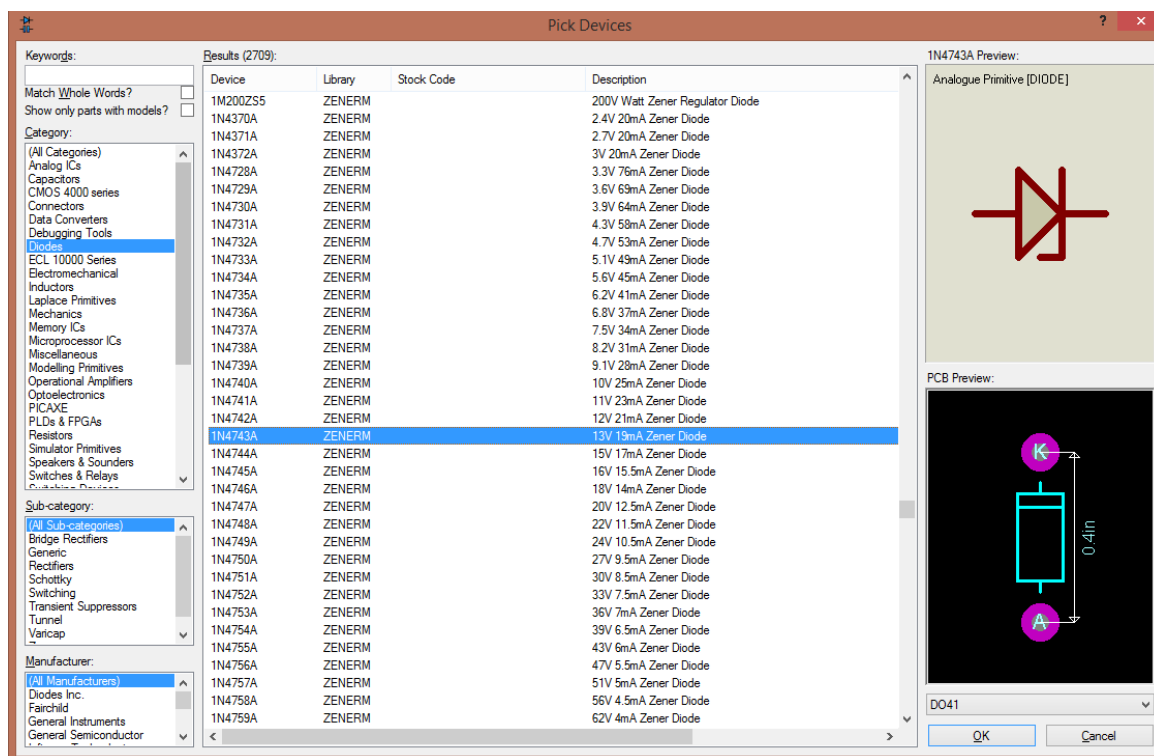


Рис.4.19. Вікно бібліотеки для вибору стабілітрона.

2. Розташуйте джерело напруги. У меню оберіть **Place > Generator > DC**. Розташувавши, подвійно натисніть лівою клавішею по цьому об'єкту (далі – зміна параметру об'єкта). У полі **Voltage (Volts)** установіть 15.
3. Розташуйте заземлення. У меню оберіть **Place > Terminal > Ground**. З'єднайте усі три елементи, як на схемі, натиснувши на вивід одного елемента і потягнувши провідник до виводу наступного.
4. У меню оберіть **Place > Probe > Current**. Розташуйте його, як на схемі. Це наш щуп струму.
5. Перевірте правильність виконаних дій. Зліва знизу натисніть «плей» для запуску симуляції. У випадку правильної побудови – симуляція не видасть помилку і на щупі буде показаний деякий струм. У випадку успіху – зупиняємо симуляцію кнопкою «стоп».

6. У меню оберіть **Place > Graphs > Transfer**, за допомогою якого будемо будувати нашу ВАХ. Розташувавши, подвійно натисніть лівою клавiшею миші по об'єкту.

7. На рис.4.20 показано вікно налаштувань нашого графіка.

У списку **Source 1** оберіть назву нашого джерела напруги для схеми (рис.4.17) «**D1(A)**». У **Start value** та **Stop value** укажіть -15 і 15 відповідно. Це наша межа вимірювання (діапазон зміни напруги джерела живлення «**D1(A)**», незважаючи на те, що раніше ми вже присвоювали йому значення). Натисніть **OK**.

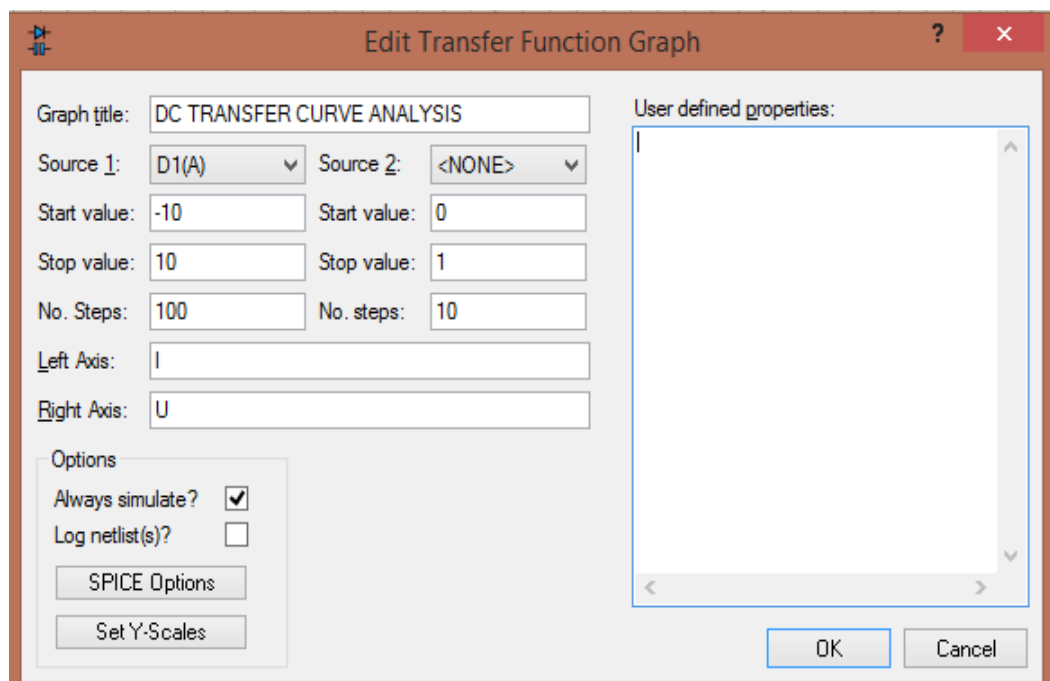


Рис.4.20. Вікно налаштування графіка ВАХ стабілітрона.

8. Одинарно клацніть лівою клавiшею (виділіть) щуп струму. Потягніть за його назву «**D1(A)**» і перетягніть її на графік (transfer).
9. Виділіть графік і натисніть «пробіл». В цьому об'єкті має з'явитися наш графік ВАХ, як на рис.4.21 та зробіть графік більшим, як на рис.4.22.

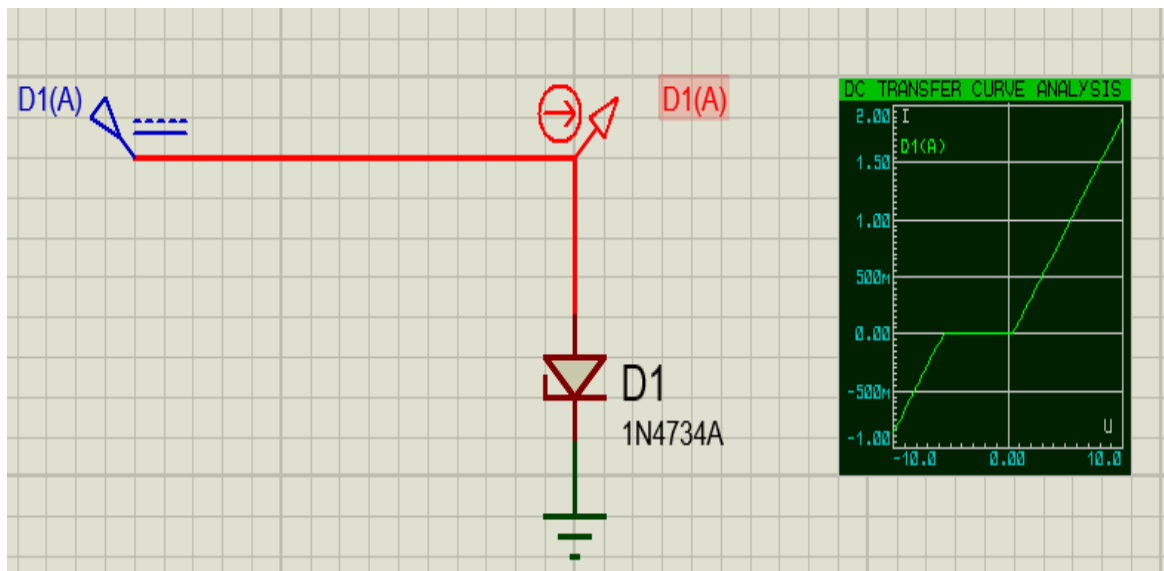


Рис.4.21. Схема із стабілітроном та ВАХ стабілітрона.

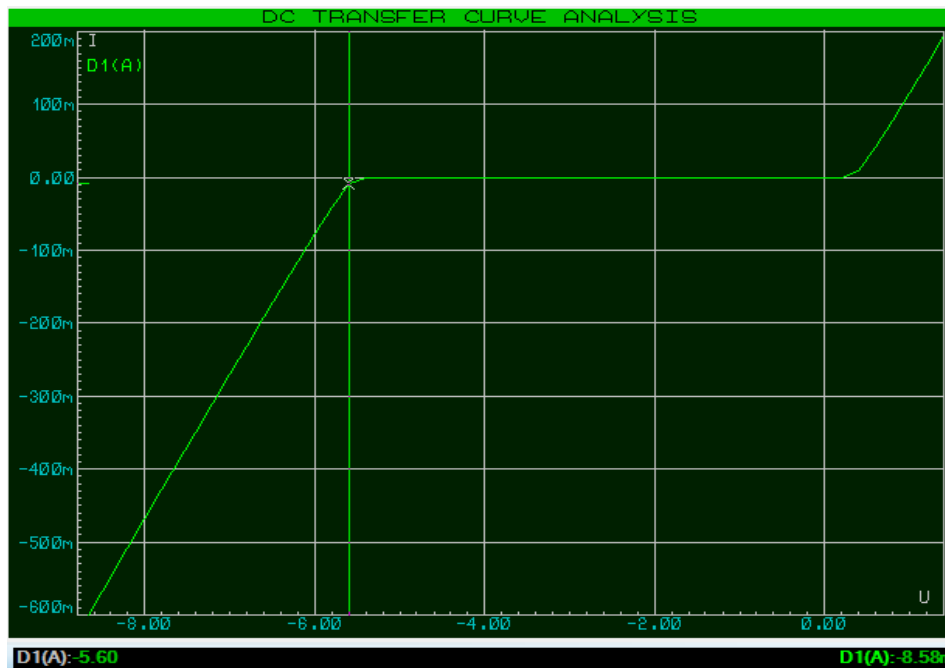


Рис. 4.22. ВАХ стабілітрона 1N4734A

10. Натисніть правою клавiшею мишки по графіку і виберіть **Maximize (Show window)**. Мишкою наблизьте початок області стабілізації та натисніть по точці, тим самим відобразивши точні значення вісі знизу (зліва – вісь X, справа – вісь Y). Таким чином зафіксуйте точку стабілізації та запишіть її напругу і струм, дивлячись на значення знизу. Зверніть увагу на одиниці вимірювання.

Отже, для стабілітрона *1N4734A* ми отримали наступні параметри:

$$U_{cm} = 5,6 \text{ В};$$

$$I_{cm} = 8,58 \text{ мА}.$$

11. Скласти схему, як на рис.4.17. В середовищі Proteus схема має вигляд, як на рис.4.23. Визначити опір навантаження R_2 , струмо-обмежувальний опір R_1 , робочий струм $I_{роб}$. Порівняти значення струмів, отриманих при розрахунку опорів та при симуляції схеми. Розрахувати коефіцієнт стабілізації.

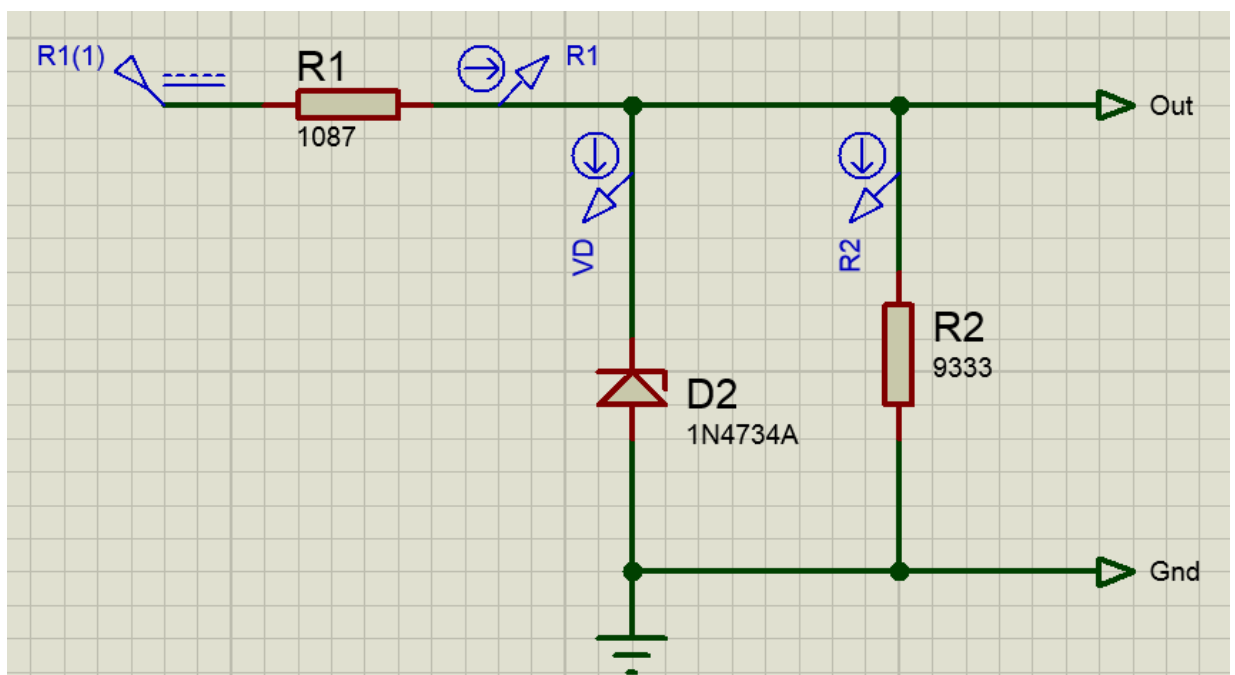


Рис.4.23. Схема стабілізатора напруги в середовищі Proteus.

12. Для моделювання схеми (рис.4.23) беремо стабілітрон зі свого варіанту. Резистори беруться з бібліотеки (**Place > Component > From libraries**) під категорією **Resistors** (список зліва). У таблиці компонентів беремо будь-який резистор, у якого у колонці **Library** написано **RESISTORS**. Номінали поки що не беремо до уваги, їх розрахуємо пізніше. З правої сторони схема має вихідні клеми **Out** і **Gnd**. Клеми знаходяться у **Place > Terminal > OUTPUT**. Перейменовуємо їх, як на схемі. Розставивши щупи струмів, дамо їм теж імена. Обов'язково поверніть їх у напрямку за схемою, інакше програма не

буде розуміти яким чином ми міряємо струм. Для джерела живлення «R1(1)» задаємо напругу живлення 15 В (значення не залежить від типу стабілітрона).

13. Поставити щуп напруги як на рис.4.26 (щуп напруги виділено червоним), обравши **Place > Probe > VOLTAGE**.

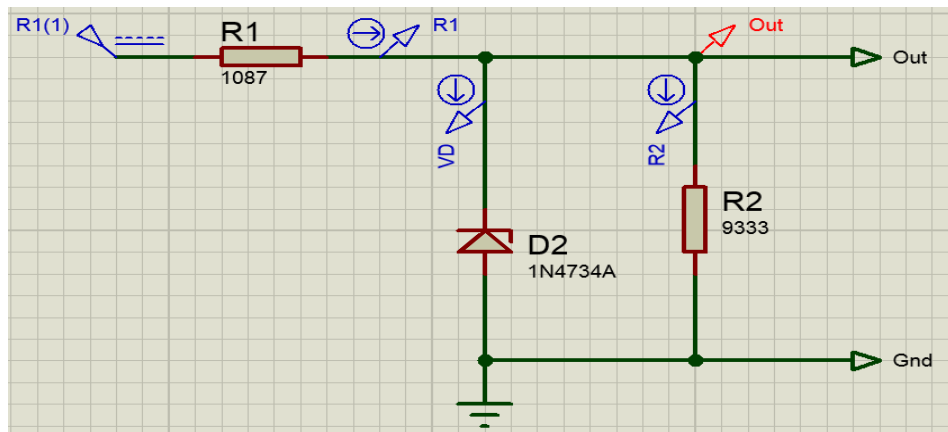


Рис.4.26. Схема із стабілітроном та щупами для вимірів параметрів (напруга та струм).

14. Робимо необхідні розрахунки та порівнюємо розраховані значення струмів та напруг із значеннями, отриманими під час симуляції роботи схеми (рис.4.27).

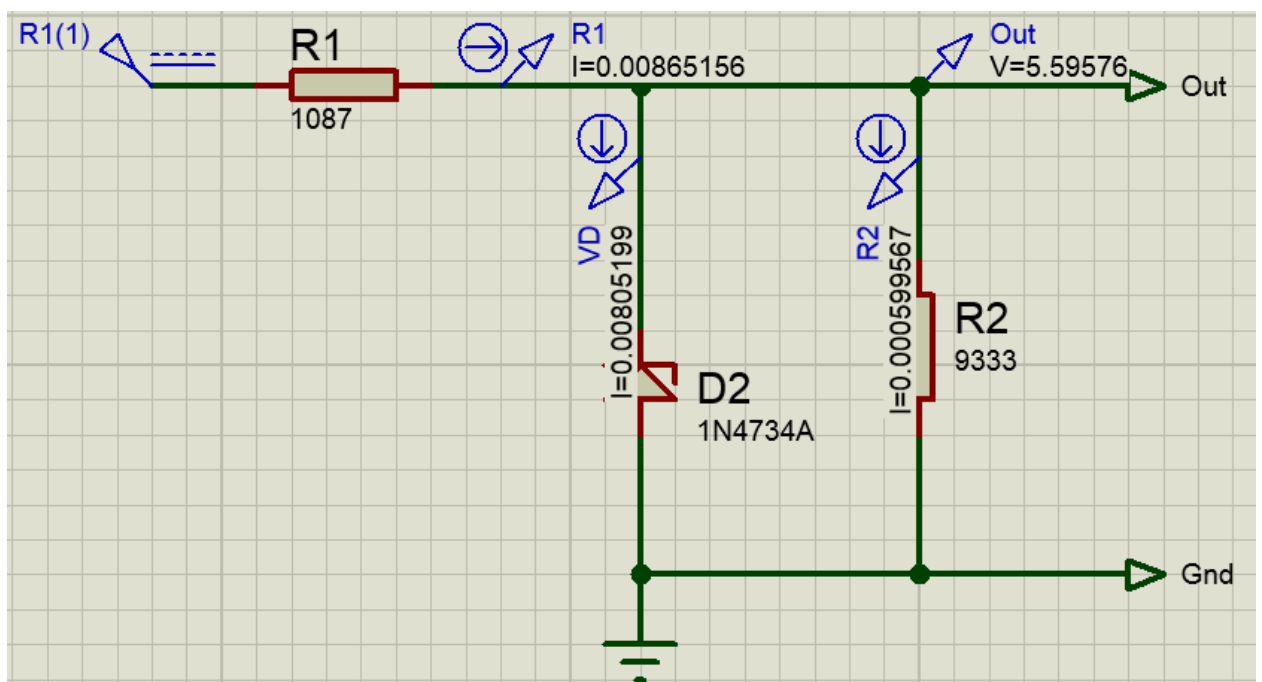


Рис.4.27. Робота схеми стабілізатора напруги під час симуляції.

Робимо розрахунки, оформлюємо звіт та робимо висновки по роботі.

4.5. Завдання 5.

Розробити схему підключення світлодіодного індикатора червоного світіння забезпечивши прямий струм $I_{np} = 10$ мА до навантаження некерованого випрямляча, який було розроблено в завданні 2. Необхідно вибрати світлодіод, визначити величину обмежувального опору R_1 , здійснити моделювання роботи схеми в середовищі Multisim. Ознайомитися з роботою світлодіодів за посиланням [6].

4.5.1. Приклад виконання

Приклад схеми підключення світлодіодного індикатора наведено на рисунку 4.28.

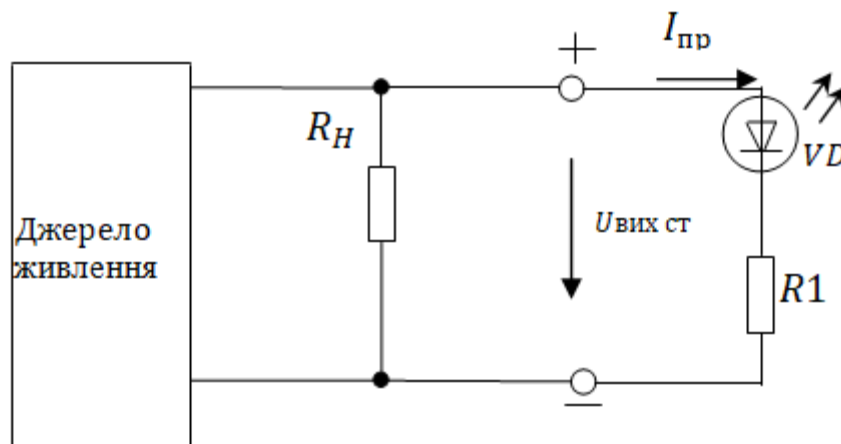


Рис. 4.28. Функціональна схема підключення світлодіодного індикатора до джерела живлення.

Умові завдання задовольняє світлодіод червоного випромінювання АЛ336А, що має $I_{np} = 10$ мА.

Опір резистора R_1 :

$$R_1 = \frac{U_{вих ст} - U_{np}}{I_{np}} = \frac{12 - 1,791}{0,01} = 102,1 \text{ Ом},$$

де U_{np} – падіння напруги на світлодіоді при протіканні через нього струму I_{np} .

Зі стандартного ряду E24 приймаємо $R_1 = 100$ Ом.

Величину напруги U_{np} слід визначити з ВАХ світлодіоду за допомогою характеристики XIV1 у середовищі Multisim (див. рис. 4.29 та 4.30). Як показано на рис.4.29, ця величина дорівнює $U_{np}=1,791$ В.

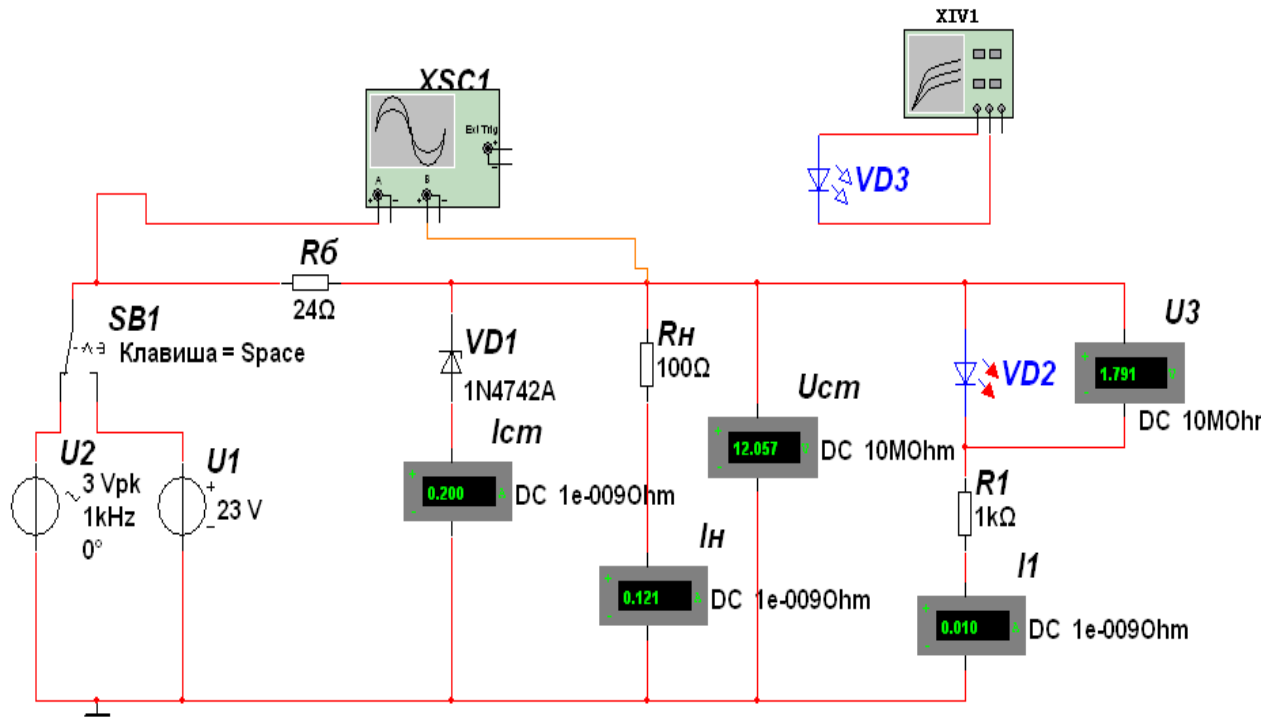


Рис.4.29. Модель схеми підключення світлодіодного індикатора до джерела живлення в середовищі Multisim.

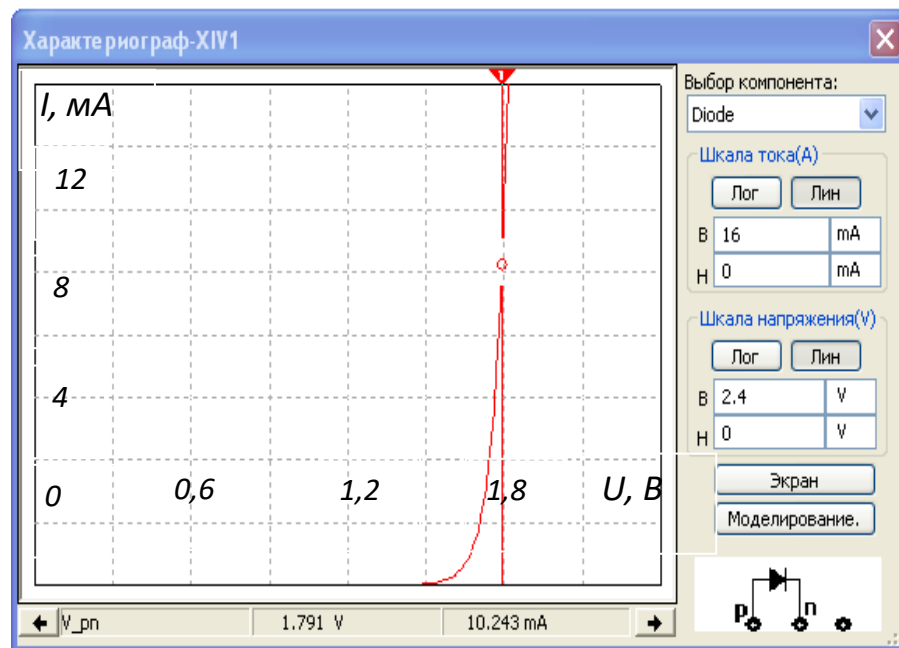


Рис.4.30. ВАХ світлодіоду.

Робимо розрахунки, оформлюємо звіт та робимо висновки по роботі.

4.6. Завдання 6.

Розрахувати вхідну напругу $U_{вх}$ біполярного транзистора КТ315Г, включеного за схемою з загальним емітером (ЗЕ), що забезпечує отримання вихідної напруги $U_{вих} = U_n/2$. Вихідні дані до задачі: $U_n=30$ В, $R_K=750$ Ом. Завдання необхідно вирішити графо-аналітичним методом по вхідних і вихідних характеристиках транзистору, здійснити моделювання роботи схеми в середовищі Multisim або Proteus. Ознайомитися з роботою транзистора за посиланням [9-12].

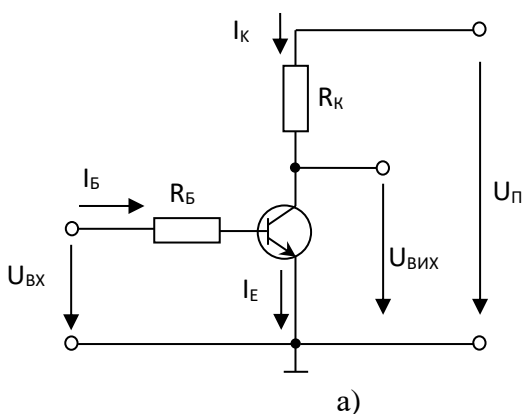
4.6.1. Приклад виконання

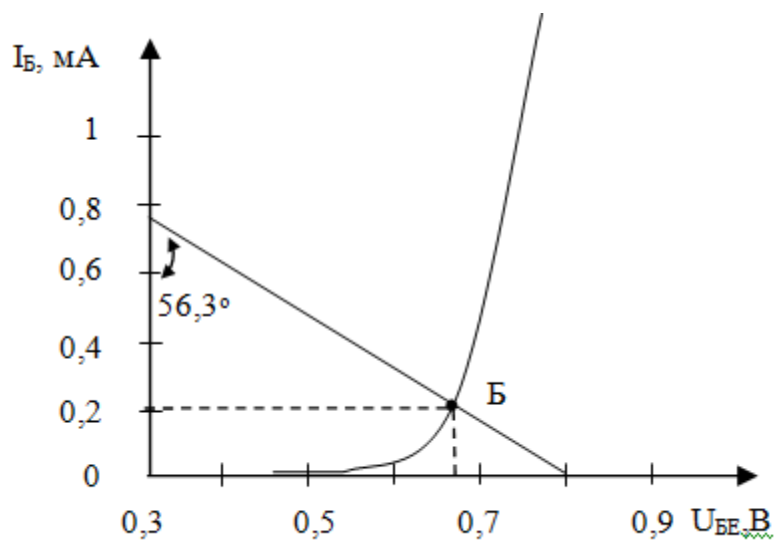
Схема включення транзистора представлена на рисунку 4.31, а.

Необхідно забезпечити вихідну напругу $U_{вих} = U_n/2 = \frac{30}{2} = 15$ В. Вхідні і вихідні характеристики транзистора наведені на рисунку 4.31, б), в).

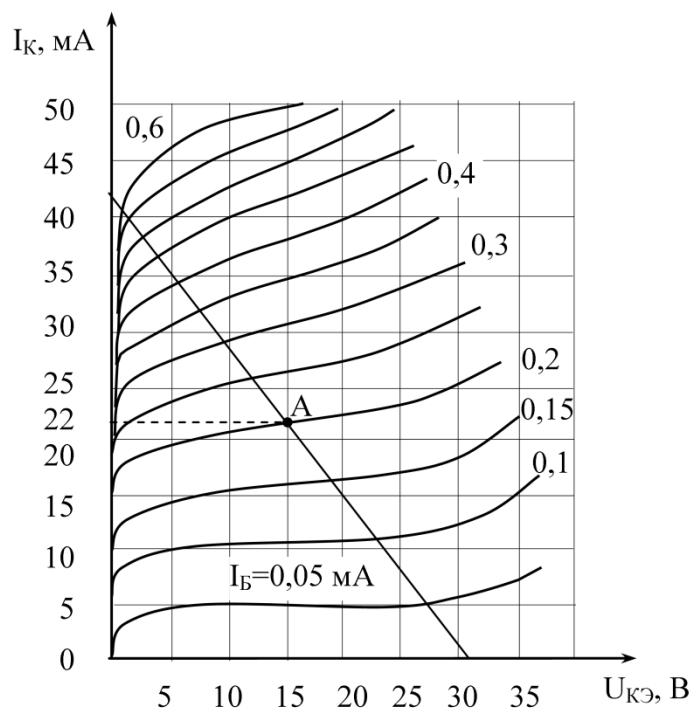
Так як характеристики біполярного транзистора є нелінійними, то скористаємося графо-аналітичним методом розрахунку. Для цього на вихідних характеристиках транзистора проведемо навантажувальну пряму, яка визначається рівнянням $U_{KE} = U_n - I_K R_K$. Вона пройде через точки $U_{KE} = U_n = 30$ В ($I = 0$), $I_K = \frac{U_n}{R_K} = \frac{30}{750} = 40$ мА, ($U_{KE} = 0$).

Для вихідної напруги $U_{вих} = \frac{U_n}{2} = \frac{30}{2} = 15$ В знайдемо точку перетину однієї з вихідних характеристик з навантажувальною прямою для $U_{KE0} = 15$ В – точка А (рис. 4.31, в). Дана точка А відповідає струму колектора $I_{K0} = 22$ мА і струму бази $I_{б0} = 0,20$ мА.





б)



в)

Рис.4.31. Схема ланцюга, що містить біполярний транзистор (а) і його вхідна (б) і вихідна (в) характеристики.

На вхідній характеристиці транзистора (рис.4.31, б) відзначимо точку Б, що відповідає струму бази $I_B = 0,20 \text{ мА}$. Через цю точку, під кутом до осі струму

рівному $\alpha = \arctg \left(R_{\sigma} \frac{M_i}{M_u} \right)$, проведемо пряму до перетину з віссю напруг, де M_i, M_u - масштаб по осі струму і напруги відповідно. Отримана точка перетину і дасть шукану вхідну напругу.

Для розглянутого випадку:

$$\alpha = \arctg 750 \cdot \frac{0,2 \cdot 10^{-3} \text{ A/дел}}{0,1 \text{ B/дел}} \approx 56,3^{\circ}.$$

Отримуємо $U_{вх} = 0,8 \text{ B}$.

Модель схеми включення біполярного транзистора КТ315Г в середовищі Multisim приведена на рисунку 4.32. Результати моделювання: $U_{вх}=0,8 \text{ B}$, $U_{вих}=13,98 \text{ B}$, $I_{\sigma}=0,15 \text{ мА}$, $I_{к}=21 \text{ мА}$.

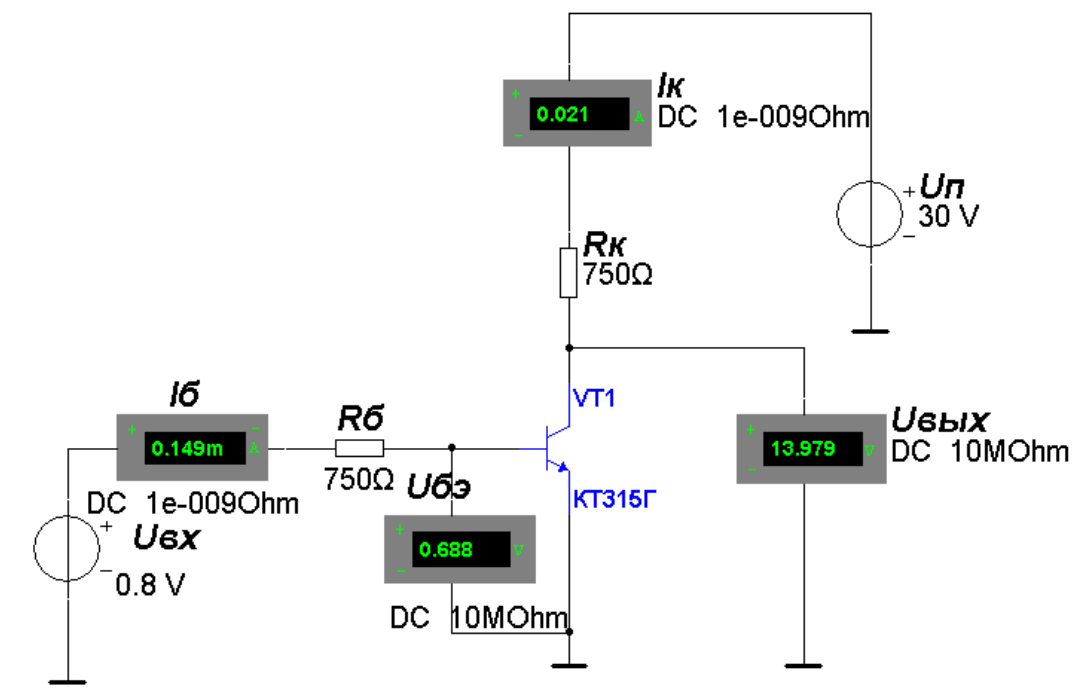


Рис.4.32. Модель схеми включення біполярного транзистора КТ315Г для забезпечення заданої вихідної напруги.

4.6.2. Інструкція до виконання моделювання схеми в середовищі Proteus

Хід роботи.

1. Обрати для дослідження один із запропонованих транзисторів у списку.

NPN: 2N1711, 2N1893, 2N2219, 2N2222, 2N3390, 2N3704, 2N3708, 2N3903, BC107, BC140, BC239, BC550.

PNP: 2N2905, 2N2907, 2N3702, 2N3905, 2N4125, 2N4401, 2N5401, 2N6609, BC143, BC177, BC478, BC557.

При пошуку потрібного транзистора у бібліотеці потрібно обирати ті варіанти, у яких у стовпці **Library** указано **BIPOLAR** (Рис.4.33).

Device	Library	Stock Code	Description
BC461	BIPOLAR		Silicon PNP Power Transistor (10W, 175eC)
BC478	BIPOLAR		Silicon PNP Low Power Bipolar Transistor (360mW, 175eC)
BC546BP	ZETEX		Low-Frequency Low-Power Silicon NPN Transistor
BC547	BIPOLAR		Silicon NPN Low Power Bipolar Transistor (625mW, 150eC)
BC547BP	ZETEX		Low-Frequency Low-Power Silicon NPN Transistor
BC548	BIPOLAR		Silicon NPN Low Power Bipolar Transistor (625mW, 150eC)
BC548BP	ZETEX		Low-Frequency Low-Power Silicon NPN Transistor

Рис.4.33. Вікно бібліотеки в середовищі Proteus.

2. Для того, щоб отримати вхідні характеристики транзистора, а саме залежність струму бази **I_b** від напруги база-емітер **U_{be}** в схемі з загальним емітером, будемо фіксувати значення напруги колектор-емітер **U_{ce}**.

Зробіть схему з обраним транзистором (рис.4.34). Назви джерел (**Generator > DC**) та щупів (**Probe > CURRENT**) бажано вказувати так як на схемі (рис.4.34). Для **U_{ce1}** та **U_{be1}** у графі **Voltage** записуємо значення **1** (для р-п-р структури транзистора вказувати **-1** та розвернути щуп **I_{b1}** у протилежному напрямку).

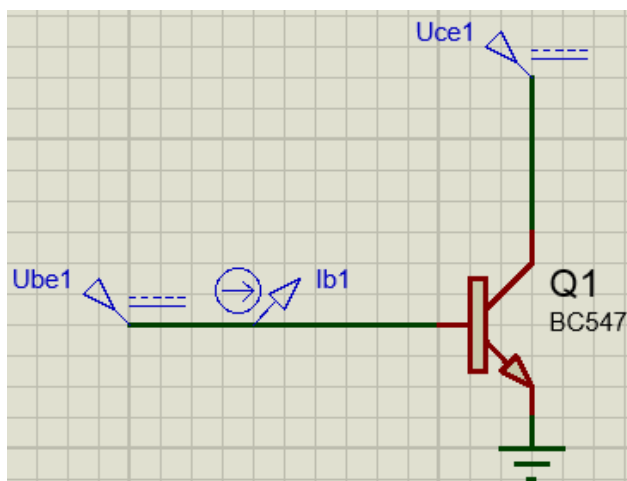


Рис.4.34. Схема підключення біполярного транзистора з загальним емітором для дослідження вхідних характеристик транзистора.

Вставляємо **Graphs > TRANSFER** і налаштуємо його. У **Source1** обираємо **Ube1**, у **Source2** обираємо **Uce1**. **Start value** для обох джерел ставимо **0**. **Stop value** ставимо **1** та **50** відповідно (**-1** та **-50** для р-п-р). Для більш плавної побудови графіка у першому джерелі ставимо **No. steps** на **200** (рис.4.35).

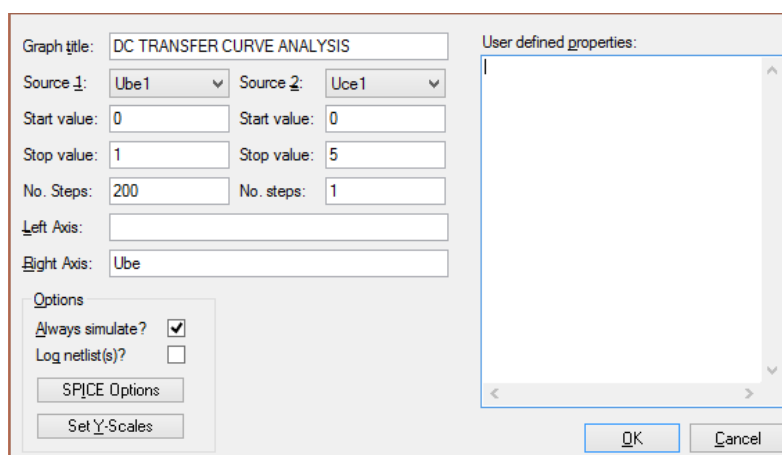


Рис.4.35. Вікно для вибору параметрів джерел живлення.

Виділяємо та перетягуємо щуп **Ib1** на область нашого графіка і запускаємо симуляцію. Отримуємо графік вхідної характеристики транзистора (рис.4.35).

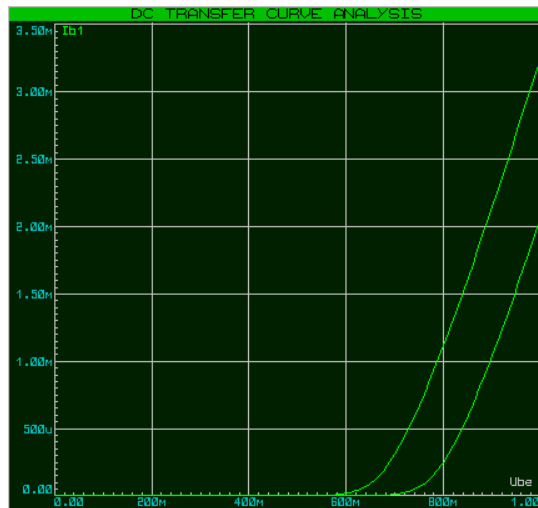


Рис.4.35. Вхідні характеристики n-p-n транзистора при $U_{ce} 0$ і $5V$.

У випадку p-n-p транзистора ми отримаємо графік, що відзеркалений по вертикальній осі (Рис.4.36). У подальшому, при виникненні такої ситуації, значення горизонтальної осі, а також значення параметра у **Source2**, для розрахунків брати протилежними (помножені на -1). Тобто графік має бути подібним Рис.4.

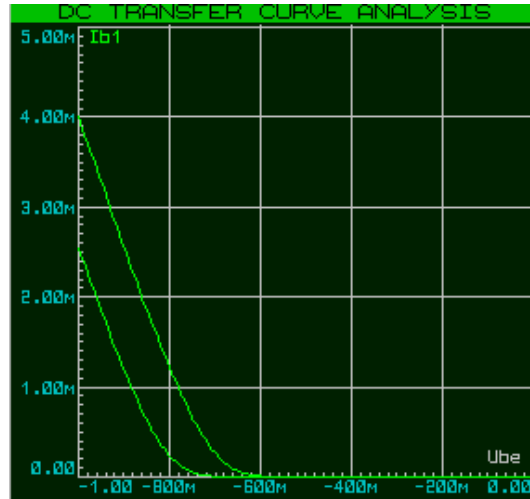


Рис.4.36. Вхідні характеристики p-n-p транзистора при $U_{ce} 0$ і $5V$.

4. Побудувати перехідні характеристики транзистора с загальним емітером. Перехідні характеристики для ЗЕ – це залежність струму колектора від напруги база-емітер $I_c(I_{be})$ при фіксованному значенні напруги колектор-емітер U_{ce} .

Складемо наступну схему (рис.4.37). Елементи бажано не копіювати з попередньої (рис.4.34), а ставити нові, для уникнення помилок при симуляції. Для **Uce2** ставимо напругу **1** (**-1** для p-n-p). **Ib2** – те ж саме джерело у Proteus, що і **Uce2**, але з іншими налаштуваннями. У вікні опцій джерела ставимо знизу зліва галочку **Current Source**, у графі **Current** (де раніше було **Voltage**) ставимо **1m** (**-1m** для p-n-p). Це **джерело струму**, тому при подальшому, коли будуть у схемі вказуватися такі джерела, потрібно завжди ставити галочку **Current Source** (рис.4.38). Не забуваємо розвертати **Ic2** для p-n-p транзистора.

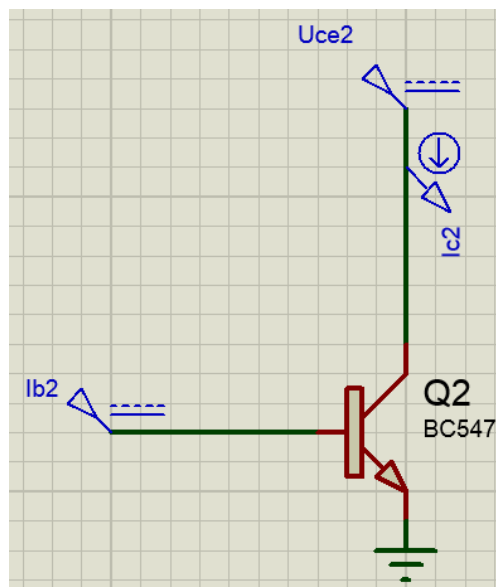


Рис.4.37. Схема підключення біполярного транзистора с загальним емітером для дослідження перехідних характеристик.

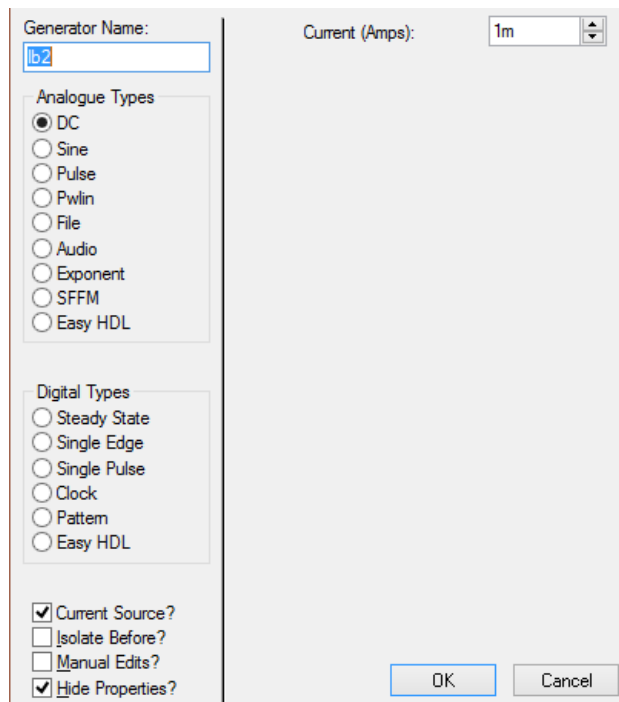


Рис.4.38. Вікно для налаштування параметрів джерела струму.

У **TRANSFER** ставимо наступні параметри:

Source1 – Ib2, Source2 – Uce2;

Start value: 0 і 5 (-5 для p-n-p) відповідно;

Stop value: 1m і 50 (-1m і -50 для p-n-p) відповідно;

No. Steps: 200 і 5 відповідно (рис.4.39).

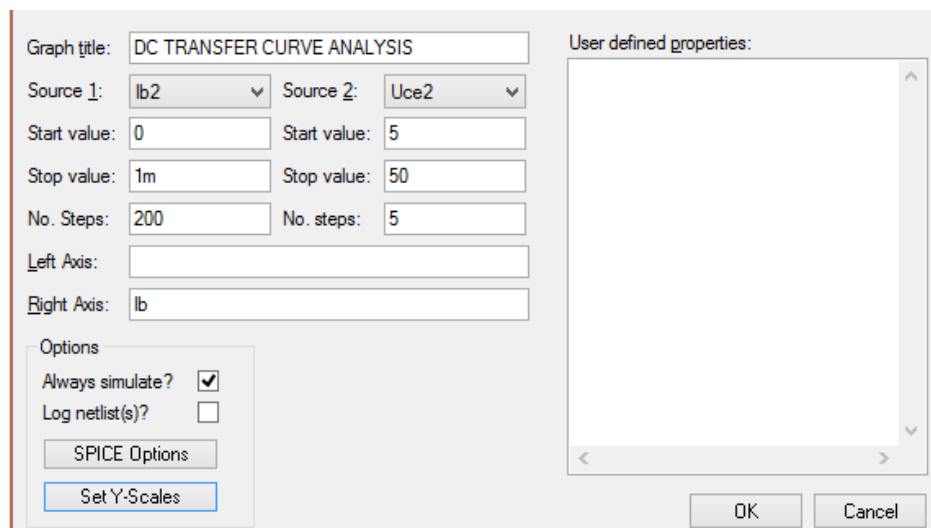


Рис.4.39. Вікно для налаштування роботи схеми.

Переносимо I_{c2} на область графіка, запускаємо симуляцію і отримуємо графік (рис.4.40).

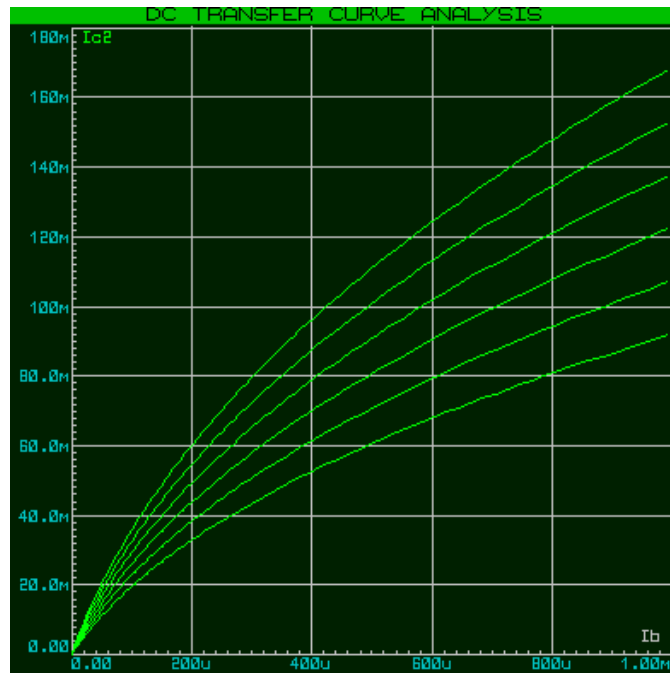


Рис.4.40. Перехідні характеристики транзистора.

У випадку дзеркального графіка (при р-п-р) транзисторі від'ємні значення брати за додатні (протилежні).

5. Побудувати вихідні характеристики транзистора с ЗЕ, а саме залежність струму колектора від напруги колектор-емітер $I_c(U_{ce})$ при фіксованому значенні струму бази I_b . Схема для дослідження вихідних характеристик представлена на рис. 4.41.

Будуємо схему та розставляємо параметри (рис.4.42): U_{ce3} ставимо 1 (-1 для р-п-р), I_{b3} ставимо 1m (-1m для р-п-р). Не забуваємо про параметри джерела струму (галочка **Current Source**). Розвертаємо I_{c3} , якщо транзистор р-п-р.

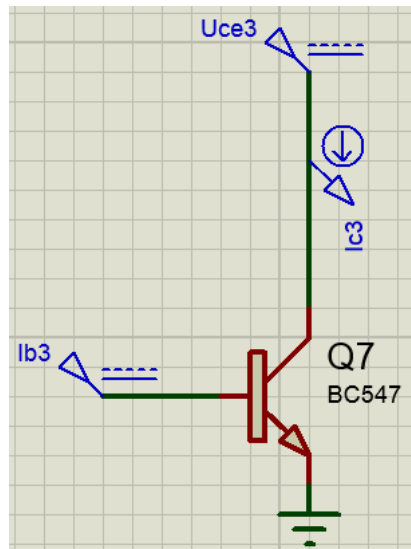


Рис.4.41. Схема біполярного транзистора с ЗЕ для дослідження вихідних характеристик.

Продовжуємо вставляти параметри (рис.4.42). У **TRANSFER** ставимо наступні параметри:

Source1 – Uce3, Source2 – Ib3;

Start value: 0 і 0;

Stop value: 20 і 2m (-20 і -2m для p-n-p) відповідно;

No. Steps: 200 і 5 відповідно.

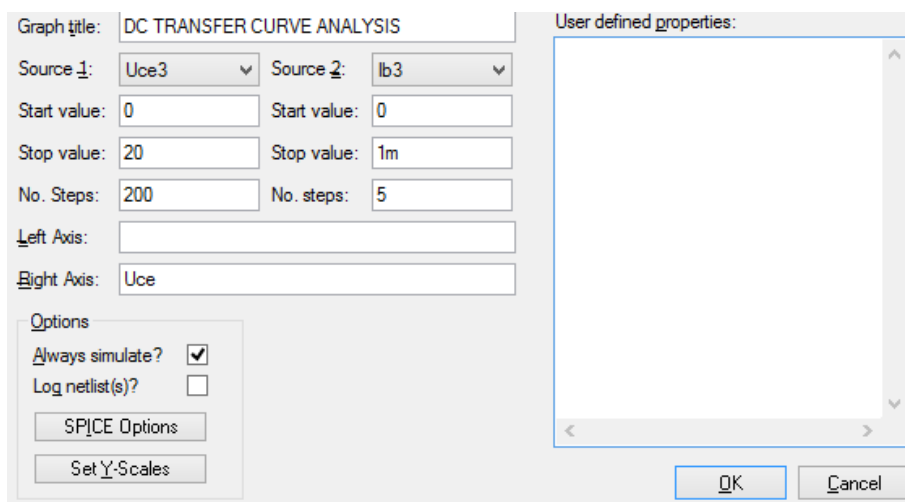


Рис.4.42. Вікно для параметрів.

Отримуємо графік вихідних характеристик транзистора (рис.4.43).

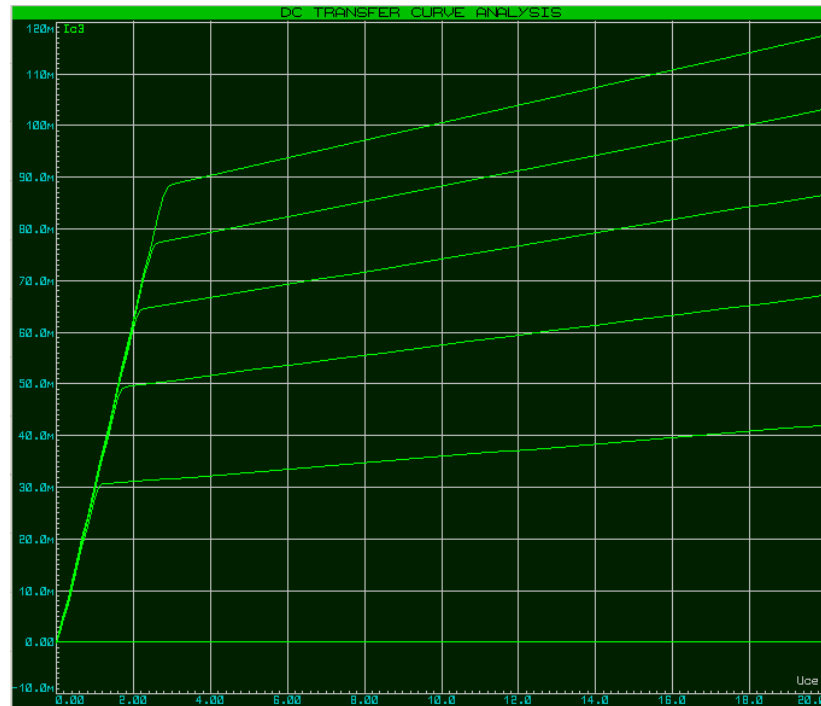


Рис.4.43. Вихідні характеристики транзистора.

Робимо розрахунки, оформлюємо звіт та робимо висновки по роботі.

4.7. Завдання 7.

Виконати розрахунок і вибір елементів схеми включення польового транзистора (як приклад 2N3972) з керуючим $p-n$ переходом із загальним витоком (ЗВ) за постійним струмом при роботі в режимі класу А при напрузі джерела живлення $E_C=20$ В. Необхідно за аналітичними залежностями визначити опір автоматичного зміщення R_B , опір в ланцюзі стоку R_C і ланцюзі затвору R_Z , здійснити моделювання роботи схеми в середовищі Multisim або Proteus. Рекомендована література за темою [6, 9-12].

4.7.1. Приклад виконання

Транзистор 2N3972 має канал n -типу і працює при $U_C > 0$ і $U_{ЗВ} \leq 0$. Такий режим може бути забезпечений одним джерелом живлення з використанням так званого «автоматичного зміщення». Схема має вигляд,

показаний на рисунку 4.44. Параметри транзистора: напруга відсічки транзистора $U_{\text{відс}} = 0,5 \text{ В}$, максимальний струм стоку $I_{C \text{ макс}} = 30 \text{ мА}$.

Аналітична залежність $I_C = f(U_{3B})$ при $U_{CB} = \text{const}$ має вигляд:

$$I_C = I_{C \text{ макс}} (1 - |U_{3B}| / |U_{\text{відс}}|)^2.$$

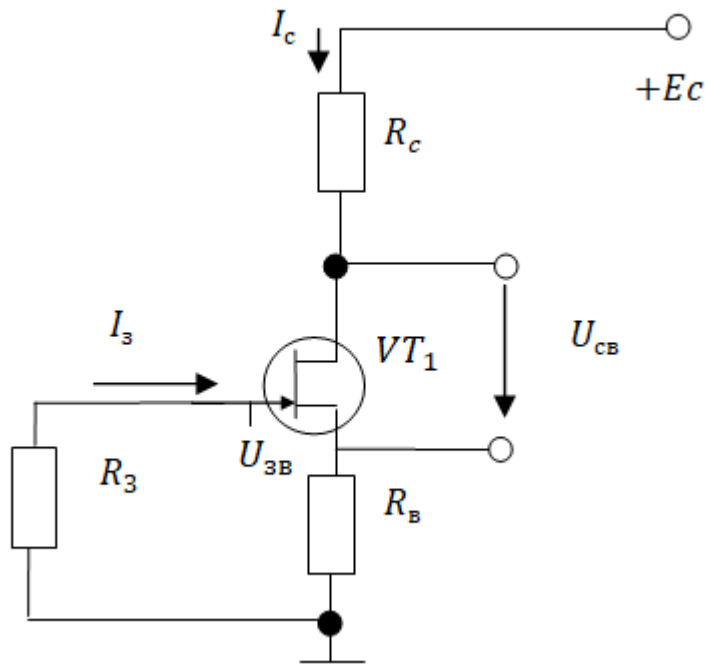


Рис.4.44. Схема включення польового транзистора з загальним витоком (ЗВ).

Звідки

$$U_{3B} = U_{\text{відс}} (1 - \sqrt{I_C / I_{C \text{ макс}}}).$$

Нехай струм стоку в робочій точці вдвічі менше максимального струму $I_{C \text{ макс}}$, тобто $I_C = 30/2 = 15 \text{ мА}$. Тоді

$$U_{3B} = -0,5 \left[1 - \sqrt{15 \cdot 10^{-3} / (30 \cdot 10^{-3})} \right] = -0,15 \text{ В}.$$

Знайдемо опір автоматичного зміщення. Так як $I_3 \ll I_C$, напруга затвор-витік дорівнює падінню напруги на опорі витоку R_B , тому

$$R_B = |U_{3B}| / I_C = 0,15 / (15 \cdot 10^{-3}) = 10 \text{ Ом.}$$

Найближчий номінал зі стандартного ряду E24 дорівнює 10 Ом. Опір резистора затвору R_3 вибираємо з умови $I_3 R_3 = 0,01 U_{3B}$, прийнявши $I_3 = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ А}$.

Звідси отримуємо

$$R_3 = 0,01 U_{3B} / I_3 = 0,01 \cdot 0,15 / 1,5 \cdot 10^{-8} = 100 \text{ кОм.}$$

Вибираємо з ряду номіналів резистор з опором 100 кОм.

Опір резистора R_C знаходимо з рівняння струмів і напруг в схемі:

$$E_C = I_C (R_B + R_C) + U_{CB}.$$

Вважаємо, що підсилювач працює в режимі класу А, і приймаємо

$$U_{CB} \approx E_C / 2 = 10 \text{ В.}$$

Вирішуємо рівняння відносно R_C :

$$R_C = \frac{E_C - U_{CB} - I_C R_B}{I_C} = \frac{20 - 10 - 75 \cdot 10^{-3} \cdot 10}{15 \cdot 10^{-3}} = 657 \text{ кОм.}$$

Вибираємо найближчий з ряду E24 номінал $R_C = 680 \text{ кОм}$.

Модель схеми вмикання польового транзистора в середовищі Multisim приведена на рисунку 4.45. Результати моделювання: $I_3 = 0,015 \text{ мкА}$, $U_{3B} = -0,147 \text{ В}$, $I_C = 15 \text{ мА}$, $U_{cB} = 9,753 \text{ В}$.

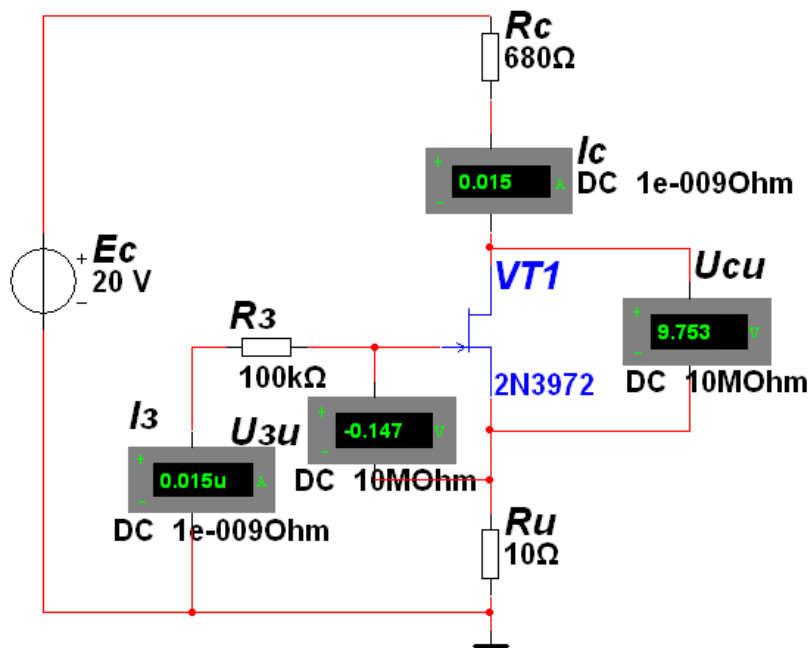


Рис.4.45. Модель схеми вмикання польового транзистора для забезпечення заданої вихідної напруги.

4.7.2. Інструкція до виконання роботи в середовищі Proteus

Хід роботи.

1. Виберемо польовий транзистор з бібліотеки даних (рис. 4.46).

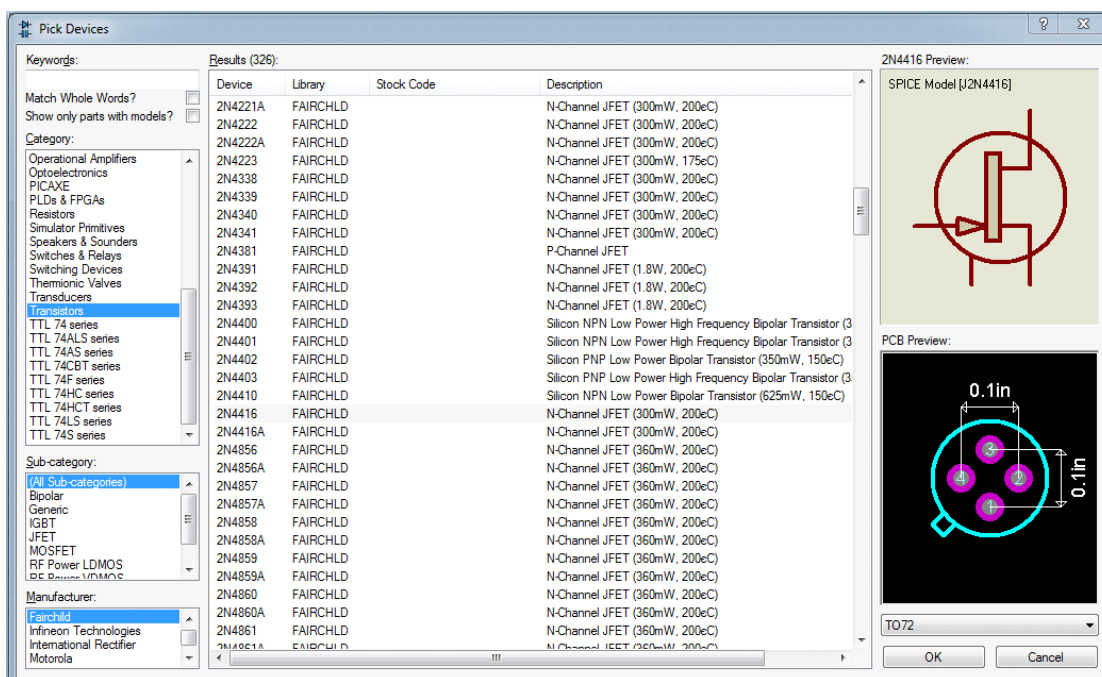


Рис.4.46. Вікно бібліотеки даних для вибору транзистора.

2. Зберемо спрощену схему без опорів (рис.4.47) для дослідження статичних характеристик транзистора.

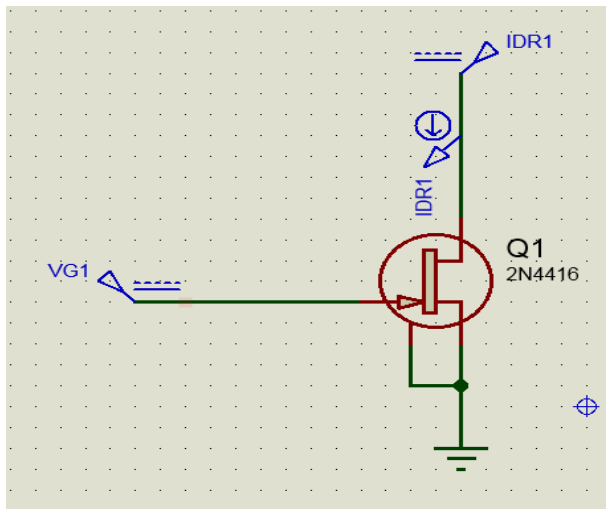


Рис.4.47. Схема для дослідження характеристик польового транзистора.

3. Виставляємо параметри джерел живлення IDR1 та VG1. Для першого джерела IDR1 виставляємо значення 1 В (рис.4.48).

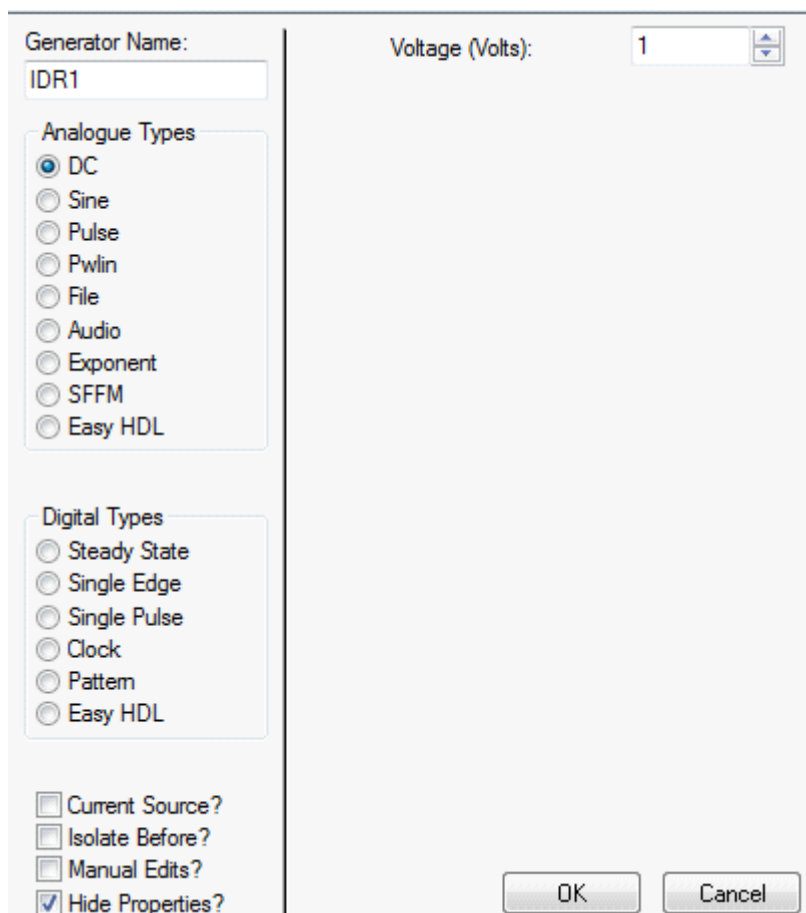


Рис. 4.48. Вікно для виставлення параметрів джерела живлення.

Для джерела живлення VG1 виставляємо 0 В (рис.4.49).

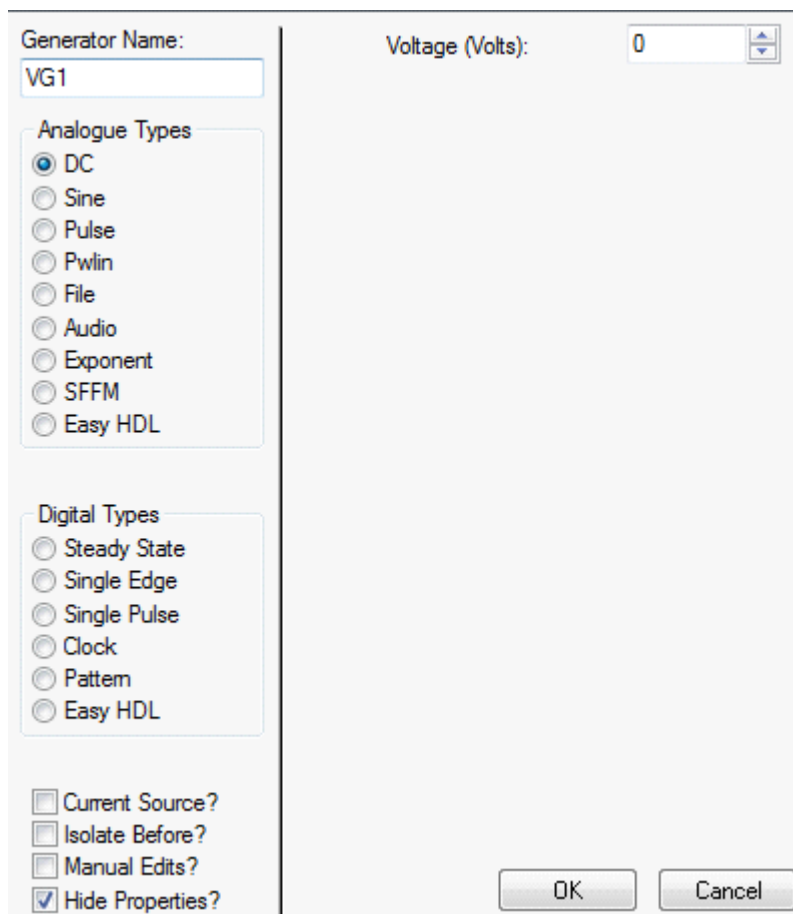


Рис.4.49. Вікно для налаштування параметрів джерела живлення.

4. Для виконання вимірів струму додаємо маркер струму на лінії IDR1.
5. Виконуємо додавання та налаштування вікна симуляції (DC TRANSFER CURVE ANALYSIS).
6. Після додавання вікна симуляції виставляємо в ньому наступні параметри (рис.4.50):
Start value -1, Stop value 10 для IDR1.
Start value -2, Stop value 0 для VG1.

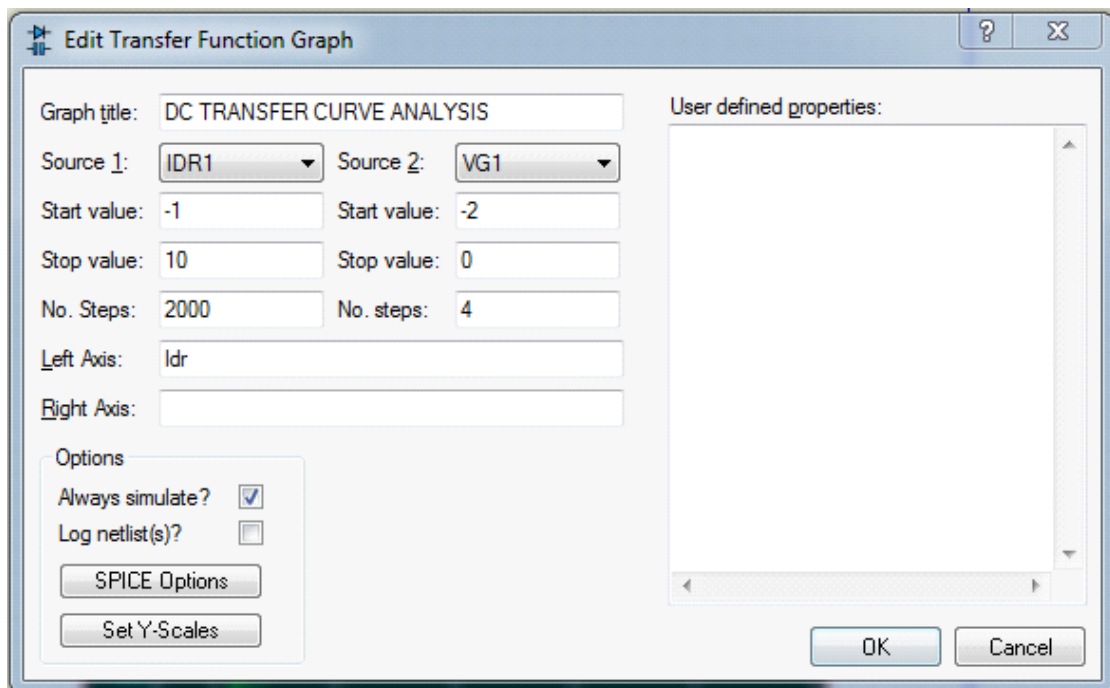


Рис.4.50. Вікно для виставлення параметрів.

7. В розділі симуляції (SPICE Options) встановимо довжину каналу 0.0001 м та таку саму ширину (рис. 4.51).

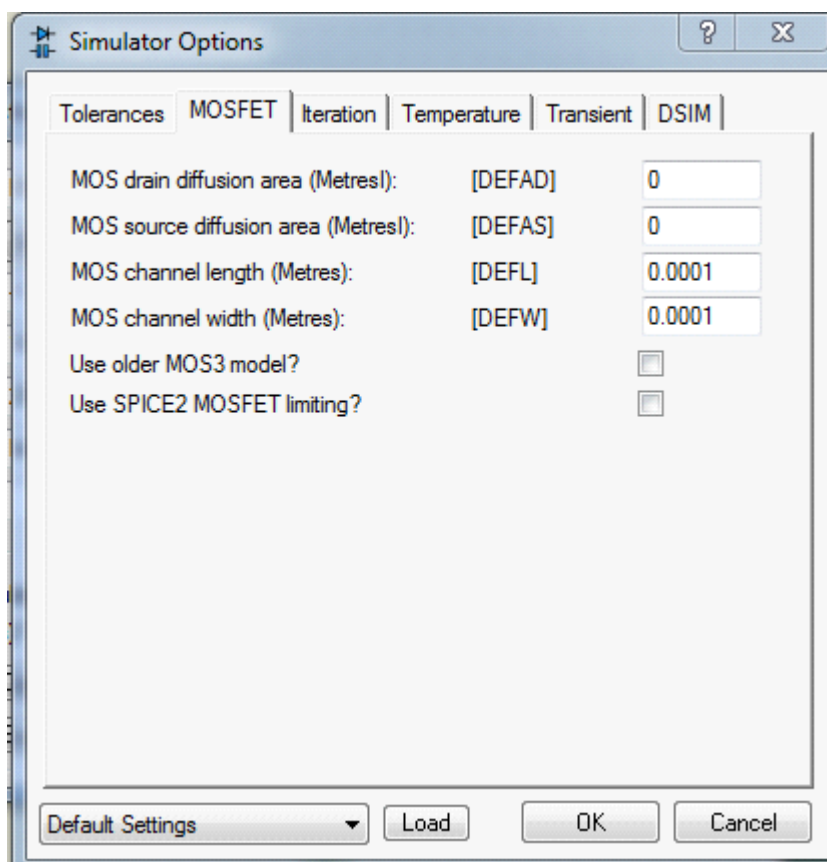


Рис. 4.51. Вікно для визначення геометричних розмірів довжини та ширини каналу транзистора.

8. Для спостереження статичних характеристик транзистора виставимо шкали по вісях. Для цього повертаємося до основного вікна налаштувань симулятора і переходимо в (SET Y-Scales), де виставляємо наступні параметри (рис.4.52).

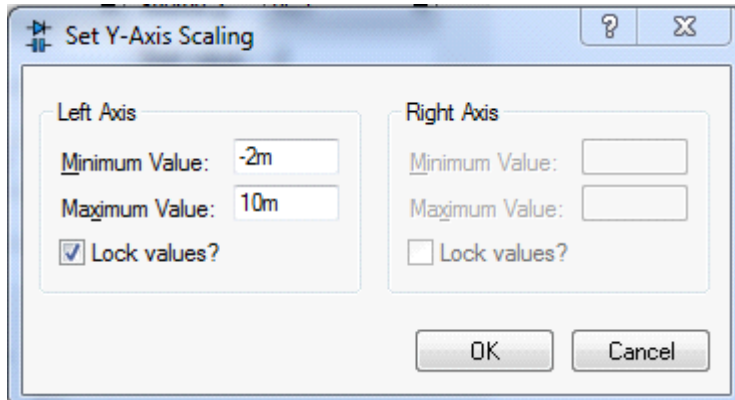


Рис.4.52. Вікно для керування шкалою вісі.

9. Вмикаємо симуляцію та спостерігаємо статичні характеристики польового транзистора (рис.4.53).

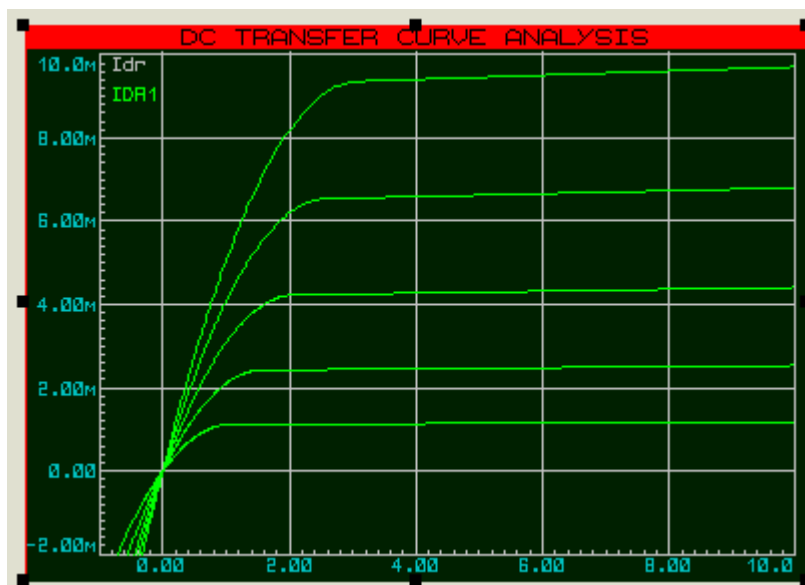


Рис.4.53. Статичні вольт-амперні характеристики польового транзистора.

Робимо розрахунки, оформлюємо звіт та робимо висновки по роботі.

4.8. Завдання 8.

Розробити схему електронного ключа на біполярному транзисторі (як приклад КТ908А). Вихідні дані до задачі: $U_{II} = 16 \text{ В}$, $R_H = 5 \text{ Ом}$, $U_{вх} = U_y = \pm 4,8 \text{ В}$. Необхідно графо-аналітично визначити опір управління в ланцюзі бази R_y , здійснити моделювання роботи схеми в середовищі Multisim або Proteus, визначити тривалість фронту t_f і зрізу імпульсу t_z вихідної напруги. Ознайомитися з роботою ключа на біполярному транзисторі можна за посиланням [4-6].

4.8.1. Приклад виконання

Схема електронного ключа приведена на рисунку 4.54.

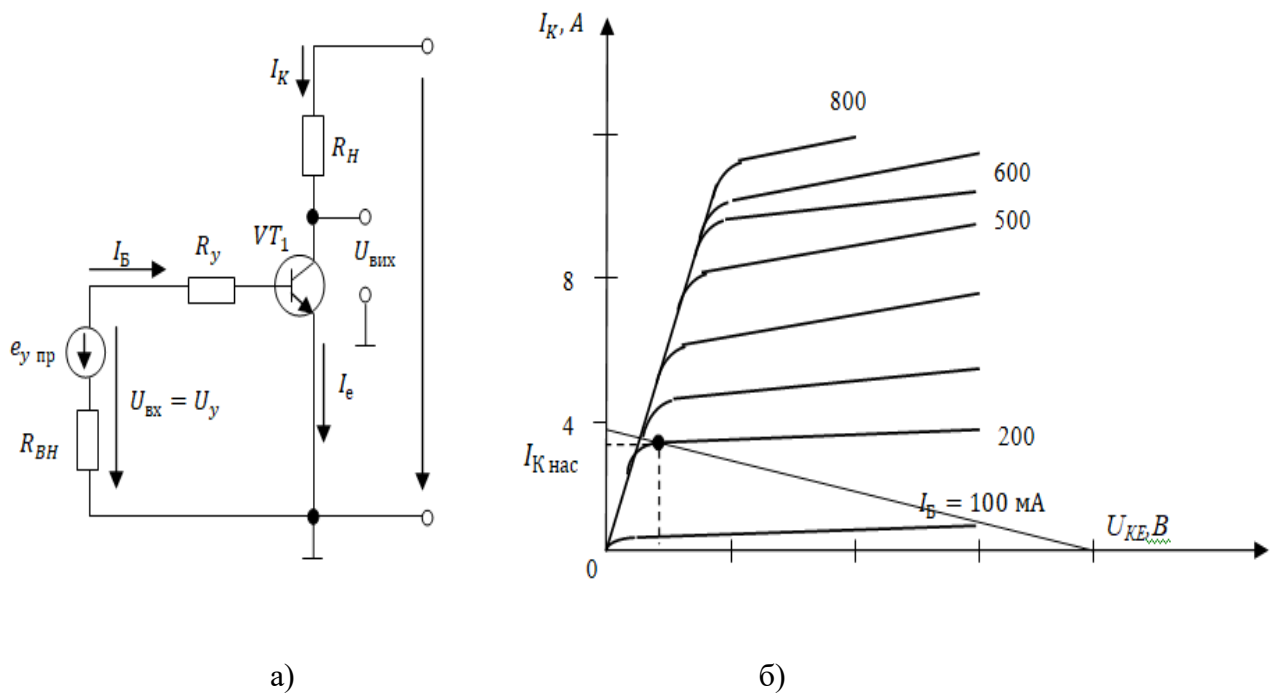


Рис.4.54. Схема електронного ключа (а) і вихідні характеристики біполярного транзистора (б).

Параметри транзистора КТ908А (аналог 2N3879): статичний коефіцієнт передачі струму біполярного транзистора в схемі із загальним емітером - $h_{21э} = 25$; постійна напруга між виводами емітера і бази при заданому

зворотному струмі колектора, рівному нулю - $U_{B_0} = 0,6 \text{ В}$; постійний зворотний струм колектора - $I_{K_0} = 20 \text{ мА}$; опір ланцюга бази $r_B = 1,5 \text{ Ом}$.

На вихідних характеристиках транзистора проведемо навантажувальну пряму. Вона пройде через точки $U_{KE} = U_{II} = 16 \text{ В}$ и $I_{ке} = U_{II}/R_H = \frac{16}{5} = 3,2 \text{ А}$.

Визначимо параметри вхідного ланцюга транзистора (опір R_y), котрі забезпечують його ввімкнений стан в режимі насичення, з рівняння:

$$-U_{y_{нас}} + I_{B_{нас}}R_y + U_{BE} = 0,$$

звідки

$$R_y = \frac{U_{y_{нас}} - U_{BE}}{I_{B_{нас}}} = \frac{U_{y_{нас}} - (U_{B_0} + I_{B_{нас}} \cdot r_B)}{I_{B_{нас}}},$$

$$\text{де } I_{B_{нас}} = \left(I_{K_{нас}} / \beta_{21Э} \right) \cdot q_{нас},$$

$q_{нас}$ – коефіцієнт насичення. Визначає перевищення базового струму насичення транзистора над його граничним значенням $I_{B_{гр}}$. Приймається $q_{нас}$ рівним 1,5...2,0. $I_{K_{нас}}$ – струм колектора насичення. Із графіка (рис. 4.54, б) $I_{K_{нас}} = 3 \text{ А}$, тоді $I_{B_{нас}} = 3/25 \cdot 1,5 = 0,18 \text{ А}$.

Підставляючи відповідні значення в рівняння (2), отримаємо:

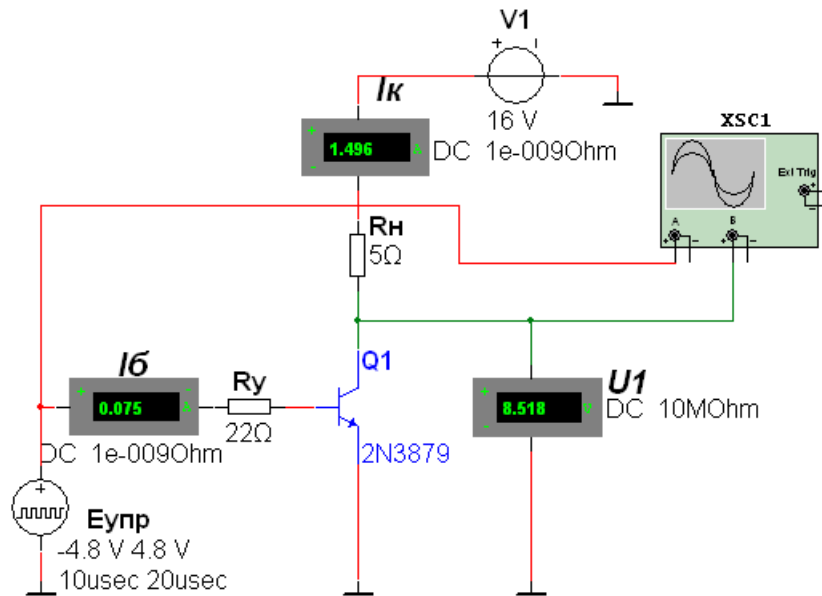
$$R_y = \frac{4,8 - (0,6 + 0,18 \cdot 1,5)}{0,18} = 21,8 \text{ Ом}.$$

Обираємо $R_y = 22 \text{ Ом}$ зі стандартного ряду E24.

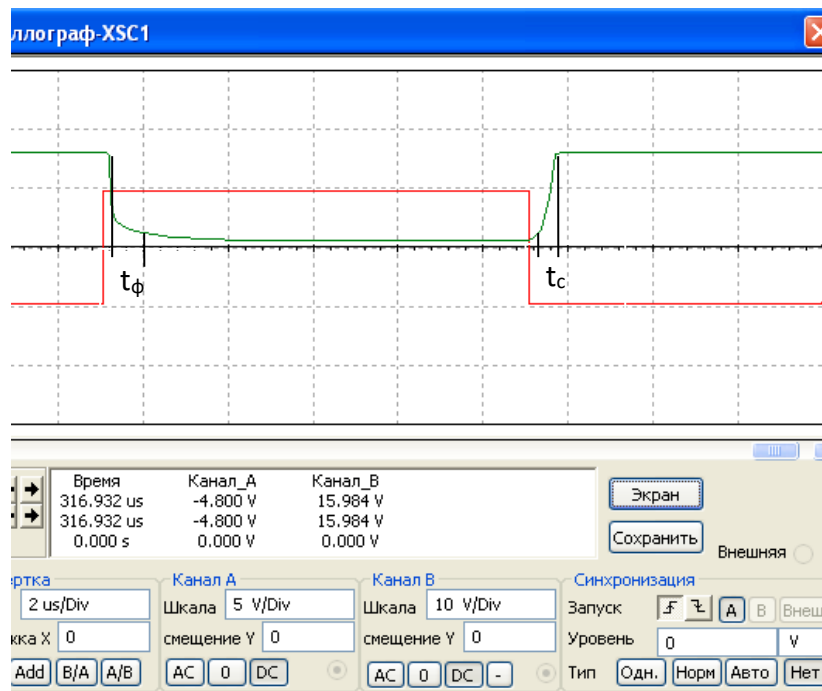
Визначаємо параметри вхідного ланцюга, що забезпечують режим замикання транзистора (режим відсічки). Для забезпечення режиму глибокої відсічки опір R_y має задовольняти нерівності:

$$R_y < \frac{U_{y_{зап}}}{I_{K_0}} = \frac{4,8}{20 \cdot 10^{-3}} = 240 \text{ Ом}.$$

Остаточно вибираємо $R_y = 22 \text{ Ом}$. Модель електронного ключа в середовищі Multisim приведена на рисунку 4.55.



а)



б)

Рис.4.55. Модель схеми електронного ключа а) і часові діаграми роботи б).

В результаті моделювання визначаємо: час фронту $t_\phi = 0,8 \text{ мкс}$, час зрізу $t_3 = 0,5 \text{ мкс}$.

4.8.2. Інструкція до виконання роботи в середовищі Proteus

Хід виконання.

1. Зібрати схему, показану на рис. 4.56. Номінал резистора **R1** та напругу джерел живлення **Eu** та **Ek** обрати самостійно у межах 1..10 кОм та 0 ... 10 В, у якості **Q1** обрати транзистор.

Додання транзистора **Q1**: натискаємо «**Component Mode**», «**P**» і у меню бібліотеки обираємо вкладку «**Transistors**», де вибираємо потрібний транзистор.

Додання резистора **R1**: натискаємо «**Component Mode**», «**P**» і у меню бібліотеки обираємо вкладку «**Resistors**», де вибираємо потрібний резистор. Опір резистора можна змінити у його властивостях(подвійне натиснення на ньому або ПКМ і «**Edit Properties**»).

Для додання джерела живлення у схему у лівому боці вікна натиснути «**Generator Mode**» і обрати «**DC**». Після вибору натискаємо ще раз на робочому полі і розміщуємо джерело живлення. Виставляємо напругу джерела (подвійне натиснення або ПКМ на елементі, «**Edit Properties**»). Встановимо **Eu = 5В** та **Ek = 10В**.

Для додання «землі» можна обрати «**Terminals Mode**», «**GROUND**» або ПКМ на робочому полі, «**Place**», «**Terminal**», «**GROUND**».

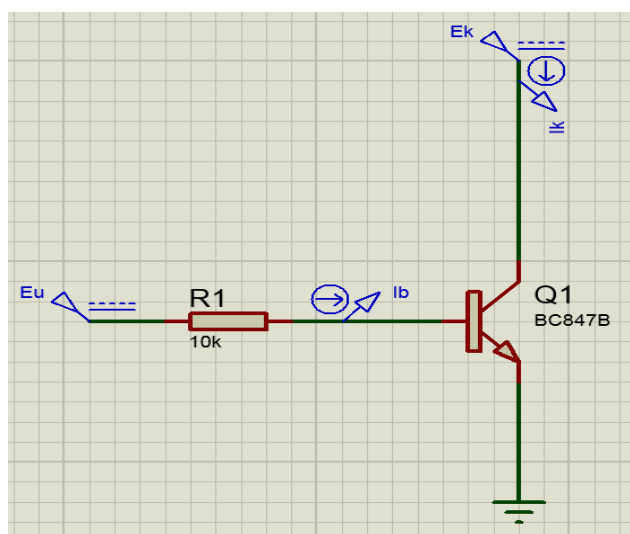


Рис. 4.56. Схема для дослідження.

Далі додаємо у схему контрольні точки – пробники струму, щоб можна було побудувати ВАХ транзистора. Для цього обираємо «**Probe Mode**», «**CURRENT**» або ПКМ, «**Place**», «**Probe**», «**CURRENT**».

Примітка: проба струму має бути орієнтована так, щоб стрілка в ній співпадала з напрямом струму, інакше програма може вивести помилку. Для перевірки правильності підключення і взагалі наявності підключення можна запустити симуляцію схеми кнопкою, що знаходиться у нижньому лівому куті.

2. Треба отримати вихідні ВАХ транзистора. Для цього необхідно додати елемент, який графічно зобразить ВАХ транзистора. Обираємо «**Graph Mode**», «**TRANSFER**» і наносимо прямокутник необхідного розміру біля схеми. Тепер необхідно задати джерела розгортки (source 1,2) та додати контрольну точку **Ik** для відображення. Для додання джерела розгортки двічі натискаємо на граф або ПКМ, «**Edit Properties**» і в «**Source1**» обираємо «**Ek**». Початкове значення (Start value) залишаємо незмінним. Кінцеве значення (Stop value) встановлюємо 10. Аналогічну операцію виконуємо для «**Source2**» обираючи «**Eu**». Початкове значення залишаємо 0 а кінцеве 5, кількість кроків (No. steps) обираємо 5.

Примітка: Перше джерело «**Ek**» відповідає вісі абсцис у ВАХ транзистора. Кінцеве значення задає кількість поділок ціною в $1V$ на цій вісі. Друге джерело «**Eu**» відповідає різним струмам I_b . В даному випадку кінцеве значення відповідає 5 з кроком в $1V$, тобто ми створили сімейство ВАХ транзистора з п'ятьма струмами бази.

3. Додання контрольної точки: ПКМ, «**Add Traces**» або комбінацією клавіш **Ctrl+T** і у «**Probe P1**» вказуємо **Ik**. Для відображення даних натискаємо один раз на графік і натискаємо «**Space**». Результат наведених дій відображено на рисунку 4.57.

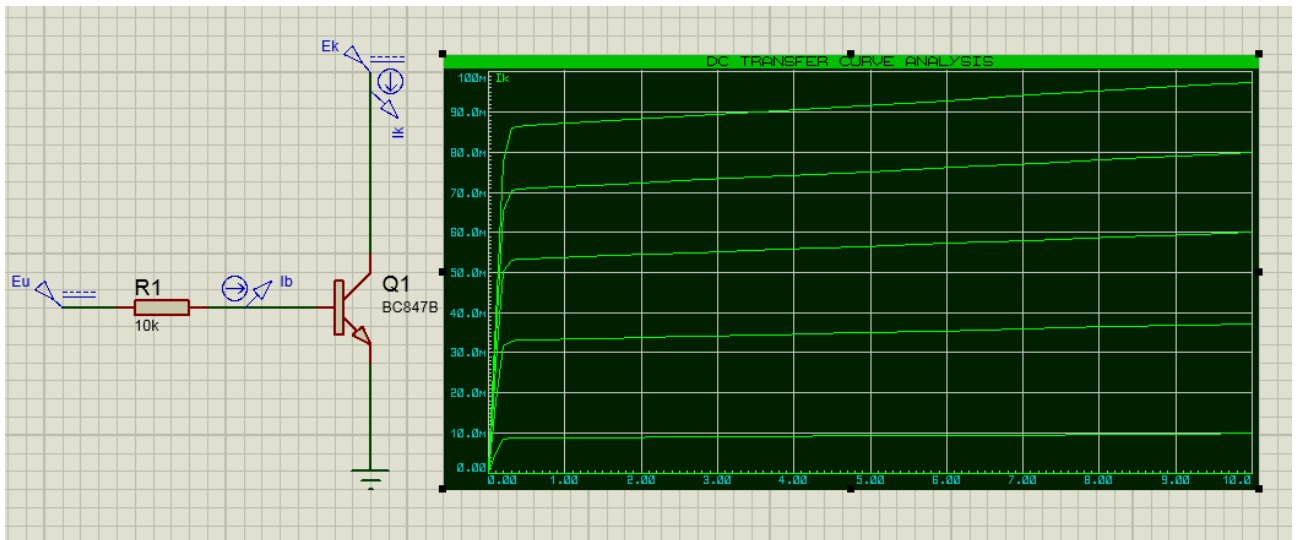


Рис.4.57. Схема з відображенням сімейства вихідних ВАХ транзистора.

Примітка: Для більш детального визначення струму при деякій напрузі по ВАХ необхідно натиснути ПКМ на графіку, «Maximize(Show Window)». Затискаючи ЛКМ, на графіку з'являється вертикальна лінія, яку може переміщувати. У лівому нижньому та правому нижньому кутах будуть показані значення напруги E_k та струму I_k при відповідній напрузі E_u для даної точки на графіку. Результат представлений на рисунку 4.58.

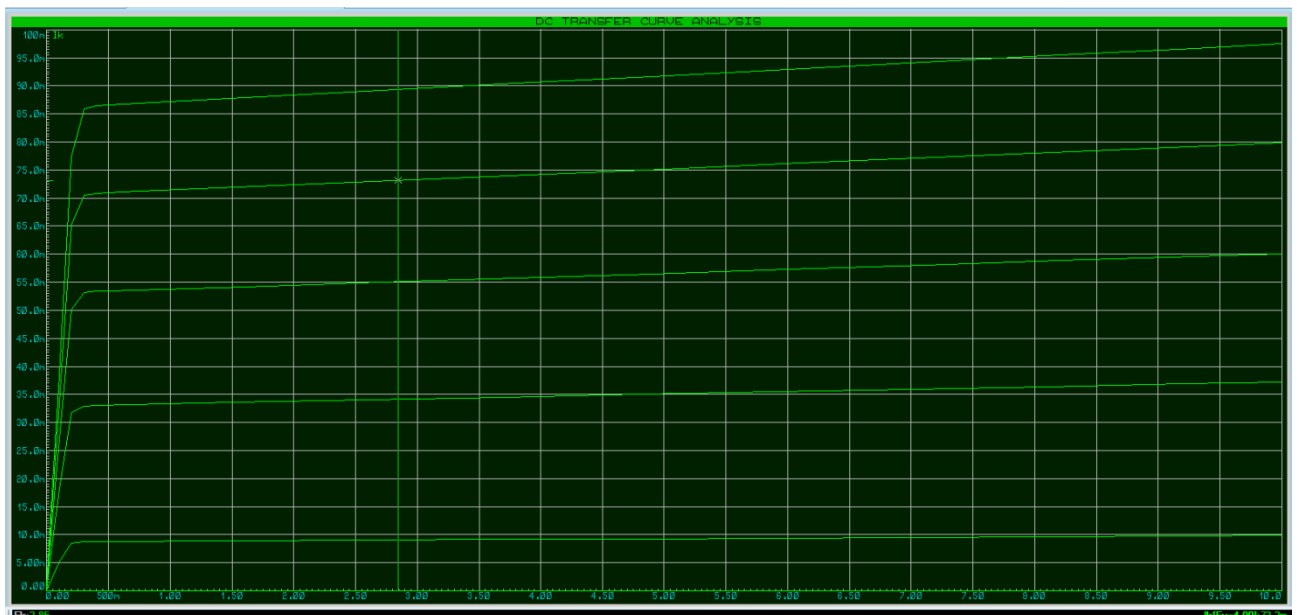


Рис.4.58. Детальне відображення ВАХ.

4. На основі отриманої ВАХ транзистора розрахуємо та промодельюємо роботу транзистора у ключовому режимі.

Примітка: будемо використовувати графоаналітичний метод визначення параметрів схеми, маючи на увазі що струм колектора та напруга живлення колектора задані споживачем. Для цього буде використана ВАХ побудована у попередньому пункті, тобто з фіксованим значенням опору бази та напруги прикладеної до переходу база-емітер (0-5В). Таке рішення викликано невідповідністю паспортних характеристик транзистора його SPICE моделі, що унеможлиблює розрахунок базового опору через коефіцієнт передачі по струму.

1. Оберемо струм колектора $I_{к.нас}$ та напругу E_K з діапазону що зображено на ВАХ транзистора (Наприклад $I_{к.нас} = 65 \text{ мА}$, $E_K = 3 \text{ В}$).

Примітка: Такі значення струму колектора та напруги живлення колектора обрані для наочності графічного методу. Насправді, при великій напрузі живлення колектора можна вважати що: $I_{к.нас} \approx I_{КЗ}$.

2. Побудуємо лінію навантаження (позначена червоним на рис. 4.59) за заданими значеннями. Вихідна ВАХ транзистора з лінією навантаження та визначеною робочою точкою зображена на рис.4.59. Видно що $I_{к.нас} \neq I_{КЗ}$, $I_{КЗ} = 69 \text{ мА}$.

3. Розрахуємо колекторний резистор транзистора за формулою:

$$R_K = \frac{E_K}{I_{КЗ}}; R_K = \frac{3}{0,069} = 43 \text{ Ом}$$

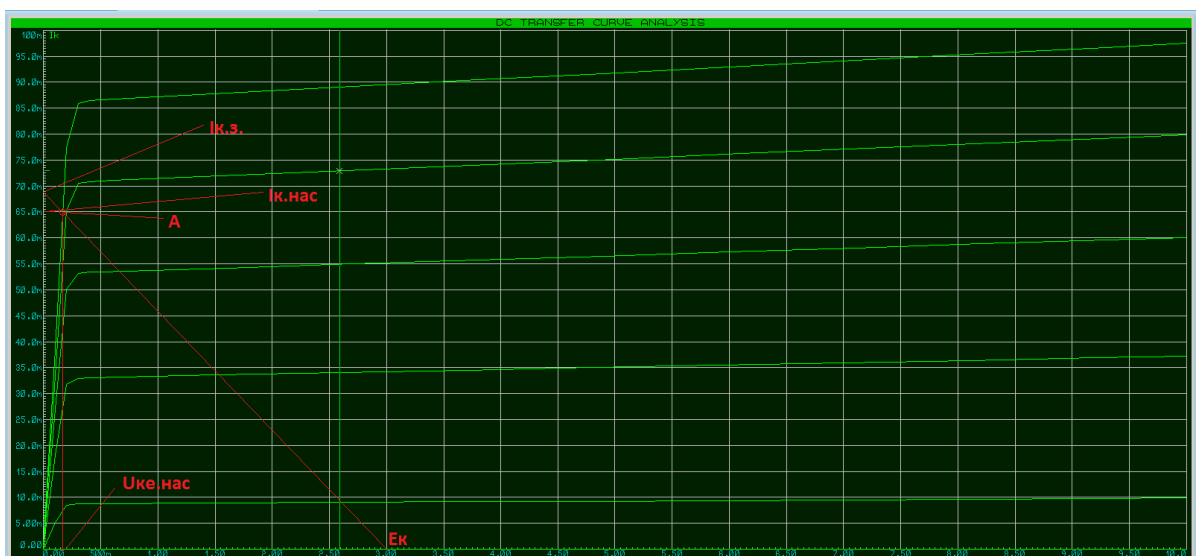


Рис.4.59. Лінія навантаження ВАХ.

4. Додамо до схеми резистор **R2** з номіналом 43 Ом. Будуємо схему зображену на рисунку 4.60.

Примітка: звернемо увагу, робоча точка розташована на 4-5 гілці вихідної ВАХ транзистора, що відповідає струму I_b при напрузі $E_u=4-5V$. Тому необхідно змінити напругу джерела E_u на значення не менше 4-х вольт.

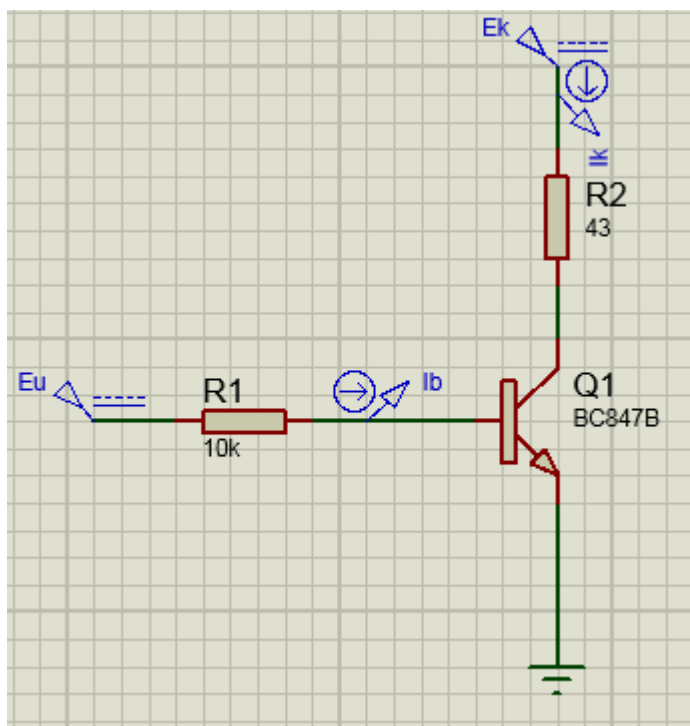


Рис.4.60. Схема з додатковим колекторним опором.

5. Проделуємо роботу схеми у режимі насичення та порівняємо отриманий I_k з розрахованим. Результати моделювання зображено на рисунку 4.61. Як ми бачимо отриманий струм I_k майже не відрізняється від струму заданого нами на початку розрахунку. Це свідчить про правильність виконаної роботи.

6. Модифікуємо нашу схему змінивши джерело постійної напруги E_u на генератор прямокутних імпульсів. Для цього у лівому боці вікна треба натиснути «**Generator Mode**» і обрати «**PULSE**». Після вибору натискаємо ще раз на робочому полі і розміщуємо генератор імпульсів. Встановимо

відсічки 600 мВ (Initial (Low) Voltage) та амплітуду прямого зміщення 4 В (Pulse (High) Voltage, частоту 50 Гц (Frequency)). Схема зображена на рисунку 4.62.

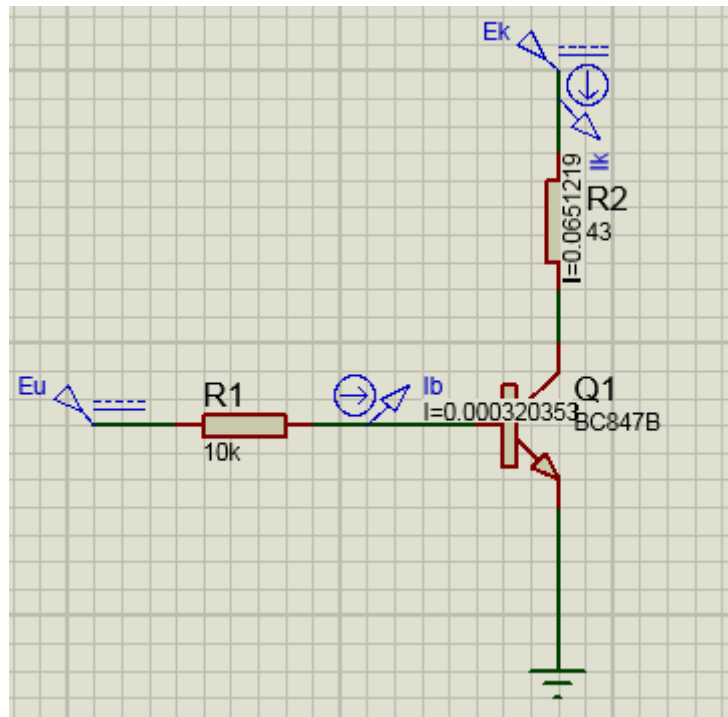


Рис.4.61. Результати моделювання схеми.

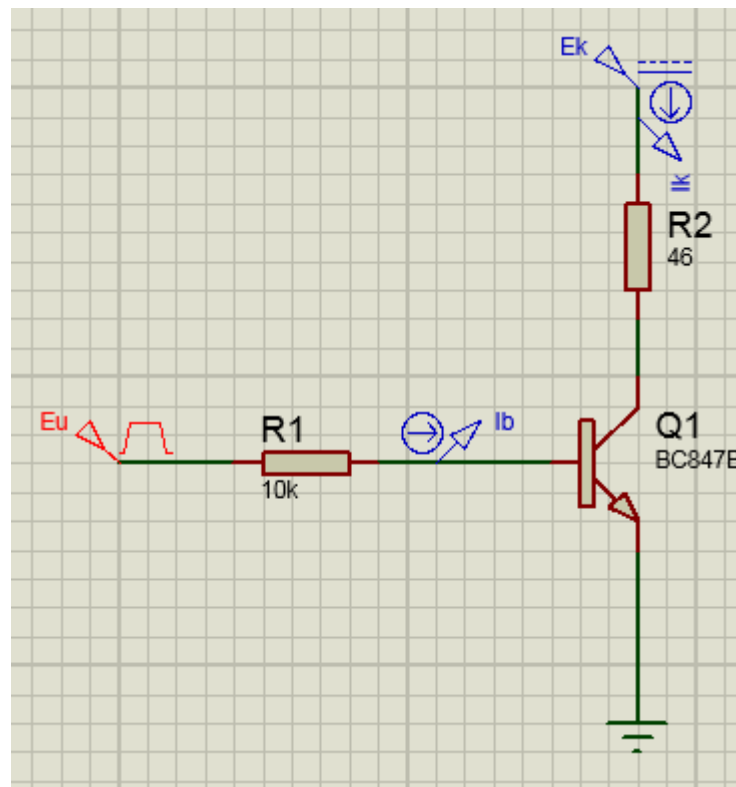


Рис.4.62. Модифікована схема.

7. Оцінимо роботу схеми за допомогою часової діаграми. Для цього обираємо «Graph Mode», «ANALOGUE» і наносимо прямокутник необхідного розміру біля схеми. Додамо по черзі пробники **I_b** та **I_k** за допомогою функції «Add Tracers», а в налаштуваннях графу «Edit Graph» встановимо початковий на кінцевий час «Start time, Stop time» відповідно 0 та 30 мс. Результат зображено на рисунку 4.63.

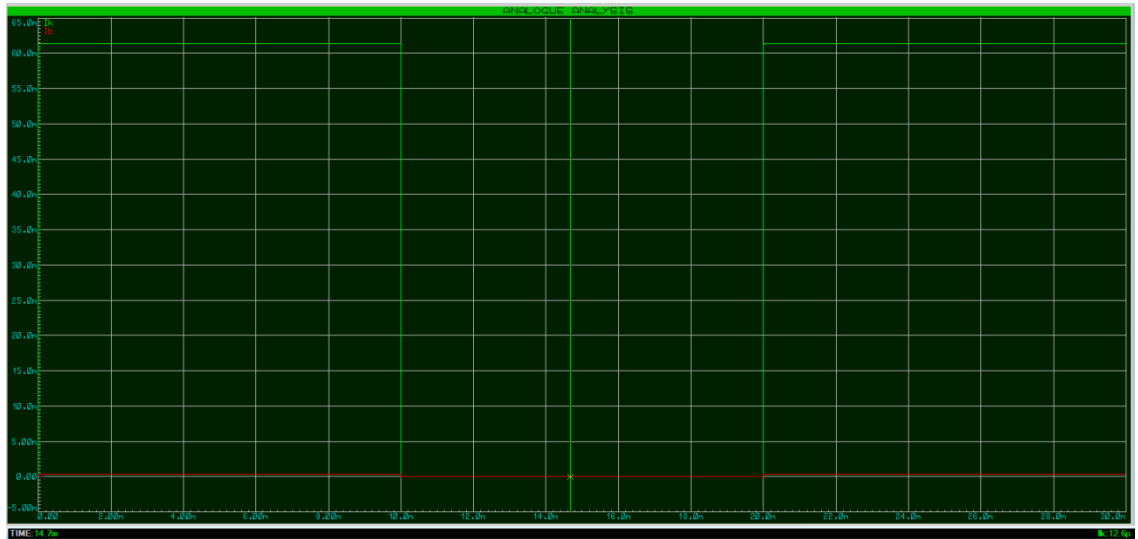


Рис.4.63. Часова діаграма роботи схеми.

Оцінити струми **I_b** та **I_k** можна за допомогою курсору, встановивши його на червону або зелену частину графіку. Струми в цьому випадку дорівнюють $I_k = 61,3 \text{ мА}$, $I_b = 321 \text{ мкА}$. Розрахуємо коефіцієнт передачі по струму для цієї схеми:

$$h_{21e} = \frac{I_k}{I_b} = \frac{61,3 \cdot 10^{-3}}{321 \cdot 10^{-6}} \approx 191$$

Як ми бачимо великий струм колектора керується маленьким струмом бази.

Оформлюємо звіт та робимо висновки по роботі.

Список рекомендованої літератури

1. Умовні графічні позначення на електричних схемах: довідник / В. Ю. Кучерук, А. М. Севастьянов, О. Г. Ігнатенко. – Вінниця: ВНТУ, 2013. – 113 с.
2. Кирина М., Фомина К. Программа схемотехнического моделирования Multisim. URL:
http://ikit.edu.sfu-kras.ru/CP_Electronics/pages/soft/multisim/manual.pdf
3. Multisim™ Руководство пользователя. URL:
<http://www.microsmart.eu/index.php?action=dlattach;topic=21.0;attach=45>
4. Основи електроніки: функціональні елементи та їх застосування. Підручник для студентів неелектротехнічних спеціальностей вищих навчальних закладів. / Стахів П. Г., Коруд В. І., Гамола О. Є. – Львів: «Новий світ - 2000»; «Магнолія плюс». – 2003. – 208 с
5. Комп'ютерна електроніка: Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. освітньої програми «Інтегровані інформаційні системи» спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології», / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: А.О. Новацький. – Електронні текстові дані (1 файл: 13.8 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 415 с.
6. Ткаченко, Ф. А. Техническая электроника / Ф. А. Ткаченко. – Минск: Дизайн ПРО, 2002. – 368 с.
7. Електронні прилади та пристрої. Частина 1. Електричні фільтри і напівпровідникові прилади: Навч. посіб. / А. М. Кулабухов, О. М. Петренко, Ю. М. Чашка. – Д.: РВВ ДНУ, 2008. – 98 с.
8. Конструювання та технологія мікроелектронної апаратури. Частина 1. Конструювання елементів мікроелектронної апаратури: навчальний посібник. / М. А. Філінюк, О. В. Войцеховська. – Вінниця: ВНТУ, 2012. – 185 с.
9. Основи схемотехніки: підручник. / О. М. Воробйова, В. Д. Іванченко. – [2-ге вид.]. – Одеса: Фенікс, 2009. – 388 с.

10. Електроніка та мікросхемотехніка: навчальний посібник для виконання лабораторних робіт. / С. О. Квітка, С. Ф. Курашкін, О. В. Соломаха. – Мелітополь, Видавнично-поліграфічний центр «Люкс», 2018. – 184 с.
11. <http://justehe525.20m.com/216319.html>
12. Галкин, В. И. Полупроводниковые приборы. Транзисторы широкого применения: справочник / В. И. Галкин, А. Л. Булычев, П. М. Лямин. – Минск: Беларусь, 1995. – 383 с.
13. Електроніка та мікросхемотехніка: посібник для виконання лабораторних і практичних занять. / С. О. Квітка, Ю. М. Федюшко, Н. Г. Косуліна, С. О. Мороз. – Х.: ХНТУСГ, 2017. – 244 с.

Додаток А
(інформаційний)

Числовий ряд опорів резисторів і конденсаторів

Числовий ряд E24, що застосовується для присвоєння номінальних значень опорів резисторів:

(1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3;
3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1)·10ⁿ,

де n = -2; -1; 0; 1; 2; 3 и т. д.