

Міністерство освіти та науки України
Національний університет водного господарства та
природокористування
Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-
інтегрованих технологій

04-03-446М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт (частина 1)

з навчальної дисципліни

«Промислова електроніка»

для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
за освітньо-професійною програмою «Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка»
денної та заочної форм навчання

Рекомендовано науково –методичною
радою з якості ННІЕАВГ
Протокол № 6 від 28.01.2025 р.

Рівне – 2025

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт (частина 1) з навчальної дисципліни «Промислова електроніка» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» денної та заочної форм навчання [Електронне видання] / Стець С. Є. – Рівне : НУВГП, 2025. – 30 с.

Укладач: Стець С. Є., к.т.н., доцент, доцент кафедри АЕКІТ.

Відповідальний за випуск: Древецький В. В., д.т.н., професор, завідувач кафедри АЕКІТ.

Керівник освітньої програми «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»: Христюк А. О., к.т.н., доцент кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

© С. Є. Стець, 2025
© НУВГП, 2025

Лабораторна робота №1

Вивчення умовних позначень елементів електронної техніки та їхнього маркування, ознайомлення з лабораторним стендом K4826

1.1. Мета роботи

Вивчити призначення комплектуючих елементів лабораторного стенду для дослідження електронних пристроїв, ознайомитися з методикою складання електричних схем, навчитись користуватися вимірювальними приладами комплекту.

1.2. Теоретичні відомості

Комплект лабораторного обладнання для виконання лабораторних робіт з електроніки складається із лабораторного стенда K4826 і вимірювального приладу з електронно-променевою та цифровою індикацією Ф4372. Стенд K4826 розміщений у переносному корпусі, який у відкритому положенні фіксується гвинтами, розташованими на обмежувачах повороту його верхньої частини.

В корпусі лабораторного стенду (рис.1.1) розташовані блок живлення, генератор сигналів, генератор трифазної напруги, вимірювальні прилади (тестери) і набірне поле (панель для монтажу електричних схем). Живлення пристрою здійснюється від мережі змінної напруги 230 V, 50 Гц.

Права частина корпусу стенду поділена на чотири зони. У верхній зоні розміщений генератор трифазної напруги. Вмикається генератор вимикачем ВКЛ. Ввімкнення контролюється за допомогою індикатора ГТН. Частоту генератора трифазної напруги можна змінювати в межах 5...10 кГц. Вихідні гнізда генератора позначено буквами А, В, С, 0. Нижче розташований блок живлення БП. На панелі блоку є тумблер ввімкнення живлення СЕТЬ ВКЛ., та індикатор подачі напруги на блок живлення. Блок БП формує три стабілізовані напруги постійного струму: +5V, -15V і +15V. Напругу стабілізованих джерел живлення -15V і +15V можна змінювати плавно за допомогою змінних резисторів, що виведені на передню панель блока живлення і мають напис ПЛАВНЕ РЕГУЛЮВАННЯ -15V і +15V. Пакетним перемикачем СТАБ.НАПРУГИ можна перемикати вольтметр стенда на контроль напруг 5V, -15V, +15V.

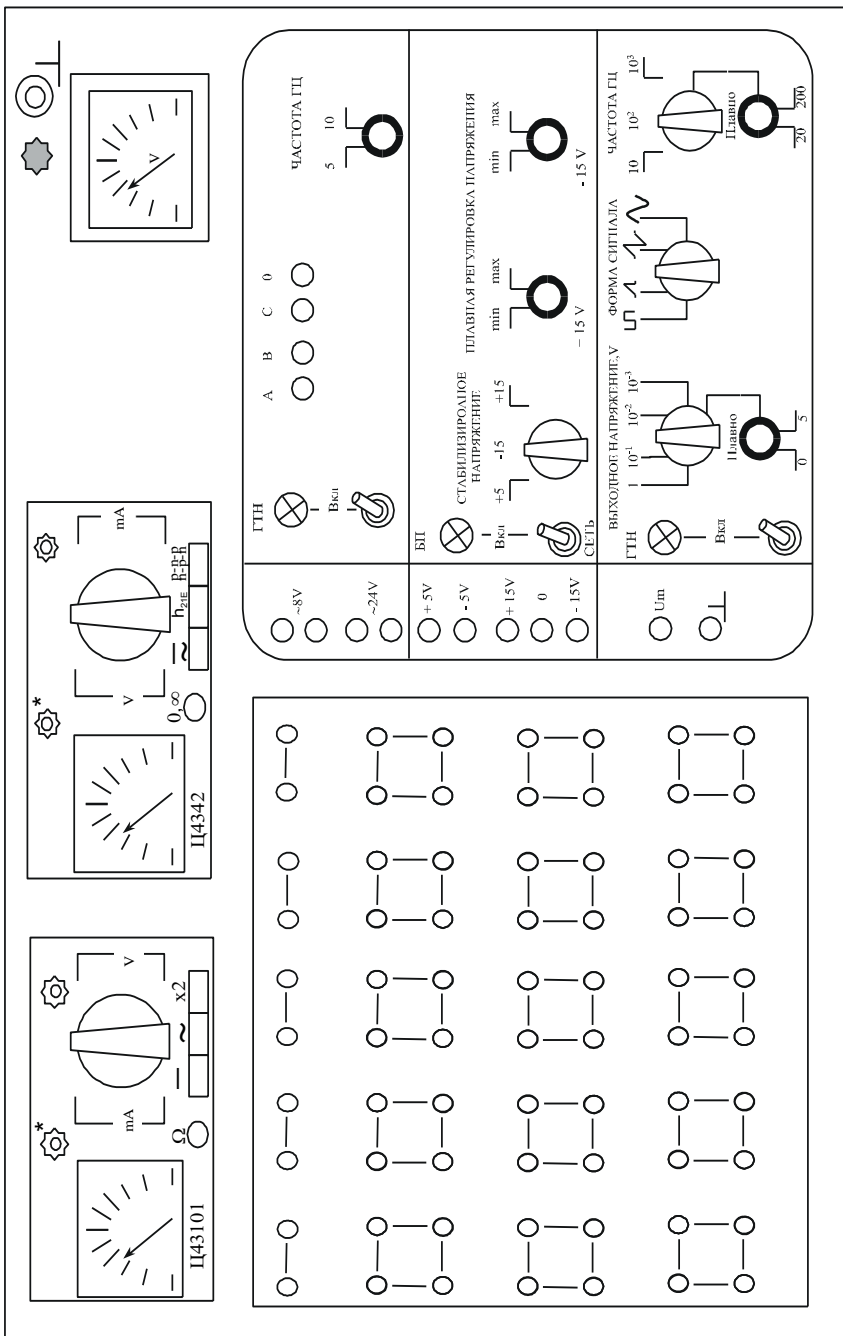


Рис. 1.1. Видяг передньої панелі лабораторного пристрою К4826

Стабілізатори $-15V$ і $+15V$ утворюють двополярне джерело живлення, під'єднане до гнізд $+15V, 0, -15V$.

Блок живлення БП має також два джерела напруги змінного струму величиною $8V$ і $24V$.

В нижній зоні розташовані органи керування і індикації генератора сигналів ГС. Генератор може виробляти сигнали прямокутної, пилкоподібної, трикутної та синусоїдної форм. Форму сигналу генератора вибирається за допомогою перемикача з позначками $\square \wedge \sim \sim$.

Частоту коливань генератора сигналів ГС можна змінювати плавно у межах від 20 Гц до 200 Гц, та ступінчасто – за допомогою перемикача множення частоти у $10, 10^2, 10^3$ разів, тобто до 200 кГц. Напруга генератора змінюється від 0 до $5V$, та може зменшуватися в $10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}$ разів за допомогою ступінчатого атенюатора. Ліву частину стенда займає монтажна панель зі штепсельними гніздами. У верхньому ряді гнізда з'єднані електрично попарно. Решта гнізд з'єднані по чотири і утворюють квадратні групи.

В кришці стенда розміщені електронні елементи у вигляді окремих блоків. Корпуси блоків є прозорими, і мають позначки з допомогою умовних графічних позначень та вказані номінальні значення параметрів. В залежності від числа виводів елементів схеми, блоки мають два або чотири штепсельні контакти. У нижніх відділеннях кришки знаходяться з'єднувальні провідники.

При виконанні лабораторних робіт на монтажній панелі збирають схеми з елементів електроніки, вимірювальних приладів, провідників та перемичок. З блоків живлення і генератора на зібрані схеми, що досліджуються, подають живлення і сигнали необхідної напруги та форми.

Над монтажною панеллю розташовані два комбіновані вимірювальні прилади (тестери) марки Ц43101 та Ц3342. Окрім напруг, струмів та опорів першим приладом можна виміряти також величину ємності, а за допомогою другого приладу можна визначати коефіцієнт передачі за струмом транзисторів у схемі з загальним емітером. Тестери використовуються, в основному, для вимірювання режимів роботи електронних схем на постійному струмі. Для вимірювання змінних складових сигналів вони не використовуються тому, що їх внутрішній опір невеликий і це призводить до значних похибок при вимірюваннях. Прилади мають кнопкові перемикачі вибору виду струму і галетні перемикачі виду та діапазону вимірюваної величини.

Прилад комбінований Ф4372 (рис. 1.2.) з цифровою і електронно-променевою індикацією призначений для вимірювання сили струму і напруги постійного струму, діючих значень струму і напруги синусоїдного струму, опору постійному струму, частоти електричних сигналів, візуального спостереження сигналів та визначення їх параметрів за осцилограмою, генерації коливань низької частоти.

Прилад складається з чотирьох основних блоків, розміщених в одному корпусі:

- Б1- блока живлення;
- Б2- осцилографа;
- Б3- мультиметра і частотоміра;
- Б4- блока генераторів.

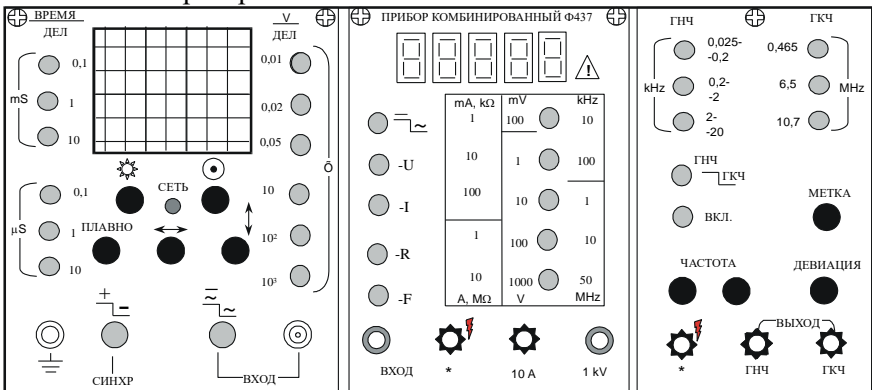


Рис. 1.2. Вигляд передньої панелі приладу Ф 4372

Елементи блока живлення змонтовані на задній стінці приладу, тумблер вмикання живлення "СЕТЬ" знаходиться в ніші верхньої кришки разом з перемикачем живлення блоків Б3-Б4. Живиться прилад від мережі змінної напруги 230 V, 50 Гц.

Передня панель приладу поділена на три частини, на які виведені органи керування та індикації блоків: осцилографа Б2, мультиметра Б3 та генераторів Б4.

На передній панелі Б2 знаходиться екран електронно-променевої трубки з нанесеною масштабною сіткою і ручки керування променем:

- ☀ - регулювання яскравості променю;
- ☉ - фокусування променю;
- ↔ - переміщення променю по горизонталі;
- ↕ - переміщення променю по вертикалі.

Коефіцієнт передачі каналу вертикального відхилення осцилографа змінюється ступінчасто шляхом натискання однієї з кнопок перемикача, позначеного V/діл, та кнопок додаткових множників коефіцієнтів відхилення на 10 , 10^2 , 10^3 .

Установка тривалості (частоти) розгортки променю по осі X здійснюється ступінчасто за допомогою кнопок перемикача "ВРЕМЯ/ДЕЛ", а також плавно з допомогою ручки "ПЛАВНО". Вказаній біля кнопок тривалості розгортки в мікросекундах μS (чи мілісекундах mS) відповідає крайнє праве положення ручки ПЛАВНО. За цей час промінь проходить віддаль, яка рівна довжині великої клітинки, що нанесена на екран осцилографа. За допомогою перемикача входів "☰" вхід осцилографа можна зробити "відкритим" для дослідження сигналів з постійною складовою частотного спектру, або "закритим" для спостереження лише змінних складових сигналів.

Синхронізація досліджуваних сигналів здійснюється автоматично. Вибір полярності сигналу для синхронізації здійснюється перемикачем "±" .

Досліджуваний сигнал за допомогою коаксіального кабелю подається на гніздо "ВХОД". Вибором значення коефіцієнта передачі каналу вертикального підсилення та тривалості розгортки добиваються стабільного зображення сигналу на екрані осцилографа, зручного для візуального спостереження. Використовуючи великі поділки масштабної сітки та значення коефіцієнтів передачі за осями X і Y, можна визначити амплітуду та період досліджуваного сигналу.

На передній панелі мультиметра (блок Б3) розташований п'ятирозрядний цифровий індикатор та органи керування мультиметром:

☰ - кнопка перемикача постійного чи змінного струму;

I, U, R, F - кнопки перемикача виду роботи;

mA, k Ω , mV, kHz, A, M Ω , V, MHz - кнопки вибору діапазону вимірювання відповідно струму, опору, напруги і частоти.

В процесі роботи за допомогою цих кнопок вибирається вид струму (постійний або змінний), вид та діапазон зміни вимірюваної величини. Вимірювана величина, в залежності від її значення і виду, подається на відповідний вхід мультиметра. Вхідні гнізда мультиметра мають позначення "ВХОД, *, 10 A, 1 kV".

Передня панель блока Б4 відноситься до генераторів низької та плавно-змінної частот. Через малу потужність генераторів та їх

великий вихідний опір, при виконанні лабораторних робіт вони не використовуються.

1.3. Програма роботи

1. Вивчити будову комплекту обладнання для дослідження пристроїв електроніки.

2. Ознайомитися з органами керування та роботою вимірювальних приладів.

3. Визначити межі регулювання напруги стабілізаторів +5V, +15V та -15V.

4. За допомогою тестера виміряти величину опору резистора та визначити похибку вимірювань.

5. Вивчити методики одержання коливань пилкоподібної, трикутної, прямокутної і синусоїдної форми та зміни їх частоти і амплітуди.

6. Визначити амплітуду і період коливання за допомогою осцилографа.

7. Ознайомитися з особливостями вимірювання напруги, струму, опору і частоти мультиметром з цифровою індикацією.

1.4. Порядок виконання роботи

1. Вивчення комплекту обладнання для дослідження пристроїв електроніки ведеться при відключеному живленні. Читаючи уважно опис наведеної вище будови стенду, знаходять відповідні надписи на лицевих панелях блоків, вмикають та вимикають відповідні перемикачі, кнопки та інші засоби комутації і запам'ятовують їх призначення. Під керівництвом викладача знайомляться з порядком включення приладів, спостерігають за світловою індикацією.

2. Знайомляться з положенням кнопок вибору виду струму, галетного перемикача виду і діапазонів вимірюваної величини, вивчають надписи над входними гніздами та на шкалах тестерів комплекту.

3. Для визначення меж регулювання напруги стабілізаторів блока живлення під'єднайте тестер Ц43101 до гнізд 0 і +15V блока живлення. Натисканням кнопки «←» виберіть вид струму постійний. Ручку галетного перемикача встановлюють проти позначки 30 V.

Резистор ПЛАВНА РЕГУЛІРОВКА +15V блока живлення виведіть в ліве крайнє положення і виміряйте мінімальне значення напруги стабілізатора +15V. $U_{\min}=V$.

Плавно повертаючи ручку резистора вправо, слідкуйте за рухом стрілки тестера. При її наближенні до краю перейдіть на більшу границю вимірювання (100V) та визначіть максимальне значення напруги. $U_{\max}=V$.

4. Для вимірювання опору резистора за допомогою тестера, натисканням одночасно двох кнопок "-" і "~" переведіть тестер в режим Омметра. Галетним перемикачем виберіть потрібну границю вимірювання опору, наприклад 1 кОм. Кінці провідників тестера з'єднайте між собою і ручкою резистора "Ω", розміщеною на корпусі тестера, встановіть стрілку на початок шкали вимірювання опору. В гнізда комутаційного поля вставте резистор з набору елементів розміщених у кришці. До резистора під'єднайте провідники тестера та проведіть вимірювання його опору. Порівняйте виміряне значення опору з величиною вказаною на резисторі і визначіть похибку вимірювання $R=(\pm)$ Ом .

5. Під'єднайте генератор сигналів лабораторного пристрою до гнізда "ВХОД" осцилографа за допомогою коаксіального кабелю так, щоб гніздо "⊥" було з'єднане з "холодним" кінцем кабелю, і ввімкніть осцилограф. Задайте тривалість розгортки 1 mS, а ручку плавної зміни тривалості ПЛАВНО переведіть в крайнє праве положення. Ручками "←" і "↕" встановіть лінію розгортки по середині екрану. Встановіть чутливість каналу вертикального відхилення 1V на поділку, натискаючи по чергово кнопки "0.01" та "10²". При необхідності відрегулюйте яскравість та фокусування променя ручками ⚙ і ⊙. Натисніть кнопку ≡, щоб зробити вхід осцилографа закритим. При цьому на екрані буде відображатися лише змінна складова досліджуваного сигналу.

Ввімкніть генератор сигналів ГС. Встановіть ручку атенюатора в положення 1, а перемикача "ЧАСТОТА" - в середнє положення. Повертаючи ручку плавної зміни вихідної напруги генератора, слідкуйте за появою зображення на екрані осцилографа. Ручкою плавної зміни частоти генератора добийтеся стійкого зображення сигналу, зручного для спостереження. Прослідкуйте за зміною форми коливань при перемиканні перемикача ФОРМА СИГНАЛА.

6. Для визначення параметрів коливань зарисуйте їх зображення з екрана осцилографа разом з масштабною сіткою. Визначіть розмах

сигналу по вертикалі h та тривалість періоду L у великих поділках сітки на екрані осцилографа. Використовуючи значення чутливості каналу вертикального відхилення m_v та тривалості установленної розгортки m_t , знайдіть амплітуду і період коливань сигналу за формулами: $A = m_v h$, $T = m_t L$.

Розрахуйте діюче значення напруги та частоту сигналу .

7. Не змінюючи установок генератора, під'єднайте до його виходу вхід мультиметра з цифровою індикацією так, щоб гніздо * було з'єднане з гніздом \perp генератора. Натисніть кнопки U і $100V$ мультиметра. Запишіть діюче значення напруги, висвітлене на індикаторі. При цьому зверніть увагу на положення крапки, яка розділює цілу та дробову частину показу.

Для вимірювання частоти коливань натисніть кнопки F і $100kHz$. Результат висвітлюється на табло. Щоб забезпечити нормальну роботу мультиметра слідкуйте, щоб при вимірюванні частоти сигналів їх напруга була у межах від 0.5 до $1.5 V$.

1.5. Контрольні запитання

1. Які стабілізовані напруги виробляє блок живлення пристрою?
2. Який максимальний допустимий струм навантаження стабілізаторів блока живлення?
3. Які межі зміни стабілізованих напруг?
4. Який робочий діапазон частот генератора сигналів комплекту?
5. У яких випадках використовують відкритий вхід осцилографа?
6. В якому положенні ручки ПЛАВНО тривалість розгортки осцилографа відповідає значенням, вказаним біля кнопок ступінчатої зміни тривалості розгортки?
7. Які ознаки переповнення розрядів індикатора мультиметра?
8. В якій смузі частот лежать сигнали, що їх можна спостерігати на екрані осцилографа лабораторного комплекту?

Лабораторна робота №2

Дослідження напівпровідникових діодів та їх застосування при випрямленні змінного струму.

2.1. Мета роботи

Ознайомитись з будовою, принципом дії та властивостями напівпровідникових діодів, їх використанням у схемах електронних пристроїв при випрямленні змінного струму.

2.2. Теоретичні відомості

Елементною базою сучасної електроніки є напівпровідникові прилади і напівпровідникові інтегральні мікросхеми. Всі вони виконуються на основі напівпровідників, тому важливо розуміти механізми їх провідності.

Напівпровідниками називають клас матеріалів, які за своєю електропровідністю ($10^2 \dots 10^{-8}$ см/м) займають проміжне місце між провідниками і діелектриками. Характерним для напівпровідників є збільшення електропровідності при зростанні температури. Ширина забороненої зони в напівпровідниках не перевищує 3 еВ.

Типовими напівпровідниками є кремній, германій і селен. До напівпровідників належать також деякі сполуки типу арсенід галію, карбід кремнію, сульфід кадмію і інші.

Кремній *Si* і германій *Ge* належать до четвертої групи елементів таблиці Менделєєва і мають кристалічну структуру. Атоми елементів розташовані у вузлах кристалічної решітки. Зв'язок між сусідніми атомами здійснюється двома усуспільненими електронами (по одному від кожного атома). Такий зв'язок називають двовалентним або ковалентним (рис. 2.1,а).

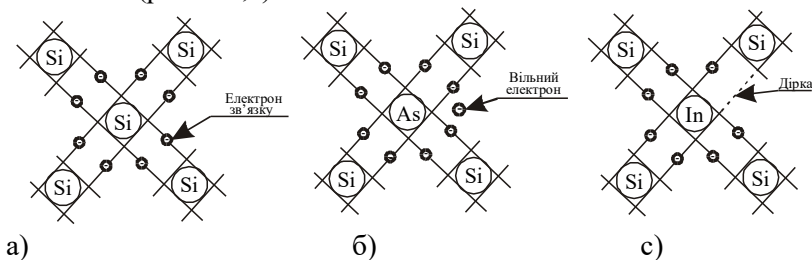


Рис.2.1. Структура напівпровідникового кремнію: а) – чистого, б) - з донорною домішкою, в) - з акцепторною домішкою

Під дією зовнішніх факторів (температури, опромінення і інших) деякі електрони одержують енергію, достатню для звільнення від ковалентного зв'язку, і можуть служити носіями струму. При переході електрона в зону провідності на його місці залишається некомпенсований додатний заряд, який називають діркою. На вакантне місце дірки може перескочити валентний електрон з іншого атома, тоді дірка виникає в ньому. Це еквівалентно переміщенню додатного заряду з величиною, рівною заряду електрона. Процес утворення пари електрон-дірка називають генерацією носіїв, а зворотний - рекомбінацією. Енергія, яка вивільняється при рекомбінації електрона і дірки, може випромінюватись у вигляді γ -квантів або передаватися коливанням кристалічної решітки.

Провідність чистих (бездомішкових) напівпровідників називається власною. Вона складається з електронної провідності (провідності n -типу), зумовленої впорядкованим рухом вільних електронів, і діркової провідності (провідності p -типу), яка зв'язана з направленим переміщенням дірок. В основі направлено переміщення дірок під дією зовнішнього електричного поля лежать "перескоки" електронів від атома до атома проти напрямку поля. Цей рух відбувається з меншою швидкістю, ніж рух вільних електронів, тому рухомість дірок менша.

Концентрація дірок і електронів у чистому напівпровіднику однакова. Добитись переважаючої провідності p -типу чи n -типу можна шляхом легування чистого напівпровідника, тобто введенням домішок атомів з іншою валентністю. Провідність легованих напівпровідників називають домішковою. Напівпровідники з переважаючою електронною провідністю називаються напівпровідниками n -типу. Електронна провідність зумовлюється домішками елементів п'ятої групи таблиці Менделєєва, які називають донорними. Механізм виникнення провідності n -типу пояснюється тим, що при заміщенні атома кремнію у вузлі решітки на п'ятиелементний атом домішки, наприклад, атом миш'яку As , чотири валентні електрони домішки вступають в ковалентні зв'язки, а п'ятий надлишковий залишається вільним (рис. 2.1,б). Якщо на місце атома напівпровідника помістити атом елемента з третьої групи, наприклад, атом індію In , то три його валентні електрони вступають у ковалентний зв'язок, а в одному місці залишиться дірка (рис. 2.1,в). Домішки, які спричиняють провідність p -

типу, називають акцепторними, а напівпровідники з таким типом домішок - напівпровідниками p -типу.

У більшості напівпровідникових приладів використовуються властивості електронно-діркового переходу. Електронно-дірковим переходом називають вузьку (декілька мікронів) область, збіднену вільними носіями, яка виникає на межі областей з різним типом провідності. Виникнення p - n -переходу зумовлено градієнтом концентрації носіїв в приграничних областях (рис. 2.2,а). В результаті дифузії електрони з n -області переходять в p -область, що призводить до появи некомпенсованих додатних зарядів атомів донорної домішки в n -області та від'ємних зарядів у p -області. Аналогічно, перехід дірок з p -області в n -область викликає появу від'ємних зарядів атомів акцепторної домішки в p -області і додатних зарядів в n -області. Таким чином, на границі областей n -типу і p -типу виникають два шари об'ємних нерухомих зарядів - подвійний запірний шар. Електричне поле, яке створюють заряди запірного шару, протидіє подальшому руху носіїв через перехід. При цьому встановлюється динамічна рівновага: частина носіїв покидає перехід, а їх місце займає така ж кількість інших носіїв.

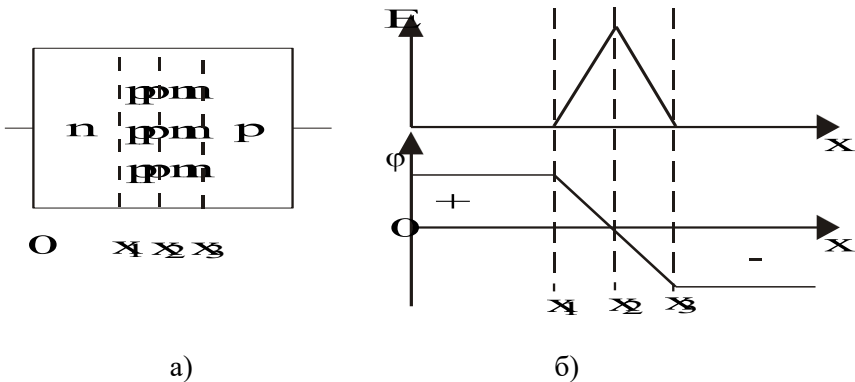


Рис.2.2. Структура p - n -переходу (а) та розподіл електричного поля і потенціалу (б)

Розподіл електричного поля і потенціальна діаграма p - n -переходу приведені на рис. 2.2,б. Перепад потенціалів, рівний контактній різниці потенціалів, називають потенціальним бар'єром, так як він перешкоджає руху основних носіїв. Разом з тим поле переходу є

прискорюючи для неосновних носіїв: дірок з n -області і електронів з p -області. Концентрації неосновних носіїв невеликі.

Електронно-дірковий перехід отримують в пластинках кристалічного напівпровідника методом вплавлення відповідних домішок або їх дифузії при високих температурах.

Властивості p - n -переходу залежать від величини і знаку зовнішнього прикладеного поля. Розрізняють пряме і обернене ввімкнення переходу. При прямому ввімкненні (прямому зміщенні) переходу позитивний полюс джерела живлення під'єднують до p -області, а негативний до n -області напівпровідника (рис. 2.3,а) У цьому стані зовнішнє поле направлено проти внутрішнього поля переходу, тому потенціальний бар'єр знижується і основні носії отримують можливість вільно рухатись через перехід, створюючи прямий струм. Зі збільшенням прямої напруги прямий струм швидко зростає, так як концентрація основних носіїв велика і може перевершити максимально допустиме значення. У відкритому стані спад напруги на p - n -переході невеликий і складає 0,6...0,8 V.

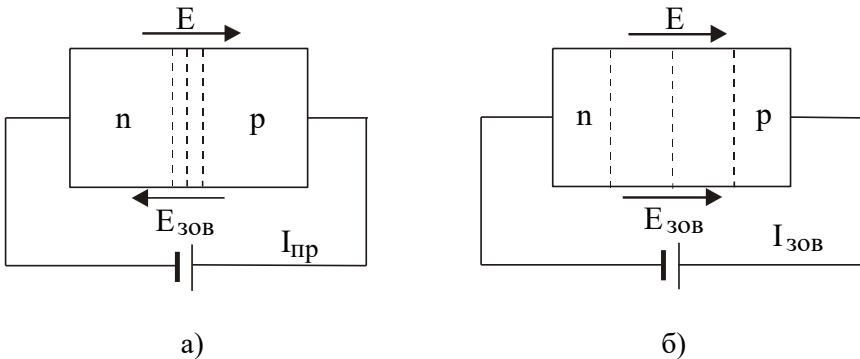


Рис.2.3. Пряме (а) і зворотнє (б) ввімкнення переходу

При оберненому включенні (оберненому зміщенні) p - n -переходу поле, створене джерелом живлення, співпадає з полем переходу (рис. 2.3,б). Потенціальний бар'єр між p - і n -областями зростає. Під дією зовнішнього поля основні носії відтягуються від приконттактних шарів і ширина p - n -переходу збільшується. При оберненій напрузі зміщення перехід закривається і рух основних носіїв практично припиняється, при цьому перехід залишається відкритим для неосновних носіїв. Рухаючись через перехід, неосновні носії створюють невеликий зворотний струм. Відзначимо також, що рух неосновних носіїв через

перехід приводить до зниження потенціального бар'єру. При зростанні зворотної напруги зворотний струм швидко досягає насичення і майже не змінюється. Коли зворотна напруга досягає критичного значення, розпочинаються процеси іонізації, що призводить до різкого зростання зворотного струму — настає електричний пробій. Електричний пробій може перейти у тепловий (незворотний), при якому перехід руйнується.

Властивості $p-n$ -переходу при прикладенні зовнішньої напруги визначаються його вольт-амперною характеристикою (рис. 2.4.).

З вольт амперної характеристики видно, що $p-n$ -перехід має вентильні властивості, тобто пропускає електричний струм лише в одному напрямку. Крім цього, у закритому стані $p-n$ -перехід володіє електричною ємністю. Його можна розглядати як своєрідний плоский конденсатор, де діелектриком є область закритого $p-n$ -переходу. В сильно легованих напівпровідниках в області $p-n$ -переходу виникає квантово-механічний тунельний ефект, який полягає у тому, що електрони можуть проходити потенціальний бар'єр без втрати енергії. При цьому на прямій ділянці вольт-амперної характеристики спостерігається ділянка з від'ємним диференціальним опором.

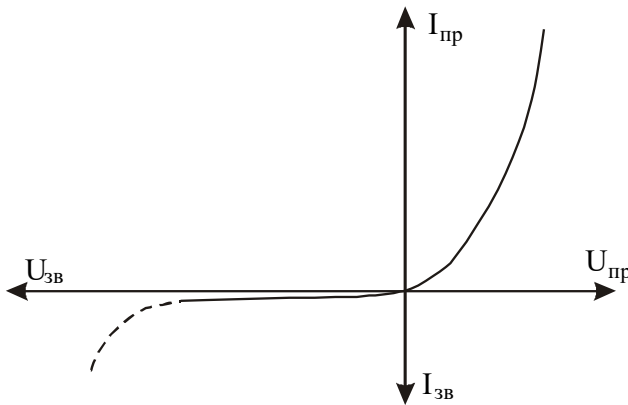


Рис.2.4. Вольт амперна характеристика $p-n$ -переходу

Властивості електронно-діркового переходу використовуються в напівпровідникових діодах.

Напівпровідниковий діод — це напівпровідниковий прилад з одним $p-n$ -переходом і двома зовнішніми виводами. Серед

напівпровідникових діодів найбільш поширені випрямні діоди, призначені для роботи у випрямлячах змінного струму.

Випрямляч — це пристрій для перетворення змінного струму у постійний. Випрямлячі є вторинним джерелом постійного струму.

Як правило, випрямляч складається з силового трансформатора, електричних вентилів, згладжуючого фільтра і стабілізатора.

Трансформатор служить для приведення величини змінної напруги до потрібного значення, та здійснює гальванічну розв'язку між електричною мережею і навантаженням (первинна і вторинна обмотки трансформатора не з'єднані електрично).

Випрямлення змінного струму здійснюється за допомогою електричних вентилів, з'єднаних за певною схемою. У ролі вентилів переважно використовують напівпровідникові випрямні діоди.

Згладжуючі фільтри призначені для зменшення пульсацій випрямленої напруги.

Стабілізатори повинні підтримувати задане значення постійної напруги при коливаннях напруги у мережі змінного струму і при зміні навантаження.

Основними характеристиками випрямлячів є:

- номінальна напруга і частота мережі живлення U_1 і f ;
- середні значення випрямлених струму $I_{н.ср.}$ і напруги $U_{н.ср.}$;
- споживна потужність S_1 ;
- коефіцієнт корисної дії η ;
- коефіцієнт пульсації p .

Коефіцієнт пульсації - відношення амплітуди першої (основної) гармоніки змінної складової випрямленої напруги до її постійної складової: $p = U_{т\text{ осн}} / U_{н.ср.}$.

Випрямлячі поділяються на одно- і трифазні, одно- і двопівперіодні, керовані і некеровані та з множенням напруги.

Схема однофазного однопівперіодного випрямляча без фільтра приведена на рис 2.5,а.

У цій схемі струм через діод VD і навантаження R_n проходить лише на протязі однієї половини періоду, коли до анода діода напруга U_2 прикладена додатним потенціалом по відношенню до катода. В інший півперіод діод закритий і струм через навантаження не протікає.

Постійна складова випрямленої напруги рівна її середньому значенню

$$\text{за період: } U_{н.ср.} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} \cdot U_2 \sin wt \, dt = 0.45 \cdot U_2.$$

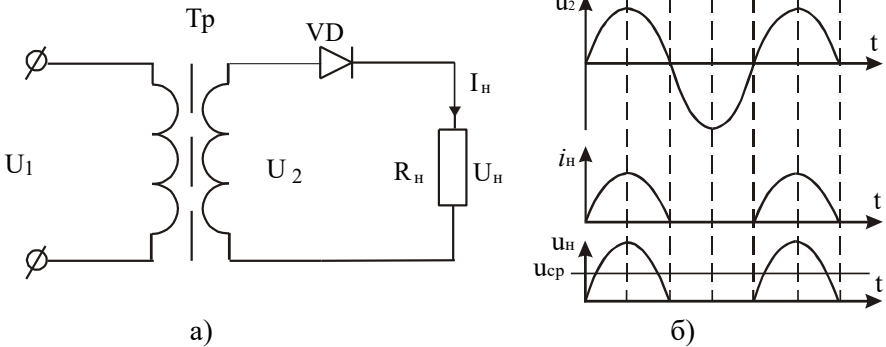


Рис.2.5. Схема однопівперіодного випрямляча (а) і часові діаграми напруг і струмів (б)

Як бачимо з підрахунку, постійна складова випрямленої напруги при однопівперіодному випрямленні є значно менша за величину діючого значення напруги на вторинній обмотці U_2 , тобто трансформатор використовується малоефективно. Випрямлений струм у навантаженні сильно пульсує. Коефіцієнт пульсацій $p = 1.57$ можна отримати, використавши розкладання випрямленої напруги в ряд Фур'є: $u = U_{н.ср.} (1 + 1.57 \cos \omega t + 0.67 \cos 2\omega t - 0.14 \cos 4\omega t + \dots)$.

Для роботи в однопівперіодному випрямлячі потрібно підбирати діоди з максимально допустимим середнім прямим струмом не меншим за середнє значення випрямленого струму $I_{нр.ср.маx} > I_{н.ср.}$. У закритому стані вся напруга вторинної обмотки прикладається до діода, тому максимально допустима зворотна напруга $U_{об.маx}$ діода повинна бути більшою за амплітудне значення напруги вторинної обмотки U_{2m} , або задовольняти умові: $U_{н.ср.з.маx}$. Однопівперіодні випрямлячі використовуються для живлення малопотужних високоомних електричних кіл.

Двопівперіодні схеми випрямлення бувають двох типів : з виводом середньої точки вторинної обмотки силового трансформатора і мостові. Схема з виводом середньої точки по суті є комбінацією двох

однопівперіодних випрямлячів, які працюють на спільне навантаження (рис. 2.6,а).

Напруги U_2' і U_2'' на половиних вторинної обмотки однакові по величині, але зсунуті по фазі на кут 180^0 , тому їх можна розглядати як двофазну напругу (рис. 2.6, б).

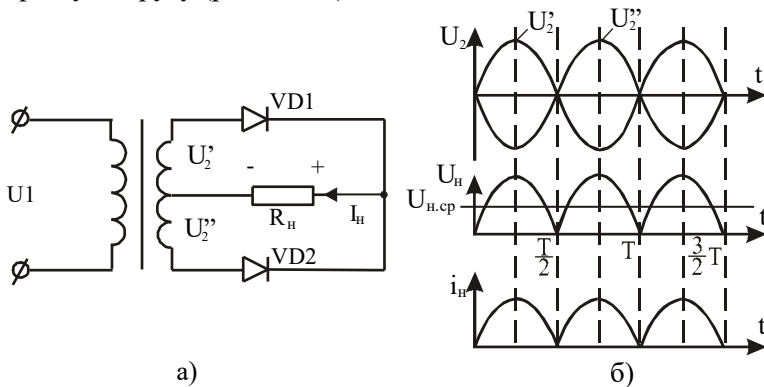


Рис. 2.6. Схема двопівперіодного двофазного випрямляча а) і часові діаграми напруг і струмів б)

Діоди відкриваються по чергову. Якщо протягом першого півперіоду струм протікає через діод VD_1 і навантаження R_n , то у наступний — через діод VD_2 і навантаження R_n . Таким чином, струм у навантаженні протікає протягом обох півперіодів і в одному й тому ж напрямку. Недоліком випрямляча з відводом від середньої точки трансформатора є те, що максимально допустима зворотна напруга діодів повинна бути у два рази більша, ніж амплітуда напруги на половині обмотки трансформатора.

Найчастіше для живлення електронних пристроїв використовується двопівперіодна мостова схема випрямлення (рис. 2.7, а).

В схему входить трансформатор і чотири діоди, включені у вигляді електричного моста. До однієї діагоналі моста під'єднана вторинна обмотка трансформатора, а до другої - навантаження R_n . В один з півперіодів, коли додатний потенціал на верхньому кінці обмотки, струм проходить через діод VD_3 , навантаження R_n , діод VD_2 і до другого кінця обмотки. У наступний півперіод, коли знак напруги U_2 поміняються на зворотний, діоди VD_2 і VD_3 закриваються. Тоді струм

проходить через діод VD_4 , навантаження R_H і діод VD_1 . Струми у навантаженні мають однаковий напрям. До кожного діода прикладається зворотна напруга, рівна амплітудному значенню напруги вторинної обмотки.

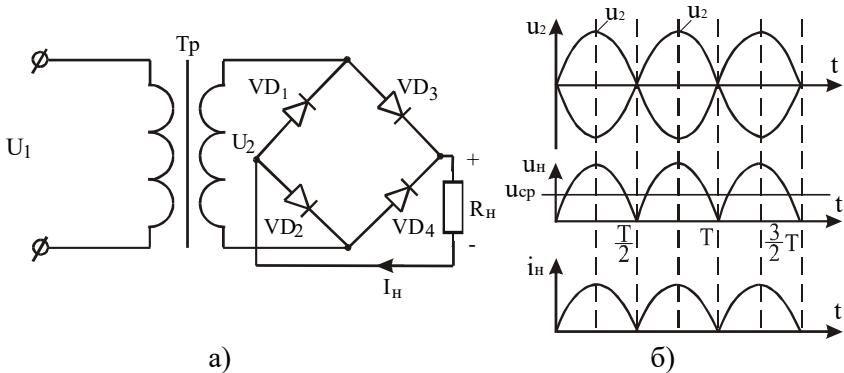


Рис. 2.7. Схема двопівперіодного мостового випрямляча (а) і часові діаграми напруг і струмів (б)

Для обох двопівперіодних схем максимально допустимий прями́й струм діодів у два рази менший за постійну складову випрямленого струму $I_{np,cr,max} > 0.5 \cdot I_{н.ср.}$. Постійна складова випрямленої напруги близька до діючого значення напруги вторинної обмотки $U_{н.ср.} = 0.9U_2$. Розкладання у ряд Фур'є імпульсів напруги при двопівперіодному випрямленні приводить до виразу

$$u = U_{н.ср.} (1 + 0.67 \cos 2\omega t - 0.14 \cos 4\omega t + \dots)$$

Звідси коефіцієнт пульсації $p = 0.67$. Він значно менший, ніж при однопівперіодному випрямленні. Крім того, основна гармоніка має частоту пульсацій у два рази більшу, ніж частота напруги живлення, що спрощує згладжування пульсацій.

При живленні електронних пристроїв коефіцієнт пульсації напруги не повинен перевищувати $10^{-4} \dots 10^{-7}$. Для зменшення пульсації (змінної складової випрямленої напруги) між випрямлячем і навантаженням вмикають згладжуючі фільтри. Основним показником якості роботи фільтра є коефіцієнт згладжування, рівний відношенню коефіцієнтів

$$\text{пульсацій на вході і виході фільтра: } q = \frac{K_{н.вх.}}{K_{н.вих.}}$$

Згладжуючі фільтри бувають прості (індуктивні та ємнісні), складні (одно- та багатоланкові) і електронні (транзисторні). Згладжуючі властивості конденсатора і індуктивності пояснюються різною величиною опору цих елементів для змінних і постійних складових струму. Найпростішим фільтром можна вважати конденсатор великої ємності, приєднаний паралельно до навантаження. Конденсатор запасє електричну енергію, коли діоди випрямляча відкриваються, і віддає у навантаження, коли вони закриваються, що призводить до зменшення пульсацій.

2.3. Програма роботи

1. Зібрати схему дослідження випрямляча.
2. Зняти осцилограми напруг.
3. Зняти навантажувальну характеристику випрямляча.
4. Визначити коефіцієнти пульсацій випрямляча без фільтра і з фільтром та коефіцієнт згладжування випрямляча.
5. Визначити вплив ємності C на коефіцієнт пульсації при $R_n = const$.

2.4. Опис схеми дослідження випрямляча

Схема електричного кола (рис. 2.8) для дослідження випрямляча змінного струму, що наведена нижче, містить наступні елементи: резистор 1 кОм; конденсатор електролітичний 220 мкФ, 16V; блок діодів КЦ405Б; тумблер; прилад Ц43101; прилад Ц43342; прилад Ф4372.

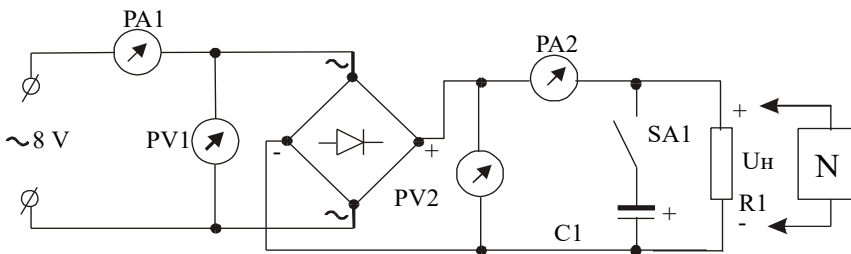


Рис. 2.8. Схема дослідження випрямляча

В роботі досліджується двопівперіодна мостова схема випрямлення, зібрана на основі випрямляючого блоку діодів $VD1$. Випрямляч працює без трансформатора, змінна напруга подається з блока живлення лабораторного стенду. Навантаженням випрямляча служить резистор $R1$. Зміна навантаження здійснюється паралельним під'єднанням резисторів. Конденсатор $C1$ згладжує пульсації випрямленого струму. Конденсатор вмикається у схему при включенні вимикача $SA1$.

2.5. Порядок виконання роботи

1. На монтажній панелі з елементів набору і вимірювальних приладів складіть схему дослідження випрямляча згідно з рис. 2.8. Зверніть увагу на полярність конденсатора $C1$. Вхід схеми з'єднайте з гніздами 8V (змінної напруги) блока живлення комплекту.

2. Під'єднайте осцилограф до вхідних гнізд випрямляча. Ручками керування осцилографа добийтеся стійкого зображення змінної напруги на екрані осцилографа. Зарисуйте осцилограму напруги разом з великими клітинками масштабної сітки та вкажіть чутливість каналу вертикального підсилення і тривалість розгортки.

Від'єднайте вхід осцилографа від входу схеми і приєднайте його паралельно до резистора $R1$, слідкуючи щоб “холодний” кінець кабелю осцилографа був з'єднаний з загальним провідником. Прослідкуйте, щоб вимикач $SA1$ був розімкнутий. Не змінюючи установок осцилографа, зніміть і зарисуйте осцилограму випрямленої напруги без згладжуючого конденсатора.

Тумблером $SA1$ ввімкніть у схему згладжуючий конденсатор $C1$. За допомогою осцилографа прослідкуйте за зміною величини пульсацій при включенні фільтра. Зарисуйте осцилограму випрямленої напруги при наявності згладжуючого фільтра. Цей дослід можна повторити при ввімкненні $C2$ іншої ємності.

3. Для зняття зовнішньої характеристики випрямляча $U_n = f(I_n)$ паралельно до навантаження підключіть вхід мультиметра, слідкуючи щоб гніздо “*” було з'єднане з загальним провідником. Величину резистора $R1$ змінюйте ступінчасто, приєднуючи додаткові резистори з номінальним значенням опору 1кОм, 1.5кОм та 3.3 кОм паралельно до $R1$. Постійну складову випрямленої напруги вимірюйте мультиметром у режимі вольтметра постійного струму, а величину струму I_n приладом $PA2$. Дані занесіть до таблиці 2.1.

Табл. 2.1.

I_n	A				
U_n	V				

За даними таблиці побудуйте навантажувальну характеристику випрямляча.

4. Для визначення коефіцієнта пульсацій випрямляча відключіть конденсатор $C1$ і за допомогою мультиметра виміряйте постійну складову випрямленої напруги $U_n = \dots\dots V$. Переключіть мультиметр для вимірювання змінної напруги і виміряйте діюче значення напруги пульсацій $U_n = \dots\dots V$.

Коефіцієнт пульсацій розрахуйте за формулою $p_1 = \frac{2U_n}{U_n}$.

Під'єднайте конденсатор і повторіть вимірювання $U_n = \dots\dots V$; $U_n = \dots\dots V$. Визначте коефіцієнт пульсацій випрямляча з фільтром p_2 .

Знайдіть коефіцієнт згладжування за формулою $g = \frac{p_1}{p_2}$. Повторіть дослід при вмиканні $C2$.

2.6. Контрольні запитання

1. Який механізм виникнення p - n -переходу в напівпровідниках?
2. Які властивості p - n -переходу ви знаєте?
3. Назвіть основне призначення випрямляча, які структури випрямлячів вам відомі?
4. Які основні схеми випрямлення застосовуються у випрямлячах?
5. Які вимоги до діодів, що використовуються у випрямлячах?
6. Поясніть роботу мостової схеми випрямлення.
7. Поясніть необхідність згладжуючих фільтрів у схемах випрямлячів.

Лабораторна робота №3

Дослідження напівпровідникових стабілітронів і параметричного стабілізатора напруги

3.1. Мета роботи

Дослідним шляхом зняти вольт-амперну характеристику стабілітрона, визначити його параметри, порівняти з довідковими даними і дослідити вплив навантаження на точність стабілізації напруги стабілітроном.

3.2. Теоретичні відомості

Стабілітронами називають напівпровідникові діоди, призначені для стабілізації напруги. Вони працюють при оберненому включенні, а їхні стабілізуючі властивості пояснюються особливістю зворотної вітки вольт амперної характеристики (рис. 3.1).

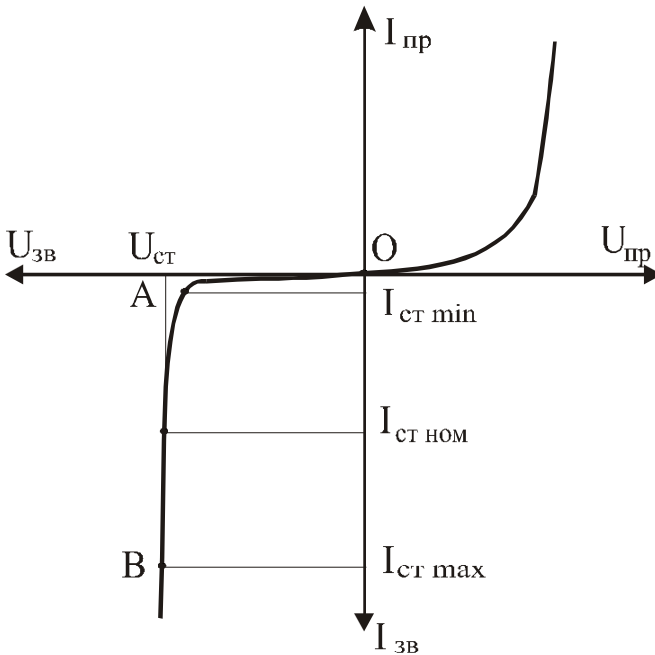


Рис. 3.1. Вольт-амперна характеристика стабілітрона

Робочою ділянкою характеристики є відрізок АВ, що проходить майже паралельно до осі струму і відповідає режиму неруйнівного електричного пробую у стабілітроні. Як видно з рис. 3.1, в області електричного пробую спад напруги на стабілітроні $U_{ст}$ залишається практично постійним при значних змінах струму стабілізації $I_{ст}$.

Характер вольт-амперної характеристики стабілітрона в області електричного пробую пояснюється властивостями $p-n$ -переходу. При оберненій полярності прикладеної напруги електричне поле, яке створене джерелом живлення, накладається на поле переходу і посилює його. Внаслідок цього потенціальний бар'єр між областями зростає і $p-n$ -перехід закривається для основних носіїв. Однак, електричне поле переходу залишається прискорюючим для неосновних носіїв: електронів з p -області і дірок з n -області. Під дією поля неосновні носії вільно рухаються через перехід, створюючи невеликий зворотний струм. Оскільки концентрація неосновних носіїв низька, то зворотний струм швидко досягає насичення I_0 і в певному інтервалі майже не залежить від величини прикладеної напруги. Це відповідає відрізку ОА оберненої вітки характеристики (рис. 3.1).

З ростом зворотної напруги зростають напруженість поля і кінетична енергія носіїв струму. При оберненій напрузі, близькій до $U_{ст}$, починаються процеси електростатичної і ударної іонізації атомів напівпровідника. В результаті іонізації утворюються нові пари вільних електронів і дірок, які, в свою чергу, розганяються полем і утворюють зростаюче число носіїв струму. Ці процеси носять лавиноподібний характер, призводять до різкого зростання струму через перехід і називаються електричним пробуюм. В області стійкого електричного пробую значні зміни струму викликаються незначними змінами прикладеної напруги, що і пояснює хід ділянки АВ вольт-амперної характеристики стабілітрона. При зменшенні прикладеної напруги властивості $p-n$ -переходу відновлюються.

Вольт-амперна характеристика стабілітрона при прямому включенні нічим не відрізняється від характеристики звичайного напівпровідникового діода.

Явище електричного пробую супроводжується значним виділенням теплової енергії в зоні $p-n$ -переходу. Неконтрольоване збільшення напруги може привести до переростання електричного пробую у тепловий з повним руйнуванням $p-n$ -переходу.

Основним матеріалом для виготовлення стабілітронів служить кремній, тому що він здатний витримувати більші теплові

навантаження порівняно з германієм. Площинні стабілітрони виготовляють за сплавною або дифузійно-сплавною технологією. Для цього в пластинку кремнію n -типу вплавають алюміній, який служить акцепторною домішкою для кремнію. Кристал з утвореним p - n -переходом поміщають в герметичний корпус. Стабілітрони виготовляються на напруги стабілізації від кількох вольт до кількох сотень вольт.

Добитися стабілізації напруги можна і на прямій вітці вольт-амперної характеристики. Стабілізуючі діоди, котрі працюють в області електричного пробую при прямому включенні, називають стабісторами. Характерною для стабісторів є низька напруга стабілізації, яка не перевищує трьох вольт.

Промисловістю випускаються також двоанодні стабілітрони, які стабілізують напругу обох полярностей.

Основними характеристиками стабілітронів є:

1. Напруга стабілізації $U_{ст}$ — спад напруги на стабілітроні при номінальному значенні струму стабілізації.

2. Номінальний струм стабілізації $I_{ст.ном}$ — значення постійного струму, при якому визначається напруга стабілізації.

3. Мінімальний і максимальний струми стабілізації $I_{ст.мін}$ і $I_{ст.макс}$ — визначають межі допустимих значень струму стабілізації.

4. Диференціальний опір r_d — відношення приросту напруги стабілізації до відповідного невеликого приросту струму стабілізації

$$r_d = \frac{\Delta U_{cm}}{\Delta I_{cm}}$$

5. Температурний коефіцієнт напруги стабілізації K_t — відношення зміни напруги стабілізації до зміни температури при середньому значенні струму стабілізації $I_{ст.ср}$

$$K_t = \frac{\Delta U_{cm}}{U_{cm} \Delta T}$$

Стабілітрони знаходять широке застосування в різноманітних пристроях електроніки, як джерела стабільної (опорної) напруги, наприклад, використовуються в параметричних стабілізаторах напруги.

Найпростіша схема параметричного стабілізатора напруги складається з баластного резистора R_b і стабілітрона D , включених послідовно (рис. 3.3).

При зміні струму в навантаженні вихідна напруга залишається практично незмінною, так як вона визначається спадом напруги на

стабілітрони $U_{\text{вих}}=U_{\text{ст}}$. Очевидно, що стабілізація напруги при зміні струму через стабілітрон можлива при зміні внутрішнього опору стабілітрона, тобто його параметру.

Ефективність роботи стабілізатора характеризується коефіцієнтом стабілізації, рівним відношенню зміни вхідної напруги до вихідної

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

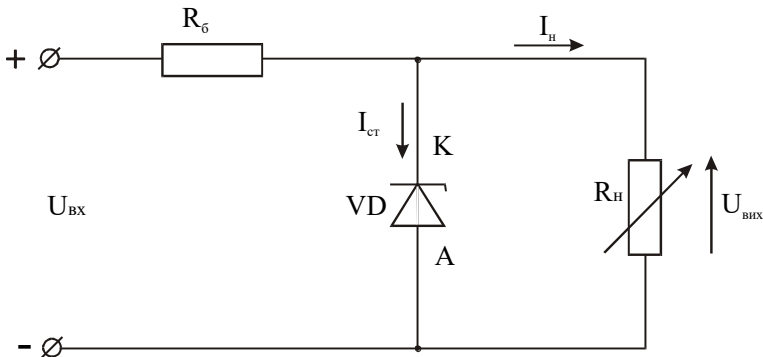


Рис. 3.2. Параметричний стабілізатор напруги

Для нормальної роботи стабілізатора струм у навантаженні повинен бути меншим від струму через стабілітрон $I_{\text{н}} < I_{\text{ст}}$.

Для збільшення напруги стабілізації допускається послідовне з'єднання стабілітронів з однаковим струмом стабілізації. Паралельна робота стабілітронів не допускається через різні умови пробою. Після пробою одного із стабілітронів напруга стабілізується, тому в іншому пробій може не відбутися.

3.3. Програма роботи

1. Зібрати схему дослідження стабілітрона.
2. Зняти вольт-амперну характеристику стабілітрона при прямому включенні напруги живлення $I_{\text{пр}}=f(U_{\text{пр}})$.
3. Зняти вольт-амперну характеристику стабілітрона при оберненому включенні напруги живлення $I_{\text{зв}}=f(U_{\text{зв}})$.
4. Зняти навантажувальну характеристику параметричного стабілізатора на основі стабілітрона.
5. Визначити коефіцієнт стабілізації параметричного стабілізатора.

6. За вольт-амперною характеристикою визначити основні параметри досліджуваного стабілітрона і порівняти з довідковими даними.

3.4. Опис схеми дослідження стабілітрона

Схема дослідження стабілітрона приведена на рис.3.4. Живлення схеми здійснюється від стабілізатора +15V блока живлення БП лабораторного стенда. Баластний резистор R1 служить для обмеження струму стабілітрона при електричному пробіі.

На схемі: R1 - резистор 470 Ом; VD1 - стабілітрон КС157Ж; R2 - резистор змінний 47 Ом; SA1-тумблер; PA1-прилад Ц43101; PA2-прилад Ц43342; PV1- прилад Ф4373.

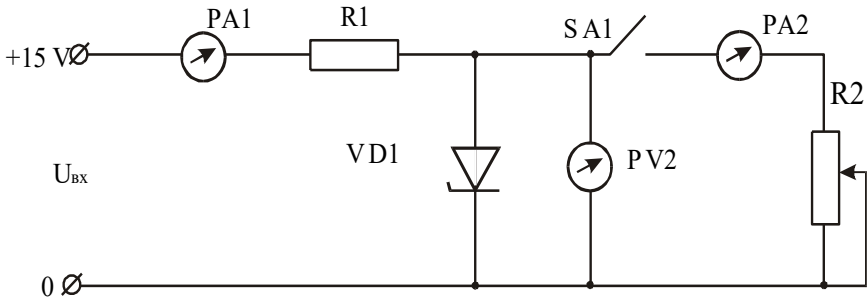


Рис. 3.4. Схема дослідження стабілітрона

За допомогою ключа SA1 паралельно до стабілітрона приєднується опір навантаження R2 для дослідження стабілітрона у режимі параметричного стабілізатора напруги.

3.5. Порядок виконання роботи

1. На монтажній панелі лабораторного стенда з елементів набору скласти схему дослідження стабілітрона згідно з рис. 3.4.

Ручку регулювання напруги +15V вивести в крайнє ліве положення. У присутності викладача ввімкнути блок живлення та вимірювальний прилад. Прослідкувати, щоб вимикач SA1 був розімкнутий.

2. Змінюючи ручкою +15V напругу живлення схеми $U_{ж}$ від мінімального значення до максимального ступенями в 2V, зняти пряму вітку вольт-амперної характеристики стабілітрона $I_{пр}=f(U_{пр})$. Дані занести у таблицю 3.1.

Табл. 3.1

$U_{ж}, V$	2	4	6	8	10	12	16	18	20	22	24
$U_{пр}, V$											
$I_{пр}, V$											

За даними табл. 3.1 побудувати пряму вітку вольт-амперної характеристики.

3. Витягнути елемент зі стабілітроном, розвернути на 180° і знову вставити у ті ж гнізда монтажною панелі таким чином, щоб напруга до стабілітрона була прикладена у зворотному напрямку.

Змінюючи напругу $U_{ж}$ ручкою $+15V$ блока живлення від мінімального до максимального значення ступенями $2V$, зняти обернену вітку вольт-амперної характеристики стабілітрона $I_{зв}=f(U_{зв})$. Дані занести у таблицю 3.2.

Табл. 3.2

$U_{ж}, V$	2	4	6	8	10	12	16	18	20	22	24
$U_{зв}, V$											
$I_{зв}, V$											

За даними табл.3.2 побудувати зворотну вітку вольт-амперної характеристики стабілітрона.

4. Для зняття навантажувальної характеристики $U_n=f(I_n)$ під'єднати навантаження $R2$ за допомогою ключа $SA1$. Установити напругу живлення схеми рівну $18V$. Плавню змінюючи величину резистора $R2$, встановлювати струм у навантаженні I_n , рівний $5, 10, 15, 20, 25$ mA, та вимірювати величину напруги на навантаженні мультиметром. Дані занести у таблицю 3.3.

Табл. 3.3

I_n, mA	5	10	15	20	25
U_n, V					

За даними табл. 3.3 побудувати навантажувальну характеристику параметричного стабілізатора.

5. Для визначення коефіцієнта стабілізації зафіксувати струм у навантаженні, рівний 20 mA. Змінити напругу на вході схеми на $1V$ та виміряти зміну напруги на навантаженні. Дані занесіть у табл.3.4.

Табл. 3.4

$U_{вх}, V$	$\Delta U_{вх}, V$	$U_{вих}, V$	$\Delta U_{вих}, V$	$K_{ст}$

За даними табл. 3.4 розрахувати коефіцієнт стабілізації стабілізатора $K_{ст}$.

6. За вольт-амперними характеристиками визначити основні параметри стабілітрона і порівняти з довідковими даними.

3.6. Контрольні запитання

1. Яке призначення стабілітронів?
2. Як класифікуються та позначаються стабілітрони?
3. Який вигляд має вольт-амперна характеристика стабілітрона і як вона пояснюється?
4. Які основні характеристики стабілітронів?
5. При якому включенні працюють стабілітрони?
6. В якому режимі працюють стабілітрони?
7. У чому полягає електричний пробій $p-n$ -переходу?
8. Які особливості роботи стабісторів?
9. Як працюють двоанодні стабілітрони?
10. Наведіть приклади застосування стабілітронів?

Література

1. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник. К. : Каравела, 2017. 416 с.
2. Дмитрів В. Т. Шиманський В. М. Електроніка і мікросхемотехніка : навч. посібник. Львів : Афіша, 2006. 175 с.
3. Квітка С. О. Електроніка та мікросхемотехніка : підручник. Мелітополь : Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. 223 с.
4. Матвієнко М. П. Основи електротехніки : підручник. Вид. 2-е перероб і доп. К. : Видавництво Ліра-К, 2018. 228 с.
5. Jerry C. Whitaker The Electronics Handbook. 2nd Edition. USA, FL, Boca Raton : CRC Press, 2017. 561p.
6. Курашкін С. Ф. Електроніка та мікросхемотехніка : курс лекцій. Мелітополь : ТДАТУ, 2018. 146 с.
7. Промислова електроніка: навч. посібник / укл. : Г.О. Андрущак, І. П. Козярьський, Е. В. Майструк. Чернівці : Чернівець. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2021. 120 с.