



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Міністерство освіти і науки України

Національний університет водного господарства
та природокористування

Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-
інтегрованих технологій

04-03-243

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт

з навчальної дисципліни «Електротехніка та комп'ютерна
електроніка. Частина 2. Електроніка»
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення»
денної та заочної форм навчання

Рекомендовано науково-методичною
комісією зі спеціальності 121
«Інженерія програмного забезпечення».
Протокол № 7 від 30.08.2019 р.

Рівне – 2019



Національний університет

водного господарства
та природокористування

Методичні вказівки до лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Електротехніка та комп'ютерна електроніка. Частина 2. Електроніка» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення» денної та заочної форм навчання / Рудик А. В. – Рівне : НУВГП, 2019. – 48 с.

Укладач: Рудик А. В., д.т.н., доцент, професор кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Відповідальний за випуск: Древецький В. В., д.т.н., професор, академік ІАУ, завідувач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.



Національний університет
водного господарства
та природокористування

© Рудик А. В., 2019

© НУВГП, 2019



ЗМІСТ

Вступ.....	4
Робота 1. Дослідження напівпровідникових приладів.....	5
Робота 2. Дослідження схем випрямлячів.....	23
Робота 3. Дослідження схеми випрямлення з параметричним стабілізатором напруги.....	31
Робота 4. Дослідження роботи транзисторного ключа.....	36
Робота 5. Дослідження електричних фільтрів.....	42
Перелік літератури.....	48





ВСТУП

Значні зміни в багатьох галузях науки і техніки зумовлено розвитком електротехніки, електроніки та приладобудування. Нині неможливо знайти жодної галузі промисловості, в якій не використовувалися б електронні прилади або пристрої вимірювальної техніки, автоматики та обчислювальної техніки. При цьому тенденція розвитку така, що частка електронних інформаційних пристроїв та пристроїв автоматизації невпинно збільшується. Це є результатом розвитку інтегральної технології, застосування якої дозволило налагодити масовий випуск дешевих, високоякісних мікроелектронних функціональних вузлів різного призначення, які не потребують спеціального налаштування.

Віртуальна лабораторія «Electronics Workbench» (EWB) орієнтована для вивчення дисциплін електротехнічного та електронного напрямків. Віртуальна лабораторія EWB дає добрі можливості проведення досліджень кіл постійного, однофазного і трифазного змінного струму, кіл з несинусоїдними струмами і напругами, вивчення особливостей електричних кіл з нелінійними елементами як в режимі малих сигналів, так і при дії синусоїдальних струмів і напруг. За допомогою віртуальної лабораторії легко вивчаються однофазні трансформатори, частотні і часові параметри чотириполюсників. У кожній роботі приводяться типові запитання, на які студент повинен вміти давати правильні і обґрунтовані відповіді.

Методичні вказівки для виконання лабораторних робіт містять набір лабораторних, що необхідні для успішного засвоєння курсу «Електротехніка та комп'ютерна електроніка». Всі лабораторні роботи містять мету роботи, основні теоретичні відомості, хід виконання завдання, вказівки до виконання необхідних обчислень. Завдання для самостійного опрацювання не представляють великої складності і потребують незначного часу на їх вирішення.

Запропоновані лабораторні роботи охоплюють напівпровідникові прилади, випрямлячі змінної напруги, електричні фільтри та транзисторні ключі. Всі роботи відповідають теоретичному курсу дисципліни та дають змогу практично застосувати набуті знання. Порядок наведеного матеріалу відповідає порядку його викладання на лекційних заняттях, що дозволяє студентам, які пропустили заняття, самостійно засвоїти відповідні розділи курсу.



Робота 1. Дослідження напівпровідникових приладів

1.1 Мета роботи

Експериментальне дослідження функціональних властивостей елементів напівпровідникової електроніки.

1.2. Теоретичні відомості

Діодами (diodes) називають двоелектродний прилад, основою якого є електронно-дірковий *перехід* (junction). Виготовляються діоди з кремнію, германію або арсенід галію.

Конструктивно діод є, наприклад, напівпровідником *n*-типу провідності, в якому формується методом дифузії або іншим методом *p-n* перехід. Внаслідок цього на межі розподілу *p* і *n* областей утворюється *p*-область *p-n* переходу. Одна із областей (рис. 1.1), в даному випадку область *p*, характеризується більш високою концентрацією носіїв заряду і меншим об'ємом і називається емітерною областю, а інша характеризується значно меншою провідністю і називається базовою областю.

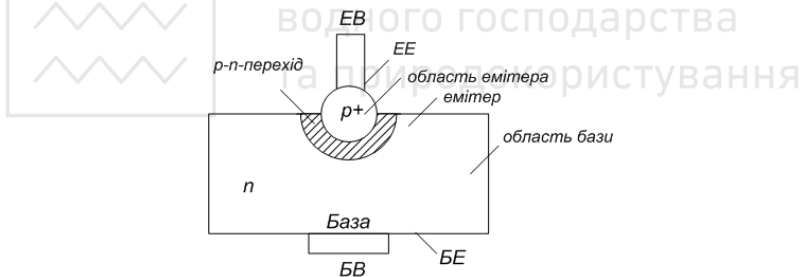


Рис. 1.1. Области діода

Тому при проходженні прямого струму носії інжектуються переважно з емітера в базу. База і емітер за допомогою спеціальних електродів емітерного (ЕЕ) і базового (БЕ), які забезпечують омичний контакт, з'єднуються з металевими виводами (ЕВ, БВ), за допомогою яких діод вмикається в електричне коло.

Основною властивістю діода є його одностороння провідність. В залежності від матеріалу, з якого виготовляється база, діоди можна розділити на германієві, кремнієві та арсенід галієві. Останні використовуються, як правило, для виготовлення НВЧ діодів.

В залежності від діапазону робочих частот діоди можна розділити на низькочастотні з граничною частотою до 3 МГц, середньої частоти



з межевою частотою від 3 МГц до 30 МГц, високочастотні з межевою частотою з 30 МГц до 300 МГц, і надвисокочастотні з межевою частотою більше 300 МГц.

В залежності від величини випрямленого струму діоди діляться на малопотужні з допустимим струмом до 1 А, середньої потужності зі струмом від 1 А до 10 А та силові вентиля з величиною допустимого струму більше 10 А. В залежності від області використання розрізняють: випрямні, універсальні та імпульсні діоди; випрямні стовпи та блоки; стабілітрони, варикапи, високочастотні діоди, тунельні та зворотні діоди; імпульсні діоди, надвисокочастотні діоди і діоди Шоткі; світловипромінюючі діоди.

Для силових вентилів використовується окреме маркування.

Маркування малопотужних діодів та діодів середньої потужності. Як правило, використовують маркування, яке складається з 5 або 6 елементів. Перший елемент маркування – (літера або цифра), яка визначає матеріал, з якого виготовляється напівпровідниковий діод: Г, 1 – германій; К, 2 – кремній; А, 3 – арсенід галію.

Якщо використовується цифра, то це вказує на те, що діод має покращені температурні характеристики.

Якщо використовуються літери, то допустима робоча температура для германієвих діодів становить 60 °С, для кремнієвих 85 °С. Якщо використовуються цифра, то допустима температура для германієвих діодів становить 70 °С, для кремнієвих – 120 °С.

Другий елемент характеризує область використання діода:

Д – випрямні універсальні імпульсні діоди;

Ц – випрямні стовпи і блоки;

С – стабілізатори і стабістори;

А – НВЧ діоди;

В – варикапи;

І – тунельні і зворотні діоди;

Л – світловипромінювальні діоди.

Третій елемент (цифровий) характеризує призначення діода або його електричні властивості.

Маркування діодів низької, середньої та високої частоти

Випрямні діоди малої потужності ($I_{\text{сер}} < 0,3\text{А}$) – 1; середньої потужності ($I_{\text{сер}} < 0,3 \dots 10\text{А}$) – 2; універсальні (з граничною частотою до 1000 МГц) – 4.

Імпульсні діоди з часом відновлення зворотного опору: більш як



150 нс – 5; від 30 до 150 нс – 6; від 5 до 30 нс – 7; від 1 до 5 нс – 8; менше 1 нс – 9.

Випрямні стовпи: малої потужності ($I_{\text{сеп}} < 0,3 \text{ A}$) – 1; середньої ($I_{\text{сеп}} = 0,3 \div 10 \text{ A}$) – 2; випрямні блоки: ($I_{\text{сеп}} < 0,3 \text{ A}$) – 3, ($I_{\text{сеп}} = 0,3 \div 10 \text{ A}$) – 4.

Для стабілітронів і стабісторів:

Малої потужності ($P_{\text{роз макс}} < 0,3 \text{ Вт}$) $U_{\text{ст}} < 10 \text{ В}$ – 1; $U_{\text{ст}} = 10 \dots 99 \text{ В}$ – 2; з допустимою потужністю розсіювання менше 0,3 Вт і напругою стабілізації $U_{\text{ст}} = 100 \dots 199 \text{ В}$ – 3.

Середньої потужності ($P_{\text{макс}} = 0,3 \dots 5 \text{ Вт}$); $U_{\text{ст}} < 10 \text{ В}$ – 4; $U_{\text{ст}} = 10 \dots 99 \text{ В}$ – 5; $U_{\text{ст}} = 100 \dots 199 \text{ В}$ – 6.

Високої потужності ($P_{\text{макс}} = 2 \dots 25 \text{ Вт}$); $U_{\text{ст}} < 10 \text{ В}$ – 7; $U_{\text{ст}} = 10 \dots 99 \text{ В}$ – 8; $U_{\text{ст}} = 100 \dots 199 \text{ В}$ – 7.

Вольт-амперна характеристика діода

Властивостями р-n переходу визначаються всі найважливіші параметри і характеристики напівпровідникового діода. Реальна характеристика діода наведена на рис. 1.2.

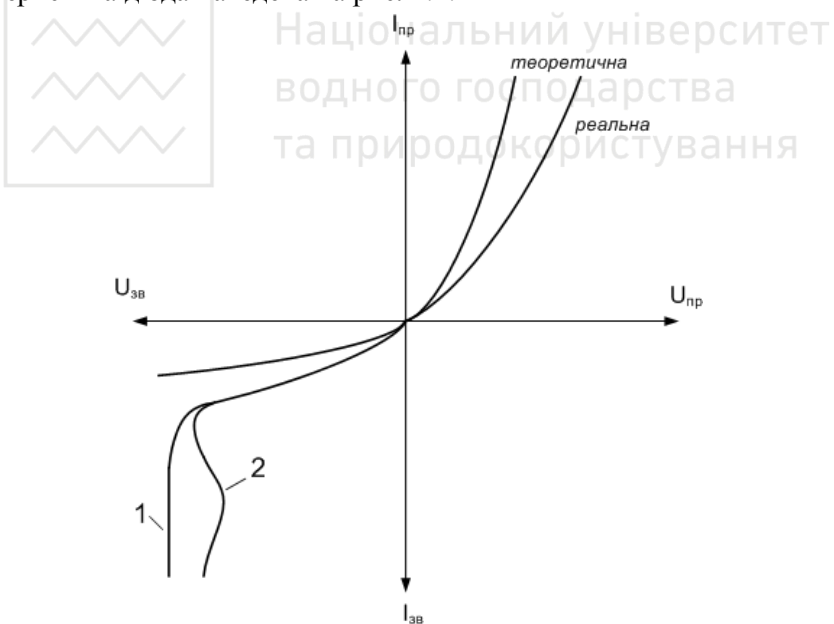


Рис. 2.2. Вольт-амперні характеристики діода:

1 – при електричному пробі, 2 – при тепловому пробі

В області малих струмів теоретична і реальна характеристика збігаються. При великих прямих струмах та при великих зворотних



напругах характеристики розходяться, що є наслідком ряду причин, неврахованих при теоретичному аналізі процесів в р-п переході. При великих прямих струмах стає значним спад напруги на омичному розподіленому опорі бази діода і опору електродів. При цьому напруга на р-п переході буде меншою напруги, прикладеної до діода, в результаті реальна характеристика розміщується нижче теоретичної і є майже лінійною. Рівняння реальної ВАХ, яка враховує цей спад напруги, має вигляд

$$I = I_0 e^{\frac{e}{kT}(U - Ir)},$$

де r – опір бази та електродів діода.

При збільшенні зворотної напруги струм діода не залишається постійним, рівним струму екстракції I_0 , а повільно збільшується. Однією з причин росту зворотного струму діода є термічна генерація носіїв в переході. Компоненту зворотного струму через перехід, яка залежить від кількості генерованих в переході носіїв, називають термострумом.

Другою причиною зростання зворотного струму діода є поверхнева провідність р-п переходу, зумовлена молекулярними та іонними плівками різного походження, що покривають зовнішню поверхню переходу. В сучасних діодах поверхня переходу обробляється і захищається від зовнішніх впливів, тому струм витікання завжди значно менший термоструму.

Пробій діода. При великій зворотній напрузі струм діода починає різко зростати. Це явище називається пробоем. Відмітимо, що пробій супроводжується виходом з ладу діода лише в тому випадку, коли виникає надмірний перегрів переходу та виникають невідновні зміни його структури. Якщо ж потужність, що виділяється на діоді, підтримується на допустимому рівні, він зберігає робоздатність. Для деяких діодів пробій є основним режимом роботи.

Розрізняють пробій електричний та тепловий. В обох випадках ріст струму пов'язаний зі збільшенням кількості носіїв заряду в переході. При електричному пробое ріст кількості носіїв, обумовлений цим полем і ударною іонізацією атомів решітки. При тепловому пробое збільшення струму обумовлено термічною іонізацією атомів.

При електричному пробое в результаті ударної іонізації починається лавинне розмноження носіїв і кількість носіїв n_0 , що залиша-



ють перехід, виявляється більшою кількістю носіїв n , що поступають до переходу. Це відношення називають коефіцієнтом лавинного розмноження

$$M = \frac{n}{n_0}.$$

Досліди дають таку залежність коефіцієнта лавинного розмноження від напруги

$$M = \frac{1}{I - \left(\frac{U}{U_L}\right)^n},$$

де U_L – напруга лавинного пробію, яка залежить від роду матеріалу, його питомого опору ρ і типу переходу.

При електричному пробію можуть мати місце обидва механізми: тунельний і лавинний. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) діода при електричному пробію показана на рис. 1.2 – крива 1.

Величина напруги пробію залежить від стану зовнішньої поверхні переходу, де можуть утворюватись заряди того чи іншого знаку, які зменшують чи збільшують результуючу напруженість поля біля поверхні порівняно з її значенням в об'ємі.

В даному випадку напруга пробію на поверхні може бути в декілька разів нижче, ніж по об'єму. Це підкреслює важливість стабілізації властивостей поверхні напівпровідника, захисту його від дії навколишнього середовища.

Тепловий пробій виникає внаслідок нагрівання переходу струмом, що проходить через нього, при недостатньому тепловідведенні, який забезпечує стійкість теплового режиму переходу.

В режимі постійного струму потужність, що підводиться до переходу, визначається величиною зворотної напруги $U_{зв}$ і величиною зворотного струму $I_{зв}$

$$P_{підв} = U_{зв} \cdot I_{зв}.$$

Ця потужність йде на нагрівання переходу, в результаті чого температура переходу зростає. При цьому зростає концентрація носіїв в p - n структурі і зворотний струм переходу, що в свою чергу, приводить до збільшення потужності, що підводиться. Збільшення потужності викликає нове підвищення температури переходу та ін. ВАХ при тепловому пробію має вигляд (рис. 1.2, крива 2). Вона має



спадний характер, оскільки внаслідок росту температури переходу концентрація носіїв в ньому різко зростає і електричний опір переходу зменшується відносно швидше, ніж зростає струм переходу.

Вплив температури на характеристики діода

При збільшенні температури різко зростає концентрація неосновних носіїв в напівпровідниках і, як наслідок, зворотний струм переходу I_0 . Вольт-амперні характеристики діода для різних температур наведені на рис. 1.3.

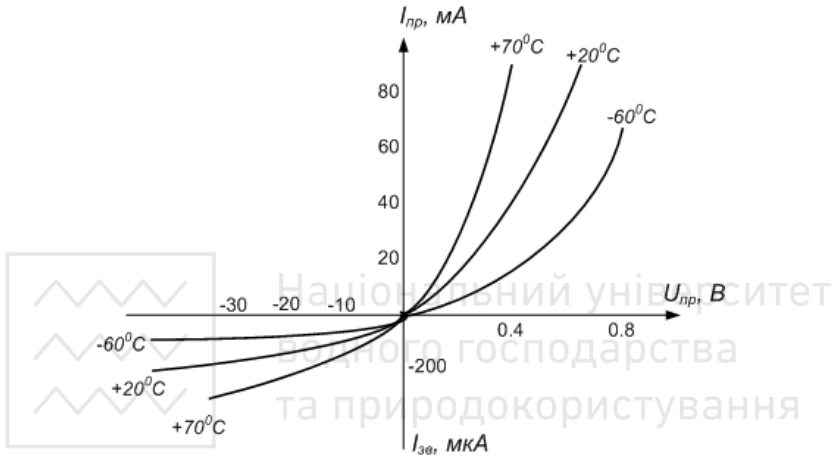


Рис. 1.3. Вольт-амперні характеристики діода для різних температур

Пряма гілка характеристики змінюється з ростом температури відносно мало. Вплив температури на характеристики більш значніші в Ge діодів, оскільки вони мають меншу енергію іонізації, ніж Si і їх власна провідність з ростом температури зростає швидше. Максимальна температура Ge діода 80...100 °С, для Si 150...200 °С.

Мінімальна робоча температура визначається енергією іонізації акцепторних і донорних домішок і теоретично становить -200°С. Практично мінімальна робоча температура обмежується $-(60\div 70)^\circ\text{C}$.

Напівпровідникові стабілітрони – це діоди на зворотній гілці ВАХ яких є відрізок зі слабкою залежністю напруги від струму, тобто стабілітрон працює в режимі електричного пробую. Величина напруги пробую, або напруга стабілізації, залежить від опору базової області діода. Якщо необхідно отримати напругу стабілізації до 3 В, то використовуються вузькі р-п переходи і має місце тунельний механізм пробую. Якщо необхідно отримати напругу стабілізації



від 3 В до 7 В, то може використовуватись лавинний і тунельний механізми пробую. При напругах стабілізації більше 7 В використовуються широкі р-п переходи і лавинний механізм пробую. На електричних схемах напівпровідникові стабілітрони позначаються як показано на рис. 1.4.

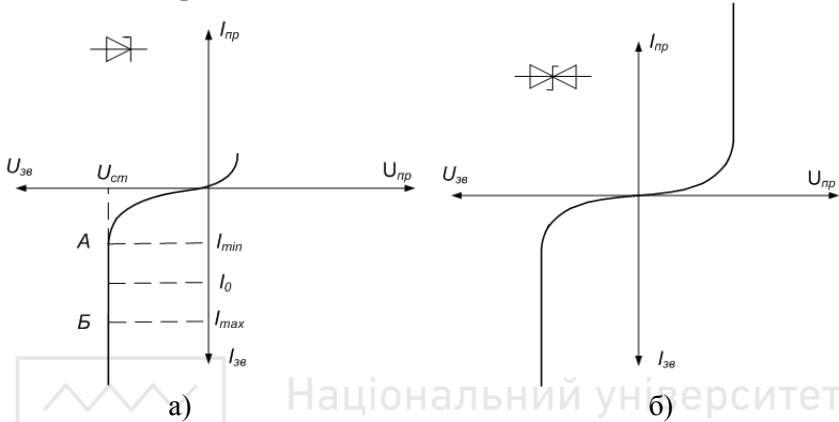


Рис. 1.4. Односторонній стабілітрон і його ВАХ (а); двосторонній стабілітрон і його ВАХ (б)

Основними характеристиками напівпровідникових стабілітронів є напруга стабілізації $U_{ст}$ і струм стабілізації $I_{ст}$, динамічний опір і температурний коефіцієнт напруги.

Величина динамічного (диференціального) опору характеризує нахил робочої області і, інакше кажучи, ступінь стабільності напруги стабілізації при зміні струму стабілізації.

В залежності від динамічного опору напівпровідникові стабілітрони можна розділити на дві групи: регулюючі (загального призначення) і опорні (прецизійні).

Регулюючі в основному використовуються в стабілізаторах і обмежувачах постійної та імпульсної напруги. Прецизійні є джерелами еталонної напруги в схемах, де потребується високий ступінь стабілізації напруги.

Температурний коефіцієнт напруги (ТКН) стабілітрона показує, як змінюється відносна напруга стабілізації при зміні температури на 1°C при постійному струмі стабілізації.

У низьковольтних стабілітронах ТКН негативний ($U_{ст} < 5,4\text{ В}$). В більш високовольтних – ТКН позитивний. В таких стабілітронах



для зниження ТКН паралельно зі стабілітроном, що працює в нормальному режимі (зворотному), вмикають один або декілька стабілітронів, що працюють при прямій напрузі. Це зумовлено тим, що пряма гілка ВАХ має негативний ТКН. Замість стабілітронів можна вмикати і звичайні випрямляючі діоди. До параметрів стабілітронів слід віднести також коефіцієнт стабілізації $K_{ст}$, який визначається як відношення відносної зміни напруги на вході до відносної зміни напруги на виході стабілітрона. В електричне коло стабілітрон вмикається за схемою, наведеною на рис. 1.5.

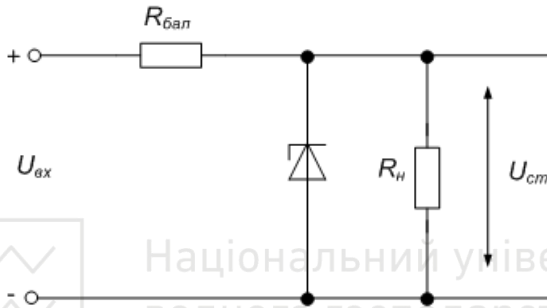


Рис. 1.5. Схема включення стабілітрона

Принцип роботи стабілізатора напруги полягає в тому, що при зміні напруги на вході змінюється струм, що протікає через стабілітрон, а напруги на стабілітроні та опорі навантаження будуть постійними. При цьому змінюється спад напруги на балансовому опорі $R_{бал}$. Стабілізація забезпечується за умови, що при максимальній зміні $U_{вх}$ струм, який протікає через стабілітрон, не виходить за межі $I_{max} - I_{min}$ (рис. 1.4, а). Величина балансового опору $R_{бал}$ вибирається так, щоб при номінальній напрузі на вході струм стабілітрона дорівнював деякому середньому значенню I_0 .

Слід відмітити, що для виготовлення стабілітронів з невеликими напругами стабілізації (0,3...1 В) використовується пряма гілка ВАХ $p-n$ переходу. Такі прилади називаються стабісторами.

Особливу групою серед напівпровідникових стабілітронів є кремнієві симетричні обмежувачі напруги (КСОН) або двосторонні стабілітрони (рис. 1.4, б), які характеризуються симетричною ВАХ відносно початку координат та можуть бути використані для усунення перенапруження в приладах перетворювальної техніки, в потужних обмежувачах напруги. Ці прилади випускаються на робочі напруги до 5000 В при струмі до 1 А.



Транзистором (transistor) називають електроперетворювальний

напівпровідниковий прилад, який складається, як правило, із двох $p-n$ переходів. Являє собою тришарову структуру, в якій крайні електроди утворені напівпровідником з електропровідністю, відмінною від електропровідності середнього електрода. Якщо як базу використовують напівпровідник p -типу, то емітер і колектор повинні мати провідність n -типу. Тоді одержимо транзистор $n-p-n$ структури або транзистор зворотної провідності (рис. 1.6, б).

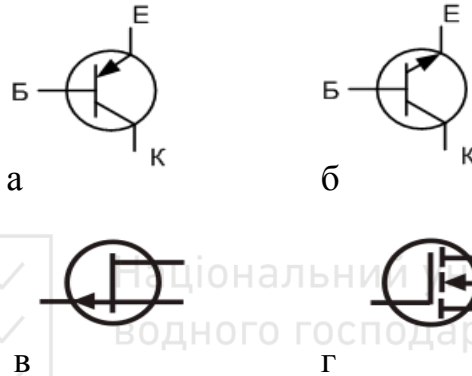


Рис. 1.6. Умовні позначення транзисторів на електричних схемах:

- а) – біполярний транзистор прямої провідності; б) біполярний транзистор зворотної провідності; в) польовий транзистор з $p-n$ переходом і каналом p -типу; г) МОН-транзистор з індукованим n -каналом

Матеріалом для бази може служити не лише германій, але і кремній. Транзистор є зворотним приладом, це означає, що колектор може виконувати функції емітера. Але властивості приладу в прямому і зворотному (інверсійному) напрямках різні, оскільки емітер і колектор відрізняються розмірами і електрофізичними властивостями.

Статичні параметри біполярних транзисторів

Як елемент електричної схеми транзистор завжди використовується таким чином, що один із його електродів є вхідним, другий вихідним, а третій – спільним. В залежності від того, який електрод є спільним, розрізняють три схеми ввімкнення: зі спільною базою (СБ), спільним емітером (СЕ) та спільним колектором (СК). Схеми вмикання наведені на рис. 1.7.

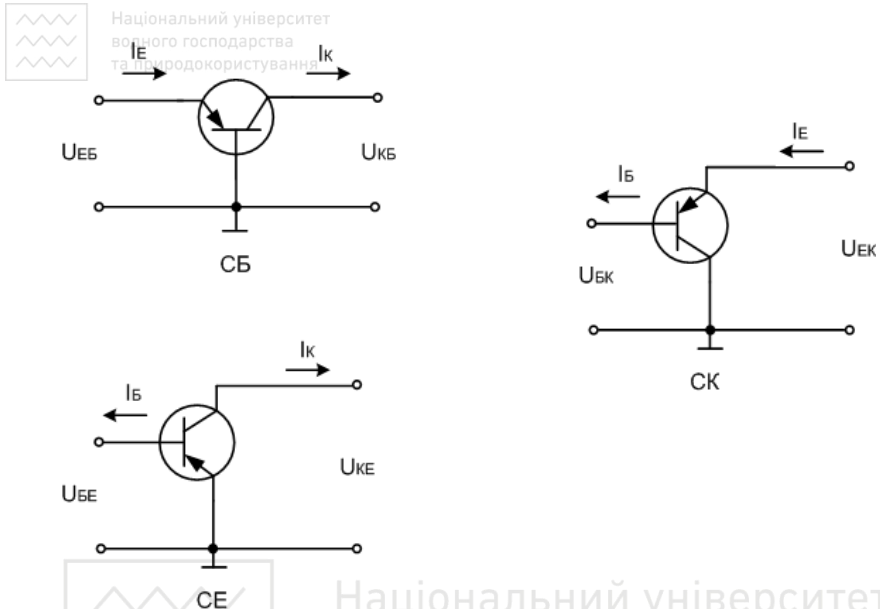


Рис. 1.7. Схеми вмикання транзистора

Одним із основних параметрів транзистора є коефіцієнт передачі за струмом, який являє собою відношення зміни вихідного струму до зміни вхідного струму.

Для схеми зі СБ вхідним є струм емітера I_E , а вихідним струм колектора I_K . Оскільки струм колектора завжди менший струму емітера, то коефіцієнт передачі струму менший одиниці і знаходиться в межах від 0,95 до 0,97.

В схемі зі СЕ струм бази I_B є вхідним, а I_K – вихідним. Оскільки струм бази значно менший струму колектора, то коефіцієнт передачі струму значно більший одиниці і може становити декілька десятків одиниць для транзисторів середньої та високої потужності та 100 і більше для транзисторів малої потужності.

Коефіцієнт передачі за струмом для схеми зі СК також визначається відношенням приросту вихідного струму dI_E до вхідного dI_B . Схема зі СК забезпечує максимальне підсилення по струму.

Важливим параметром транзистора є об'ємний опір бази. База транзистора виконується в основному з високоомного матеріалу, тому її об'ємний опір r_{δ} в роботі транзистора відіграє значну роль. Величина r_{δ} визначається в основному опором її активного відрізка, а саме того шару бази, що знаходиться між емітером та колектором.



Режими роботи і статичні характеристики біполярних транзисторів. Поряд з описаним активним режимом транзистор в ряді імпульсних, ключових та інших схем транзистор може працювати в режимі відсікання або в режимі насичення.

В режимі відсікання обидва переходи зміщені в зворотному напрямку, отже через них течуть зворотні струми.

При підключенні обох батарей в прямому напрямку транзистор працює в режимі насичення – обидва переходи відкриті, а інжекція носіїв в базу має місце як з боку емітера, так і з боку колектора.

Розрізняють також ще інверсний режим роботи, при якому емітерний перехід зміщений в зворотному напрямі, тобто закритий, а колекторний – в прямому, тобто відкритий. Коефіцієнт передачі в інверсному режимі значно менший ніж в активному режимі, оскільки концентрація носіїв заряду в емітері значно вища концентрації носіїв в колекторній області.

Для кожної схеми включення існує чотири види статичних характеристик: вихідні, керуючі (характеристики прямої передачі), вхідні та прохідні (характеристики зворотного зв'язку).

Керуючі та вхідні характеристики, як правило, зображаються у вигляді однієї-двох кривих, що зумовлено слабкою залежністю вихідного струму від вхідної напруги $U_{\text{вих}}$.

Для кожної схеми ввімкнення з чотирьох видів характеристик незалежними є тільки дві. Тому, як правило, для аналізу використовуються тільки вхідні і вихідні характеристики.

Вхідна характеристика для схеми зі спільною базою є залежністю струму емітера I_E від напруги між емітером і базою U_{EB} при постійній нарузі між колектором і базою $U_{KB} - I_E = f(U_{EB})$ при $U_{KB} = const$ (рис. 1.8). Оскільки I_E практично не залежить від U_{KB} , то такі характеристики розміщуються дуже близько одна біля одної і вони зображаються однією або двома лініями.

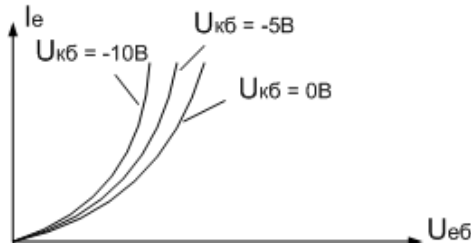


Рис. 1.8. Вхідна характеристика для схеми зі ББ



Вихідна характеристика для схеми зі СБ є залежністю струму колектора I_K від напруги між колектором і базою при постійному струмі емітера I_E (рис. 1.9): $I_K = f(U_{KB})$ при $I_E = const$.

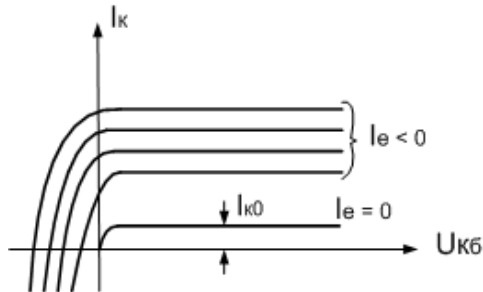


Рис. 1.9. Вихідні характеристики транзистора для схеми зі СБ

Вихідні характеристики майже паралельні осі напруг. Наявність невеликого нахилу пояснюється тим, що колекторна напруга має слабкий кінцевий вплив на рух носіїв до колекторного переходу. Кожна характеристика різко зростає в області, близькій до пробою.

При ввімкненні транзистора за схемою з СЕ статичні характеристики описуються залежностями:

$$\begin{aligned} I_K &= f(U_{KE}); & I_B &= const - \text{вихідна характеристика;} \\ I_B &= f(U_{BE}); & U_{KE} &= const - \text{вхідна характеристика.} \end{aligned}$$

Вихідні характеристики для схеми з СЕ мають великий нахил в порівнянні з характеристиками для схеми з СБ, що пояснюється більш сильним впливом U_K на коефіцієнт передачі струму.

Крім того, при вмиканні транзистора за схемою з СЕ на величину I_K має вплив ефект лавинного множення носіїв в колекторному переході. Тому різке збільшення струму колектора в передпробійній області починається для схеми з СЕ при більш низьких напругах, ніж в схемі з СБ. Цим зумовлюється той факт, що допустима колекторна напруга для схеми з СЕ менша в порівнянні зі схемою з СБ.

Можна показати, що мінімальне значення колекторного струму $I_K = I_{K0}$ має місце при струмі бази: $I_B = -I_{K0}$.

Звідси випливає, що транзистор в схемі з СЕ в діапазоні струмів бази від 0 до $-I_{K0}$ керується негативним вхідним струмом.

Вхідні характеристики схеми з СЕ мають такий самий вигляд, що і для схеми з СБ і розміщуються близько одна біля одної, тому при розрахунках, як правило, використовують одну характеристику.



На відміну від схеми з СБ вхідні характеристики схеми з СЕ більш лінійні.

Характеристики схеми з СК багато в чому спільні з характеристиками схеми з СЕ, оскільки в обох схемах вхідним є струм бази, а вихідні (I_E , I_K) відрізняються мало. Тому для практичних розрахунків як вихідні характеристики схеми з СК можна використовувати вихідні характеристики схеми з СЕ, якщо замінити I_K на I_E . Вхідні характеристики схеми з СК за формою збігаються з вхідними характеристиками схеми з СЕ, але зміщені по осі напруг праворуч на величину спаду напруги на колекторному переході.

1.3. Порядок виконання роботи

1. Запустити програму *EWB*.
2. Зібрати схему для дослідження параметрів напівпровідникових діодів.
3. З бібліотеки компонентів джерел живлення Sources на робоче поле помістити джерело постійної напруги та заземлення.
4. З бібліотеки пасивних компонентів Basic на робочому полі розмістити постійний резистор, підстроювальний резистор та ключ.
5. З бібліотеки індикаторних пристроїв Indicators розмістити на схемі амперметри та вольтметри.
6. З бібліотеки Diodes на поле викласти напівпровідниковий діод.
7. Всі компоненти з'єднати за схемою рис. 1.10 та встановити необхідні параметри компонентів.

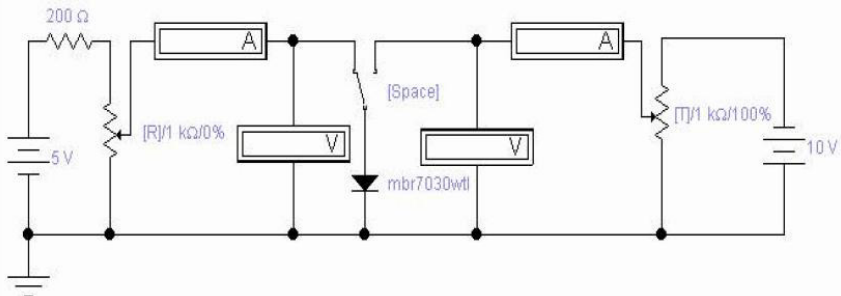


Рис. 1.10. Схема для дослідження напівпровідникових діодів

8. Зняти вольт-амперні характеристики (ВАХ) діода. Для цього необхідно змінювати значення змінних резисторів від 10% до 100% з кроком 10%. Збільшення можна виконувати натисканням клавіші "R", зменшення – "Shift+R". Крок збільшення / зменшення можна



ЗМІНЮВАТИ.

9. Дослідити пряму гілку діода. Для перемикання ключа використовується клавіша Space (Пропуск).

10. Дослідити зворотну гілку ВАХ діода (тип діода відповідно до варіанту наведений в таблиці 1.1).

11. Отримані дані занести в таблицю 1.2 (точність вимірювання – два знаки після коми).

Таблиця 1.1. Тип діода відповідно до варіанту

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Тип діода	1N4001	1N4148	KD102A	KD202D	KD512A	KD521A	Q2D103A	Q2D503A	Q2D521A	Q2D522A	BY228	BY396P	BY500-100	BY500-600	BYM12-100	BYM12-400	BYM10-600

№ вар.	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Тип діода	BYM11-100	1N6095	200CNQ	240NQ	444CNQ	D10MQ060	D180NQ	D80SQ	D1N4001	D1N5402	D1N3208	D3N246	MBR1540	MR810	MBR340	1N4009	BA221

Таблиця 1.2. Результати дослідження діода

Пряма гілка	U, мВ																
	I, мА																
Зворотна гілка	U, В																
	I, мкА																

12. Побудувати графік ВАХ діода.

13. Змінити робочу температуру діода (для цього необхідно клацнути двічі на позначенні діода у вікні “Diode Properties”, вибрати вкладку “Analysis Setup” і встановити температуру 60°C) та повторити дослідження ВАХ діода.

14. Зібрати схему для дослідження параметрів стабілітрона (рис. 1.11). Дана схема аналогічна схемі для дослідження параметрів напівпровідникових діодів. З бібліотеки Diodes на робоче поле поміс-

типи стабілітронів.

15. Зняти ВАХ стабілітрона, змінюючи значення опору змінного резистора від 0% до 100% з кроком 20%.

16. Дослідити пряму гілку ВАХ стабілітрона (тип стабілітрона відповідно до варіанту наведений в таблиці 1.3). Для перемикання ключа використовувати клавішу Space (Пропуск).

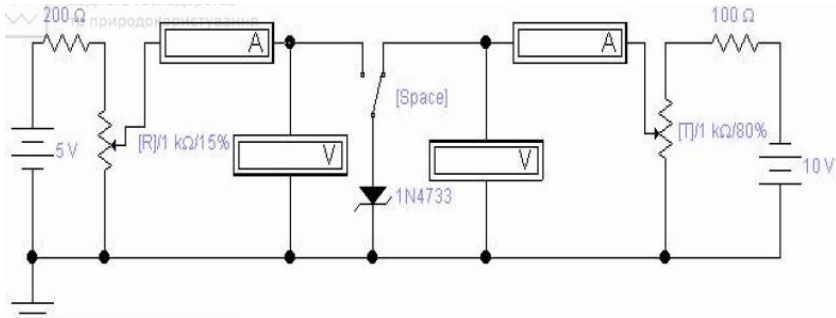


Рис. 1.11. Схема для дослідження напівпровідникових стабілітронів

17. Дослідити зворотню гілку ВАХ стабілітрона.

18. Отримані дані занести в таблицю 1.4 (точність вимірювання – два знаки після коми).

Таблиця 1.3. Тип стабілітрона відповідно до варіанту

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Тип стабілітрона	1N4733	GLL4735	Z4KE100	BZX55C10	1N4370A	BZX79C10	GLL4740	BZX55C2V4	Z4KE120	1N4731A	BZX85C36	GLL4760	MZ4100	BZX55C51	Z4KE170	BZX79C18	SML4740

№ вар.	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Тип стабілітрона	BZX85C9V1	Z4KE200	BZX55C20	SML4756	1N989B	BZX55C2V7	BZV49-C10	BZX79C3V6	ZGL41-100	MZ4622	BZX85C22	ZGL41-200	1N4762A	BZX55C27	ZGL41-160	BZV85-C4V3	BZX85C11



19. Побудувати ВАХ стабілітрона.

20. Змінити температуру роботи стабілітрона та повторити відповідні досліди.

Таблиця 1.4. Результати дослідження стабілітрона

Пряма гілка	U, мВ							
	I, мА							
Зворотна гілка	U, В							
	I, мкА							

21. З бібліотеки транзисторів Transistors розмістити на робочому полі р-п-р транзистор згідно варіанту (таблиця 1.5). Зібрати схему для дослідження параметрів транзистора (рис. 1.12).

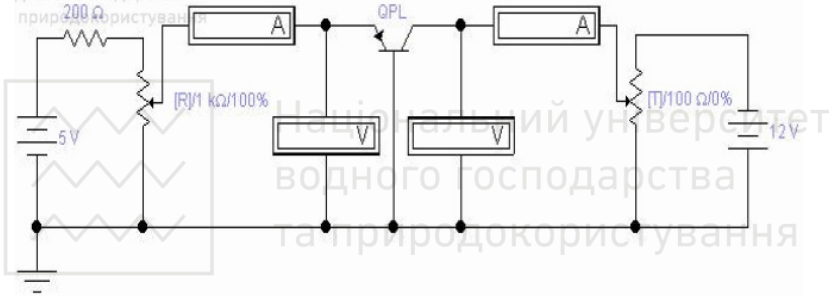


Рис. 1.12. Схема для дослідження параметрів біполярного транзистора

Таблиця 1.5. Тип біполярного транзистора відповідно до варіанту

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Тип БТ	2N2218	D44C7	BD239	Q2N3442	TP100	2N2222	BC107A	D72F5T1	BD241A	BC238	GE10023	BSS71	BD550B	2N3904	Q2N5038	MJ16012	BDY90

№ вар.	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Тип БТ	TP41	Q2N5630	BUW41A	MM3001	RCA6340	BUX21	MUN5233T1	2N4401	Q2N6059	BUY69C	TP50	RCA9228A	D40C1	Q2N6576	MP3904	MPS6602	D40E5



22. Зняти сімейство вхідних і вихідних характеристик біполярного транзистора, змінюючи значення змінного резистора від 0% до 100% з кроком 20%. Отримані результати занести до таблиці 1.6 (точність вимірювання складає два знаки після коми).

Таблиця 1.6. Результати вимірювань параметрів біполярного транзистора

	$U_{KB}=12\text{ В}$ ($R_2=100\%$)	$U_{KB}=9.6\text{ В}$ ($R_2=80\%$)	$U_{KB}=7.2\text{ В}$ ($R_2=60\%$)	$U_{KB}=4.8\text{ В}$ ($R_2=40\%$)	$U_{KB}=2.4\text{ В}$ ($R_2=20\%$)	$U_{KB}=0\text{ В}$ ($R_2=0\%$)
$I_E, \text{ мА}$ ($R_1=100\%$)						
$I_E, \text{ мА}$ ($R_1=80\%$)						
$I_E, \text{ мА}$ ($R_1=60\%$)						
$I_E, \text{ мА}$ ($R_1=40\%$)						
$I_E, \text{ мА}$ ($R_1=20\%$)						
$I_E, \text{ мА}$ ($R_1=0\%$)						
	$I_K, \text{ мА}$	$I_K, \text{ мА}$	$I_K, \text{ мА}$	$I_K, \text{ мА}$	$I_K, \text{ мА}$	$I_K, \text{ мА}$
	$U_{BE}, \text{ В}$	$U_{BE}, \text{ В}$	$U_{BE}, \text{ В}$	$U_{BE}, \text{ В}$	$U_{BE}, \text{ В}$	$U_{BE}, \text{ В}$
	$U_{KE}, \text{ В}$	$U_{KE}, \text{ В}$	$U_{KE}, \text{ В}$	$U_{KE}, \text{ В}$	$U_{KE}, \text{ В}$	$U_{KE}, \text{ В}$

23. Побудувати графіки вхідних та вихідних характеристик біполярного транзистора: $I_E = f(U_{BE})_{I_{KB}=const}$; $I_K = f(U_{KB})_{I_E=const}$.

24. За характеристиками транзистора визначити параметри його еквівалентної схеми h_{11B} та h_{21B} при $U_{KB} = 0$ та $I_E = 3.24 \text{ мА}$.

25. Змінити робочу температуру транзистора на 70°C та повторити дослідження за пунктами 22 і 23.

1.3. Зміст звіту

1. Тема, мета роботи.
2. Порядок виконання роботи.
3. Результати розрахунків, досліджувані схеми, таблиці з результатами вимірювань.
4. Графіки знятих характеристик, осцилограми напруг.
5. Розв'язання завдання відповідно до п.24.



6. Висновки.

1.5. Контрольні запитання

1. Назвіть основні матеріали для виготовлення діодів.
2. Що характеризує температурний коефіцієнт напруги?
3. Для чого призначені випрямні діоди?
4. Чим відрізняються вольт-амперні характеристики кремнієвих та германієвих діодів?
5. Наведіть означення напівпровідникового діода та галузь його застосування.
6. Яка гілка ВАХ діода називається робочою?
7. В чому полягає принципова різниця між діодом та стабілітроном?
8. Наведіть електричну схему елементарного параметричного стабілізатора напруги.
9. Охарактеризуйте та наведіть форму вхідних та вихідних характеристик транзистора для схеми з спільним емітером.
10. Наведіть основну властивість напівпровідникового діода.
11. Яку гілку ВАХ напівпровідникового діода називають прямою і які особливості використання діоди на ній?
12. Яку гілку ВАХ напівпровідникового діода називають зворотною і які особливості використання діоди на ній?
13. Який параметр діода визначається за прямою гілкою його ВАХ?
14. Який параметр діода визначається за зворотною гілкою його ВАХ?
15. Охарактеризуйте основні параметри напівпровідникового діода, які визначають його вибір при використанні в електричній схемі.
16. Чому в деякому діапазоні спад напруги на діоді залишається практично незмінним при зміні струму через діод в широких межах?
17. Запишіть рівняння, що визначає залежність струму через діод від спаду напруги на переході.



Робота 2. Дослідження схем випрямлячів

2.1 Мета роботи

Дослідження схем, властивостей та принципів використання найпростіших випрямлячів змінної напруги.

2.2. Теоретичні відомості

Випрямні пристрої (випрямлячі) відносяться до вторинних джерел електроживлення, для яких первинними джерелами є мережі змінного струму. Випрямлячі використовуються для перетворення змінної напруги живлення мережі в постійну.

Випрямляч у більшості випадків складається з трансформатора живлення змінної напруги, вентилів, які випрямляють змінну напругу, та згладжувального фільтра. Вентиль являє собою нелінійний елемент, опір якого в прямому напрямку в 100÷1000 разів менше, ніж у зворотному. На сучасному етапі розвитку електроніки в основному використовуються напівпровідникові вентилі.

Основними параметрами випрямлячів є напруга та частота мережі, їх відхилення від номінальних значень, повна потужність, споживана від мережі при номінальному навантаженні, номінальний струм навантаження та його можливі відхилення від номінального значення, номінальна вихідна напруга, а також коефіцієнт пульсацій вихідної напруги.

Коефіцієнт пульсацій вихідної напруги K_{Π} являє собою відношення подвоєної амплітуди пульсацій $2U_{m,\Pi}$ до номінальної вихідної напруги U_0 :

$$K_{\Pi} = \frac{2U_{m,\Pi}}{U_0} \cdot 100\% .$$

Подвоєна амплітуда пульсацій вимірюється як сума амплітуд позитивної та негативної півхвиль змінної складової вихідної напруги.

Схеми випрямлячів. Випрямлячі для приймально-підсилювальних пристроїв використовуються із згладжувальним фільтром, який починається з конденсатора (рис. 2.1). Хоча такі випрямлячі мають низький ККД у порівнянні з випрямлячами, які працюють на індуктивне навантаження, вони дозволяють одержувати менший коефіцієнт пульсацій при однакових габаритних розмірах фільтра. Випрямлячі, які працюють на ємнісне навантаження, використовують



для отримання випрямлених напруг від одиниць вольт до десятків кіловольт.

Випрямлячі без згладжувального фільтра використовуються нечасто, наприклад, для живлення реле та в інших випадках, коли коефіцієнт пульсацій вихідної напруги не має суттєвого значення. Однопівперіодну (однофазну) схему (рис. 2.1, а) використовують при вихідних потужностях до 10 Вт та немає жорстких вимог до коефіцієнта пульсацій. Частота пульсацій вихідної напруги в такій схемі дорівнює частоті мережі. Двопівперіодну (двофазну) схему (рис. 2.1, б) використовують при вихідних потужностях до сотень Вт та вихідних напругах до 500 В. Частота пульсацій випрямленої напруги в такій схемі в два рази більше частоти мережі.

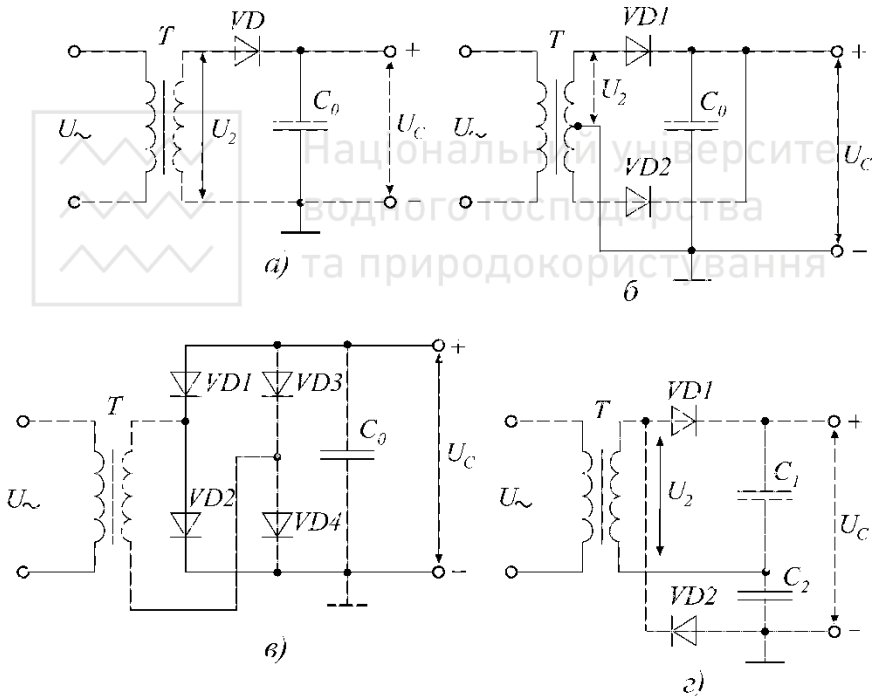


Рис. 2.1. Схеми випрямлячів: а – однопівперіодна; б – двопівперіодна; в – однофазна мостова; г – симетрична з подвоєнням напруги

Однофазна мостова схема (рис. 2.1, в) характеризується достатнім використанням потужності трансформатора, тому рекомендується при вихідних потужностях до 1000 Вт та більше. Зворотна



напряга на вентилях в такій схемі в два рази менша, ніж в одно– та двопівперіодній схемах випрямляча. Напряга на вторинній обмотці трансформатора в мостовій схемі приблизно в два рази менша, ніж в двопівперіодній з середнім виводом обмотки, а частота пульсацій така сама.

Симетричну схему з подвоєнням напруги (рис. 2.1, г) використовують при вихідних потужностях до 1000 Вт та вихідних напругах вище 600 В. При однакових вихідних напругах напруга на вторинній обмотці трансформатора в схемі з подвоєнням майже в два рази менша, ніж в мостовій. Зворотна напруга на вентилях для даної схеми приблизно така сама, як в мостовій, а частота пульсацій вихідної напруги в два рази більша частоти мережі.

Згладжувальні фільтри включають між випрямлячем та навантаженням для зменшення пульсацій (змінної складової) випрямленої напруги. Найбільш часто використовують фільтри, що складаються з дроселя та конденсатора (рис. 2.2, а) або з резистора та конденсатора (рис. 2.2, б). Якість фільтра оцінюють коефіцієнтом згладжування пульсацій $q = \frac{K_{П.вх}}{K_{П.вих}}$, де $K_{П.вх}$ та $K_{П.вих}$ – відповідно

коефіцієнти пульсацій на вході та виході згладжувального фільтра). Припустиме значення коефіцієнта пульсацій на виході фільтра $K_{П.прип}$ залежить від типу навантаження. У випадку живлення перших каскадів ПНЧ з високою чутливістю (наприклад, мікрофонних підсилювачів) $K_{П.прип}$ складає (0.00001 ÷ 0.00002), попередніх каскадів – (0.0001 ÷ 0.001), вихідних каскадів – (0.0005 ÷ 0.001), електронних стабілізаторів напруги – (0.005 ÷ 0.03).

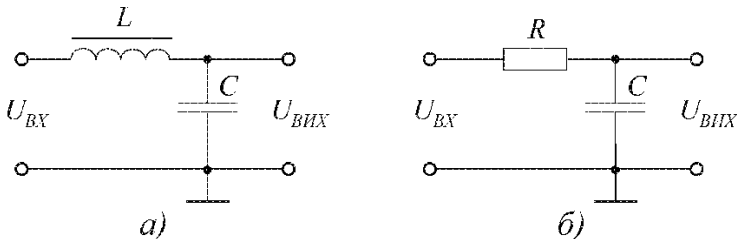


Рис. 2.2. Схеми згладжувальних LC – фільтра (а) та RC – фільтра (б)

Г – подібні LC – фільтри широко використовуються при підвищених струмах навантаження, оскільки спад напруги постійного

струму на них можна зробити порівняно малим. Коефіцієнт корисної дії LC – фільтрів досить високий. До недоліків таких фільтрів можна віднести порівняно великі габаритні розміри та масу і наявність магнітного поля розсіювання. Окрім того, вони не послаблюють повільні коливання випрямленої напруги.

Для LC – фільтрів слід вибирати $q \geq 3$ для того, щоб уникнути резонансних явищ. Добуток LC в залежності від потрібного значення q можна визначити за таким співвідношенням:

$$LC = \frac{2.5 \cdot 10^4 (q+1)}{m^2 f^2},$$

де L – індуктивність, Гн; C – ємність, мкФ; m – кількість фаз випрямляча; f – частота мережі, Гц.

Для двопівперіодної та мостової схем випрямляча при частоті мережі 50 Гц виконується співвідношення $LC = 2.5 (q+1)$.

Г-подібні RC-фільтри доцільно використовувати при малих струмах навантаження (менше 15 мА) та невеликих значеннях коефіцієнта згладжування. До переваг таких фільтрів слід віднести малі габаритні розміри та маса, а також низьку вартість. Добуток RC визначають за формулою

$$RC = \frac{1.5 \cdot 10^5 q}{mf},$$

де R – активний опір, Ом; C – ємність, мкФ; f – частота мережі, Гц.

Опір резистора вибирають за умови допустимого спаду напруги постійного струму на згладжувальному фільтрі.

Окрім фільтрів типу LC і RC на практиці використовуються транзисторні згладжувальні фільтри (рис. 2.3). Вони мають малі габарити і масу, менші втрати випрямленої напруги і не створюють паразитних магнітних полів, що виникають біля дроселя LC-фільтра.

Аналіз вихідної характеристики транзистора для схеми з спільним емітером (рис. 2.3, б) показує, що на пологій її частині опір ділянки колектор-емітер змінному струму дорівнює

$$r_{KE} \approx \frac{\Delta U_{KE}}{\Delta I_K}$$

та буде більше, ніж опір постійному струму в робочій точці P:

$$r_{KE.P} = \frac{U_{KE.P}}{I_{K.P}}.$$

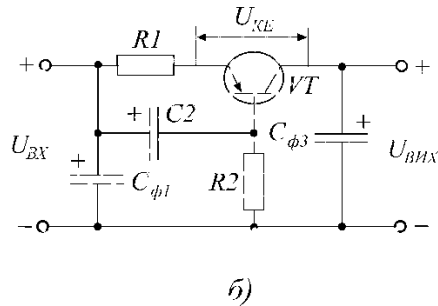
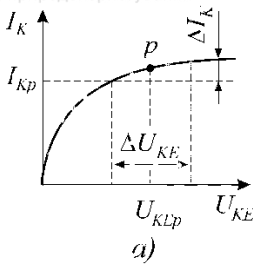


Рис. 2.3. Транзисторний згладжувальний фільтр: а – вибір робочої точки на вихідній характеристиці транзистора; б – електрична схема

Тому транзистор можна використовувати замість дроселя фільтра. Одна з можливих схем транзисторного згладжувального фільтра наведена на рис. 2.3, б. Необхідно відзначити, що при розрахунку випрямляча потрібно враховувати характер опору навантаження, від якого найбільше залежать розрахункові співвідношення. В реальних схемах випрямлячів опір навантаження рідко буває активним. Це пов'язано з тим, що згладжувальний фільтр, включений між випрямлячем та споживачем, являє собою реактивний опір (як було показано вище, найчастіше фільтр починається з конденсатора). Тому характер навантаження випрямляча виявляється ємнісним.

2.3. Порядок виконання роботи

1. Запустити програму EWB 5.12.
2. Зібрати схему найпростішого напівперіодного випрямляча без фільтра (рис. 2.4). Тип напівпровідникового діода визначається згідно варіанту за таблицею 1.1.
3. До досліджуваної схеми підключити осцилограф так, щоб канал А відтворював вхідну напругу джерела, а канал В – вихідну (випрямлену) напругу. Параметри розгортки осцилографа налаштувати так, щоб на екрані спостерігалось до 5 повних коливань змінної напруги.
4. В звіті навести синхронні осцилограми каналів А та В осцилографа (в одному вікні) з вказанням масштабів за осями.
5. Змінюючи величину опору навантаження R від 100% до 10% з кроком 10%, зняти зовнішню характеристику найпростішого напівперіодного випрямляча без фільтра $U_H = f(\mathcal{C}_H)$ (результати дослідження занести до таблиці 2.1).



6. Отриману в п.5 залежність представити у вигляді графіка.

7. За допомогою ключа до схеми випрямляча (рис. 2.4) підключити ємнісний фільтр.

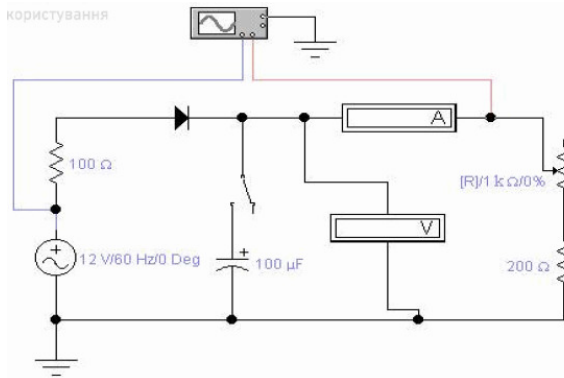


Рис. 2.4. Схема для дослідження найпростішого однопівперіодного випрямляча

Таблиця 2.1. Зовнішня характеристика найпростішого однопівперіодного випрямляча без фільтра

I_H, A									
U_H, B									

8. Настроювання засобів вимірювання залишити з попереднього експерименту. В звіті представити синхронні осцилограми вхідної та вихідної напруг схеми з ємнісним фільтром.

9. Повторити дослідження за п.5 для випрямляча з ємнісним фільтром. Результати вимірювань занести до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. Зовнішня характеристика найпростішого однопівперіодного випрямляча з ємнісним фільтром

I_H, A									
U_H, B									

10. За результатами досліджень побудувати зовнішню характеристику найпростішого однопівперіодного випрямляча з ємнісним фільтром $U_H = f(I_H)$.

11. Скласти схему мостового випрямляча (рис. 2.5), при цьому ємнісний фільтр має бути відключеним.

12. Для даної схеми навести синхронні осцилограми каналів А та



В осцилографа (в одному вікні) з вказанням масштабів за осями.

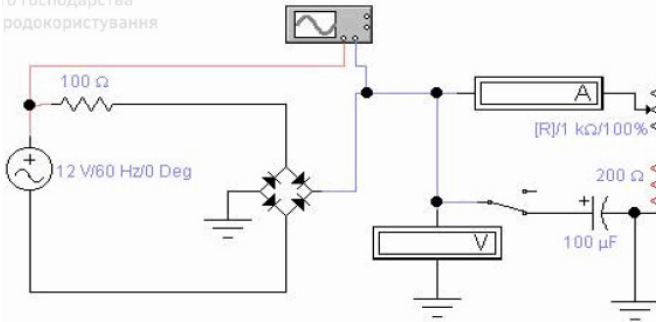


Рис. 2.5. Схема для дослідження мостової схеми випрямлення

13. Змінюючи величину опору навантаження R від 100% до 10% з кроком 10%, зняти зовнішню характеристику мостового випрямляча без фільтра $U_H = f(I_H)$ (результати дослідження занести до таблиці 2.3).

Таблиця 2.3. Зовнішня характеристика мостового випрямляча без фільтра

I_H, A									
U_H, B									

14. За результатами досліджень побудувати зовнішню характеристику мостового випрямляча без фільтра $U_H = f(I_H)$.

15. Скласти схему мостового випрямляча (рис. 2.5), підключивши конденсатор фільтра за допомогою ключа.

16. Для мостової схеми з ємнісним фільтром навести синхронні осцилограми каналів А та В осцилографа (в одному вікні) з вказанням масштабів за осями.

17. Змінюючи величину опору навантаження R від 100% до 10% з кроком 10%, зняти зовнішню характеристику мостового випрямляча з ємнісним фільтром $U_H = f(I_H)$ (результати дослідження занести до таблиці 2.4).

Таблиця 2.4. Зовнішня характеристика мостового випрямляча з ємнісним фільтром

I_H, A									
U_H, B									



18. За результатами досліджень побудувати зовнішню характеристику мостового випрямляча з ємнісним фільтром $U_H = f(I_H)$.

19. За результатами вимірювань обчислити внутрішній опір R_i схем досліджуваних випрямлячів з використанням закону Ома для повного кола (для ділянки кола з ЕРС):

$$U_H = E_{дж} - R_i I_H,$$

де $E_{дж}$ визначається з графіка навантажувальної (зовнішньої) характеристики при її продовженні до перетину з віссю напруг до точки з $I_H = 0$.

2.4. Зміст звіту

1. Тема, мета роботи.
2. Порядок виконання роботи.
3. Результати розрахунків, досліджувані схеми, таблиці з результатами вимірювань.
4. Графіки знятих характеристик, осцилограми напруг.
5. Розв'язання завдання відповідно до п.19.
6. Висновки.

2.5. Контрольні запитання

1. Чому більшість активних електронних пристроїв живиться від джерела постійної напруги?
2. Які переваги мають випрямлячі у порівнянні з іншими джерелами живлення?
3. Чи можна побудувати випрямну схему без силового трансформатора?
4. Чи можна побудувати випрямну схему без вентиля?
5. Для чого в схемах випрямлячів використовуються згладжувальні фільтри?
6. Наведіть основні технічні показники випрямних схем.
7. Як вибирають вентиля (діоди) для роботи в схемах випрямлячів?
8. Поясніть фізичний зміст коефіцієнта пульсацій.
9. Складіть схему випрямляча, який дозволяє проводити збільшення напруги в 5 разів.
10. Нарисуйте часові діаграми, які характеризують форму випрямленого струму для однопівперіодного випрямляча, який працює на чисто активне та ємнісне навантаження.



Робота 3. Дослідження схеми випрямлення з параметричним стабілізатором напруги

3.1. Мета роботи

Дослідити принцип роботи параметричного стабілізатора напруги та його вплив на форму та параметри вихідної напруги мостової схеми випрямлення.

3.2. Теоретичні відомості

Стабілізатором напруги (струму) називається пристрій, який автоматично та з потрібною точністю підтримує напругу (струм) в навантаженні при зміні дестабілізуючих факторів у визначених межах.

Не дивлячись на використання згладжувальних фільтрів, напруга на опорі навантаження випрямляча може змінюватись. Це пояснюється тим, що при згладжуванні пульсацій фільтром зменшується тільки змінна складова випрямленої напруги, а величина постійної складової може змінюватись і при коливаннях напруги мережі, і при зміні струму навантаження. Для отримання необхідної величини постійної напруги на опорі навантаження використовують стабілізатори напруги. В залежності від місця їх включення в схему бувають стабілізатори напруги постійного та змінного струму. В першому випадку стабілізатор розташовують між випрямлячем та опором навантаження, а в другому випадку – між джерелом змінного струму та випрямлячем. Розглянемо основні параметри стабілізаторів напруги.

Коефіцієнт стабілізації напруги – величина, що показує, у скільки разів відносна зміна напруги на виході менша, ніж на вході (при $I_{\text{н}} = I_{\text{вих}} = \text{const}$):

$$K_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}} : \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{U_{\text{вих}}},$$

де $\Delta U_{\text{вх}}$ та $\Delta U_{\text{вих}}$ – зміна напруг на вході та виході стабілізатора; $U_{\text{вх}}$ та $U_{\text{вих}}$ – напруги на вході та виході стабілізатора.

Коефіцієнт корисної дії – відношення потужності на виході стабілізатора до потужності на вході.

Вихідний опір – опір стабілізатора змінному струму з боку виходу. Чим він менший, тим слабшим є зв'язок між каскадами через джерело живлення цих каскадів.



Коефіцієнт згладжування пульсацій – відношення напруг пульсацій на вході та виході стабілізатора. Для деяких стабілізаторів коефіцієнт згладжування пульсацій приблизно дорівнює коефіцієнту стабілізації напруги.

Напівпровідникові параметричні стабілізатори (НПС) є найбільш простими. Вони характеризуються порівняно невеликим коефіцієнтом стабілізації, більшим вихідним опором (одиниці ÷ десятки Ом), та низьким значенням ККД. В таких стабілізаторах неможливо одержати точне значення напруги на виході та регулювати його.

Принцип роботи НПС оснований на використанні нелінійності ВАХ кремнієвих стабілітронів. Найпростіший НПС є подільником напруги, що складається з резистора та кремнієвого стабілітрона (КС). Навантаження підключається до КС. Для термокомпенсації змін напруги на стабілітроні та, отже, на навантаженні, послідовно з КС включають напівпровідникові діоди в прямому напрямку (рис. 3.1). Якщо стабілізатор призначений для роботи у вузькому інтервалі температур, то потрібна термокомпенсація. Тип та кількість КС обирають в залежності від необхідних напруги та струму навантаження. Вихідна напруга стабілізатора дорівнює сумі напруг на КС та діодах, включених у прямому напрямку, але в основному визначається напругою на КС. Для термокомпенсації можна використовувати стабілітрони або германієві діоди, включені у прямому напрямку. Їх кількість вибирають в залежності від типу та кількості КС, включених у зворотному напрямку. Використовуючи простішу схему НПС (рис. 3.1, а), можна одержати коефіцієнт стабілізації напруги не більш 100 (без термокомпенсації) при зміні вхідної напруги на $\pm 10\%$. При термокомпенсації коефіцієнт стабілізації зменшується у 2÷4 рази. Коефіцієнт стабілізації також зменшується при збільшенні струму навантаження та допуску на вхідну напругу. Вихідний опір такого НПС складає 6÷10 Ом без термокомпенсації та 25÷40 Ом при використанні термокомпенсації (визначається типом стабілітрона).

Якщо необхідно одержати більший коефіцієнт стабілізації (до 1000), то слід використовувати двокаскадні НПС (рис. 3.1, б, в). В таких НПС термокомпенсацію доцільно реалізовувати тільки в другому каскаді, оскільки при цьому можна досягти більшого коефіцієнта стабілізації в першому каскаді та у всьому стабілізаторі. Підсумковий коефіцієнт стабілізації двокаскадного НПС дорівнює добутку коефіцієнтів стабілізації першого та другого каскадів, а вихід-



дний опір визначається вихідним опором другого каскаду.

В НПС, схема якого наведена на рис. 3.1, в, через діоди, включені в пряму напрямку, пропускається додатковий струм. При цьому зменшується їх динамічний опір та, отже, вихідний опір стабілізатора, а також збільшується коефіцієнт стабілізації. Перевагою такого НПС є можливість плавного регулювання термокомпенсації шляхом зміни додаткового струму (опору резистора R_r), а недоліком – більш низький ККД.

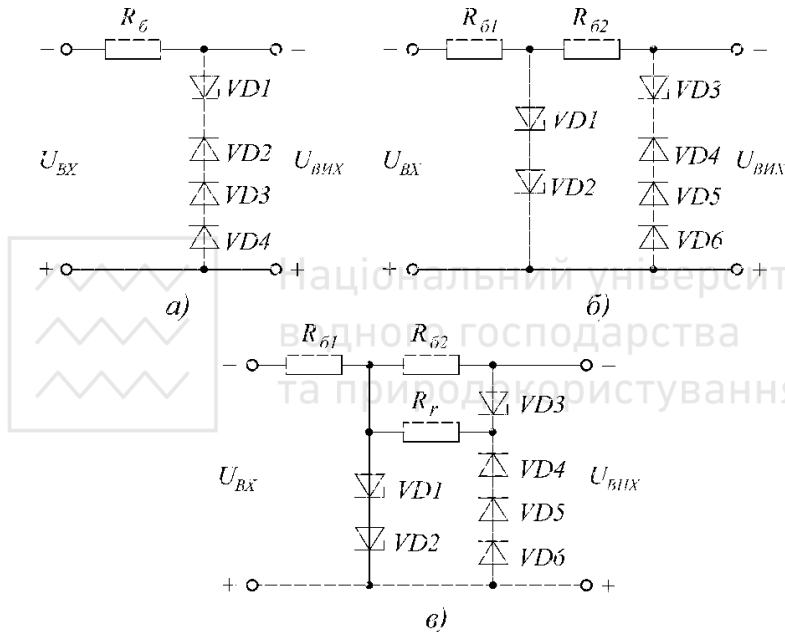


Рис. 3.1. Схеми параметричних напівпровідникових однокаскадного (а) та двокаскадного (б, в) стабілізаторів напруги

3.3. Порядок виконання роботи

1. Запустити програму EWB 5.12. Зібрати схему мостового випрямляча без ємнісного фільтра та параметричним стабілізатором (рис. 3.2). Тип напівпровідникових діодів вибирається відповідно до варіанту за таблицею 1.1, а тип стабілітрона – за таблицею 1.3.

2. Підключити до досліджуваної схеми осцилограф так, щоб до каналу А була підключена вихідна напруга випрямляча, а до каналу В – вихідна напруга параметричного стабілізатора напруги. Масш-



таб за віссю часу вибирається таким чином, щоб на екрані осцилографа спостерігалось більше 5 періодів напруги.

3. У звіті представити синхронні часові діаграми напруг в каналах А та В осцилографа (рис. 3.2).

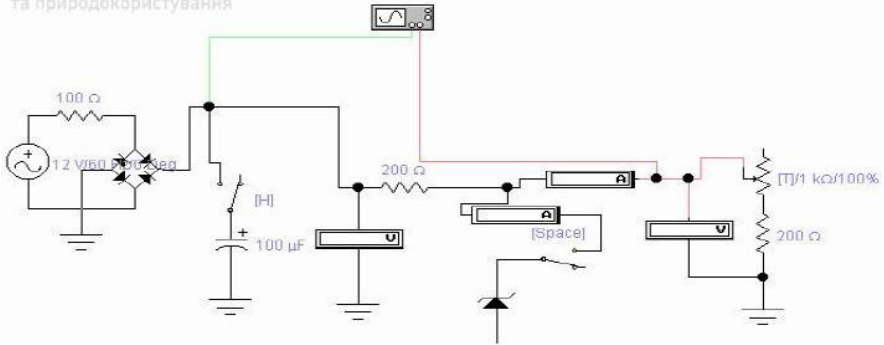


Рис. 3.2. Схема мостового випрямляча з параметричним стабілізатором напруги

4. Провести дослідження зміни напруг на вході стабілізатора та на навантаженні при зміні струму навантаження (стабілітрон відключений). Для цього підключити до виходу мостової схеми випрямлення конденсатор фільтра (стабілітрон відключений) і при зміні опорів навантаження від 100% до 0% зняти залежність напруги на навантаженні від струму навантаження. У висновках пояснити причини зміни напруги при зміні струму навантаження.

5. Провести дослідження зміни напруг на вході стабілізатора та на навантаженні при зміні струму навантаження та підключених стабілітроні і конденсаторі фільтра. Результати досліджень занести до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Результати досліджень параметричного стабілізатора напруги

$R_H, \text{ Ом}$	Стабілітрон відключений		Стабілітрон включений	
	$I_H, \text{ мА}$	$U_H, \text{ В}$	$I_H, \text{ мА}$	$U_H, \text{ В}$
1200 (100%)				
1000 (80%)				
800 (60%)				
600 (40%)				
400 (20%)				
200 (0%)				



6. Представити осцилограми напруг і побудувати графік зовнішньої характеристики стабілізованого випрямляча. При дослідженні характеристик необхідно звернути увагу на показання вольтметрів, які вимірюють напругу на стабілітроні та вході стабілізатора напруги і пояснити результати перерозподілу напруг.

7. Відключити конденсатор фільтра, представити осцилограму вихідної напруги та пояснити форму напруги на навантаженні.

3.4. Зміст звіту

1. Тема, мета роботи.
2. Порядок виконання роботи.
3. Результати розрахунків, досліджувані схеми, таблиці з результатами вимірювань.
4. Графіки знятих характеристик, осцилограми напруг.
5. Висновки.

3.5. Контрольні запитання

1. Наведіть призначення та основні характеристики напівпровідникового стабілітрона.
2. В чому полягає відмінність стабілітрона від напівпровідникового діода?
3. Яка гілка ВАХ стабілітрона є робочою і чому?
4. В яких випадках необхідним є використання стабілізованої напруги живлення?
5. Що таке динамічний опір стабілітрона і як він визначається?
6. Чим визначається якість напівпровідникового стабілітрона?
7. Запишіть рівняння зовнішньої характеристики стабілізованого джерела живлення.
8. Поясніть призначення та способи розрахунку елементів схеми параметричного стабілізатора напруги.
9. Як визначити параметри вхідної напруги стабілізатора для забезпечення стабілізованого значення вихідної напруги?



Робота 4. Дослідження роботи транзисторного ключа

4.1 Мета роботи

Ознайомитися з роботою електронних ключів. Дослідити роботу ключа на біполярному транзисторі в статичному і динамічному режимах. Освоїти методику визначення параметрів реальних імпульсів.

4.2. Теоретичні відомості

Важливими елементами сучасних схем автоматики, імпульсної та цифрової техніки є електронні ключі. Електронні ключі – це безконтактні комутуючі пристрої, які мають два стійких стани: включено і виключено. В кожному з цих станів вони можуть перебувати як завгодно довго. Зміна станів відбувається різко, стрибкоподібно під дією керуючих сигналів.

Залежно від типу активного елементу ключі діляться на діодні, транзисторні, тиристорні, оптронні та інші.

На рис. 4.1 приведені схема ідеального ключа та часові діаграми його роботи.

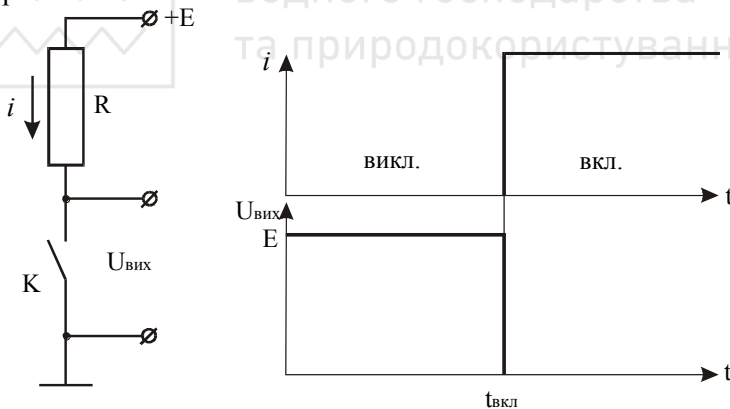


Рис. 4.1. Схема ідеального ключа та часові діаграми його роботи

Ідеальний ключ – безінерційний елемент. В розімкненому стані він має безмежно великий опір. Тому струм через ключ рівний нулю $i=0$, а вихідна напруга дорівнює ЕРС джерела живлення $U_{\text{вих}} = E$. В замкнутому стані опір ідеального ключа дорівнює нулю. При цьому струм через ключ обмежується лише опором резистора R і дорівнює E/R , а вихідна напруга $U_{\text{вих}} = 0$.



Найпростішими ключами є діодні. Схеми діодних ключів з нульовим і ненульовим рівнем спрацювання приведені на рис. 4.2.

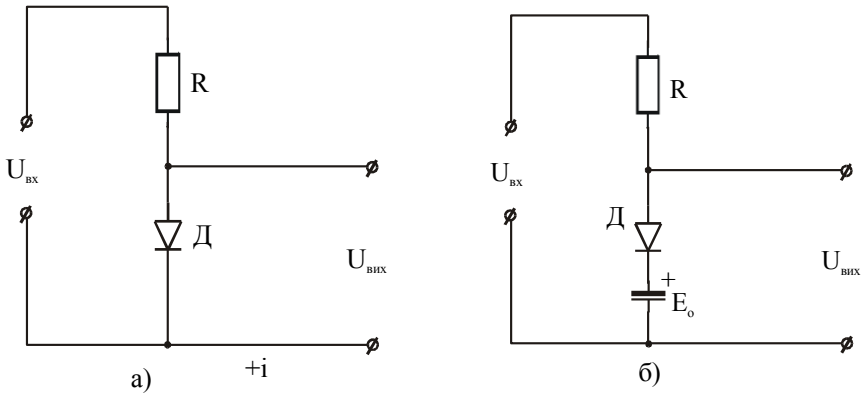


Рис. 4.2. Схеми ключів з нульовим (а) та ненульовим (б) рівнем спрацювання

В схемі на рис. 4.2, а для всіх від'ємних значень вхідної напруги $U_{\text{вх}} < 0$ діод Д закритий і вихідна напруга дорівнює вхідній. При зміні полярності вхідної напруги діод відкривається і вихідна напруга стає практично рівною нулю ($U_{\text{вих}} = 0$). Робота схеми на рис. 4.2, б відрізняється тим, що відкривання діодного ключа відбувається лише при додатному значенні вхідної напруги, більшому за величину напруги опорного елемента, тобто при $U_{\text{вх}} > E_0$. Недолік діодних ключів полягає у тому, що кола керуючих і керованих сигналів збігаються.

Цього недоліку позбавлені транзисторні ключі, в яких вхідні (керуючі) кола відокремлені від вихідних (керованих) кіл (рис. 4.3, а).

Робота транзистора у ролі електронного ключа характеризується двома стійкими станами: закритим і відкритим. Режим роботи транзистора у закритому стані, при якому обидва переходи закриті, називають **режимом відсікання**. На навантажувальній лінії, побудованій на вихідних характеристиках транзистора, йому відповідає положення точки А рис. 4.3, б. У відкритому стані обидва переходи відкриті. Цей режим роботи транзистора називають **режимом насичення** і йому відповідає точка В навантажувальної прямої.

При низькому рівні вхідної напруги ключ закритий. Через транзистор протікає незначний струм $I_{\text{к0}}$, зумовлений неосновними носіями, і вихідна напруга практично дорівнює величині $E_{\text{к}}$. При висо-



кому додатному рівні вхідного сигналу транзистор відкривається до насичення, протікає струм I_{KH} , а вихідна напруга стає близькою до нуля. Таким чином, транзисторний ключ повертає фазу вхідного сигналу на 180° , тобто виконує одночасно і функцію інвертора. Резистор R_B обмежує струм бази при великому рівні вхідного сигналу.

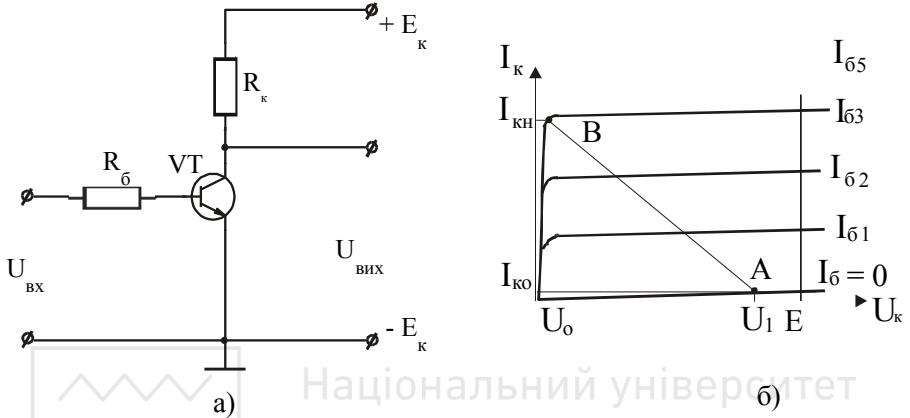


Рис. 4.3. Схема (а) та режими роботи ключа для біполярного транзисторі (б)

Якість електронних ключів визначається їх швидкістю, яка залежить від частотних характеристик транзисторів. Через різні швидкості та траєкторії носіїв, інжекттованих з емітера в базу, колекторний струм не може зростати миттєво. На час перемикання ключа істотно впливають і процеси накопичення та розсмоктування просторових зарядів в області бази транзистора. Внаслідок цього спотворюється форма імпульсів, що проявляється у сповільненні наростання і спадання імпульсів та спаді плоскої вершини (рис. 4.4).

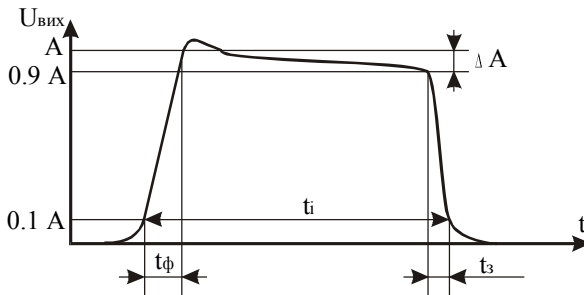


Рис. 4.4. Параметри реальних прямокутних імпульсів



Реальні прямокутні імпульси характеризуються такими основними параметрами:

- амплітудою імпульсу A ;
- тривалістю імпульсу t_i , яка визначається на основі графіка імпульсу, як це показано на рис. 4.4, або за умови, що амплітуда більша за $0.1A_m$;
- тривалістю фронту імпульсу t_f , яка дорівнює часу наростання імпульсу від $0.1A$ до A ;
- тривалістю заднього фронту або зрізу імпульсу t_z , який дорівнює часу спадання імпульсу від $0.9A$ до $0.1A$;
- спаданням вершини імпульсу ΔA .

Швидкість зміни фронтів імпульсів залежить також від величини резистора R_B . Для покращення форми імпульсів і збільшення швидкодії ключа резистор R_B може бути зашунтований конденсатором.

Опір транзисторного ключа у відкритому стані хоча і малий, але не нульовий, а у відкритому стані – великий, але не безмежний. Це також погіршує роботу ключа. Кращі характеристики мають ключі на польових (уніполярних) транзисторах, особливо з ізольованим затвором.

Тому що базові струми транзисторів у десятки і сотні разів менші за колекторні, то і струми керування транзисторними ключами набагато менші за комутовані ними струми. Навантаженням транзисторних ключів можуть бути обмотки реле, електромагнітів чи двигунів, сигналізуючі світлодіоди та інші елементи. Електронні ключі часто використовують для формування прямокутних імпульсів з імпульсів довільної форми, які виробляються сенсорами (давачами).

4.3. Порядок роботи

1. Зібрати схему дослідження транзисторного ключа. Тип транзистора вибирається відповідно до варіанту за таблицею 1.5.
2. Виміряти значення вихідної напруги ключа у статичному режимі для включеного та виключеного станів.
3. За допомогою осцилографа прослідкувати роботу транзисторного ключа при проходженні прямокутних імпульсів.
4. Визначити основні параметри прямокутних імпульсів.
5. Дослідити вплив конденсатора C на форму імпульсів.

4.4. Опис схеми дослідження

В схемі ключа використовується транзистор, тип якого згідно ва-



ріанту наведений в таблиці 1.5. Резистор R1 використовується для обмеження базового струму. Через резистор R2 база транзистора гальванічно зв'язана з спільним провідником, що забезпечує закритий стан ключа при відсутності вхідної напруги. Відкривається ключ при прикладенні до його входу постійної напруги додатної полярності. Резистор R3 є колекторним навантаженням транзистора. Схема дослідження транзисторного ключа приведена на рис. 4.5.

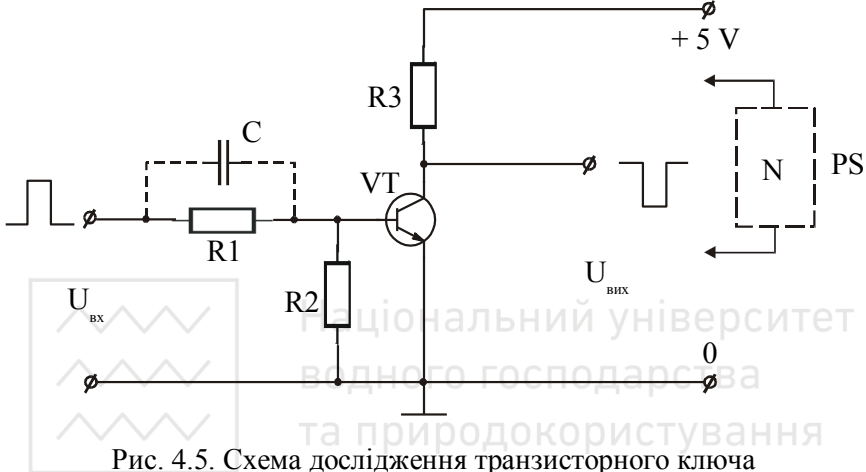


Рис. 4.5. Схема дослідження транзисторного ключа

R1 – резистор 3.3 кОм; R2 – резистор 1 кОм; R3 – резистор 4.7 кОм;
C – конденсатор 3300 пФ; VT – транзистор відповідно до варіанту;
PS – осцилограф

4.5. Порядок виконання роботи

1. В схемотехнічному редакторі EWB скласти схему транзисторного ключа відповідно до рис. 4.5. Встановити напругу живлення колекторного кола транзистора рівною 5 В.

2. До вихідних клем транзисторного ключа під'єднайте мультиметр в режимі вольтметра постійного струму і виміряйте величину напруги на виході ключа у закритому стані $U_{\text{вих}}$ (при відсутності напруги на вході ключа та при вхідній напрузі 0.2 В).

Щоб відкрити ключ, під'єднайте його вхід до блока живлення +5 В додатним потенціалом до резистора R1. Виміряйте значення вихідної напруги ключа у відкритому стані $U_{\text{вих0}}$.

3. Від'єднайте вхід схеми від блока живлення +5 В та під'єднайте до генератора прямокутних імпульсів. До виходу ключа під'єднайте



осцилограф і мультиметр для вимірювання амплітуди імпульсної послідовності. З генератора подавайте імпульси прямокутної форми амплітудою 4 В і частотою 10 кГц. В звіті представте синхронні осцилограми вхідних та вихідних імпульсів. Визначте амплітуду і період імпульсів та розрахуйте їх частоту.

4. Зменшуючи тривалість розгортки осцилографа, "розтягніть" зображення одного імпульсу на весь екран осцилографа. Представте отриману осцилограму і визначте основні параметри імпульсу (амплітуду, тривалості фронту, спаду та імпульсу).

5. Дослідити вплив вхідної та вихідної паразитних ємностей на тривалість перехідних процесів у транзисторному ключі. Для цього по чергово підключіть до схеми транзисторного ключа конденсатор між базою та емітером транзистора орієнтовною ємністю одиниці нФ (імітація збільшення вхідної паразитної ємності) та конденсатор між колектором та емітером транзистора орієнтовною ємністю десятки нФ (імітація збільшення вихідної паразитної ємності).

6. Паралельно з резистором R1 підключити до схеми конденсатор С ємністю 3300 пФ. Представте осцилограму вихідної напруги та визначте параметри імпульсу при наявності конденсатора. Зробити висновок про вплив даного конденсатора на форму імпульсів.

4.6. Контрольні запитання

1. Поясніть роботу ідеального ключа.
2. Наведіть недоліки діодних ключів?
3. Які особливості роботи транзистора в ключовому режимі?
4. Яка роль резистора R_B у вхідному колі транзисторного ключа?
5. Як транзисторні ключі змінюють фазу сигналів?
6. Які причини спотворення форми імпульсів у транзисторних ключах?
7. Назвіть приклади застосування електронних ключів?
8. Які фактори впливають на швидкодію транзисторних ключів?
9. Наведіть повні і спрощені лінійні моделі транзисторів в областях насичення і відсікання. Чому дорівнюють коефіцієнти передачі транзистора в цих областях?
10. Наведіть методику розрахунку транзисторного ключа в режимі насичення, модель ключа, а також поясніть зміст коефіцієнта насичення S і його рекомендовані значення.
11. Викладіть методику розрахунку транзисторного ключа в режимі відсікання, а також наведіть модель ключа в даному режимі.



Робота 5. Дослідження електричних фільтрів

5.1. Мета роботи

Вивчення основних властивостей і частотних характеристик фільтрів низьких та високих частот.

5.2. Теоретичні відомості

Електричними фільтрами називають чотириполосники, що пропускають струми одних частот і затримують струми інших частот.

Електричні фільтри поділяються на такі типи: фільтри високих частот (ФВЧ), фільтри низьких частот (ФНЧ), смугові фільтри (СФ), загороджувальні або режекторні фільтри (ЗФ).

Кожен тип фільтра має ряд модифікацій, які відрізняються різними елементами (фільтри L-C, фільтри R-C, кварцові фільтри, електромеханічні та ін.); схемою з'єднання елементів (простіші фільтри к-типу, m-типу, мостові фільтри та ін.).

Фільтри L-C-типу мають багато різновидів: к-типу, m-типу, мостові. Фільтри к-типу T- і П-подібних схем мають у послідовному і паралельному плечах елементи з реактивними опороми Z_1 та Z_2 . Ці опори вибрані таким чином, щоб величина $\sqrt{Z_1 Z_2}$ дорівнювала деякому числу K, яке не залежить від частоти. Фільтри, у яких цей добуток залежить від частоти, називають m-фільтрами.

Найпростіші фільтри к-типу мають схеми, які зображені на рис. 5.1: а) Г-подібну ланку; б) Т-подібну ланку; в) П-подібну ланку.

Простішу Г-подібну ланку частіше називають напівланкою.

Діапазон частот, що пропускається фільтром без затухання, називають смугою пропускання (прозорості), а діапазон частот, що пропускається фільтром із затуханням – смугою затухання.

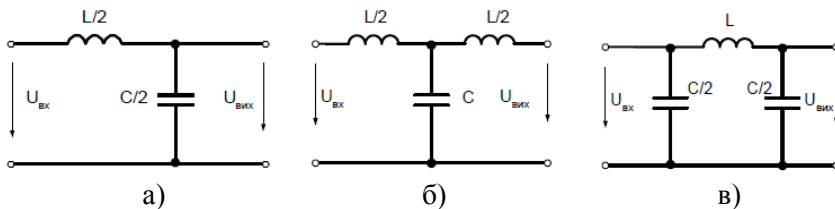


Рис. 5.1. Схеми найпростіших фільтрів к-типу: Г-подібна ланка (а); Т-подібна ланка (б); П-подібна ланка (в)

Частоту, яка є межею між смугами прозорості та затухання, на-



зивають частотою зрізу.

Будь-який фільтр характеризується такими параметрами: характеристичним опором Z_c та сталою передачі (коефіцієнтом поширення) $\gamma = a + jb$ (a – коефіцієнт затухання фільтра, b – коефіцієнт фази фільтра).

Коефіцієнти a і b визначаються параметрами фільтра (чотириполюсника) і не залежать від величини опору навантаження, але експериментально визначаються тільки при узгодженому навантаженні, тобто коли $Z_H = Z_c$.

При узгодженому навантаженні фільтра:

$$\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = e^\gamma = e^a \cdot e^{ib}.$$

Звідси одержуємо: $a = \ln(U_1/U_2)$, Нп; $b = \varphi_1 - \varphi_2$, град (рад).

Коефіцієнт a вимірюється у неперах (Нп) або децибелах ($a = 20 \lg(U_1/U_2)$, дБ), а коефіцієнт b вимірюється у градусах або радіанах. Останній буде позитивним, якщо напруга на вході фільтра U_1 ($U_{вх}$) буде випереджати напругу на його виході U_2 ($U_{вих}$) за фазою.

Визначення фільтруючих властивостей чотириполюсників так або інакше пов'язано з дослідженням залежності їх коефіцієнтів a , b і характеристичного опору Z_c від частоти ω . При побудові цих графіків використовують резонансну кутову частоту зрізу ω_0 , відносно

якої будуються вищезгадані залежності, а величину $\xi = \frac{\omega}{\omega_0}$ прийня-

ято називати відносною кутовою частотою.

5.3. Порядок виконання роботи

1. У відповідності з варіантом завдання (таблиця 5.1) розрахувати параметри фільтрів низьких та високих частот.

Таблиця 5.1. Вихідні дані для виконання лабораторної роботи

№ варіанту	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Тип фільтра	П	Т	П	Т	П	Т	П	Т	П	Т	П	Т	П
Частота зрізу, Гц	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650

№ варіанту	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Тип фільтра	Т	П	Т	П	Т	П	Т	П	Т	П	Т
Частота зрізу, Гц	700	750	800	850	900	950	1000	1100	1200	1300	1400

Для розрахунків ємність конденсатора прийняти $C = 100$ мкФ.

Розрахунок відбувається за наступними формулами для вихідної величини частоти зрізу $f_{зр}$, яка відповідає номеру варіанта, а також в залежності від схеми фільтра.

Частоти першої та третьої гармонік вхідної напруги:

$$f_1 = f_{зр}/2, \quad f_3 = 3f_1.$$

Розрахунок параметрів ФНЧ.

Індуктивність фільтра:

$$L_H = \frac{1}{\pi^2 f_{зр}^2 C}.$$

Характеристичний опір для Т- та П-подібних схем:

$$Z'_{СП} = \sqrt{\frac{L_H}{C}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \xi'^2}}; \quad Z'_{СТ} = \sqrt{\frac{L_H}{C}} \cdot \sqrt{1 - \xi'^2},$$

де $\xi' = \frac{f_1}{f_{зр}}$ – відносна кутова частота ФНЧ; L_H – індуктивність ФНЧ.

Розрахунок параметрів ФВЧ.

Індуктивність фільтра:

$$L_B = \frac{1}{16\pi^2 f_{зр}^2 C}.$$

Характеристичний опір для Т- та П-подібних схем:

$$Z''_{СП} = \sqrt{\frac{L_B}{C}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \xi''^2}}; \quad Z''_{СТ} = \sqrt{\frac{L_B}{C}} \cdot \sqrt{1 - \xi''^2},$$

де $\xi'' = \frac{f_3}{f_{зр}}$ – відносна кутова частота ФВЧ; L_B – індуктивність ФВЧ.

2. Зібрати схему фільтра низьких частот (рис. 5.2).

Встановити у джерелах діючі значення напруги першої та тре-



тьої гармонік 71 В. Опір навантаження встановити рівним Z_c' .

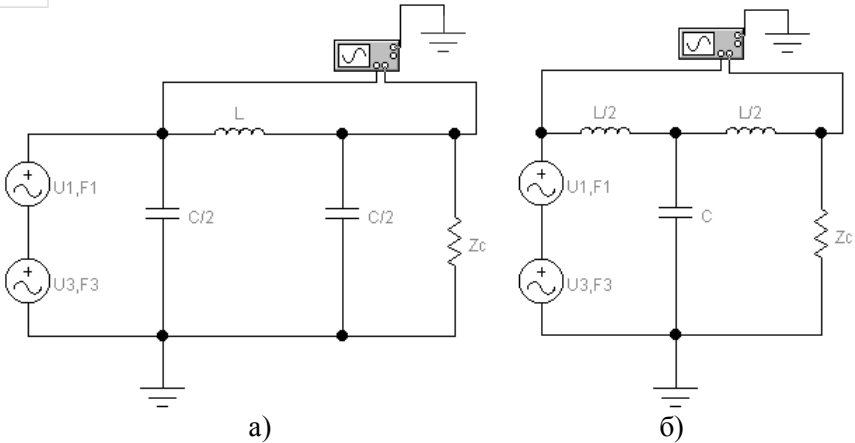


Рис. 5.2. Моделі найпростіших П-подібного (а) та Т-подібного (б) ФНЧ

Запустити схему і отримати осцилограми напруги з входу та виходу фільтра. Представити ці осцилограми у звіті та пояснити їх форму.

3. Використовуючи функціональний генератор та аналізатор частотних характеристик, отримати частотні (АЧХ та ФЧХ) характеристики досліджуваного ФНЧ.

4. Зібрати схему фільтра високих частот (рис. 5.3).

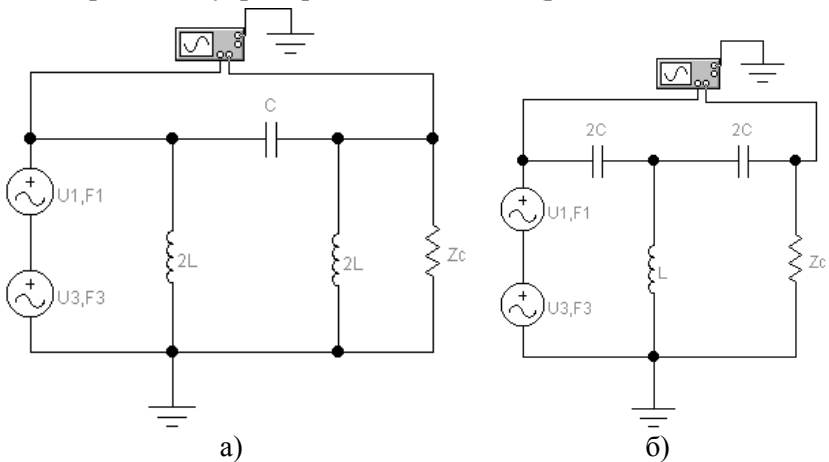


Рис. 5.3. Моделі найпростіших П-подібного (а) та Т-подібного (б) ФВЧ



Встановити у джерелах діючі значення напруги першої та третьої гармонік 71 В. Опір навантаження встановити рівним Z_C'' . Запустити схему і отримати осцилограми напруги з входу та виходу фільтра. Представити ці осцилограми у звіті та пояснити їх форму.

5. Використовуючи функціональний генератор та аналізатор частотних характеристик, отримати частотні (АЧХ та ФЧХ) характеристики досліджуваного ФВЧ.

5.4. Вимоги до звіту

1. Аналітично побудувати частотні характеристики ФНЧ. Їх побудова відбувається за такими формулами (параметр ξ змінюється від 0 до ∞):

$$a \hookrightarrow cha = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \xi < 1; \\ 2\xi^2 - 1, & \text{якщо } \xi > 1. \end{cases}$$

$$b \hookrightarrow \cos b = \begin{cases} 1 - 2\xi^2, & \text{якщо } \xi < 1; \\ -1, & \text{якщо } \xi > 1, b > 0. \end{cases}$$

$$Z_C \hookrightarrow Z_C = \sqrt{\frac{L_H}{C}} \cdot \sqrt{1 - \xi^2} \text{ – для Т-подібної схеми фільтра;}$$

$$Z_C = \sqrt{\frac{L_H}{C}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} \text{ – для П-подібної схеми фільтра.}$$

2. Аналітично побудувати частотні характеристики ФВЧ. Їх побудова відбувається за такими формулами (параметр ξ змінюється від 0 до ∞):

$$a \hookrightarrow cha = \begin{cases} \frac{2}{\xi^2 - 1}, & \text{якщо } \xi < 1; \\ 2\xi^2 - 1, & \text{якщо } \xi > 1. \end{cases}$$

$$b \hookrightarrow \cos b = \begin{cases} 1 - \frac{2}{\xi^2}, & \text{якщо } \xi > 1; \\ -1, & \text{якщо } \xi < 1, b < 0. \end{cases}$$

$$Z_C \hookrightarrow Z_C = \sqrt{\frac{L_B}{C}} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{\xi^2}} \text{ – для Т-подібної схеми фільтра;}$$



Національний університет
водного господарства
та природокористування

$$Z_C = \sqrt{\frac{L_B}{C} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{\xi^2}}}} \text{ — для П-подібної схеми фільтра.}$$

5.5. Контрольні запитання

1. Дати визначення частотного фільтра.
2. За якими ознаками класифікуються частотні фільтри?
3. Як змінюються коефіцієнти згасання та фази ФНЧ в залежності від частоти?
4. Як змінюються коефіцієнти згасання та фази ФВЧ в залежності від частоти?
5. Для чого фільтри узгоджують з навантаженням?



Національний університет
водного господарства
та природокористування



ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Теоретичні основи електротехніки : Підручник. Т. 1. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами / В. С. Бойко, В. В. Бойко, Ю. Ф. Видолоб, І. М. Чиженко. Київ: Політехніка, 2004. 272 с.
2. Гумен М. Б., Гуржій А. М., Співак В. М. Основи теорії електричних кіл. Аналіз лінійних електричних кіл. Частотна область : підручник. Київ : Вища школа, 2004. 358 с.
3. Основи теорії електронних кіл : підручник / Бобало Ю. Я., Мандзій Б. А., Стахів П. Г., Писаренко Л. Д., Якименко Ю. І. Львів: Магнолія Плюс, 2008. 332 с.
4. Паначевний Б. І., Свергун Ю. Ф. Загальна електротехніка: теорія і практикум. Підручник. Київ : Каравела, 2018. 296 с.
5. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка і мікросхемотехніка: теорія і практикум. Навчальний посібник. Київ : Каравела, 2004. 236 с.
6. Основи теорії кіл : Підручник / Ю. О. Коваль, Л. В. Гринченко, І. А. Мілютченко, А. І. Рибін. Харків: ХНУРЕ, Колегіум, 2004. 436 с.
7. Рудик А. В. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи №1 з дисципліни “Теоретичні основи електротехніки” для студентів спеціальності 141 ”Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” денної і заочної форм навчання. Рівне : НУВГП, 2016. 28 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/view/shufr/04-03-164.html>
8. Рудик А. В. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи №2 з дисципліни “Теоретичні основи електротехніки” для студентів спеціальності 141 ”Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка”. Рівне : НУВГП, 2016. 37 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/view/shufr/04-03-165.html>