

Волинський національний університет імені Лесі Українки

Навчально-науковий фізико-технологічний інститут

**Кафедра експериментальної фізики, інформаційних та освітніх
технологій**

Новосад О. В., Федосов С. А., Божко В. В., Кевшин А. Г.

ЕЛЕКТРОНІКА

Методичні рекомендації до лабораторних робіт

Луцьк

2020

Рекомендовано до друку науково-методичною радою Волинського національного університету імені Лесі Українки (протокол № 3 від 18. 11. 2020р.).

Рецензенти: **Шигорін П. П.** – к. ф.-м. н., доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського Волинського національного університету імені Лесі Українки.

Захарчук Д. А. – к. ф.-м. н., доцент кафедри фундаментальних наук Луцького національного технічного університету

Н 72 Новосад О. В. Федосов С. А., Божко В. В., Кевшин А. Г.
Електроніка : методичні рекомендації до лабораторних робіт.
Луцьк, 2020. 87 с.

Методичні рекомендації до лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Електроніка» – складова комплексу робочих матеріалів написаних на українській мові, створених для забезпечення якісної практичної підготовки фахівців галузей знань 01 «Освіта/Педагогіка», 10 «Природничі науки», галузей знань технічних наук.

У навчально-методичному виданні поданий теоретичний матеріал для підготовки до лабораторних робіт згідно з програмою навчальної дисципліни «Електроніка» для студентів спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали».

Рекомендовано для студентів, які навчаються за спеціальностями 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» 104 «Фізика та астрономія», 014.08 «Середня освіта (Фізика)», а також для студентів природничих та інженерно-технічних спеціальностей, що виконують лабораторні роботи з даної дисципліни.

УДК 621.382

© Новосад О. В., Федосов С. А.,
Божко В. В., Кевшин А. Г., 2020
© Волинський національний
університет імені Лесі Українки

ЗМІСТ

ВСТУП

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1. Дослідження роботи напівпровідникового діода та схем випрямлення змінного струму	9
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2. Дослідження фотодіодів та світлодіодів	15
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3. Дослідження ВАХ стабілітрона та компенсаційного стабілізатора напруги	19
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4. Зняття характеристик біполярних транзисторів	23
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5. Дослідження статичних характеристик і параметрів польових транзисторів	28
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6. Дослідження варикапів	37
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7. Дослідження роботи тиристора та його використання в схемах регулювання потужності	41
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8. Дослідження еквівалентів приладів з від'ємним диференціальним опором	46
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9. Датчики на основі ефекту Холла	50
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10. Тунельний діод і резонансний генератор на його основі	56
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 11. Амплітудно-частотні характеристики електричних фільтрів	62
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 12. Вивчення інтегрального операційного підсилювача в різних режимах роботи	72
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 13. Дослідження роботи мікросхем	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	85

ВСТУП

Лабораторний практикум з дисципліни «Електроніка» для студентів спеціальностей 105 «Прикладна фізика та наноматеріали», передбачає виконання стандартних робіт, описаних у цьому методичному виданні. Теоретичні відомості до кожної з них дають мінімальні відомості про досліджуване явище, фізичний об'єкт, електронну систему, яких достатньо для підготовки та проведення відповідного дослідження. Переважна частина запропонованих лабораторних робіт передбачена також для студентів природничих факультетів університету, які можуть використовувати описи та завдання, коректуючи умови їхнього виконання за вказівками викладача.

В інструкціях до лабораторних робіт висвітлюється мета досліджень, що здійснюються у цій роботі, подано детальне описання вимірювальних приладів та обладнання, описано послідовність виконання робіт, наведено зразки таблиць для запису результатів вимірювань і розрахунків, а також контрольні запитання. В окремих роботах подано перелік необхідних дій. Щоб підготуватися до виконання лабораторної роботи і знайти відповіді на контрольні запитання, які можуть бути поставлені викладачем під час допуску до виконання роботи, або зарахування результатів дослідження, необхідно ґрунтовно опрацювати теоретичні відомості до лабораторної роботи та лекційний матеріал. За потреби для глибшого вивчення відповідного явища можна використати підручники, список яких подано в кінці цього навчально-методичного видання.

Основна спрямованість методичних вказівок з навчальної дисципліни «Електроніка» - дати можливість студентам за допомогою досліду вивчити фізичні явища та процеси в електронних приладах та ситемах. Опис лабораторних робіт не претендує на те, щоб створити у студентів повне уявлення про явища, які вивчаються. Таке уявлення може виникнути лише внаслідок опрацювання лекцій та підручників. Для успішного виконання робіт необхідна попередня самостійна підготовка, в першу чергу теоретична.

Перед заняттям студент повинен підготувати протокол лабораторної роботи, вивчити відповідний теоретичний матеріал.

Під час заняття студенти отримують допуск до лабораторної роботи, проводять необхідні виміри, виконують розрахунки, доводять звіт до висновку.

Результати вимірювання обговорюються з викладачем і затверджуються. Звіт з лабораторної роботи повинен містити: титульний лист, номер лабораторної роботи та її назву, перелік приладів і приладдя, мету роботи, схему установки, розрахункові формули, таблицю результатів вимірів і розрахунки, висновки за результатами роботи. Графіки повинні бути виконані на міліметровому папері, дозволяється оформити звіт (графіки) з використанням комп'ютерних програм (Excel, Origin).

Інструкція з охорони праці

1. Інструкція з охорони поширюється на всіх учасників навчально-виховного процесу під час проведення занять (демонстраційних дослідів, лабораторних і практичних робіт).
2. Відповідно до Правил безпеки, під час проведення навчально-виховного процесу в лабораторіях студенти проходять інструктаж із безпеки праці та

навчання, надання першої (долікарської) допомоги при характерних ушкодженнях, який проводить викладач фізики перед початком занять у лабораторії і реєструється в журналі.

3. До роботи в лабораторії допускаються лише особи, обізнані з інструкцією і правилами з охорони праці та безпеки життєдіяльності.

4. Вивчивши зміст інструкції, студент розписується в журналі з охорони праці та безпеки життєдіяльності і несе відповідальність за її виконання.

5. Під час роботи в лабораторії будьте обережними, додержуйтесь порядку і чистоти на робочому місці, виконуйте правила техніки безпеки. Безладність, поспішність, недбалість у роботі й порушення правил охорони праці та безпеки життєдіяльності можуть привести до нещасних випадків.

6. Перед початком роботи переконайтеся в наявності та робочому стані всіх частин досліджуваних установок.

7. Лабораторну роботу категорично забороняється виконувати без дозволу викладача.

8. Забороняється виконання лабораторних робіт у випадку відсутності викладача або лаборанта, який відповідає за лабораторію.

9. Не можна торкатися до неізольованих частин електричних установок, оголених провідників, які перебувають під напругою.

10. Не слід самостійно робити будь-які сполучення на головному розподільному щиті.

11. Ставити і замінити плавкі запобіжники в установках і приладах можна лише з дозволу керівника при вимкнутій напрузі.

12. Складати коло за схемою можна тільки при вимкнутій напрузі.

13. Вмикати напругу в колі за складеною схемою можна лише з дозволу викладача.

14. Здійсніть надійне кріплення електричних провідників лабораторних установок.

15. Чітко виконуйте правила охорони праці та безпеки життєдіяльності, вказані в інструкціях до лабораторних робіт і приладів.

16. Не відволікайтесь самі і не відволікайте інших від роботи сторонніми розмовами.

17. Виконувати роботи, не пов'язані із завданням і не доручені викладачем, забороняється.

18. Не переставляйте і не переносьте прилади і матеріали з одного робочого місця на інше.

19. Під час заняття забороняється ходити по лабораторії.

20. Якщо під час роботи установка чи прилад вийшов з ладу, відбулась поломка чи розбиття приладу, про це негайно треба повідомити керівника заняття.

21. У випадку ураження струмом – негайно вимкнути вимикач на головному розподільному щиті, щоб звільнити потерпілого від електричного струму, повідомити керівника та організувати першу допомогу, одночасно викликавши швидку медичну допомогу. (Тел. 103.)

Правила безпеки при роботі з електричними колами

У лабораторії необхідно строго дотримуватись правил техніки безпеки при роботі з електричними колами.

1. Під час роботи потрібно бути уважним при використанні приладів. Перш ніж користуватися приладом, необхідно вивчити його будову і правила роботи з ним. Про несправність приладів необхідно повідомити викладача або лаборанта.
2. Зібрану електричну схему можна підключати до джерела струму тільки після її перевірки викладачем або лаборантом.
3. Не робити перемикань в схемі, що знаходиться під напругою.
4. Не залишати без нагляду схему, що знаходиться під напругою.
5. Не торкатися до неізолюваних частин схеми.
6. При виявленні нагріву окремих частин електричної схеми або, тим більше, при появі запаху гару, джерело струму слід негайно відключити і повідомити викладача.
7. Після закінчення вимірів треба відключити джерело струму.
8. Після закінчення розрахунків і перегляду отриманих результатів викладачем, електричне коло розібрати, робоче місце привести в порядок.

Деякі відомості про похибки

Пряме вимірювання - це вимірювання, при якому сигнал, що поступає на вхід засобів вимірювання, містить інформацію про саму фізичну величину.

Вимірювання, при яких шукані фізичні величини отримують розрахунками на основі їх залежності від величин, які вимірюють прямими методами, називають непрямими.

Розрізняють три типи похибок вимірювань: грубі похибки, систематичні та випадкові похибки.

Грубі похибки пов'язані або з несправністю вимірювальної апаратури, або з помилкою експериментатора при відліку чи запису показів приладу, або з різкою зміною умов вимірювання. Результати вимірювань, що відповідають цим похибкам, потрібно відкинути і, якщо потрібно, проводити нові вимірювання.

Систематичні похибки - це похибки, які при багаторазовому вимірюванні однієї і тієї ж величини залишаються постійними або змінюються за певним законом. Ці похибки складаються з методичних та інструментальних похибок.

Методичні похибки пов'язані з недоліками методу вимірювань, недосконалістю теорії фізичного явища і неточністю розрахункової формули. Наприклад, при зважуванні тіла на аналітичних терезах будуть допущені систематичні методичні похибки, якщо не буде вноситись поправка виштовхувальних сил, що діють зі сторони повітря на зважуване тіло. Ці похибки можна зменшити шляхом введення уточнень в розрахункову формулу.

Інструментальні похибки пов'язані, наприклад, з недосконалістю конструкції, неточністю, допущеною при виготовленні вимірювальних приладів. Зменшення інструментальних похибок досягається використанням більш досконалих і точних приладів. Однак повністю позбутись інструментальних похибок неможливо.

Випадковими похибками вимірювань називають похибки, абсолютна величина і знак яких змінюються при багатократних вимірюваннях однієї і тієї ж фізичної величини. Ці похибки обумовлені багатьма факторами, що не піддаються обліку. Наприклад, на покази чутливих аналітичних важільних ваг можуть вплинути порошинки пилу, що сідають під час зважування на чашки ваги,

подовження одного з плечей коромисла ваги, яке нагрівається від рук експериментатора, що знаходиться поблизу, конвекційні потоки повітря біля чашок та інші причини.

Повністю позбутись випадкових похибок неможливо, але їх можна зменшити шляхом багатократного повторення вимірювань. При цьому відбувається часткова компенсація випадкових відхилень результатів вимірювання в сторону завищення і в сторону заниження. Розрахунок випадкових похибок здійснюється методом теорії ймовірностей і математичної статистики.

Для оцінки відхилення результатів вимірювань від дійсного значення розрізняють абсолютну, відносну та зведену похибку.

Абсолютною похибкою вимірювання Δ називають різницю між знайденим на досліді результатом вимірювання X та дійсним значенням фізичної величини X_0 :

$$\Delta = X - X_0 \quad (1)$$

Для оцінки якості вимірювань вводять відносну похибку, яка рівна відношенню абсолютної похибки до істинного значення вимірюваної величини:

$$\delta = \frac{\Delta}{X_0} 100\% \quad (2)$$

Зведена похибка

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_H} 100\%$$

де X_H – номінальне значення вимірюваної величини, яке для приладів дорівнює максимальному значенню діапазону вимірювань.

З рівнянь (1) і (2) видно, що для того, щоб знайти абсолютну і відносну похибки, потрібно знати не тільки значення вимірюваної величини, отримане з дослідів, а також і її істинне значення. Але якщо істинне значення відоме, то немає необхідності проводити вимірювання. Мета вимірювань полягає в тому, щоб знайти невідоме значення фізичної величини і знайти якщо не її істинне значення, то хоча б значення, яке мало від нього відрізняється. Тому формули (1) і (2), які визначають величину похибок, для практичних цілей непридатні.

Похибка вимірювального приладу, обумовлена класом точності, і похибка вимірювання цим приладом фізичної величини не збігаються.

Відносна похибка вимірювання фізичної величини визначається за формулою

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{X} 100\% = \pm \frac{X_H}{X} \gamma$$

де γ - гранично допустиме значення основної похибки або клас точності приладу.

Наприклад, відносна похибка вимірювань струму, напруги і потужності оцінюється за формулами

$$\delta_I = \pm \gamma_i \frac{I_H}{I} ;$$

$$\delta_U = \pm \gamma_U \frac{U_H}{U};$$

$$\delta_P = \pm \gamma_P \frac{P_H}{P};$$

де $\gamma_I, \gamma_U, \gamma_P$ – клас точності відповідного приладу; I_H, U_H, P_H – кінцевий діапазон вимірюваної величини; I, U, P – виміряне значення величини.

При непрямих вимірюваннях відносні похибки оцінюють іншим чином.

Визначаючи, наприклад, опір за показами амперметра, вольтметра і ватметра, обчислення виконують за однією з нижченаведених формул:

$$R = \frac{U}{I},$$

$$R = \frac{P}{I^2},$$

$$R = \frac{U^2}{P}.$$

Відносна похибка вимірювання опору, відповідно, оцінюється за однією з формул:

$$\delta_R = \delta_I + \delta_U,$$

$$\delta_R = 2\delta_I + \delta_P,$$

$$\delta_R = 2\delta_U + \delta_P.$$

Причин виникнення похибок багато і вони мають як об'єктивний, так і суб'єктивний характер, але у всіх випадках мають дві складові: систематичні похибки, що можуть бути враховані і виключені з результатів вимірювань, і випадкові, які не можуть бути виключені з результатів вимірювань, але їх можна зменшити застосуванням методів теорії імовірності і математичної статистики при обробці результатів вимірювання.

За результатами досліджень необхідно виконати такі операції:

1. Результати спостережень занести до таблиці і виключити з них систематичні і грубі похибки, в результаті чого отримаємо виправлені спостереження, з якими будемо проводити подальші операції.
2. Визначити середнє арифметичне результатів спостережень:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = \frac{X_1 + X_1 + \dots + X_i + \dots + X_n}{n}.$$

3. Обчислити середнє квадратичне відхилення результатів окремих спостережень

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2},$$

де n – число спостережень; X_i – окреме спостереження вимірюваної величини; \bar{X} – середнє арифметичне.

4. Визначити середнє квадратичне відхилення результатів вимірювань

$$\sigma_X = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

5. Визначити довірчий симетричний інтервал, в який із заданою імовірністю p попадає дійсне значення вимірюваної величини. Шуканий довірчий інтервал визначається за формулою

$$\Delta X = \pm t_{p, n-1} \cdot \sigma_X = \pm t_{p, n-1} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}},$$

де $t_{p, n-1}$ – коефіцієнт Стюдента, який знаходять з відповідних таблиць залежно від довірчої ймовірності p і числа ступенів вільності $(n-1)$.

$n-1$	$p=0,95$	$p=0,99$	$n-1$	$p=0,95$	$p=0,99$
3	3,18	5,84	10	2,23	3,17
4	2,78	4,60	11	2,20	3,11
5	2,57	4,03	12	2,18	3,05
6	2,45	3,71	13	2,16	3,01
7	2,36	3,50	14	2,14	2,98
8	2,306	3,25	15	2,13	2,95
9	2,26	3,25	16	2,12	2,92
17	2,11	2,90	20	2,08	2,84

6. Записати результат вимірювань

$$X = \bar{X} \pm \Delta X$$

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

Дослідження роботи напівпровідникового діода та схем випрямлення змінного струму

Мета роботи: Ознайомитись з принципом дії напівпровідникового діода та схемами випрямлення змінного струму.

Прилади і матеріали

1. Установка для вивчення p - n -переходу ФПК-06.
2. Діоди, діодний місток.
3. Осцилограф.
4. Резистор.
5. Конденсатори.
6. Перемикач.
7. Трансформатор.
8. З'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості

Властивості однорідних напівпровідників використовуються лише для побудови напівпровідникових резисторів. Більшість напівпровідникових приладів

й елементів електроніки утворено з неоднорідних структур, основним серед яких є контакт двох напівпровідників різного типу провідності та контакт напівпровідника з металом.

Межу між двома напівпровідниками різного типу провідності називають електронно-дірковим або *n-p*-переходом. Такий перехідний контакт не можна утворити простим дотиком напівпровідникових пластин різних типів провідності, тому що він буде забруднений оксидами, повітрям і т. д. Електронно-дірковий перехід отримують дифузією або вплавленням відповідних домішок у монокристал напівпровідника, а також вирощуванням *n-p*-переходу з розплаву напівпровідника.

Властивості *n-p*-переходу залежать від його конструкції, методу отримання, співвідношення концентрації донорних та акцепторних домішок.

Розглянемо властивості *n-p*-переходу з однаковими концентраціями донорних й акцепторних домішок (рис. 1.1).

У напівпровіднику *n*-типу провідності основними рухомими носіями електричного заряду є електрони, у напівпровіднику *p*-типу провідності - дірки. Рухомі носії заряду, що знаходяться поблизу *n-p*-переходу, дифундують через *n-p*-перехід і взаємно рекомбінують, унаслідок чого утворюється збіднений вільними носіями подвійний шар просторових зарядів. Ширина його становить десяті частки мікрометра. У напівпровіднику *p*-типу він утворюється негативними іонами акцепторної домішки, а в напівпровіднику *n*-типу — позитивними іонами донорної домішки. Електричне поле просторових зарядів перешкоджає подальшій дифузії носіїв заряду, оскільки на *n-p*-переході виникає потенціальний бар'єр ϕ_x у кілька десятків вольт.

Це поле спрямоване від позитивних іонів-донорів до негативних іонів-акцепторів, воно гальмує рух основних носіїв заряду і прискорює рух неосновних. Тепер будь-який електрон, що перейшов з електронної структури в діркову, потрапляє в електричне поле, яке намагається повернути його назад в структуру *n*-типу провідності. Аналогічно дірки відштовхуються в структуру *p*-типу. Завдяки наявності збідненого вільними носіями шару шириною L , електронна провідність *n-p*-переходу зменшується відносно провідності решти частини напівпровідника, а наявність просторових зарядів й електричного поля робить його провідність залежною від напрямку дії зовнішнього електричного поля.

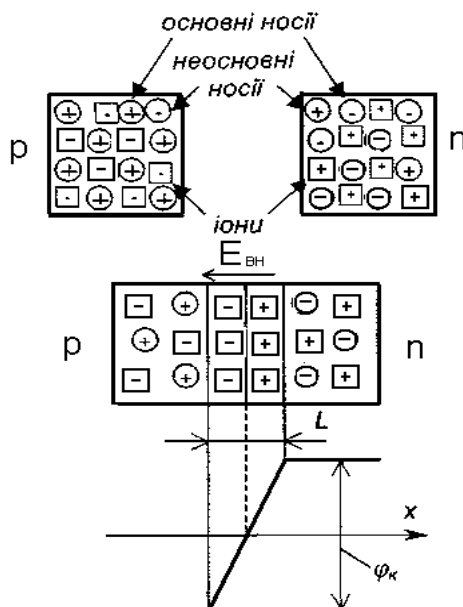


Рис. 1.1. Утворення потенціального бар'єру в $n-p$ -переході.

Слід мати на увазі, що у напівпровідниках неперервно утворюються та рекомбінують теплові електронно-діркові пари, які створюють деяку кількість неосновних носіїв заряду. Перш ніж рекомбінувати з основними носіями, неосновні носії, що знаходяться поблизу $n-p$ -переходу, можуть потрапити в поле потенціального бар'єра і спричинити дрейфовий струм. За відсутності зовнішніх впливів цей струм компенсується дифузійним струмом основних носіїв, унаслідок чого встановлюється динамічна рівновага переходу.

Якщо до зрівноваженого електронно-діркового переходу прикласти зовнішнє електричне поле, то через нього проходитиме електричний струм, величина якого залежить від напрямку прикладеного поля (рис. 1.2).

Під дією електричного поля, спрямованого проти потенціального бар'єра (рис. 1.2, а), останній зменшується, а потім зникає взагалі. Основні носії заряду рухаються в напрямку $n-p$ -переходу, його ширина й опір зменшуються. Ті носії, які пройшли через $n-p$ -перехід, стають неосновними і рекомбінують з основними носіями напівпровідника, до якого вони дифундували. Поповнення основних носіїв, що рекомбінували, забезпечується із зовнішнього кола: через $n-p$ -перехід проходить прямий дифузійний струм. Підвищення зовнішньої напруги призводить до експоненційного зростання прямого струму.

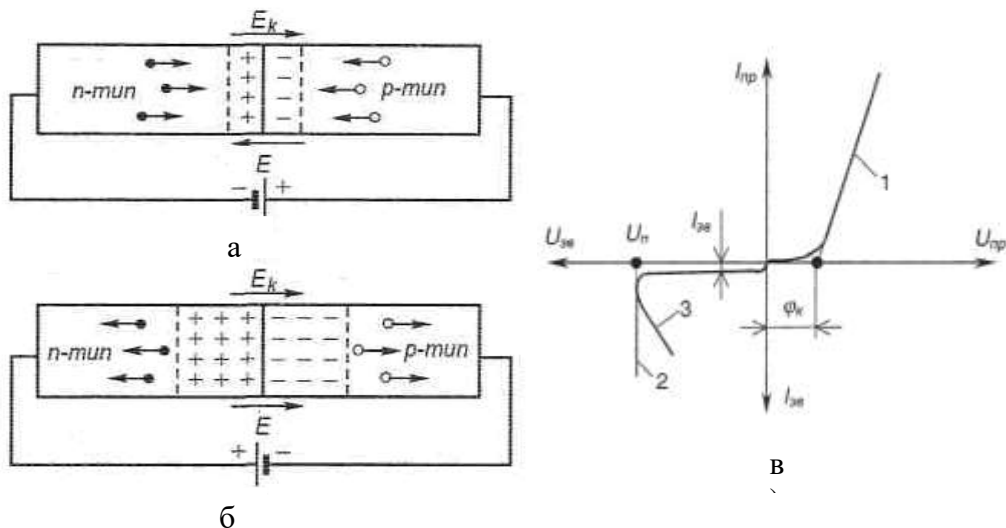


Рис. 1.2. Пряме (а) та зворотнє (б) включення електронно-діркового переходу до зовнішнього джерела живлення та його вольт-амперна характеристика (в).

Якщо зовнішнє електричне поле збігається з полем потенціального бар'єра (рис. 1.2, б), то із підвищенням його напруженості потенціальний бар'єр збільшується, ширина (L) збідненої вільними носіями зони зростає, опір $n-p$ -переходу підвищується. Кількість основних носіїв заряду, здатних подолати дію такого поля, зменшується, дифузійний струм основних носіїв спадає. Основні носії заряду під дією зовнішнього поля відтягуються від приконттактних шарів у глибину напівпровідника. Для неосновних носіїв потенціальний бар'єр в $n-p$ -переході відсутній, і вони будуть втягуватися полем в $n-p$ -перехід. Таке вмикання $n-p$ -переходу називають зворотним. При ньому основний дрейфовий струм, що

утворюється неосновними носіями, має мале значення, яке практично не залежить від зовнішньої напруги, але істотно залежить від температури.

Таким чином, основною властивістю *n-p*-переходу є його одnobічна провідність і нелінійність ВАХ (рис. 1.2, в). Напівпровідникові діоди — це прилади з двома виводами, які мають один електронно-дірковий перехід. Різні типи напівпровідникових діодів різняться основним матеріалом, з якого їх виготовлено, технологією виробництва та конструкцією, що зумовлює широку різноманітність їхніх електричних параметрів й застосування (рис. 1.3).

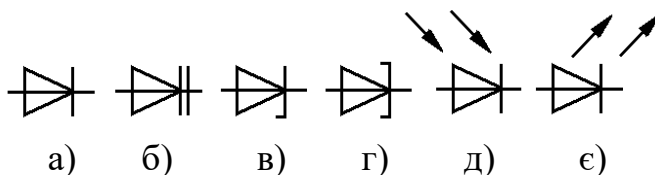


Рис. 1.3. Умовні графічні позначення напівпровідникових діодів: *a* — загальне; *b* — варикап; *c* — стабілітрон; *d* — тунельний діод; *e* — світлодіод.

За основним матеріалом найпоширенішими є германієві та кремнієві діоди; за конструкцією - точкові та площинні; за технологією виробництва - сплавні, зварні, дифузійні; за умовами застосування - універсальні, високочастотні, імпульсні, випрямні. Крім того, використовують спеціальні діоди, побудовані на параметричних властивостях *n-p*-переходу, явищі електричного пробою, тунельному ефекті тощо.

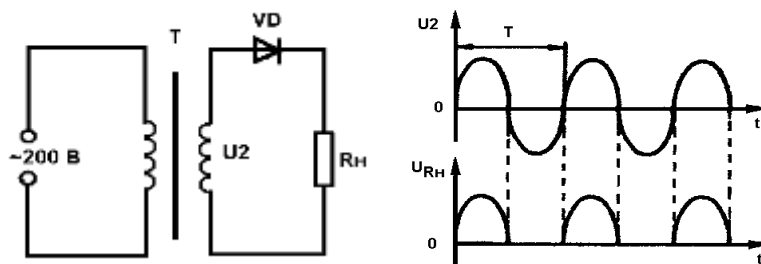


Рис. 1.4. Однопівперіодний випрямляч та часові діаграми його роботи.

Сучасні електронні пристрої містять велику кількість транзисторів, фотоелементів, ІМС. Майже усі вони споживають електроенергію постійного струму, яку отримують випрямленням змінного струму.

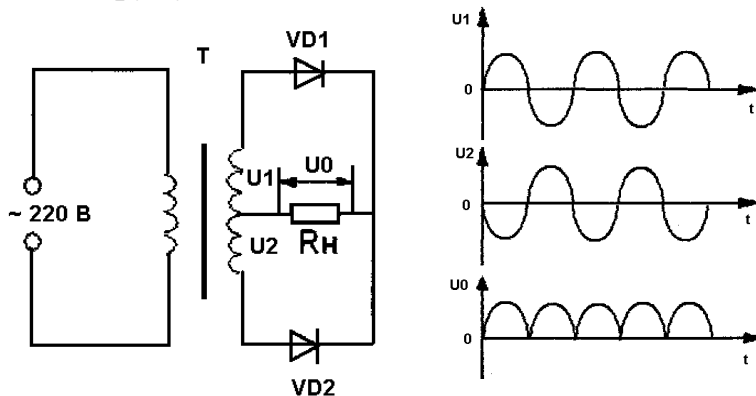


Рис. 1.5. Двопівперіодний випрямляч та часові діаграми його роботи.

Найпростіший однопівперіодний випрямляч (рис. 1.4) складається з послідовно ввімкнених джерела живлення, діода та активного навантаження. У цій

схемі змінний струм проходить через випрямляч і опір навантаження протягом однієї половини періоду.

При однопівперіодному випрямлянні отримується сильно пульсуючий струм. Тому однофазні однокітні випрямлячі застосовуються в схемах, не чутливих до великих пульсацій струму.

Більш досконалим є двопівперіодний випрямляч (рис. 1.5). Тут навантаження приєднано до середньої точки вторинної обмотки трансформатора, а струм через опір навантаження R_H проходить протягом обох півперіодів.

Найбільшого поширення в сучасній електронній апаратурі набула однофазна однокітна (місткова) схема випрямляча (рис. 1.6.). Тут первинна обмотка трансформатора вмикається в мережу однофазного змінного струму, а до вторинної обмотки приєднуються чотири випрямні діоди, з'єднані за схемою містка, причому в одну діагональ містка вмикається вторинна обмотка трансформатора, в іншу - опір навантаження. Через навантаження випрямлений струм проходить за два півперіоди (рис. 1.6).

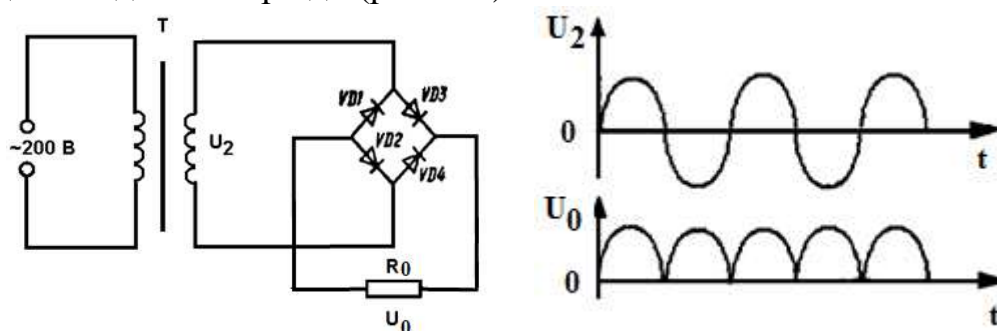


Рис. 1.6. Місткова схема випрямляча.

Випрямлена такими методами напруга містить значні змінні складові — пульсації. Для їх зменшення до виходу випрямлячів приєднують згладжувальні фільтри, що зменшують величину пульсацій до допустимого значення, при якому вони вже не впливають на роботу електронних пристроїв.

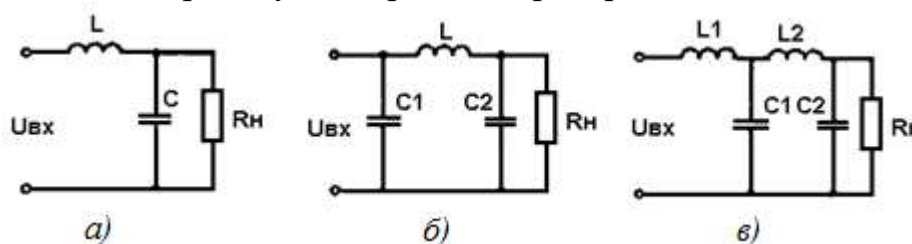


Рис. 1.7. Згладжуючі фільтри.

Згладжуючі фільтри поділяються на прості - ємнісні та індуктивні (рис. 1.7, а); складні - одноланкові (рис. 1.7, б), багатоланкові (рис. 1.7, в) та ін.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з паспортом та порядком роботи за установкою для вивчення p - n -переходу ФПК-06.
2. Зняти вольт-амперні характеристики та вольт-фарадні характеристики запропонованих діодів згідно з п. 7. «Порядок роботи» паспорта установки для вивчення p - n -переходу ФПК-06.

3. Отримати осцилограму змінного струму.
4. Ввімкнувши в коло змінного струму напівпровідниковий діод та опір навантаження за схемою на рис. 1.8., одержати осцилограму однопівперіодного випрямлення змінного струму.

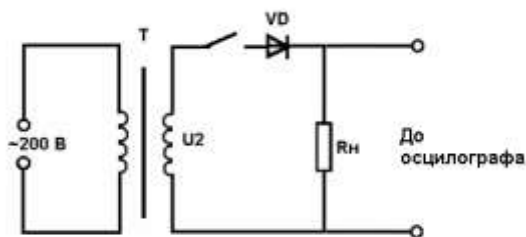


Рис. 1.8. Дослідження однопівперіодного випрямлення змінного струму.

5. Скориставшись містковою схемою випрямлення, отримати на екрані осцилограму двопівперіодного випрямленого струму.

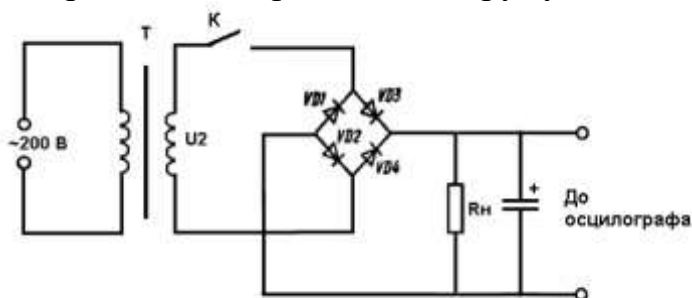


Рис. 1.9. Дослідження двопівперіодного випрямлення змінного струму.

6. Ввімкнути в місткову схему випрямлення змінного струму ємнісний фільтр (рис. 1.9.), отримати осцилограму.
7. Підрахувати пульсації, які мають місце при згладжуванні випрямленого струму ємнісним фільтром.

Таблиця 1. Електричні параметри деяких напівпровідникових діодів

Тип діода	Граничний струм $I_{np, max}, A$	Прямий спад напруги U_{np}, A	Максимальна зворотна напруга $U_{зв. max}, B$	Зворотний струм $I_{зв}, mA$	Гранична частота, кГц
КД103А ... КД105В	0,1...0,3	1...1,2	30...600	0,05...0,3	1
Д226	0,3	1	400	0,3	50
Д202 ... Д205	0,4	1	100...400	0,5	50
КД202	1...5	0,8	50...600	0,9	5
Д242 ... Д284Б	5...10	1...1,5	100...600	3	1,2
Д9А ... Д9М	0,015...0,04	1	10...100	0,06...1	40 000
Д223 ... Д233Б	0,02...0,05	1	50...150	0,0005...0,001	30 000

ГД402А ... ГД402Б	0,025	15	15	0,1	10 000
----------------------	-------	----	----	-----	--------

Контрольні запитання

1. Опишіть механізм утворення *p-n*-переходу.
2. Охарактеризуйте ВАХ напівпровідникового діода.
3. Назвіть основні типи діодів.
4. Умовні схематичні позначення різних діодів.
5. Маркування напівпровідникових діодів.
6. Які фізичні процеси лежать в основі роботи варікапів?
7. Які фізичні процеси лежать в основі роботи тунельних діодів?
8. Які фізичні процеси лежать в основі роботи стабілітронів?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Дослідження фотодіодів та світлодіодів

Мета роботи: Ознайомитись з принципом дії фотодіодів, світлодіодів та оптопари.
Дослідити їх основні властивості та параметри.

Прилади і матеріали

1. Установка для вивчення фотодіода і світлодіода ФДСВ - 05.
2. Осцилограф.
3. З'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості

Фотодіоди

Напівпровідниковий фотодіод - це напівпровідниковий діод, зворотний струм якого залежить від рівня освітленості. Як фотодіод використовують напівпровідниковий діод з *p-n*-переходом, який зміщений у зворотному напрямку зовнішнім джерелом живлення.

При поглинанні квантів світла в *p-n*-переході або в прилеглих до нього областях утворюються додаткові носії заряду. Неосновні носії заряду, що виникли в областях, прилеглих до *p-n*-переходу на відстані, що не перевищує дифузійної довжини, дифундують у *p-n*-перехід і проходять через нього під дією електричного поля. Тобто зворотний струм при освітленні зростає. Поглинання квантів світла безпосередньо в *p-n* переході призводить до аналогічних результатів. Величина, на яку зростає зворотний струм, називається фотострумом.

Схема включення фотодіода наведена на рис. 2.1. Напруга джерела живлення прикладена до фотодіода в зворотному напрямку. Коли фотодіод не освітлено, в колі проходить невеликий зворотній (темновий) струм (10-20 мкА для германієвих і 1-2 мкА для кремнієвих діодів).

Слід зазначити, що фотодіод можна включати в схеми як із зовнішнім джерелом живлення, так і без нього. Режим роботи фотодіода із зовнішнім

джерелом живлення називають фотодіодним, а без зовнішнього джерела — фотовентильним або генераторним.

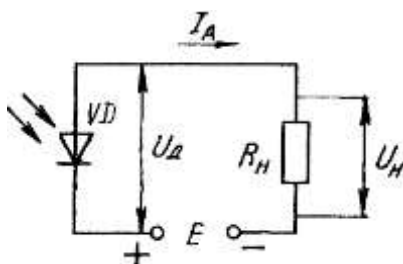


Рис. 2.1. Схема включення фотодіода.

У вентильному режимі в фотодіоді під дією світлового потоку виникає електрорушійна сила, тому він не потребує стороннього джерела напруги.

Властивості фотодіода можна описати такими характеристиками:

1. Вольт-амперна характеристика ($I_D=f(U_D)$ при $\Phi=const$) визначає залежність струму фотодіода від напруги на ньому при постійній величині світлового потоку (рис. 2.2, а). При повній відсутності освітлення ($\Phi=0$) через фотодіод протікає темновий струм. З ростом світлового потоку I_D збільшується. Характерною особливістю робочої області вольт-амперних характеристик є практично повна незалежність струму фотодіода від прикладеної напруги. Такий режим настає при зворотних напругах на діоді порядку 1 В. Оскільки темновий струм малий, то відношення струму при освітленні до темнового струму велике, що дуже важливо при індикації освітлення. Якщо зворотна напруга перевищить деяке допустиме значення, то в $p-n$ -переході виникає ефект лавиноподібного утворення носіїв заряду, що може призвести до виходу фотодіода з ладу.

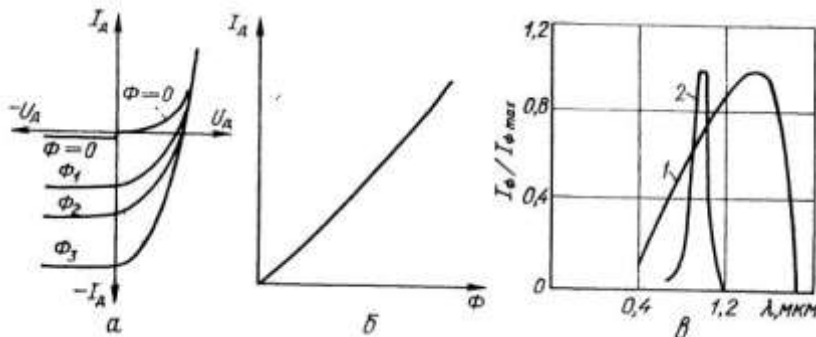


Рис. 2.2. Характеристики фотодіода: а) ВАХ; б) світлова; в) спектральна (1 – германієвий фотодіод; 2 – кремнієвий фотодіод).

2. Світлова характеристика фотодіода - це залежність фотоструму від освітленості. У широкому діапазоні змін світлового потоку світлова характеристика фотодіода виявляється лінійною (рис. 2.2, б). Це обумовлено тим, що товщина бази фотодіода значно менша дифузійної довжини неосновних носіїв заряду. Тобто практично всі неосновні носії заряду, що виникли в базі, беруть участь в утворенні фотоструму.

3. Спектральна характеристика фотодіода (рис. 2.2, в) - це залежність фотоструму від довжини хвилі падаючого світла на фотодіод. Вона визначається шириною забороненої зони; при малих довжинах хвиль - великим коефіцієнтом поглинання і збільшенням впливу поверхневої рекомбінації носіїв заряду із зменшенням довжини хвилі квантів світла. Тобто короткохвильова межа

чутливості залежить від товщини бази та від швидкості поверхневої рекомбінації. Положення максимуму в спектральній характеристиці фотодіода сильно залежить від ступеня зростання коефіцієнта поглинання.

4. Стала часу - це час, протягом якого фотострум фотодіода змінюється після освітлення або після затемнення фотодіода в e раз по відношенню до сталого значення.

5. Темновий опір - опір фотодіода при відсутності освітлення.

6. Інтегральна чутливість

$$K=I_{\phi}/\Phi,$$

де I_{ϕ} – фотострум, Φ – освітленість.

Світлодіоди

Світлодіод - напівпровідниковий пристрій, що випромінює некогерентне світло при пропусканні через нього електричного струму (електролюмінесценція). Випромінюване світло традиційних світлодіодів лежить у вузькій ділянці спектру, а його колір залежить від хімічного складу, використаного у світлодіоді напівпровідника. Сучасні світлодіоди можуть випромінювати світло від інфрачервоної ділянки спектру до близької до ультрафіолету. Існують методи розширення смуги випромінювання і створення білих світлодіодів. На відміну від ламп розжарювання, які випромінюють світловий потік широкого спектру рівномірно у всіх напрямках, звичайні світлодіоди випромінюють світло певної довжини хвилі і в певному напрямі.

Світлодіоди були удосконалені до лазерних діодів, які працюють за тим же принципом, але можуть напрямлено випромінювати когерентне світло.

Як і в будь-якому напівпровідниковому діоді, в світлодіоді є p - n -перехід. При пропусканні електричного струму в прямому напрямку носії заряду — електрони і дірки - рекомбінують з випромінюванням фотонів.

Не всі напівпровідникові матеріали ефективно випромінюють світло при рекомбінації. Найкращими випромінювачами є, як правило, прямозонні напівпровідники типу $A^{III}B^V$ (наприклад, GaAs або InP) і $A^{II}B^{VI}$ (наприклад, ZnSe або CdTe). Змінюючи компонентний склад напівпровідників, можна створювати світлодіоди різних довжин хвиль - від ультрафіолету (GaN) до середнього інфрачервоного діапазону (PbS).

Діоди, зроблені з непрямозонних напівпровідників (наприклад, кремнієвий або германієвий діоди, а також сплави SiGe, SiC), світло практично не випромінюють. Втім, у зв'язку з розвиненістю кремнієвої технології, роботи зі створення світлодіодів на основі кремнію активно ведуться.

Порядок виконання роботи

1. Дослідити роботу світлодіодів.

1.1. Підготуйте лабораторне обладнання до роботи, згідно з п. 6. паспорта до установки, для вивчення фотодіода і світлодіода ФДСВ - 05.

1.2. Встановіть постійну пряму напругу живлення світлодіодів переведенням перемикача (поз. 5 рис. 2.3) у положення «-», регулятор «УРОВЕНЬ» (поз. 4) переводиться в крайнє положення за годинниковою стрілкою.

1.3. Послідовно, за допомогою перемикача (поз. 2, рис. 2.3), підключіть світлодіоди, розташовані на стенді.

1.4. Обертанням регулятора «УРОВЕНЬ» дослідіть залежність сили світла від прямого струму через світлодіод.

2. Дослідження ВАХ світлодіодів.

2.1. Встановіть двополярну лінійно наростаючу напругу живлення світлодіодів переведенням перемикача (поз. 5 рис. 2.3) у положення «ВАХ». «Y» - вхід осцилографа, підготовленого по п. 6.7 паспорта до установки, підключається сигнальним кінцем з'єднувального шнура до верхнього, а спільним кінцем - до нижнього гнізда (поз. 3 рис. 2.3).

2.2. На екрані осцилографа отримайте ВАХ у прямокутній системі координат з початком у центрі екрана і масштабом по горизонталі 0,5 В/под. Вибір світлодіодів здійснюється перемикачем (поз. 2 мал. 1).

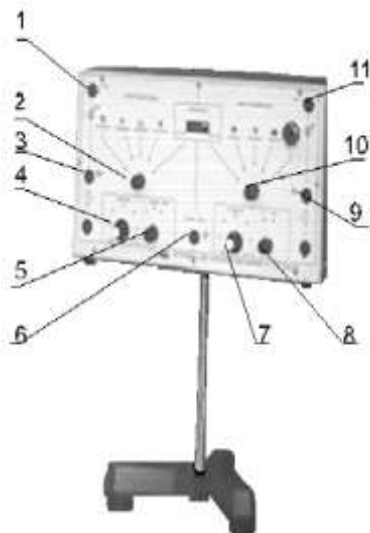


Рис. 2.3. Установка для вивчення фотодіода і світлодіода ФДСВ - 05.

3. Дослідження роботи фотодіодів.

3.1. Встановіть постійну зворотну напругу живлення фотодіодів переведенням перемикача (поз. 8 рис. 2.3) у положення «-», регулятор «УРОВЕНЬ» (поз. 7) переводиться в середнє положення. «Y» - вхід осцилографа, підготовленого по п. 6.7 паспорта до установки, підключається сигнальним кінцем з'єднувального шнура до верхнього, а спільним кінцем - до нижнього гнізда (поз. 9 рис. 2.3).

3.2. Послідовно, за допомогою перемикача (поз. 10 рис. 2.3), підключаються фотодіоди, розташовані на стенді.

3.3. Якщо фотодіод закритий яким-небудь непрозорим предметом, то осцилограф показує відсутність струму чи деякий початковий зворотній струм через опір навантаження у контурі фотодіода.

3.3. Освітліть фотодіод зовнішнім джерелом світла, наприклад, лампою розжарювання, при цьому осцилограф покаже збільшення зворотного струму. Наближенням джерела світла до фотодіода демонструється збільшення зворотного струму зі збільшенням освітлення.

3.4. Переконайтеся, що при однаковому освітленні різні фотодіоди мають різні струми через опір навантаження, тобто фотодіоди мають різну струмову інтегральну чутливість.

4. Дослідження ВАХ фотодіодів.

4.1. Встановіть двополярну лінійно наростаючу напругу живлення фотодіодів переведенням перемикача (поз. 8 рис. 2.3) у положення «ВАХ». «Y»- вхід

осцилографа, підготовленого по п. 6.7 паспорта до установки, підключається сигнальним кінцем з'єднувального шнура до верхнього, а спільним кінцем - до нижнього гнізда (поз. 9 рис. 2.3). На екрані осцилографа демонструються ВАХ у прямокутній системі координат з початком у центрі екрана і масштабом по горизонталі 0,5 В/под. Вибір фотодіодів здійснюється перемикачем (поз. 10 рис. 2.3).

4.2. Наближенням джерела світла до фотодіода демонструється зміна зворотної гілки ВАХ (збільшення зворотного струму).

5. Робота оптоелектронної пари світлодіод-фотодіод.

5.1. Встановіть живлення світлодіодів періодичними прямокутними імпульсами переведенням перемикача (поз. 5 рис. 2.3) у положення «_ _ _». Регулятор «УРОВЕНЬ» світлодіодів переводиться в крайнє положення по годинниковій стрілці. Перемикачем (поз. 2 рис. 2.3) напруга живлення подається на інфрачервоний світлодіод оптопари.

5.2. Встановіть постійну напругу живлення фотодіодів переведенням перемикача (поз. 8 рис. 2.3) у положення «-», регулятор «УРОВЕНЬ» (поз. 7 рис. 2.3) переводиться в середнє положення. Перемикачем (поз. 10 рис. 2.3) напруга живлення подається на фотодіод оптопари.

5.3. На екрані осцилографа, що підключається як і в пп. 3 та 4, дослідіть приймання фотодіодом прямокутного сигналу, випромінюваного світлодіодом. Поворотом регулятора «УРОВЕНЬ» (поз. 4 рис. 2.3) дослідіть залежність амплітуди імпульсів, прийнятих фотодіодом, від величини прямого струму через світлодіод. Перекриваючи оптичний канал оптопари будь-яким непрозорим предметом, демонструють припинення прийому сигналу фотодіодом оптопари.

Контрольні запитання

1. Які фізичні явища лежать в основі принципу дії фотодіодів?
2. Які фізичні явища лежать в основі принципу дії світлодіодів?
3. Перерахуйте та охарактеризуйте основні характеристики фотодіодів.
4. Де використовуються світлодіоди та фотодіоди?
5. У чому полягає відмінність лазера та світлодіода?
6. З чого складається оптоелектронна пара?
7. Як вмикаюся в електричне коло фотодіоді та світлодіоді?
8. З яких речовин виготовляють фотодіоді та світлодіоді?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Дослідження ВАХ стабілітрона та компенсаційного стабілізатора напруги

Мета роботи: Отримати осцилографічним методом ВАХ стабілітрона. Ознайомитись з принципом дії параметричних та компенсаційних стабілізаторів напруги. За результатами експерименту знайти коефіцієнт стабілізації компенсаційного стабілізатора напруги.

Прилади і матеріали

1. Звуковий генератор ГЗ-ЗМ.

2. Понижувальний трансформатор.
3. Панель із закріпленими на ній стабілітронами та резисторами.
4. Осцилограф С1-5.
5. Змонтований на панелі компенсаційний стабілізатор напруги.
6. Блок живлення В-24 М.
7. З'єднувальні проводи.

Теоретичні відомості

Зворотне вмикання *n-p*-переходу застосовується також при побудові стабілітронів, робота яких ґрунтується на стабілізуючих властивостях явища електричного пробію. Для виготовлення стабілітронів використовують кремній, що має вищу температурну стабільність, ніж германій. Завдяки внутрішній електростатичній емісії під дією сильного електростатичного поля, створеного зворотною напругою, виникає електричний пробій напівпровідника, наслідком якого є зворотний струм, практично незалежний від подальшої зміни напруги. Такий електричний пробій оборотний, тобто він не супроводжується руйнуванням *n-p*-переходу.

Суть електричного пробію полягає в тому, що, рухаючись з великою швидкістю, електрони при зіткненні з нейтральними атомами в зоні *n-p*-переходу іонізують їх, створюючи нові вільні електрони і дірки. Цей процес має лавиноподібний характер, що зумовлює значне зростання струму. Електричний пробій у стабілітронах відбувається при низьких зворотних напругах, тому потужність, яка виділяється в *n-p*-переході, мала, і теплового пробію спостерігатись не буде. ВАХ і схему вмикання стабілітрона зображено на рис. 3.1. *а* та *б* відповідно.

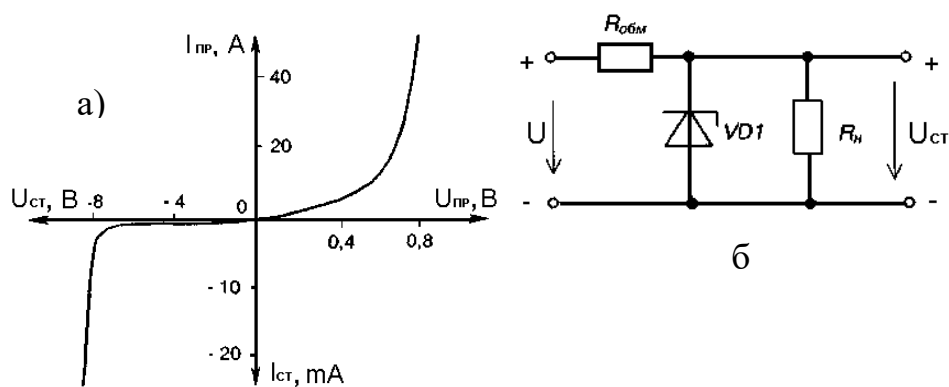


Рис. 3.1. ВАХ (а) і схема вмикання стабілітрона(б).

Основними параметрами стабілітрона є:

1. Напруга стабілізації ($U_{ст}$) - спад напруги на стабілітроні в області стабілізації при номінальному значенні струму. За цією напругою здійснюють відбір стабілітронів для роботи.

2. Мінімальний струм стабілізації ($I_{ст.мін}$) - зворотний струм, що проходить через стабілітрон і забезпечує його стійкий пробій.

3. Номінальний струм стабілізації - значення зворотного струму, при якому вимірюється напруга стабілізації. Цей струм підтримується за допомогою резистора, який завжди вмикається послідовно зі стабілітронном.

У промисловості використовується велика кількість різноманітних напівпровідникових приладів. Для того, щоб відрізнити їх один від одного, ці прилади кодують, використовуючи буквено-цифровий код.

Для дослідження ВАХ стабілітрона за допомогою осцилографа використовують установку, електрична схема якої зображена на рис. 3.2. Через стабілітрон і послідовно з'єднаний з ним резистор пропускають змінний струм. На горизонтальні пластини осцилографа подається напруга із стабілітрона, а на вертикальні - з резистора R, яка пропорційна струму, що протікає через стабілітрон. Прокалібрувавши осцилограф, можна експериментально знайти напругу стабілізації.

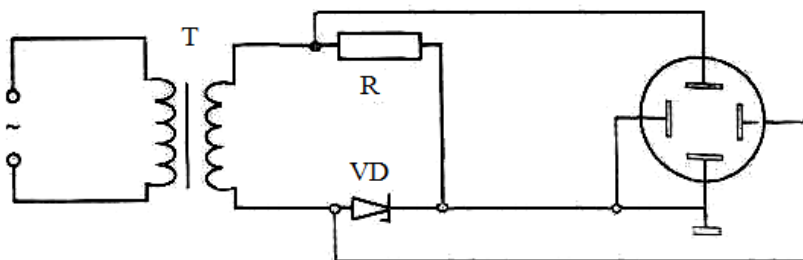


Рис. 3.2. Схема дослідження ВАХ стабілітрона за допомогою осцилографа.

У більшості електронних пристроїв напруга, що подається на трансформатор, ніколи не залишається сталою, й може змінюватися в широких межах. Ці зміни відображаються на роботоздатності апаратури, що живиться. Тому, незалежно від того, яка напруга мережі, застосовуються електронні стабілізатори (рис. 3.3), які можуть складатися з транзисторів, стабілітронів або ІМС. Призначення їх — підтримувати стабільною вихідну напругу.

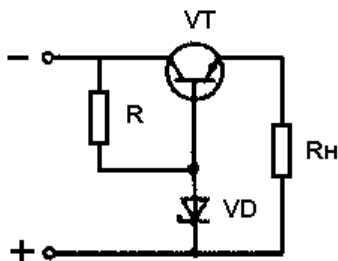


Рис. 3.3. Схема електронного стабілізатора напруги.

Якісні показники стабілізаторів характеризуються коефіцієнтом стабілізації напруги:

$$K_{CT} = \frac{\Delta U_{BX} / U_{BX}}{\Delta U_{ВИХ} / U_{ВИХ}}$$

Значення коефіцієнта стабілізації напруги стабілізаторів різних типів коливається в широких межах - від кількох одиниць до кількох тисяч.

Стабілізатор характеризується також коефіцієнтом пульсацій напруги, що визначається виразом

$$K_{П} = \frac{\Delta U_{\sim m}}{\Delta U_{ВИХ}} \cdot 100$$

де $\Delta U_{\sim m}$, змінна складова вихідної напруги стабілізатора, виражається в відсотках.

Стабілізатори напруги бувають параметричними і компенсаційними.

Параметричними називають стабілізатори, в яких для стабілізації напруги використовують характерні залежності параметрів нелінійних радіоелементів (ВАХ стабілітрона). На рис. 3.1 наведена схема найпростішого параметричного стабілізатора постійної напруги.

Схема є, по суті, подільником напруги, який складається з обмежуючого резистора $R_{обм}$ і стабілітрона VD_1 , паралельно якому підключений навантажувальний резистор R_n .

При зміні вхідної напруги $U_{вх}$ змінюється струм через обмежуючий резистор. Якби в схемі не було стабілітрона, то зміна струму викликала б зміну напруги на резисторі R_n . При наявності стабілітрона змінюється струм, який проходить через нього, а напруга на ньому, завдяки специфічній формі ВАХ стабілітрона VD_1 , залишається практично незмінною. Незмінною залишається напруга і на резисторі навантаження, який ввімкнений паралельно стабілітрону.

Розглянемо інший випадок, коли вхідна напруга залишається незмінною, а змінюється опір резистора навантаження. У цьому випадку струм, який проходить через стабілітрон, теж буде змінюватись, причому із зменшенням R_n (із збільшенням струму навантаження) струм через стабілітрон зменшиться, а напруга залишиться незмінною. До недоліків параметричних стабілізаторів слід віднести невисоку ефективність, незначні робочі струми, невисокий коефіцієнт стабілізації.

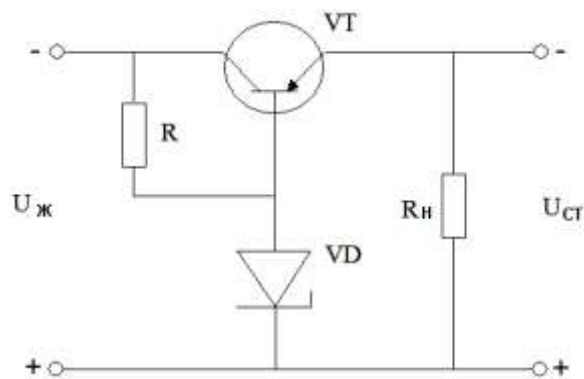


Рис. 3.4. Схема компенсаційного стабілізатора напруги.

Вказаних недоліків позбавлений компенсаційний стабілізатор, приклад схеми якого подано рис. 3.4. Тут резистор R і стабілітрон VD утворюють параметричний стабілізатор, який підтримує на базі транзистора (регулюючого) постійну напругу. Напруга на виході такого стабілізатора, а значить, і на резисторі навантаження R_n , рівна $U_{RH} = U_{VD} - U_{BE}$. Припустимо, що напруга на вході стабілізатора зростає. При цьому зростає струм I_e , а значить, і напруга на навантажувальному резисторі U_{RH} . Однак, при зростанні U_{RH} зменшиться пряма напруга між базою та емітером U_{BE} . Зменшення напруги приведе до часткового закриття транзистора. При цьому спад напруги на ділянці емітер-колектор транзистора зростає на величину, необхідну для компенсації зміни вхідної напруги.

Порядок виконання роботи

1. Скласти схему для одержання ВАХ стабілітрона осцилографічним методом.
2. Отримати на осцилографі ВАХ стабілітронів КС168Д та КС133А (Табл. 2.).
3. Скласти електричну схему для проведення експериментів з компенсаційним стабілізатором напруги.
4. Змінюючи напругу на вході компенсаційного стабілізатора, фіксувати зміну вихідної напруги. Результати вимірювань занести в табл. 1.

Таблиця 1.

№	1	2	3	...	22
$U_{ВХ}, В$	1	2	2	...	22
$U_{ВІХ}, В$					

5. Визначити коефіцієнт стабілізації за даними експерименту.
6. За даними таблиці 1 у прямокутній системі координат побудувати навантажувальну характеристику стабілізатора напруги.

Таблиця 2. Параметри досліджуваних стабілітронів.

Тип стабілітрон	$U_{ст.}, В$	$I_{ст. min}, мА$	$I_{ст. max}, мА$	Диференціальний опір, Ом	$P_{max}, Вт$
КС168Д	6,12...7,48	3	50	30	0,3
КС133А	2,97...3,6	3	50	65	0,3

Контрольні запитання

1. Які напівпровідникові діоди використовують при побудові стабілізаторів напруги?
2. Назвіть основні параметри стабілітронів.
3. Що таке параметричний стабілізатор напруги?
4. Для чого призначені стабілізатори напруги?
5. Які недоліки параметричних стабілізаторів напруги?
6. Які існують схеми стабілізаторів напруги?
7. Що таке коефіцієнт пульсації?
8. Що таке коефіцієнт стабілізації стабілізатора напруги?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

Зняття характеристик біполярних транзисторів

Мета роботи: Ознайомитись з принципом дії біполярного транзистора. Дослідити ВАХ транзистора, включеного за схемою зі спільним емітером.

Прилади і матеріали

1. Панель з досліджуваним транзистором.
2. Блок живлення 0-12 В.

3. Блок живлення 0-20 В.
4. Реостат (28 Ом).
5. Вольтметр (В7-21А).
6. Вольтметр (М2042).
7. Міліамперметр (МВА-47/5).
8. Мікроампервольтметр (М 109/1).
9. З'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості

Транзистор - це напівпровідниковий прилад, який має три та більше виводи і призначений для підсилення, генерування електричних сигналів, а також комутації електричних кіл.

Транзистори - найбільш цікаві та поширені прилади сучасної напівпровідникової електроніки. За роки свого розвитку транзистори істотно й неодноразово видозмінювалися за конструкцією, технологією виготовлення, електричними параметрами. Проте суть основних фізичних процесів, які відбуваються в них, залишилася незмінною.

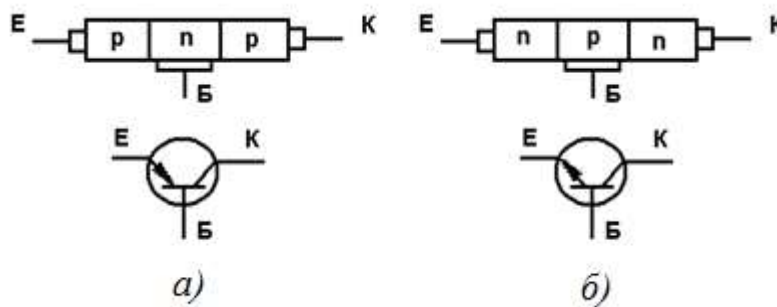


Рис. 4.1. Будова та умовне схематичне позначення біполярного транзистора структури *p-n-p* (а) та *n-p-n* (б).

Біполярний транзистор складається з трьох напівпровідникових структур, дві з яких мають однакову електропровідність і розділені між собою структурою іншої електропровідності. Внаслідок цього утворюються транзисторні *p-n-p* або *n-p-n* структури з двома (рис. 4.1) переходами, що мають підсилювальні властивості. Середню область називають базою (Б), а дві крайні - колектором (К) та емітером (Е). Транзистори структури *p-n-p* (рис. 4.1. а.) називають транзисторами прямої провідності, а структури *n-p-n* (рис. 4.1. б.) - зворотної.

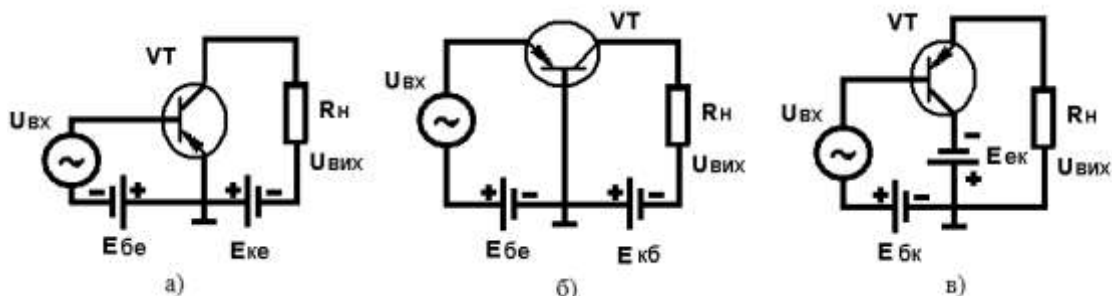


Рис. 4.2. Схеми вмикання транзистора: а) зі спільним емітером; б) зі спільною базою; в) зі спільним колектором.

Існують три основні схеми вмикання транзистора (рис. 4.2): із спільним емітером, із спільною базою, та із спільним колектором.

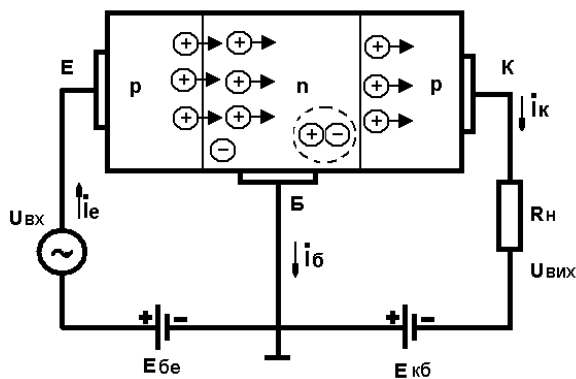


Рис. 4.3. Принцип дії біполярного транзистора.

Принцип дії транзистора ґрунтується на взаємодії двох $p-n$ переходів (рис. 4.3). Одна зі структур транзистора з'єднується через свій електрод з джерелом сталої напруги, причому структура p використовується при роботі транзистора як основне джерело носіїв заряду (емітер). Через середній шар (базу) носії заряду проходять у другу структуру p -типу провідності (колектор), який є збирачем носіїв заряду, інжекттованих емітером, що пройшли крізь шар бази. За допомогою струму в колі емітера у транзисторі здійснюється керування струмом у колі колектора. Обидва кола мають джерела електричної енергії.

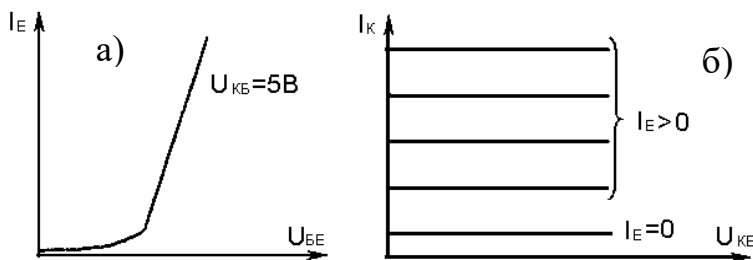


Рис. 4.4. ВАХ транзистора, увімкненого за схемою із спільною базою: а) входні; б) вихідні.

Залежність між струмом і напругою у входньому та вихідному колах транзистора визначається його вольт-амперними характеристиками. Сім'ї ВАХ транзистора при його вмиканні із загальною базою показано на рис. 4.4.

Залежно від прикладених напруг до електродів транзистора ($p-n$ -переходів) розрізняють наступні режими його роботи:

1) активний режим (активне підсилення) - емітерний перехід зміщено в прямому напрямку, а колекторний – у зворотному;

2) режим відсікання (відсічки) струму - на обидва переходи подані зворотні напруги, обидва переходи закрито, через них проходять незначні зворотні струми. У першому наближенні можна вважати, що всі струми дорівнюють нулю, а між виводами транзистора має місце розрив;

3) режим насичення – на обидва переходи подані прямі напруги, тобто обидва переходи зміщено у прямому напрямку (транзистор повністю відкритий). У цьому режимі і емітер, і колектор інжектують електрони в базу, у результаті чого в

структурі протікають два зустрічних наскрізних потоки електронів (нормальний та інверсний). Від співвідношення цих потоків залежить напрямок струмів, що протікають у колі емітера та колектора. Внаслідок подвійної інжекції база транзистора дуже сильно насичується надлишковими електронами, через що підсилюється їхня рекомбінація з дірками, і рекомбінаційний струм бази виявляється значно вище, ніж в активному або інверсному режимах. Слід також зазначити, що у зв'язку з насиченням бази транзистора і його переходів надлишковими носіями заряду, їхні опори стають дуже маленькими. Тому при великому струмі колектору в транзисторі розсіюється мала потужність внаслідок малого опору відкритого колекторного переходу. Цей режим є основним при побудові перемикальних схем;

4) інверсний активний режим характеризується тим, що до емітерного переходу підводиться зворотна напруга, а до колекторного – пряма, тобто емітер і колектор міняються місцями. У зв'язку з тим, що підсилювальні властивості транзистора в інверсному режимі виявляються значно гірше, ніж в активному режимі, транзистор в інверсному режимі практично не використовується.

Конструктивно біполярні транзистори оформляються в металевих, пластмасових або керамічних корпусах.

Як і для напівпровідникових діодів, існує буквено-цифрове кодування транзисторів.

Перший елемент означає напівпровідниковий матеріал (буква або цифра): Г або 1 - германій; К або 2 - кремній; А або 3 - арсенід галію.

Другий елемент (буква) вказує клас приладів: Т - транзистори біполярні; П - транзистори польові.

Третій елемент (цифра) визначає якісні та частотні показники транзисторів:

- транзистори малої потужності:

- низькочастотні (до 3 МГц) - 1,
- середньочастотні (3...30 МГц) - 2,
- високочастотні (понад 30 МГц) - 3;

- транзистори середньої потужності:

- низькочастотні (до 3 МГц) - 4,
- середньочастотні (3...30 МГц) - 5,
- високочастотні (понад 30 МГц) - 6;

- транзистори великої потужності:

- низькочастотні (до 3 МГц) - 7,
- середньочастотні (3...30 МГц) - 8,
- високочастотні (понад 30 МГц) - 9.

Четвертий та п'ятий елементи вказують порядковий номер розробки (від 01 до 99).

Шостий елемент (буква) означає поділ транзисторів на групи за класифікаційними параметрами.

Приклади позначень транзисторів:

ГТ115А - германієвий транзистор, малопотужний низькочастотний, номер розробки 15, група А;

КТ360В - кремнієвий транзистор, малопотужний високочастотний, номер розробки 60, група В;

КТ820Б - кремнієвий транзистор, великої потужності, середньочастотний, номер розробки 20, група Б.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з лабораторною установкою.
2. Скласти електричне коло, схема якого зображена на рис. 4.5, для дослідження транзистора, ввімкненого із спільним емітером.

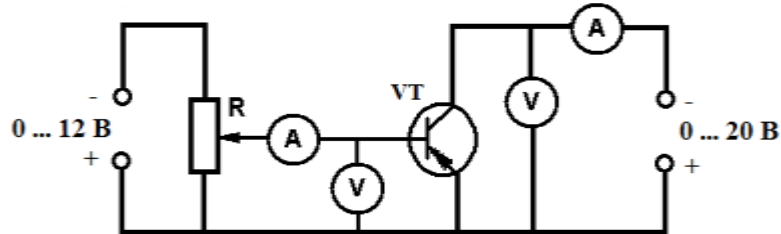


Рис. 4.5. Схема досліджуваного електричного кола.

3. Встановити напругу на колекторі транзистора $U_{KE}=0$.
6. Для зняття сім'ї вхідних статичних характеристик транзистора $I_B=f(U_{BE})$, при $U_{KE}=0$; 1; 2; 3 В, за допомогою резистора R змінювати напругу U_{BE} в межах вказаних викладачем.
7. Побудувати графічно сім'ю вхідних статичних характеристик транзистора.
8. Для зняття сім'ї вихідних статичних характеристик транзистора $I_K=f(U_{KE})$, при $I_B=0$; 40; 80 мкА, змінювати напругу на колекторі в межах, вказаних викладачем.
8. Побудувати графічно сім'ю вихідних статичних характеристик транзистора.
9. Користуючись сім'єю вихідних статичних характеристик транзистора, визначити його коефіцієнт підсилення за струмом:

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}, \text{ при } U_{KE} = \text{const.}$$

10. Користуючись сім'єю вхідних статичних характеристик транзистора, визначити його вхідний опір:

$$R_{BX} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}, \text{ при } U_{KE} = \text{const.}$$

Контрольні запитання

1. Структура та будова транзистора.
2. Використання транзисторів.
3. Позначення транзисторів.
4. Принцип дії транзистора.
5. Назвіть основні режими роботи транзисторів.
6. Маркування транзисторів.
7. Схеми вмикання транзисторів.
8. Вхідні та вихідні ВАХ транзистора.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

Дослідження статичних характеристик і параметрів польових транзисторів

Мета роботи: Вивчити принцип дії польових транзисторів, експериментально дослідити статичні вольт-амперні характеристики. Дослідити залежність опору каналу від напруги на затворі транзистора з керуючим *p-n*-переходом.

Прилади і матеріали

1. Панель з польовим транзистором КП 301Б.
2. Джерело живлення (10 В).
3. Джерело живлення (25 В).
4. Два вольтметри.
5. Амперметр.
6. Мікроамперметр.

Теоретичні відомості

Напівпровідникові прилади, в основі принципу дії яких лежить зміна провідності каналу поперечним електричним полем, називають польовими транзисторами. В утворенні електричного струму через польовий транзистор беруть участь носії одного типу (електрони чи дірки), тому їх ще називають уніполярними транзисторами. За способом створення провідного каналу розрізняють польові транзистори з керуючим *p-n*-переходом та транзистори структури метал-діелектрик-напівпровідник (МДН-транзистори) з вбудованим каналом та з індукованим каналом.

Польові транзистори з керуючим *p-n*-переходом

Аналіз роботи польового транзистора з керуючим *p-n*-переходом розглянемо на основі моделі, показаної на рис. 5.1, а. У наведеній конструкції каналом проходження струму транзистора є шар напівпровідника *n*-типу провідності, розміщений між двома *p-n*-переходами. Канал має контакти із зовнішніми електродами приладу. Електрод, від якого починають рух носії заряду (в даному випадку електрони), називають виток (В), а електрод, до якого вони рухаються - стоком (С). Напівпровідникові області *p*-типу, які утворюють з *n*-шаром два *p-n*-переходи, мають більш високу концентрацію домішок, ніж *n*-шар. Обидва *p*-шари електрично зв'язані між собою і мають загальний зовнішній електрод, який називається затвором (З). Подібну конструкцію мають і польові транзистори з каналом *p*-типу.

Умовні позначення польових транзисторів з індукованими каналами *n*- та *p*-типу наведено на рис. 5.1. б, в.

Полярність зовнішніх напруг, які подаються на транзистор, показана на рис. 5.1., а. Керуюча (вхідна) напруга подається між затвором і виток. Напруга $U_{зв}$ зворотна для обох *p-n*-переходів. У вихідне коло, в яке входить канал транзистора, включається напруга $U_{св}$ позитивним полюсом до стоку.

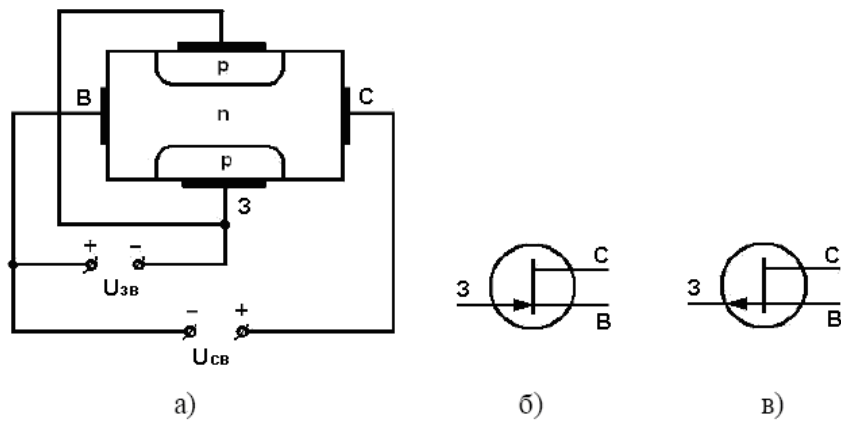


Рис. 5.1. а) польовий транзистор з керуючим $p-n$ -переходом; б) умовне позначення польового транзистора з індукованим каналом n -типу в) умовне позначення польового транзистора з індукованим каналом p -типу.

Керуючі властивості транзистора пояснюються тим, що при зміні напруги $U_{зв}$ змінюється ширина обох $p-n$ -переходів, які являють собою ділянки напівпровідника, збідненого вільними носіями заряду. Оскільки p -область має більшу концентрацію домішки, ніж n -область, то зміна ширини $p-n$ -переходів відбувається в основному за рахунок каналу. З підвищенням прикладеної напруги $U_{зв}$ розміри $p-n$ -переходів збільшуються, і область, збіднена носіями заряду, зміщується в бік каналу, що приводить до зменшення перерізу струмопровідного каналу і підвищення його електричного опору.

Особливістю польового транзистора є те, що на провідність каналу впливає як керуюча напруга $U_{зв}$, так і напруга $U_{св}$. Вплив підключених напруг на величину області об'ємного заряду, а отже, і на провідність каналу, ілюструє рис. 5.2.

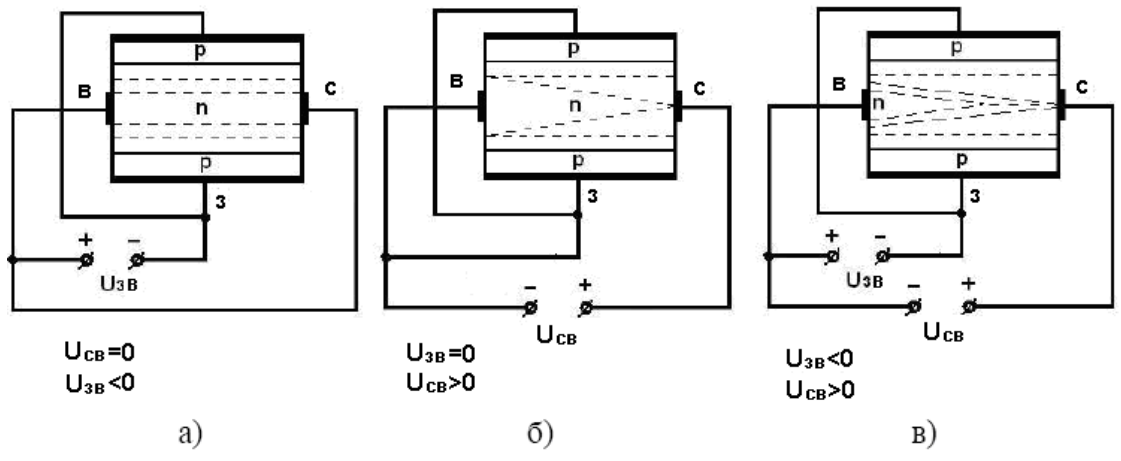


Рис. 5.2. Вплив напруг $U_{зв}$ та $U_{св}$ на провідність каналу.

На рис. 5.2. а зовнішня напруга прикладена тільки до вхідного кола транзистора. Зміна напруги $U_{зв}$ призводить до зміни провідності каналу за рахунок зміни на однакову величину об'ємного заряду, а, значить, і його площі перерізу по всій довжині каналу. Але вихідний струм стоку $I_c=0$, оскільки $U_{св}=0$. Рис. 5.2. б ілюструє зміну перерізу каналу при дії тільки напруги $U_{св}$ ($U_{зв}=0$). При $U_{св}$ більшій нуля через канал протікає струм I_c , в результаті чого створюється спад напруги, що зростає в напрямку стоку. Сумарний спад напруги на ділянці витік-стік рівний $U_{св}$. У силу цього потенціали точок каналу n -типу будуть неоднаковими по його

довжині, зростаючи в напрямку стоку від нуля до $U_{св}$. Потенціал точок p -області відносно виток визначається потенціалом затвора відносно виток і в даному випадку дорівнює нулю. У зв'язку із зазначеним, зворотна напруга, прикладена до переходів, зростає в напрямку від джерела до стоку, і переходи розширюються в напрямку стоку. Дане явище призводить до зменшення площі перерізу каналу від виток до стоку (рис. 5.2. б). Підвищення напруги $U_{св}$ викликає збільшення спаду напруги в каналі і зменшення його перерізу, а отже, призводить до зменшення провідності каналу. При певній напрузі $U_{св}$ відбувається звуження каналу, при якому границі обох p - n -переходів зникають (рис. 5.2. б), і опір каналу стає високим. На рис. 5.2. відображено результат впливу на канал обох напруг $U_{зв}$ і $U_{св}$.

Стокові (вихідні) вольт-амперні характеристики польового транзистора з керуючим p - n -переходом і каналом n -типу показані на рис. 5.3, а. Вони відображають залежність струму стоку від напруги стік-витік при фіксованій напрузі затвор-витік і зображуються у вигляді сім'ї кривих. На кожній з цих кривих можна виділити три області: 1 - сильна залежність струму стоку від напруги $U_{св}$ (початкова область), 2 - слабка залежність струму стоку від напруги $U_{св}$ (режим насичення струму стоку), 3 - область електричного пробоя p - n -переходу.

В області малої напруги $U_{св}$ (рис. 5.3, а - ділянка 0-а) вплив напруги на провідність каналу незначна, оскільки об'ємний заряд переходів ще незначний і тому тут спостерігається практично лінійна залежність струму стоку I_c від напруги $U_{св}$. При збільшенні напруги (ділянка а-б) звуження струмопровідного каналу за рахунок зростання об'ємного заряду чинить все більший вплив на його провідність, що призводить до зменшення нахилу наростання струму.

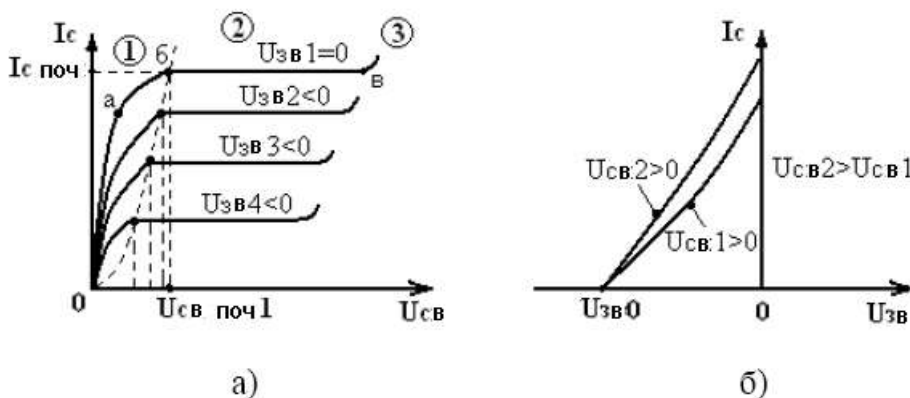


Рис. 5.3. а) стокові (вихідні) ВАХ польового транзистора. б) стік-затворні ВАХ польового транзистора.

При наближенні до межі з ділянкою 2 (точка б) переріз каналу зменшується в області стоку до мінімуму в результаті накладання об'ємних зарядів обох p - n -переходів. Напруга, при якій настає режим насичення струму стоку, називається напругою насичення $U_{св.нас}$. Подальше підвищення напруги мало змінює значення струму, оскільки одночасно зі зростанням напруги буде збільшуватися опір каналу, оскільки збільшена носіями область об'ємного заряду продовжує збільшуватися, заповнюючи канал від стоку до виток. Деяке збільшення струму стоку на ділянці б-в пояснюється наявністю різного роду витікань і впливом сильного електричного поля в переходах, прилеглих до каналу. Область 3 характеризується лавинним пробоем p - n -переходів поблизу стоку в колі стік-затвор, і відповідно, різким збільшенням струму стоку. Напруга початку пробоя відповідає точці в.

Прикладання до затвору зворотної напруги викликає звуження каналу, оскільки зростає об'ємний заряд p - n -переходів і відбувається зменшення його вихідної провідності. Тому початкові ділянки кривих, що відповідають великим напругам на затворі, мають меншу крутизну наростання струму. Зважаючи на наявність напруги $U_{зв}$, перекриття каналу об'ємним зарядом p - n -переходів відбувається при меншій напрузі, і межі ділянок 1 і 2 будуть відповідати меншій напрузі насичення $U_{св.нас}$. Напрузі перекриття каналу відповідають абсциси точок перетину стокових характеристик з пунктирною кривою, показаною на рис. 5.3. а. Важливим параметром польового транзистора є напруга на затворі, при якій струм стоку близький до нуля. Вона називається напругою відсікання $U_{зв(0)}$. Числове значення напруги відсікання дорівнює напрузі $U_{св}$ в точці b вольт-амперної характеристики при напрузі $U_{зв}=0$, а напруга насичення при певній напрузі на затворі дорівнює різниці напруги відсікання і напруги затвор-витік ($U_{св.нас}=U_{зв(0)}/-U_{зв}/$). Оскільки керування вихідним струмом польових транзисторів здійснюється напругою вхідного кола, то важливою для них є так звана перехідна або стік-затворна ВАХ. Ця характеристика показує залежність струму стоку від напруги затвор-витік при фіксованій напрузі стік-витік.

Приблизний вигляд цієї характеристики зображений на рис. 5.3.б. Стік-затворна характеристика пов'язана з вихідними характеристиками польового транзистора і може бути побудована на їх основі.

При роботі транзистора в пологій області стокової вольт-амперної характеристики при заданій напрузі $U_{зв}$ визначають з виразу:

$$I_c = I_{c.пю} \left(1 - \frac{U_{зв}}{U_{зв(0)}} \right)^2, \quad (5.1)$$

де $I_{c.п.}$ - початковий струм стоку насичення, під яким розуміють струм при $U_{зв}=0$ і напрузі на стоці, що перевищує напругу насичення $U_{св.нас}$.

Для кількісної оцінки керуючої дії затвору використовують крутизну стік-затворної характеристики, яка визначається при фіксованій напрузі $U_{св}$

$$S = \frac{dI_c}{dU_{зв}}. \quad (5.2)$$

Крутизна характеристики досягає максимального значення $S_{п.}$ при $U_{зв}=0$. Для визначення значення крутизни при будь-якій напрузі $U_{зв}$ продиференціюємо вираз (5.1):

$$\frac{dI_c}{dU_{зв}} = \left(\frac{2I_{c.п.}}{U_{зв(0)}} \right) \left(1 - \frac{U_{зв}}{U_{зв(0)}} \right). \quad (5.3)$$

При $U_{зв}=0$ вираз (5.3) матиме вигляд:

$$\frac{dI_c}{dU_{зв}} = S_{п.} = \left(\frac{2I_{c.п.}}{U_{зв(0)}} \right). \quad (5.4)$$

Підставивши (5.4) у вираз (5.3), отримаємо:

$$S = S_{п.} \left(1 - \frac{U_{зв}}{U_{зв(0)}} \right). \quad (5.5)$$

Основними параметрами польового транзистора є максимально допустимий струм стоку $I_{c.макс}$, максимальна напруга стоку $U_{св.макс}$, напруга відсікання $U_{зв(0)}$,

диференціальний внутрішній опір R_i , крутизна S , вхідний опір - $R_{вх}$, а також міжелектродні ємності затвор-витік $C_{зв}$, затвор-стік $C_{зс}$ і стік-витік $C_{св}$.

Максимальне значення струму стоку $I_{с.макс}$ відповідає його значенню в точці (в) на вихідних характеристиках (при $U_{зв}=0$). Максимальне значення напруги $U_{св.макс}$ вибирають в 1,2 - 1,5 рази менше від напруги пробою ділянки стік-затвор при $U_{зв}=0$. Напрузі відсікання $U_{зв(0)}$ відповідає напруга на затворі при струмі стоку, близькому до нуля. Диференційний внутрішній опір $R_i=dU_{св}/dI_c$ (при $U_{зв}=const$) характеризує нахил характеристики на ділянці 2 (рис. 5.3, а). Крутизна $S=dI_c/dU_{зв}$ (при $U_{св}=const$) відображає вплив напруги $U_{зв}$ на вихідний струм транзистора. Крутизну знаходять по стік-затворній характеристиці (рис. 5.3, б). Вхідний опір $R_{вх}=dU_{зв}/dI_з$ транзистора визначається опором p - n -переходів, зміщених у зворотному напрямку.

МНД-транзистори

МНД-транзистори можуть бути двох типів: транзистори із вбудованими каналами (канал створюється при виготовленні) і транзистори з індукованими каналами (канал створюється напругою, прикладеною до керуючих електродів). На відміну від польових транзисторів з керуючим p - n -переходом, в яких затвор має безпосередній електричний контакт з прилеглою областю струмопровідного каналу, в МНД-транзисторах затвор ізольований від зазначеної області шаром діелектрика. З цієї причини МНД-транзистори відносять до класу транзисторів з ізольованим затвором.

МНД-транзистори (структура метал-діелектрик-напівпровідник) виготовляють з кремнію. Як діелектрик використовують оксид кремнію. Звідси інша назва цих транзисторів - МОН-транзистори (структура метал-оксид-напівпровідник). Наявність діелектрика забезпечує високий вхідний опір цих транзисторів (10^{12} - 10^{14} Ом), значно більший, ніж у польових транзисторів з керуючим p - n -переходом (10^8 - 10^9 Ом).

Принцип дії МНД-транзисторів полягає в ефекті зміни провідності приповерхневого шару напівпровідника на межі з діелектриком під впливом поперечного електричного поля. Приповерхнева область напівпровідника є струмопровідним каналом цих транзисторів.

МНД-транзистор в загальному випадку чотирьохелектродний прилад. Четвертим електродом (підложкою), що виконує допоміжну функцію, є вивід від підложки вихідної напівпровідникової пластини. МНД-транзистори можуть бути з каналом n - або p -типу. Умовні позначення МНД-транзисторів показані на рис. 5.5. На рис. 5.5, а, б - транзистори з вбудованим і з індукованим каналом n -типу, на рис. 5, в, г - транзистори з каналом p -типу.

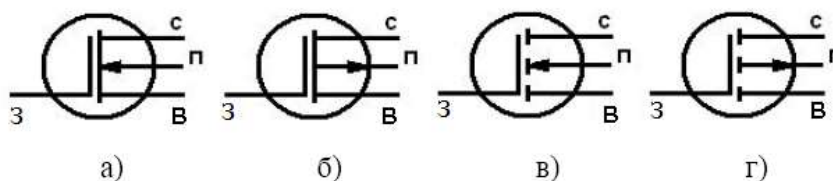


Рис. 5.5. Умовні позначення МНД-транзисторів. а) транзистори з вбудованим каналом n -типу; б) транзистори з вбудованим каналом p -типу; в) транзистори з індукованим каналом n -типу; б) транзистори з індукованим каналом p -типу.

Розглянемо особливості МНД-транзисторів з вбудованим каналом. Конструкція такого транзистора з каналом n -типу показана на рис. 5.6, а.

У вихідній пластині кремнію p -типу за допомогою дифузійної технології створені області витоку, стоку і каналу n -типу провідності. Шар оксиду кремнію виконує функції захисту поверхні, прилеглої до витоку і стоку, а також ізоляції затвора від каналу. Вивід підкладки, якщо він не використовується як додатковий керуючий електрод, приєднують до витоку. Стокові (вихідні) характеристики польового транзистора з вбудованим каналом n -типу показані на рис. 5.6, б. По виду ці характеристики близькі до характеристик польового транзистора з керуючим p - n -переходом. Розглянемо характеристику, зняту при напрузі $U_{зв}=0$, що відповідає з'єднанню затвора з витоком. Зовнішню напругу $U_{вс}$ прикладено до ділянки витік-стік позитивним полюсом до стоку, що відповідає зворотному включенню p - n -переходу. Оскільки напруга $U_{зв}=0$, то через прилад протікає струм, який визначається вихідною провідністю каналу. На початковій ділянці (0-а), коли спад напруги в каналі малий, залежність струму стоку від напруги $U_{св}$ близька до лінійної.

Це пояснюється тим, що тут об'ємний заряд зворотного зміщеного переходу ще малий і практично не впливає на опір каналу. При наближенні до точки (б) відбувається вже помітне зростання об'ємного заряду в області стоку, оскільки тут зворотна напруга на переході має найбільше значення. У результаті переріз каналу зменшується і його опір уже помітно зростає, що зменшує швидкість наростання струму на ділянці (а-б). У точці (б) струмопровідний канал в області стоку звужується до мінімуму (тобто відбувається змикання каналу) і далі зі зростанням напруги $U_{св}$ об'ємний заряд продовжує заповнювати канал у бік витоку і опір каналу зростає майже пропорційно зростанню напруги. Це призводить до обмеження наростання струму і появи на характеристиці пологої ділянки.

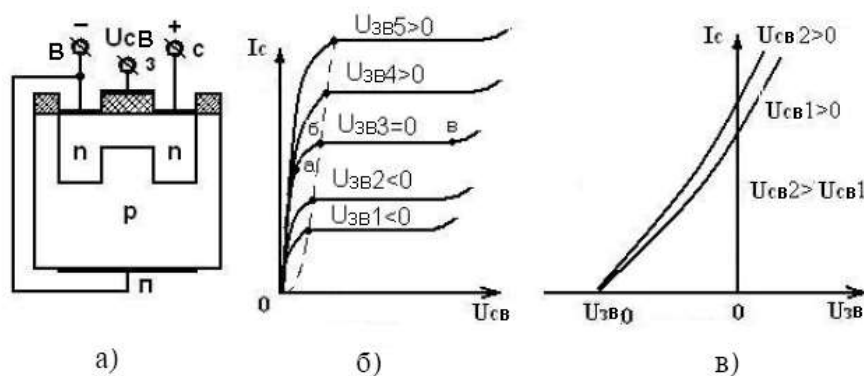


Рис. 5.6. а) конструкція МНД-транзистора з вбудованим каналом n -типу; б) стокові (вихідні) характеристики польового транзистора з вбудованим каналом n -типу; в) стік-затворна характеристика транзистора з вбудованим каналом.

Далі розглянемо вплив напруги $U_{зв}$ на хід стокових характеристик. У випадку прикладання до затвора напруги $U_{зв} < 0$ поле затвора чинить відштовхуючу дію на електрони, які є носіями заряду в каналі, що призводить до зменшення їх концентрації в каналі і збільшення опору каналу. Внаслідок цього стокові характеристики при напругах на затворі $U_{зв} < 0$ розташовуються нижче кривої, що відповідає $U_{зв}=0$. Режим роботи транзистора, при якому відбувається зменшення концентрації заряду в каналі, називають режимом збідніння.

При подачі на затвор напруги $U_{зв} > 0$ поле затвора притягує електрони в канал з p -шару напівпровідникової пластини. Концентрація носіїв заряду в каналі збільшується, що приводить до зменшення його опору, а значить, і до зростання струму стоку. Тому стокові характеристики при напругах $U_{зв} > 0$ розташовуються вище кривої, що відповідає напрузі $U_{зв} = 0$. Режим роботи транзистора, при якому відбувається збільшення концентрації заряду в каналі, називають режимом збагачення.

Для транзистора є межа зростання напруги $U_{сз}$ через настання пробою ділянки стік-затвор. На стокових характеристиках пробій відповідає певній величині $U_{св.пр}$ (область 3). Якщо $U_{зв} < 0$ напруга $U_{сз}$ збільшується, у зв'язку з чим пробій починається при меншій напрузі $U_{св}$.

Стік-затворна характеристика транзистора з вбудованим каналом зображена на рис. 5.6. Її відмінність від стік-затворної характеристики транзистора з керуючим p - n -переходом обумовлена можливістю роботи приладу як в режимі збіднення, так і в режимі збагачення.

Конструкція МНД-транзистора з індукованим каналом n -типу показана на рис. 5.7, а. Канал провідності струму тут спеціально не створюється, а утворюється (індукується) завдяки припливу електронів з напівпровідникової пластини у випадку прикладення до затвору напруги позитивної полярності відносно витоку. За рахунок припливу електронів в приповерхневому шарі відбувається зміна електропровідності напівпровідника, тобто індукується струмопровідний канал n -типу, що з'єднує області стоку і витоку. Напругу на затворі, при якому індукується канал, називають пороговою напругою $U_{зв.пор}$.

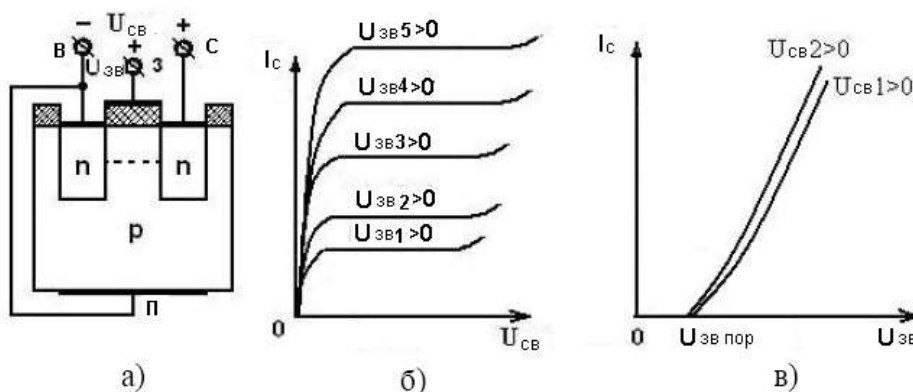


Рис. 5.7. а) конструкція МНД-транзистора з індукованим каналом n -типу; б) стокові характеристики польового транзистора з індукованим каналом n -типу; в) стік-затворна характеристика транзистора з індукованим каналом.

Провідність каналу зростає з підвищенням прикладеної до затвору напруги позитивної полярності. Таким чином, транзистор з індукованим каналом працює тільки в режимі збагачення.

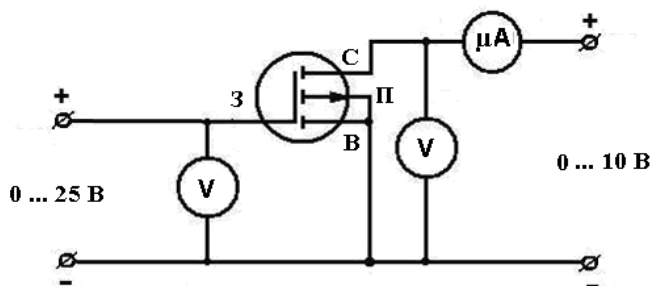
Стокові (вихідні) характеристики польового транзистора з індукованим каналом n -типу наведено на рис. 5.7, б. Вони близькі до аналогічних характеристик транзистора з вбудованим каналом.

Відмінність полягає в тому, що керування струмом стоку транзистора здійснюється напругою однієї полярності, що співпадає з полярністю напруги $U_{св}$.

Струм стоку дорівнює нулю при $U_{зв}=0$, тоді як в транзисторі з вбудованим каналом струм відмінний від нуля, оскільки він має не нульову вихідну провідність каналу.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись і виписати з додатку довідкові дані польового транзистора КП301Б
2. Скласти схему для дослідження транзистора КП301Б.



3. Межу вимірювань струму амперметра встановити на 200 мкА.
4. Межу вимірювань напруги обох вольтметрів встановити на 20 В.
5. Зняти сім'ю стік-затворних характеристик $I_c=f(U_{зв})$ при напругах $U_{св}=3$ В та $U_{св}=6$ В, $U_{св}=9$ В.
6. Напругу $U_{зв}$ змінювати в межах від 1 до 12 В через 1 В.
7. Результати занести до таблиці.

$U_{зв}, \text{В}$	$I_c, \text{мкА}$		
	$U_{св}=3 \text{ В}$	$U_{св}=6 \text{ В}$	$U_{св}=8 \text{ В}$

8. Зняти сім'ю стокових характеристик $I_c=f(U_{св})$ при напрузі на затворі: $U_{зв}=5$ В; $U_{зв}=6$ В; $U_{зв}=7$ В; $U_{зв}=8$ В.
9. Напругу $U_{св}$ змінювати в мажах від 1 до 10 В через 1 В.
10. Результати занести до таблиці.

$U_{св}, \text{В}$	$I_c, \text{мкА}$			
	$U_{зв}=5 \text{ В}$	$U_{зв}=6 \text{ В}$	$U_{зв}=7 \text{ В}$	$U_{зв}=8 \text{ В}$

11. За результатами вимірювань побудувати стік-затворні та стокові характеристики польового транзистора.
12. По стік-затворній характеристиці, при $U_{св}=9$ В, визначити порогову напругу МДП - транзистора з індукованим каналом ($U_{зв,пор}$), як напругу на затворі, при якій струм стоку рівний 20 мкА.
13. Використовуючи стік-затворну характеристику, при $U_{св}=9$ В, визначити крутизну характеристики

$$S = \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{зв}} \right|_{U_{св} = \text{const}}$$

при $U_{зв}=8$ В.

14. По стоковій характеристиці, дослідженій при $U_{зв}=8$ В, визначити опір каналу повністю відкритого транзистора при напрузі $U_{св}=1$ В.

15. Визначити активну складову вихідної провідності

$$g_{22} \approx \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{CB}} \Big|_{U_{ЗВ} = \text{const}}$$

при $U_{ЗВ}=8$ В и при $U_{СВ}=10$ В.

16. Визначити власний коефіцієнт підсилення по напрузі

$$k_U = \frac{S}{g_{22}}$$

для робочої точки, для якої були визначенні крутизна і активна складова вихідної провідності.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення термінам «транзистор», «польовий транзистор».
2. Поясніть відмінність польових транзисторів від керуючих переходів та ізолюваного затвору.
3. Охарактеризуйте кожен з виводів та поясніть принцип дії польового транзистора з керуючим *p-n*-переходами.
4. Нарисуйте умовні графічні позначення польових транзисторів. Запишіть назви виводів на рисунку.
5. Поясніть принцип дії та будову польового транзистора з ізолюваним затвором.
6. Наведіть типові статичні характеристики польового транзистора та коротко охарактеризуйте їх.
7. Поясніть, як визначити крутизну стік-затворної характеристики та активну вихідну провідність.
8. Стисло охарактеризуйте особливості роботи та сферу застосування польових транзисторів.

Параметри транзистора КП301Б

Кремнієвий планарний МОН-транзистор з індукованим каналом *p*-типу провідності призначений для роботи в приймальній, підсилювальній та іншій апаратурі.

Корпус металевий, герметичний, з гнучкими виводами. Маса транзистора не більша 0,7 г.

Електричні параметри

Струм витікання затвора -	$I_{з.вит.}=0,3$ нА при $U_{ЗВ}=30$ В.
Пороговий струм -	$I_{с.пор.}=10$ мкА при $U_{СВ}=6,5$ В, $U_{ЗВ}=6,5$ В.
Крутизна характеристики -	$S=(1-2,6)$ при $U_{СВ}=15$ В, $I_c=5$ мА.
Порогова напруга -	$U_{зв.пор.}=(2,7-5,4)$ В при $U_{СВ}=15$ В, $I_c=0,3$ мА.

Максимально допустимі параметри

Постійний струм стоку -	$I_{с.мах.}=15$ мА.
Постійна напруга стік-витік -	$U_{СВ. макс.}=20$ В.
Постійна напруга затвор-витік -	$U_{ЗВ. макс.}=30$ В.
Робоча частота -	$f=100$ МГц.
Допустима температура навколишнього середовища -	$(-45 \dots +70)$ °С.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

Дослідження варикапів

Мета роботи: Вивчити фізичні основи роботи варикапів та експериментально дослідити характеристики варикапів.

Прилади і матеріали

1. Об'єкт дослідження у вигляді вилки, до якої під'єднуються варикапи.
2. Установка для вивчення $p-n$ -переходу ФПК-06.
3. Джерело живлення 5 В і 12 В.
4. Генератор для дослідження варикапів.
5. Мікроампервольтметр М2042.
6. Частотомір ЧЗ-24 (або аналогічні).

Теоретичні відомості

У режимі зворотної напруги $p-n$ -перехід являє собою ємність, зумовлену нерухомим об'ємним зарядом на межі розділення p та n областей, величина якої пропорційна площі $p-n$ -переходу, концентрації носіїв заряду та діелектричній проникності матеріалу напівпровідника. Цю ємність називають бар'єрною (C_0). Величина бар'єрної ємності діода може бути визначена з формули:

$$C_0 = \frac{\varepsilon S}{4\pi d},$$

де ε – відносна діелектрична проникність напівпровідника; S – площа $p-n$ -переходу; d – ширина $p-n$ -переходу.

При прямій напрузі $p-n$ -перехід, крім бар'єрної ємності, має так звану дифузійну ємність $C_{\text{диф}}$. Ця ємність обумовлена накопиченням рухомих носіїв заряду в p - і n -областях.

$$C_{\text{диф}} = Q_{\text{диф}} / U_{\text{пр}},$$

де $Q_{\text{диф}}$ – величина заряду, накопичена в області $p-n$ -переходу; $U_{\text{пр}}$ – значення прямої напруги, якій відповідає $Q_{\text{диф}}$.

Дифузійна ємність істотно не впливає на роботу $p-n$ -переходу, тому що вона завжди зашунтована малим прямим опором переходу. Найбільше практичне значення має бар'єрна ємність.

Варикап – це напівпровідниковий діод, принцип дії якого ґрунтується на залежності бар'єрної ємності $p-n$ -переходу від зовнішньої напруги. Можна сказати, що варикап – це конденсатор змінної ємності, керований зміною зворотної напруги.

Основною характеристикою варикапа є залежність його ємності від напруги (вольт-фарадна характеристика), типовий вигляд якої зображено на рис. 6.2. Залежність ємності варикапа від прикладеної напруги визначається технологією виготовлення $p-n$ -переходу.

Рис. 6.1. Умовне графічне позначення варикапа.

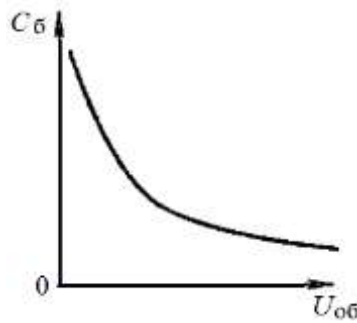


Рис. 6.2. Залежність бар'єрної ємності $p-n$ -переходу від напруги.

Основні параметри варикапів

1. Номінальна ємність C_B – ємність, яку вимірюють між выводами варикапа за заданого зворотного зміщення при температурі навколишнього середовища 20°C . Залежно від призначення варикапи виготовляють з ємністю від одиниць до сотень пікофарад. Здебільшого номінальну ємність вимірюють при зворотній напрузі 4 В.
2. Коефіцієнт перекивання за ємністю K_C – це відношення номінальної ємності варикапа, яку вимірюють при мінімальній зворотній напрузі, до мінімальної ємності, яку вимірюють при максимально допустимій зворотній напрузі. Значення K_C дорівнює декільком одиницям.
3. Добротність Q – це відношення реактивного опору варикапа до активного (опір втрат). Добротність можна знайти з еквівалентної схеми варикапа.

Повний опір варикапа

$$Z_{\text{в}} = r_{\text{зв}} + j\omega C_B$$

Поділивши дійсну частину опору на уявну і врахувавши, що $r_{\text{зв}} \gg r_{\text{б}}$, дістанемо зворотну величину добротності:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{\omega C_B r_{\text{зв}}}$$

де C_B – ємність варикапа; $r_{\text{б}}$ – опір бази; $r_{\text{зв}}$ – опір зворотно зміщеного переходу варикапа.

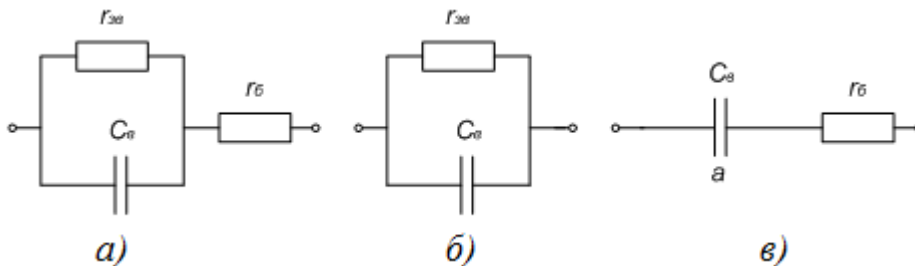


Рис. 6.3. Еквівалентна схема варикапа: a – повна; $б$ – на низьких частотах; $в$ – на високих частотах.

На низьких частотах другий доданок набагато менший від першого і ним можна знехтувати. Тоді

$$Q \approx \omega C_B r_{\text{зв}}$$

На високих частотах можна знехтувати першим доданком, і

$$Q_{\Gamma} = \frac{1}{\omega C_0}$$

Максимально припустима напруга U_{\max} – максимальне миттєве значення змінної напруги, що забезпечує необхідну надійність при довготривалій роботі.

4. Температурний коефіцієнт ємності – відношення відносної зміни ємності при заданій напрузі до абсолютної зміни температури навколишнього середовища.
5. Максимально припустима потужність P_{\max} – максимальне значення потужності, що розсіюється на варикапі, при якому забезпечена необхідна надійність при довготривалій роботі.

Залежність параметрів від температури

Залежність ємності від температури зумовлена двома факторами: температурною залежністю діелектричної проникності ε і температурною залежністю висоти потенціального бар'єра φ_0 .

Діелектрична проникність напівпровідників слабо залежить від температури і цю залежність можна не враховувати.

Висота потенціального бар'єра φ_0 залежить від температури через концентрацію власних носіїв n і температурний потенціал φ_T . Оскільки концентрація n_i зі зростанням температури зростає за експонентою, а φ_T – лінійно, то в цілому φ_0 зі зростанням температури буде зменшуватися, а отже, ємність варикапа C_v – зростати. Вплив φ_0 на температурну залежність C_v буде сильніше виявлятися при малих зворотних напругах, коли φ_0 співрозмірна з $U_{зв}$. У випадку $p-n \gg \varphi_0$ залежність C_v від температури суттєво знижується.

Залежність добротності варикапа від температури на низьких частотах зумовлена здебільшого зниженням зворотного опору $p-n$ переходу з підвищенням температури. На високих частотах добротність варикапа з підвищенням температури трохи знижується внаслідок зменшення рухливості носіїв і відповідно зростання опору r_b .

Варикапи працюють тільки за зворотного зміщення, оскільки при цьому забезпечується високе значення добротності.

Варикапи застосовуються головним чином для настроювання коливальних контурів, а також у деяких спеціальних схемах, наприклад, в параметричних підсилювачах.

Порядок виконання роботи

1. Вимірювання ємності варикапа залежно від напруги за допомогою установки для вивчення $p-n$ -переходу ФПК-06.

1.1. Виміряйте залежність бар'єрної ємності варикапа від напруги. Отримані значення ємності занесіть в табл. 6.1.

Таблиця 6.1. Залежність бар'єрної ємності варикапа від напруги

$U_c, \text{В}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	25
$C_0, \text{пФ}$																

1.2. Виміряйте залежність дифузійної ємності варикапа від напруги. Результати вимірювань занесіть до табл. 6.2.

Таблиця 6.2. Залежність дифузійної ємності варикапа від напруги

$U_c, \text{В}$	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
$C_{\text{диф}}, \text{пФ}$									

1.3. За даними табл. 6.1, 6.2 побудуйте залежність ємності варикапа від напруги.

1.4. Розрахуйте коефіцієнт перекриття бар'єрної ємності досліджуваного варикапа.

2. Дослідження роботи варикапа в схемі генератора за допомогою генератора для дослідження варикапів.

2.1. Підключити вимірювальні прилади згідно зі схемою, зображеною на рис. 6.4.

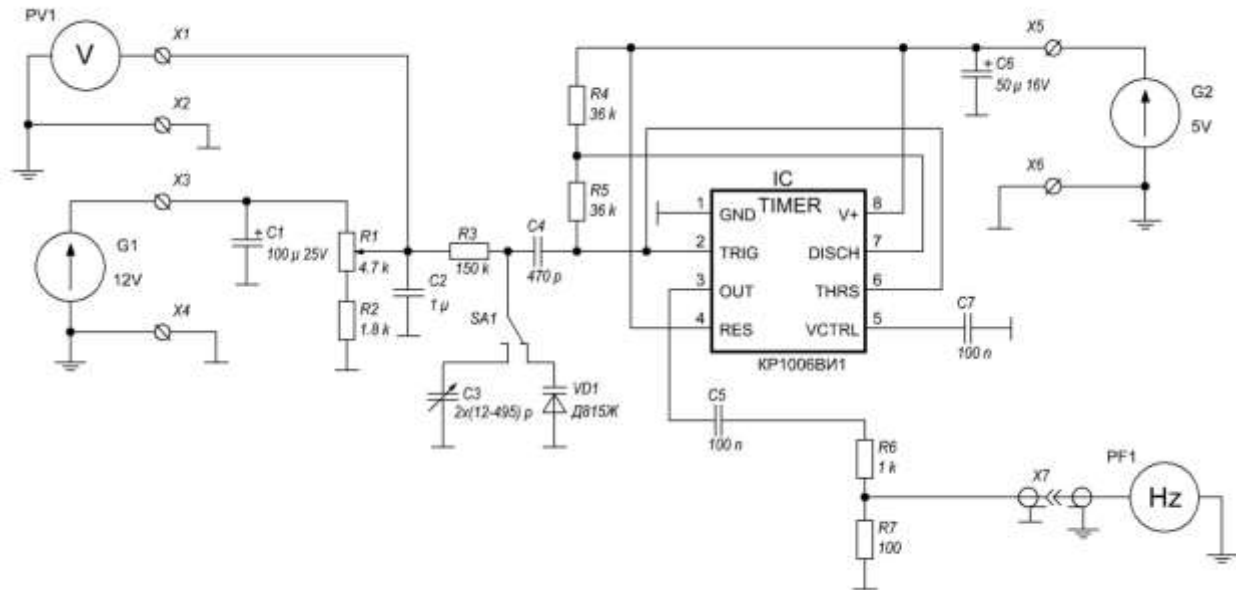


Рис. 6.4. Схема для дослідження роботи варикапа в схемі генератора.

2.2. Встановити перемикач SA1 в положення “Конденсатор”. Змінюючи ємність конденсатора C3, виміряти частоту коливань генератора.

2.3. Встановити перемикач SA1 в положення “Варикап”. Змінюючи напругу на варикапі за допомогою резистора R1, виміряти частоту коливань генератора. Результати вимірювань занести до табл. 6.3.

Таблиця 6.3. Залежність частоти коливань генератора від напруги на варикапі.

U, В									
f, кГц									

2.4. За даними табл. 6.3 побудувати графік залежності частоти коливань генератора від напруги на варикапі.

2.5. Порівняти значення частоти коливань генератора в обох положеннях перемикача SA1.

Контрольні запитання

1. Чим обумовлена наявність бар'єрної ємності $p-n$ -переходу?
2. Чим обумовлена наявність дифузійної ємності $p-n$ -переходу?
3. Що називають варикапом?

4. Що є основною характеристикою варикапа? Який вигляд вона має?
5. Назвіть основні параметри варикапів.
6. Що таке номінальна ємність та добротність варикапа?
7. Що таке коефіцієнт перекривання за ємністю варикапа?
8. Поясніть залежність бар'єрної ємності та добротності від температури.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

Дослідження роботи тиристора та його використання в схемах регулювання потужності

Мета роботи: Дослідити роботу електронного ключа на тиристорі. Ознайомитись зі схемою фазового регулювання споживаної потужності.

Прилади і матеріали

1. Панель з тиристором.
2. Джерело живлення (12 В).
3. Лампа розжарення 6,3 В, 0,3 А.
4. Міліамперметр (500 мА).
5. Вольтметр.
6. Панель для дослідження тиристора в схемі регулювання потужності.
7. З'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості

Класифікація та умовні графічні позначення тиристорів.

Тиристорами називаються напівпровідникові прилади з трьома і більше *p-n*-переходами, призначені для використання в якості електронних ключів в схемах перемикання електричних струмів. Залежно від конструктивних особливостей і властивостей тиристори поділяються на діодні (диністори) і тріодні (триністори).

Серед діодних тиристорів розрізняють тиристори, які замикаються в зворотному напрямку, які проводять в зворотному напрямку та симетричні.

Тріодні тиристори поділяють на такі, що замикаються в зворотному напрямку з керуванням по аноду чи катоду, які проводять в зворотному напрямку з керуванням по аноду чи катоду, симетричні.

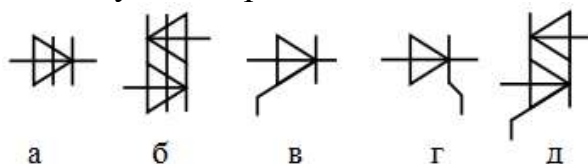


Рис. 7.1. Умовні графічні позначення тиристорів: а - діодний тиристор, що замикається в зворотному напрямку; б - діодний симетричний тиристор (симетричний диністор); в - тріодний тиристор, що замикається в зворотному напрямку з керуванням по аноду; г - тріодний тиристор, що замикається в зворотному напрямку з керуванням по катоду; д - тріодний симетричний тиристор (симетричний триністор).

Принцип дії тиристорів

Найпростіші діодні тиристири, що замикаються в зворотному напрямку, зазвичай виготовляються з кремнію і складаються з чотирьох p - і n - областей, які чергуються (рис. 7.2. а). Область p_1 , в яку потрапляє струм із зовнішнього кола, називають анодом, область n_2 - катодом; області n_1 і p_2 - базами.

Структура тиристора може бути представлена у вигляді з'єднання двох транзисторів різної структури (рис. 7.2, б, в), так що колекторний струм транзистора $p_1-n_1-p_2$ (VT1) є базовим струмом транзистора $n_1-p_2-n_2$ (VT2), а колекторний струм транзистора $n_1-p_2-n_2$ є базовим струмом транзистора $p_1-n_1-p_2$.

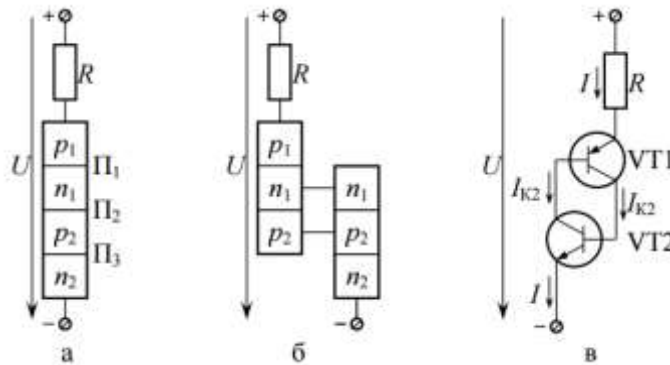


Рис. 7.2. Структура діодного тиристора.

Таким чином, між базовими і колекторними струмами транзисторів існує позитивний зворотний зв'язок, який забезпечує перемикання структури за умови, що коефіцієнт позитивного зворотного зв'язку більше одиниці.

Якщо до тиристора підключити джерело напруги, як показано на рис. 7.2. а, то переходи Π_1 і Π_3 виявляться відкритими, а перехід Π_2 - закритим. Його називають колекторним переходом. Майже весь спад напруги формується на ньому.

Оскільки переходи Π_1 і Π_3 зміщені в прямому напрямку, то з них в області баз інжектуються носії заряду: дірки з області p_1 і електрони з області n_2 . Ці носії дифундують в областях баз n_1 і p_2 та наближаються до колекторного переходу Π_2 і його полем перекидаються через p - n -перехід. Рухаючись в протилежних напрямках, ці дірки та електрони створюють загальний струм. При малих значеннях зовнішньої напруги практично вся вона спадає на колекторному переході Π_2 . Тому до переходів Π_1 і Π_3 , які мають малий опір, прикладена мала різниця потенціалів і інжекція носіїв зарядів незначна. У цьому випадку струм малий і дорівнює зворотному струму через перехід Π_2 , тобто I_{K0} .

При збільшенні зовнішньої напруги струм у зовнішньому колі збільшується незначно, проте при досягненні напругою певного значення $U_{вкл}$ носії заряду, проходячи через p - n -перехід Π_2 , прискорюються настільки, що при зіткненні з атомами в області p - n -переходу іонізують їх, викликаючи лавинне розмноження носіїв заряду. Дірки, що виникають при цьому, під впливом електричного поля переходять в область p_2 , а електрони - в область n_1 . Струм через перехід збільшується, а його опір і падіння напруги на ньому знижуються. Це призводить до зростання напруги, докладеної до переходів Π_1 і Π_3 , і збільшення інжекції через них, що викликає подальше зростання колекторного струму і збільшення струмів інжекції. Процес відбувається лавиноподібно, і опір переходу Π_2 стає малим. В

результаті падіння напруги на тиристорі стає незначним, а струм через нього обмежується тільки опором R .

На ВАХ (рис. 7.3) закритому стану тиристора відповідає ділянка 1. Процес лавинного розмноження носіїв заряду відображає ділянку 2 з негативним диференціальним опором. Після перемикання ВАХ тиристора аналогічна гілці ВАХ діода, зміщеного в прямому напрямку (ділянка 3).

Для того, щоб замкнути тиристор, потрібно зменшити його робочий струм до значення $I < I_{\text{кд}}$ шляхом зниження напруги живлення.

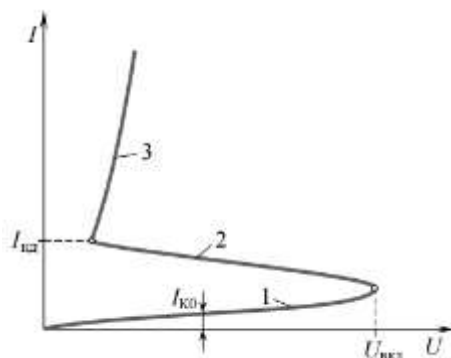


Рис. 7.3. ВАХ тиристора

Керовані тиристори

Триодний тиристор відрізняється від діодного тим, що одна з баз має зовнішній вивід, який називають керуючим електродом.

Перевести тиристор в провідний стан можна, підключивши до однієї з його базових областей джерело струму в прямому напрямку. Залежно від того, база якого саме емітерного переходу буде керуючою, розрізняють триністори з керуванням по аноду та з керуванням по катоду. На рис. 7.4. а показано включення джерела керуючого струму в базову p -область другого еквівалентного транзистора. Струм, що викликає перемикання тиристора, називають керуючим струмом $I_{\text{к}}$.

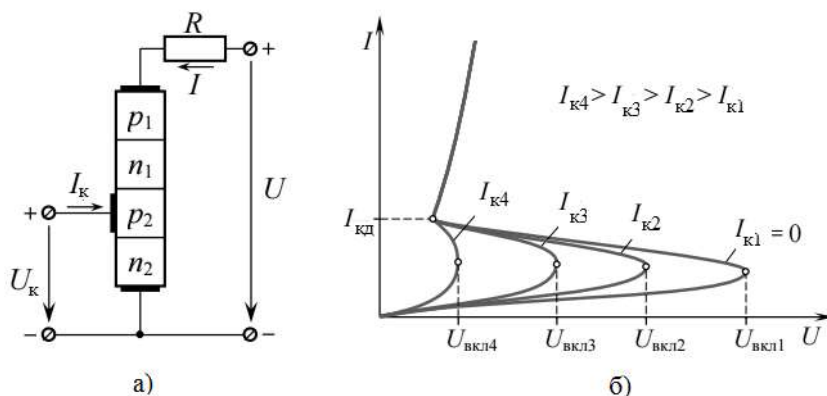


Рис. 7.4. Тиристор, керований по катоду: а - структурна схема; б - ВАХ.

Симістори

У сучасній електроніці для комутації ланцюгів змінного струму застосовуються симетричні тиристори, у яких ВАХ однакові в I і III квадрантах. Симістори створюють на основі п'ятишарових структур.

При подачі на керуючий електрод сигналу однієї полярності симістори відкриваються як в прямому, так і в зворотному напрямках. Вимкнення симістора

відбувається при переході комутуючої напруги через нуль (зміні полярності з одного півперіоду на інший).

Застосування тиристорів, схеми включення

На даний час тиристори знаходять найрізноманітніше застосування як в промисловій, так і в побутовій апаратурі. Найбільш широко вони застосовуються в пристроях електроживлення (випрямлячі, перетворювачі енергії, частотні регулятори, регулятори потужності), також часто застосовуються в пристроях керування електроприводом, пристроях захисту і комутації.

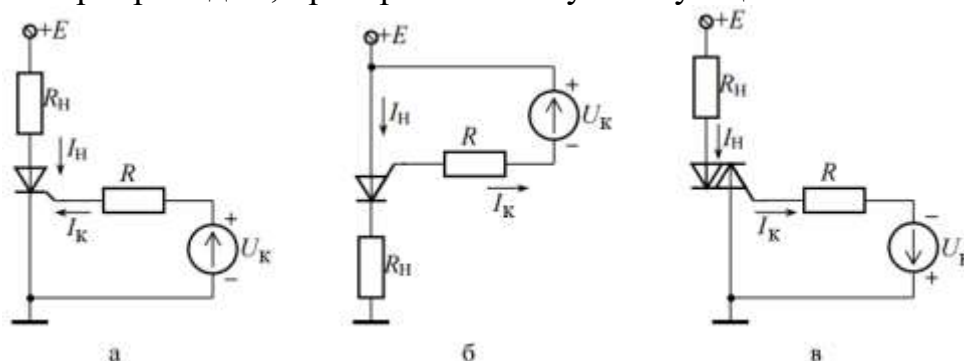


Рис. 7.5. Схеми ввімкнення тиристорів: а - з керуванням по катоду, б - з керуванням по аноду, в - керування симістором.

У порівнянні з потужними транзисторами тиристори мають ряд переваг:

- можуть працювати при дуже великих струмах (сотні ампер) і більш високих зворотних напругах;
- менший спад напруги в відкритому стані;
- мала потужність сигналів управління;
- не вимагають додаткової потужності сигналу управління для підтримки пристрою у ввімкненому або вимкненому стані.

Основним недоліком тиристорів є те, що вони не можуть бути вимкнені за допомогою керуючого електрода.

Розглянемо як приклад використання тиристора для регулювання потужності. Це досягається подачею на навантаження змінної напруги на протязі лише частини періоду (Рис. 7.6.). Такий спосіб регулювання потужністю одержав назву фазового регулювання.

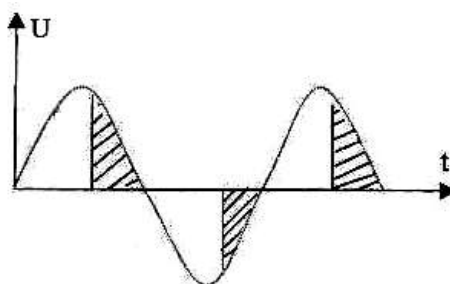


Рис. 7.6. Напруга при фазовому регулюванні потужності.

У схемі, наведеній в роботі, в діагональ містка ввімкнений тиристор. Керування тиристором здійснюється напругою, яка знімається з конденсатора С. Час вмикання тиристора відносно фази напруги живлення, а, відповідно, і потужність споживача залежить від швидкості заряду конденсатора, яка регулюється величиною опору резистора R_1 . При зменшенні опору резистора R_1

конденсатор заряджається швидше, відповідно, і потужність більша. Це обумовлено тим, що час і величина струму, який протікає через споживач, залежить від часу знаходження тиристора у відкритому стані.

Порядок виконання роботи

Завдання I

1. Скласти електричну схему для дослідження електричного ключа на тиристорі (рис. 7.6).

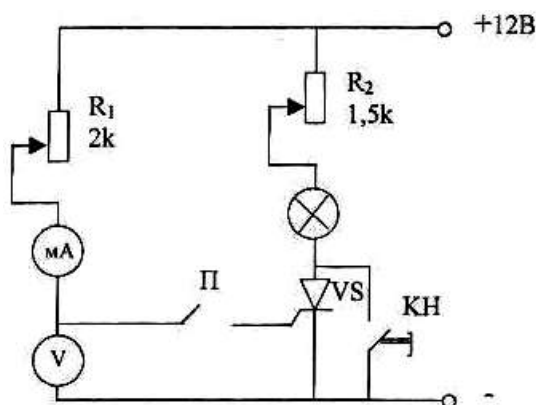


Рис. 7.6. Схема для дослідження електричного ключа на тиристорі.

2. Встановити повзунки резисторів R_1 і R_2 в положення, які відповідають максимуму і мінімуму опорів.
3. Подати напругу живлення на схему.
4. Зменшуючи опір резистора R_1 , зафіксувати струм керуючого електрода тиристора VS і напругу на ньому, при якій ввімкнеться лампа.
5. Вимикачем Π вимкнути напругу на керуючому електроді, відмітивши при цьому стан, у якому буде знаходитись тиристор.
6. Натисканням кнопки $КН$ заблокувати тиристор VS , відмітивши, в якому стані він буде знаходитись після відпускання кнопки.
7. Відімкнути напругу живлення схеми.
8. Скласти електричну схему (рис. 7.7), ввімкнувши міліамперметр в анодне коло тиристора.

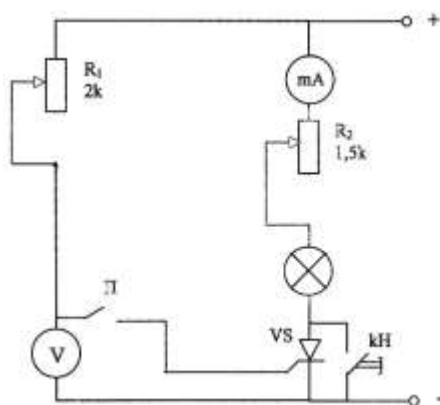


Рис. 7.7.

10. Збільшуючи опір резистора R_2 , зафіксувати струм, при якому відбудеться

вимкнення тиристора VS.

11. Всі висновки, зроблені на основі спостереження, подати у формі звіту до лабораторної роботи.

Завдання II

1. Скласти електричну схему, у якій споживана потужність регулюється тиристором (рис. 7.8)

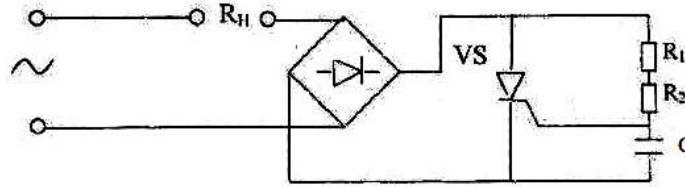


Рис. 7.8. Схема регулювання потужності тиристором.

2. Подати напругу живлення на схему.

3. Дослідити, що час і величина струму, який протікає через резистор навантаження R_n , залежить від часу знаходження тиристора у відкритому стані.

4. Подивитись на осцилографі різні форми напруги на навантаженні при двохпівперіодному випрямленні з фазовим регулюванням.

Контрольні запитання

1. Яка фізична причина нелінійності ВАХ тиристора?
2. Які тиристори називаються керованими тиристорами?
3. Яке призначення керуючого електрода в тиристорі?
4. Як перевести тиристор з відкритого стану в закритий?
5. У чому полягає суть фазового регулювання споживаною потужністю?
6. Перерахуйте основні особливості симісторів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

Дослідження еквівалентів приладів з від'ємним диференціальним опором

Мета роботи: Ознайомитись з однією із можливих транзисторних схем еквівалентів приладів з від'ємним диференціальним опором. Одержати його ВАХ із різними навантажувальними резисторами.

Прилади і матеріали

1. Панель з асиметричним транзисторним еквівалентом $p-n-p-n$ -структури.
2. Джерело живлення (24 В).
3. Міліамперметр (200 мА).
4. Вольтметр.
5. Реостат.
6. Резистори навантаження.
7. З'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості

Прилади з від'ємним диференціальним опором характеризуються багатofункціональністю, тобто можливістю створення на їх основі різноманітних радіотехнічних пристроїв.

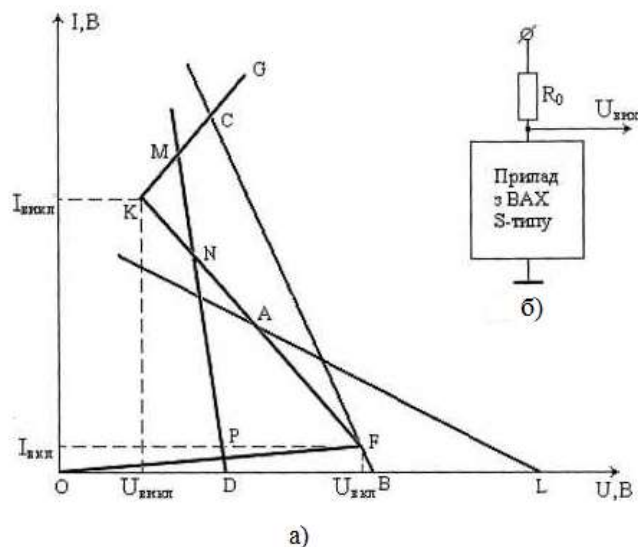


Рис. 8.1. а - вибір робочої точки на ВАХ S-типу, б - структурна схема радіотехнічного приладу, який містить прилад з від'ємним диференціальним опором.

На рис. 8.б. показана структурна схема, яка містить прилад з від'ємним диференціальним опором і ввімкнений послідовно резистор R_0 , який задає режим роботи і положення робочої точки.

При визначенні напруг і струмів вмикання і вимикання на ВАХ s-типу виділяються три ділянки (рис. 8.а). На ділянці OF транзистори працюють у режимі відсікання, на ділянці FK - в лінійному режимі, на ділянці KG - в режимі насичення. Якщо навантажувальна пряма MD перетинає ВАХ S-типу у трьох точках, то пристрій може виконувати функції тригера. Якщо навантажувальна пряма AL перетинає ВАХ S-типу в одній точці, то пристрій працює в лінійному режимі і може виконувати, наприклад, функції підсилювача або генератора. При перетинанні ВАХ навантажувальною прямою BC у двох точках пристрій працює в пороговому (ключовому) режимі. Таким чином, однакові пристрої виконують різні функції, що є їх основною перевагою.

Короткий порівняльний аналіз промислових приладів з від'ємним диференціальним опором дозволяє зробити висновок, що ці прилади (диністори, тиристори, одноперехідні і лавинні транзистори) теоретично можуть працювати в будь-якому з режимів (підсилювальному, генераторному, ключовому). Для них характерна економія енергії при роботі в ключовому режимі, високі робочі частоти, а в ряді випадків - здатність комутувати сигнали великої потужності. Однак область практичного застосування обмежується в основному пристроями імпульсної техніки, що пояснюється рядом характерних для цих приладів недоліків. До них відносяться низька температурна стабільність напруг і струмів вмикання та вимикання, велика чутливість коефіцієнта перетворення пристрою до зміни від'ємного диференціального опору, велике споживання енергії при роботі в лінійному режимі, висока напруга живлення і, як наслідок цього - додаткові складності в узгодженні з логічними мікросхемами. Всі ці недоліки і визначили область їх застосування в імпульсних пристроях, які не вимагають високих

метрологічних характеристик.

Природно, що потреби практики вимагають варіювання основних параметрів ВАХ. Тому постає задача створення приладів, в яких можна одержувати задані напруги і струми вмикання і вимикання, які змінюються в широких межах. Сучасні прилади, які випускаються, цим вимогам не відповідають. Одним із шляхів усунення відмічених недоліків є розробка транзисторних аналогів, або, як їх часто називають, еквівалентів. Слід відмітити, що ця назва не відбиває еквівалентності фізичних процесів у вказаних пристроях, а лише аналогію їх ВАХ.

Із транзисторних еквівалентів приладів з від'ємним диференціальним опором виділяється група, основу якої складають еквіваленти $p-n-p-n$ -структури.

На рис. 8.2. зображений двополюсник - аналог $p-n-p-n$ -структури.

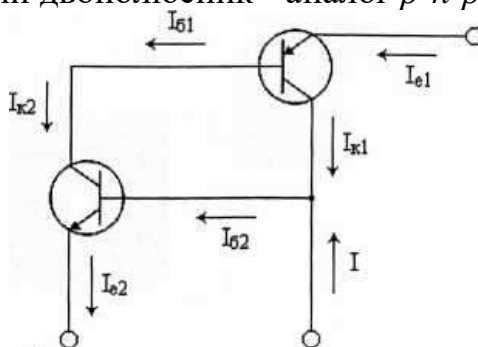


Рис. 8.2 Схема тиристорної $p-n-p-n$ -структури.

Якщо в двополюснику є лише від'ємний зворотній зв'язок за напругою, то його вихідний опір буде додатним і пропорційним глибині від'ємного зворотного зв'язку.

При наявності додатного зворотного зв'язку за напругою двополюсник з ВАХ S-типу має від'ємний диференціальний опір. Причому транзистори, які складають $p-n-p-n$ -структуру, в залежності від глибини і характеру додатного зворотного зв'язку можуть або зразу перейти в режим насичення, або спочатку працювати в лінійному режимі, а далі із збільшенням напруги живлення перейти в режим насичення. Все визначається співвідношенням глибини додатних і від'ємних зворотних зв'язків, введених в еквіваленти $p-n-p-n$ -структури.

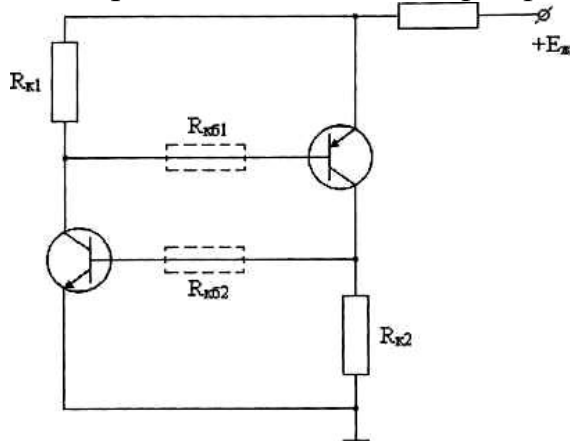
Розглянемо спочатку роботу найпростішого транзисторного еквівалента $p-n-p-n$ -структури, схема якого зображена на рис. 8.3.

При роботі на ділянці OF ВАХ (рис. 8.1а.) пристрій практично не споживає струму від джерела живлення, так як транзистори закриті. Напруга, при якій відкриваються транзистори, близька до напруги пробію. При ввімкненні одного транзистора через його колекторне коло почне протікати струм, що спричинить спад напруги на колекторному резисторі, яка буде відкриваючою для другого транзистора. У цьому проявляється дія додатного зворотного зв'язку за струмом. Струм вмикання виявляється близьким за величиною до струму вимикання. Тому розглянутий пристрій має високий і практично некерований від'ємний диференціальний опір. Вмикання резисторів у коло додатного зворотного зв'язку за струмом (на схемі вказано пунктиром) дозволяє змінювати глибину зв'язку і, відповідно, впливати на умови вмикання і вимикання. При невеликих значеннях опорів резисторів $R_{кб}$ вмикання пристрою буде обумовлене різким зростанням некерованого струму при напругах, близьких до напруги пробію транзисторів. При

великих значеннях опорів резисторів $R_{к6}$ (порядку одиниць, десятків кОм) некеровані струми транзисторів можуть обумовлювати на них спад напруги, достатній для вмикання еквівалента $p-n-p-n$ -структури при напругах, значно менших напруги пробую транзисторів. У цьому випадку від'ємний диференціальний опір зменшиться, відповідно, зміняться параметри ВАХ.

Рис. 8.3. Схема транзисторного еквівалента.

Різновидністю транзисторних еквівалентів $p-n-p-n$ -структури є схема,



наведена на рис. 8.4.

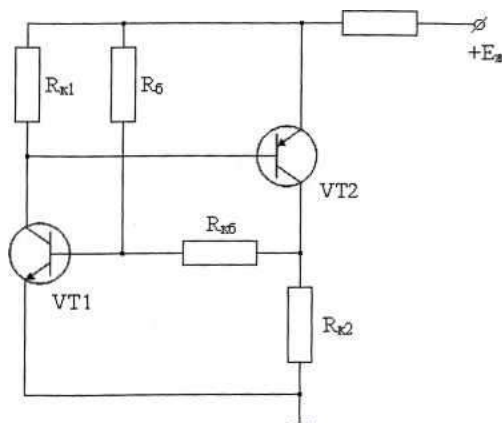


Рис. 8.4. Схема асиметричного транзисторного еквівалента $p-n-p-n$ -структури.

Це асиметричний еквівалент, у якому незалежно від розкиду напруг на переходах бази-емітер першим завжди вмикається транзистор VT1. У вихідному стані транзистори VT1 і VT2 закриті. Збільшення напруги живлення викликає збільшення сили струму в резистивному подільнику R_6 , $R_{к6}$, $R_{к2}$.

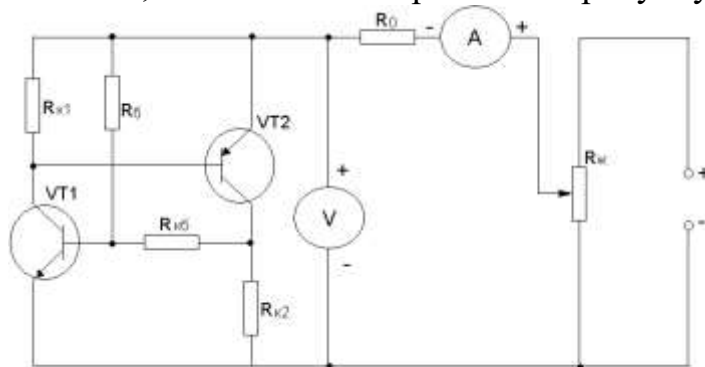
Коли спад напруги на резисторах $R_{к6}$ і $R_{к2}$ стане рівним напрузі на переході база-емітер U_{6e1} , транзистор VT1 відкривається і зростає сила струму $I_{к1}$ в колекторному колі транзистора VT1. Оскільки транзисторні еквіваленти $p-n-p-n$ -структури мають великий коефіцієнт підсилення за струмом, то транзистор VT1 може бути малопотужним з високоомним колекторним резистором, опір якого одного порядку з опором резистора R_6 , а транзистор VT2 - потужний з низькоомним колекторним резистором.

Після вмикання пристрою більша доля струму протікає через колекторне коло потужного транзистора. Введенням резистора $R_{к6}$ у коло додатного зворотного зв'язку і зміною величини його опорів здійснюється регулювання глибини додатного зворотного зв'язку за струмом, параметрів вмикання і вимикання і

вихідного диференціального опору. Збільшення напруги живлення переводить транзистори в режим насичення, і пристрій вимикається. У цьому пристрої вдається отримати від'ємний, нульовий і додатний диференціальний опір. При цьому параметри ВАХ змінюються в широких межах.

Хід роботи

1. Скласти електричне коло, схема якого зображена на рисунку.



2. Межі вимірювань струму амперметра встановити на 200 мА.
3. Зняти ВАХ, змінюючи напругу живлення резистором $R_{ж}$ через кожні 0,2 В.
4. Не допускати перевищення струму через резистор R_0 за 80 мА.
5. Змінити резистор навантаження R_0 і повторити виміри.
6. Отримані дані занести до таблиці.
7. За даними таблиці побудувати графік ВАХ приладу.

Контрольні запитання

1. Чому еквіваленти приладів з від'ємним диференціальним опором на транзисторних схемах є багатофункціональними?
2. Де в сучасній електроніці використовуються еквіваленти приладів з від'ємним диференціальним опором?
3. Охарактеризуйте основні електричні схеми еквівалентів приладів з від'ємним диференціальним опором.
4. Чим обумовлюється ділянка з від'ємним диференціальним опором?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

Датчики на основі ефекту Холла

Мета роботи: Вивчити фізичні основи роботи датчиків на основі ефекту Холла і засвоїти методику вимірювання їх параметрів.

Прилади і матеріали

1. Електромагніт.
2. Джерело постійного струму Б5-49.
3. Датчик Холла ДКХ-05.
4. Вольтметр.
5. Міліамперметр.

6. З'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості

Ефект Холла

Ефектом Холла називається виникнення у провіднику зі струмом густиною \vec{j} , поміщеному в магнітне поле напруженістю \vec{H} , електричного поля \vec{E}_H , перпендикулярного до векторів \vec{H} і \vec{j} . Напруженість такого електричного поля, визначається виразом:

$$E_H = R H j \sin \alpha, \quad (9.1)$$

де α - кут між векторами \vec{H} і \vec{j} ($\alpha < 180^\circ$). Коли $\vec{H} \perp \vec{j}$, то величина поля Холла E_H максимальна:

$$E_H = R H j$$

Величина R називається коефіцієнтом (сталю) Холла і є основною характеристикою ефекту Холла. Ефект відкритий Едвіном Гербертом Холлом в 1879 році в тонких пластинках золота. Для спостереження ефекту Холла вздовж прямокутних пластин (рис. 9.1.) з досліджуваних речовин, довжина яких l значно більша ширини b і товщини d , пропускається електричний струм:

$$I = j \cdot b \cdot d$$

Тут магнітне поле перпендикулярне площині пластинки. На середині бічних граней, перпендикулярно до струму, розташовані електроди, між якими вимірюється ЕРС Холла U_H :

$$U_H = E_H \cdot b = \frac{R H \cdot j}{d} \quad (9.2)$$

Оскільки ЕРС Холла змінює знак на протилежний при зміні напрямку магнітного поля, то ефект Холла відноситься до непарних гальваноманітних явищ.

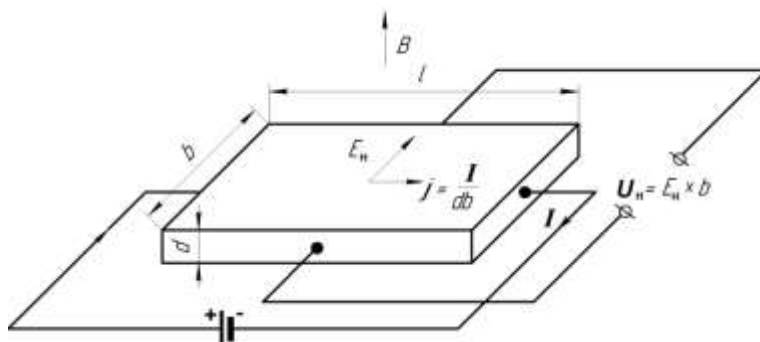


Рис. 9.1. Виникнення ефекту Холла.

Найпростіша теорія ефекту Холла пояснює появу ЕРС Холла взаємодією носіїв струму (електронів провідності і дірок) з магнітним полем. Під дією

електричного поля носії заряду набувають дрейфового руху, середня швидкість якого (дрейфова швидкість) $\vec{v}_{др} \neq 0$. Густина струму в провіднику

$$j = n e v_{др},$$

де n - концентрація носіїв заряду, e - їх заряд. При накладенні магнітного поля на носії заряду діє сила Лоренца:

$$\vec{F} = e [\vec{B} \times \vec{v}_{др}],$$

під дією якої частинки відхиляються в напрямку, перпендикулярному $\vec{v}_{др}$ і \vec{H} . У результаті на обох гранях провідника скінченних розмірів відбувається накопичення заряду і виникає електростатичне поле - поле Холла. У свою чергу поле Холла діє на заряди і врівноважує силу Лоренца. В умовах рівноваги

$$e E_H = e B v_{др},$$

$$E_H = \frac{1}{n e} B j,$$

звідси

$$R = \frac{1}{n e} \left(\frac{\text{см}^3}{\text{Кл}} \right).$$

Знак R збігається зі знаком носіїв струму. Для металів, у яких концентрація носіїв (електронів провідності) близька до концентрації атомів ($n \sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$), $R \sim 10^{-3} (\text{см}^3/\text{Кл})$, в напівпровідників концентрація носіїв значно менше і $R \sim 10^5 (\text{см}^3/\text{Кл})$. Коефіцієнт Холла R може бути виражений через рухливість носіїв заряду

$$\mu = \frac{e \tau}{m^*}$$

і питому електропровідність

$$\sigma = \frac{j}{E} = \frac{n e v_{др}}{E} :$$

$$R = \frac{\mu}{\sigma} \quad (9.3)$$

Тут m^* - ефективна маса носіїв, τ - середній час між двома послідовними зіткненнями з розсіювальними центрами.

Іноді при описі ефекту Холла вводять кут Холла φ між струмом j та напрямком поля E : $\text{tg} \varphi = E_H/E = \Omega \tau$, де Ω - циклотронна частота носіїв заряду. У слабких полях ($\Omega \tau \ll 1$) кут Холла $\varphi \approx \Omega \tau$ можна розглядати як кут, на який відхиляється рухомий заряд за час τ . Наведена теорія справедлива для ізотропного провідника (зокрема, для полікристала), у якого m^* і τ - сталі величини. Коефіцієнт Холла (для ізотропних напівпровідників) виражається через парціальні електропровідності σ_e і σ_d концентрації електронів n_e і дірок n_d :

$$R \approx \frac{1}{e} \frac{\left(\frac{\sigma_e^2}{n_e}\right) - \left(\frac{\sigma_d^2}{n_d}\right)}{(\sigma_e + \sigma_d)^2} \quad \text{- для слабких полів,}$$

$$R \approx \frac{1}{e} \frac{1}{(n_e + n_d)} \quad \text{- сильних полів.}$$

При $n_e = n_d = n$ в усьому інтервалі магнітних полів :

$$R \approx \frac{1}{en} \frac{\sigma_e - \sigma_d}{\sigma_e + \sigma_d},$$

а знак R вказує на переважаючий тип провідності.

Датчики магнітного поля, генератор Холла

Датчики магнітного поля забезпечують на виході електричну напругу (різницю потенціалів), пропорційну величині магнітної індукції. У вимірювальній практиці широко застосовується генератор Холла - вимірювальний прилад для визначення індукції магнітного поля. Його принцип дії заснований на вимірюванні ЕРС Холла U_H , пропорційної до індукції магнітного поля, при постійному керуючому струмі I_{st} .

За допомогою додаткового опору R_V встановлюється оптимальне значення керуючого струму, яке контролюється вольтметром через спад напруги на резисторі R_N . Цей же вольтметр перемикається для вимірювання ЕРС Холла. За наявності двох прямокутних, розташованих один навпроти одного, датчиків Холла можна визначити напрямок магнітного поля.

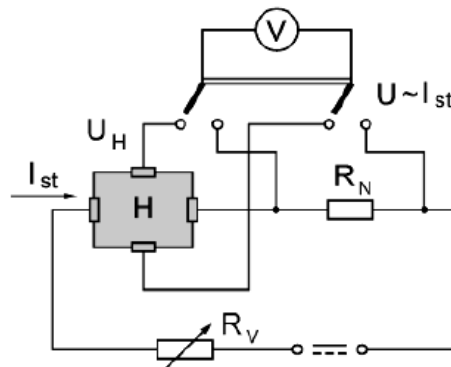


Рис 9.2. Генератор Холла.

Датчики струму на ефекті Холла (відкритого типу та компенсаційні) представляють найбільш цікаву групу поширених на сьогоднішній день пристроїв вимірювання струму. До їх головних переваг слід віднести відсутність вкладу в систему втрат потужності (і, як наслідок, виділення теплоти), хорошу електричну ізоляцію, широкий діапазон частот і можливість вимірювання постійних струмів. Недоліком цього виду датчиків є необхідність зовнішнього джерела живлення.

Датчики струму з логічним виходом дозволяють виявити перевищення струму в контрольованому провіднику вище певного значення і сформувати логічний сигнал. Основою цих приладів є інтегрований датчик Холла з логічним виходом. Значення порогу спрацьовування визначається моделлю датчика і може мати такі значення: 0,5, 3,5, 5,0, 7,0, 10,0 та 54,00 А. Поріг спрацьовування може бути встановлений менше номінального значення.

Датчики струму відкритого типу призначені для безконтактного вимірювання постійного, змінного та імпульсного струмів в діапазонах $\pm 57 \dots \pm 950$ А. Датчики струму відкритого типу побудовані на базі інтегрованих лінійних датчиків Холла, що володіють підвищеною температурною стабільністю та лінійністю характеристик. Так, датчики струму фірми Honeywell на основі лінійних датчиків Холла 91SS12-2 і SS94A1 мають аналоговий вихід, напруга на якому пропорційна величині струму, що протікає через контрольований провідник. Датчики на базі сенсора SS94A1 мають двухтактний вихідний каскад, побудований на парі з біполярних *p-n-p*- і *n-p-n*-транзисторів, а на базі 91SS12-2 - каскад на *p-n-p*-транзисторі з відкритим колектором.

Основні характеристики датчиків

Лінійні датчики

Повна шкала виходу відповідає діапазону вихідних напруг, у якому нелінійність не виходить із заданих меж.

Діапазон вимірюваної індукції визначається в гаусах або мілітеслах.

Чутливість визначається як крутизна нахилу характеристики перетворення в мВ/Гс або мВ/мТл.

Похибка лінійності характеристики перетворення - відхилення статичної характеристики перетворення датчика від ідеальної прямої лінії - вказується у відсотках від повної шкали.

Напруга нуля магнітного поля - значення вихідної напруги, що відповідає відсутності магнітного поля.

Температурний дрейф нуля - зміна напруги нуля, викликана зміною температури. Вимірюється у $\%/^{\circ}\text{C}$ від напруги нуля при 25°C .

Температурний дрейф чутливості - зміна чутливості, викликана зміною температури. Зазначається у $\%/^{\circ}\text{C}$ від напруги повної шкали при 25°C .

Час відгуку, визначається як час зміни вихідного сигналу від 10% до 90% сталого значення його збільшення при імпульсній зміні магнітного поля.

Логічні датчики

Індукція включення - значення індукції, при якій відбувається перехід вихідної напруги датчика від низького до високого рівня.

Індукція вимикання - значення індукції, при якій відбувається перехід вихідної напруги датчика від високого до низького рівня.

Гістерезис - різниця між індукцією ввімкнення і вимкнення.

Час перемикання - визначається як час зміни вихідного сигналу від 10% до 90% його сталого значення при стрибкоподібній зміні індукції.

Характеристики досліджуваного датчика Холла

Датчик Холла ДХК-0,5А призначений для вимірювання величини магнітної індукції на основі перетворення магнітної індукції в вихідну напругу. Датчик виконаний на основі планарної топологічної структури, сформованої на поверхні кремнієвого кристала. На рис. 9.3. показано розміщення виводів датчика: $-I_X$ і $+I_X$ - виводи для підключення джерела керуючого струму (струмові виводи); $-U_X$ і $+U_X$ - виводи вихідного сигналу (холлівські виводи).

Основні технічні характеристики:

- номінальний керуючий струм - 3 мА;

- напруга Холла при магнітній індукції 0,25 Тл і номінальному керуючому струмі - 70 мВ (чутливість $K=280$ мВ/Тл);
 - залишкова напруга при номінальному керуючому струмі - не більше 7 мВ (значення цього параметра залежить від умов вимірювань);
 - вхідний опір (між виводами I_x) - 1.8 ... 3 кОм;
 - вихідний опір (між виводами U_x) - не більше 3 кОм;
- Вихідна напруга в мВ:

$$U_{\text{вих}} = U_x - (-U_x) = K (I_x B) \cdot B,$$

де I_x - значення керуючого струму в мА, K - чутливість в мВ/Т (близько 280 мВ/Т), B - величина магнітної індукції в тесла.

На рис. 9.3. показана схема вмикання датчика ДХК-0,5А. Датчик є знаочутливим як до напрямку магнітної індукції, так і до полярності керуючого струму.

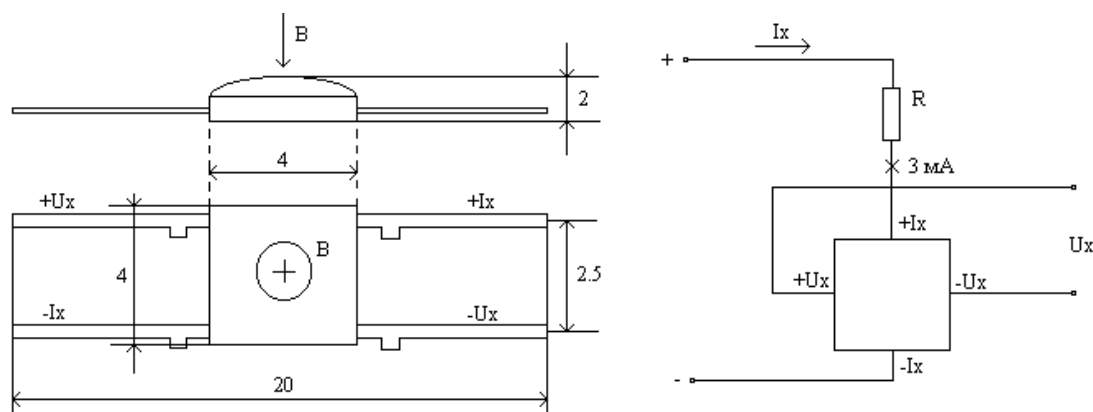


Рис. 9.3. Розміщення виводів датчика Холла ДХК-0,5А та схема його вмикання.

Порядок виконання роботи

1. Розмістити датчик Холла між полюсами електромагніта.
2. Підключити електромагніт до джерела живлення Б5-49.
3. Увімкнути живлення датчика Холла та встановити за допомогою змінного резистора і мультиметра робочий струм датчика величиною 5 мА.
4. До сигнальних виходів датчика під'єднати вольтметр.
5. Змінюючи стум джерела живлення, зняти залежність показів вольтметра від струму через котушки електромагніта.
6. Повторити вимірювання при струмі живлення датчика 1 мА, 1,5 мА, 2 мА, 2,5 мА, 3 мА.
7. За результатами вимірювань побудувати таблицю та графіки залежності напруги Холла від струму живлення електромагніта.
8. При сталому значенні струму живлення електромагніта зняти залежність напруги Холла від керуючого струму датчика. Повторити вимірювання, змінивши напругу живлення електромагніта.
9. Провести градування електромагніта, знаючи чутливість датчика та вважаючи, що залежність вихідної напруги від величини магнітного поля є прямою лінією.

10. Оцінити значення сталої Холла напівпровідникового матеріалу датчика, вважаючи, що товщина пластини 0,5 мм.

Контрольні запитання

1. У чому полягає ефект Холла?
2. Де використовується ефект Холла?
3. Перерахуйте основні типи датчиків Холла.
4. Для чого призначений датчик Холла ДХК-0,5А?
5. Перерахуйте основні параметри датчиків Холла.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10

Тунельний діод і резонансний генератор на його основі

Мета роботи: Вивчити принцип дії тунельного діода. Засвоїти методики вимірювання характеристик і параметрів тунельних діодів та резонансного генератора на його основі.

Прилади і матеріали

1. Панель з тунельним діодом та резонансним генератором.
2. Джерело живлення (1,5 В).
3. Мілівольтметр.
4. Вольтметр.
5. Мікроамперметр.
6. Частотомір.
7. Осцилограф.

Теоретичні відомості

Тунельні і обернені діоди: будова та принцип дії

Тунельним діодом називають напівпровідниковий діод на основі p^+-n^+ -переходу з сильнолегованими областями, на прямій ділянці ВАХ якого спостерігається N -подібна залежність струму від напруги. На рис. 10.1. наведена ВАХ тунельного діода при прямому ввімкненні.

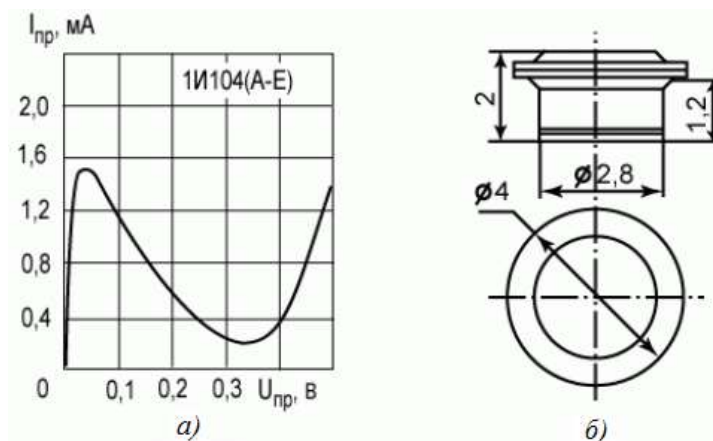


Рис. 10.1. Тунельний діод 1И104: а) вольт-амперна характеристика при прямому ввімкненні; б) геометричні параметри діода.

Проаналізуємо особливості ВАХ тунельного діода, для цього розглянемо $p^+ - n^+$ -перехід, утворений двома виродженими напівпровідниками. Якщо концентрація донорів і акцепторів в n^+ і p^+ напівпровідниках буде $N_A, N_D \sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$, то концентрація основних носіїв заряду буде набагато більшою від ефективної густини станів у дозволених зонах $p_{p0}, n_{n0} \gg N_C, N_V$. У цьому випадку рівень Фермі буде знаходитися в дозволених зонах p^+ і n^+ напівпровідників.

У напівпровіднику n^+ типу всі стани у зоні провідності до рівня Фермі зайняті електронами, а в напівпровіднику p^+ -типу - дірками. Зонна діаграма $p^+ - n^+$ переходу, утвореного двома виродженими напівпровідниками, наведена на рис. 10.2. Для прямого дифузійного струму має місце велика висота потенціального бар'єра. Щоб отримати типові значення прямого струму, потрібно прикласти велику пряму напругу (більшу або приблизно рівну половині ширини забороненої зони $E_g/2$). У виразі для зворотного дрейфового струму концентрація неосновних носіїв $p_{n0} = n_i^2 / N_D$ мала, і тому зворотний струм теж буде малий.

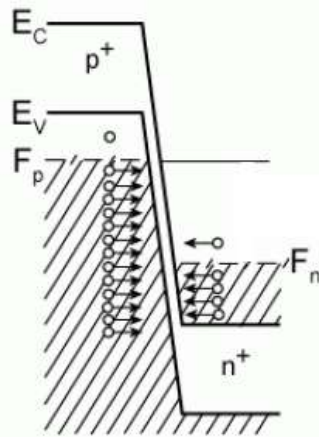


Рис. 10.2. Зонна діаграма $p^+ - n^+$ -переходу в рівновазі.

Розрахуємо, чому дорівнює геометрична ширина виродженого несиметричного $p - n$ -переходу. Будемо вважати, що p^+ - більш сильнолегована область, тоді ширина $p^+ - n^+$ -переходу буде мала:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 2\phi_0}{qN_D}} = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 E_g}{qN_D}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \cdot 10^{-12} \cdot 1}{1,6 \cdot 10^{-19}}} \approx 10^{-6} \text{ см} = 100 \text{ \AA}$$

Дебройлівську довжину хвилі електрона оцінимо з простих співвідношень:

$$E = kT = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}; \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad E = \frac{\hbar^2 (2\pi)^2}{2m\lambda^2}; \quad \lambda = \frac{2mkT}{\hbar^2} = \frac{1}{h} \sqrt{2mkT};$$

$$\lambda = \frac{\sqrt{2 \cdot 91 \cdot 10^{31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}}{6,3 \cdot 10^{-34}} \approx 140 \text{ \AA}$$

Таким чином, геометрична ширина $p^+ - n^+$ -переходу виявляється співрозмірна з Дебройлівською довжиною хвилі електрона. У цьому випадку в виродженому $p^+ - n^+$ -переході будуть проявлятися квантово-механічні ефекти, одним з яких є тунелювання через потенціальний бар'єр. При вузькому бар'єрі ймовірність

тунельного проходження через бар'єр відмінна від нуля. Розглянемо більш детально тунельні ефекти у вироджених $p^+ - n^+$ -переходах при різних напругах.

На рис. 10.3. показана зонна діаграма тунельного діода при зворотному зміщенні. При зворотній напрузі струм в діоді обумовлений тунельним переходом електронів з валентної зони на вільні місця в зоні провідності. Оскільки концентрація електронів і число місць великі, то тунельний струм різко зростає із зростанням зворотної напруги. Така поведінка ВАХ різко відрізняє тунельний діод від звичайного випрямного діода.

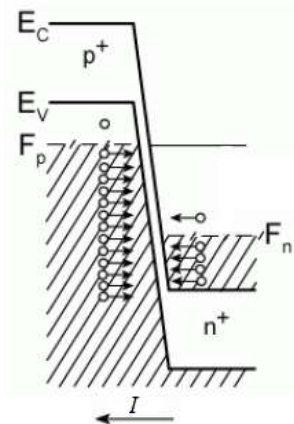


Рис. 10.3. Зонна діаграма тунельного діода при зворотному включенні.

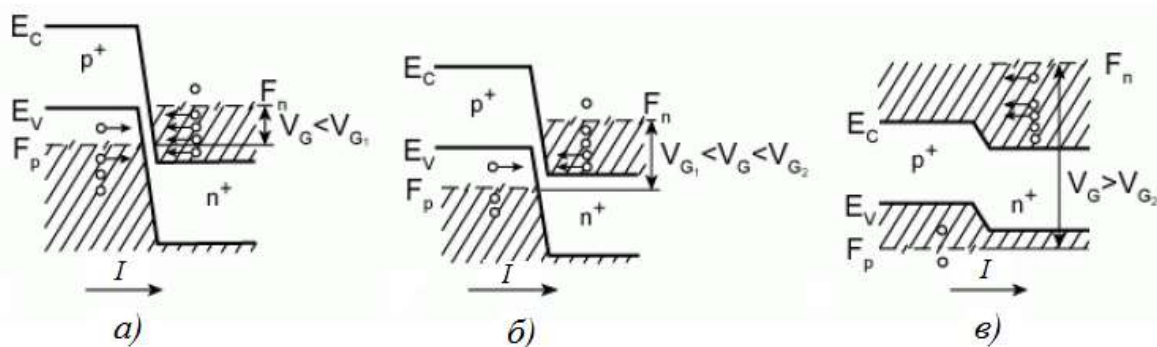


Рис. 10.4. Зонні діаграми тунельного діода при прямому зміщенні: а) ділянка 1, б) ділянка 2, в) ділянка 3.

При прямій напрузі струм в діоді обумовлений тунельним переходом електронів із зони провідності на вільні місця у валентній зоні. Оскільки тунельні переходи відбуваються без розсіювання, тобто зі збереженням енергії тунелюючої частинки, то на зонній діаграмі ці процеси будуть відображені прямими горизонтальними лініями.

На рис. 10.4 показані зонні діаграми тунельного діода при прямому зміщенні, що відповідають трьом точкам на прямій ділянці ВАХ.

На ділянці 1 при невеликій прямій напрузі навпроти електронів зони провідності починають з'являтися вільні місця у валентній зоні при тій же самій енергії. У міру зростання напруги число вільних місць зростає і, відповідно, струм зростає зі збільшенням напруги. Тунельний струм досягає максимуму, коли всі вільні місця у валентній зоні опиняються по енергії навпроти енергетичних рівнів, зайнятих електронами в зоні провідності (ділянка 2). Потім, у міру зростання прямої напруги, число цих вільних місць починає зменшуватися, оскільки по

енергії навпроти рівнів, зайнятих електронами в зоні провідності, виявляються стани в забороненій зоні (енергетичні рівні в ідеальних напівпровідниках в забороненій зоні відсутні). На ділянці 3 тунельний струм зменшується зі зростанням напруги і перетворюється в нуль, коли заборонена зона p^+ напівпровідника буде знаходитися по енергії напроти рівнів, зайнятих електронами в зоні провідності. При подальшому зростанні прямої напруги з'являється компонента звичайного дифузійного струму p - n -переходу.

Ділянка 3 на рис. 10.4 - це ділянка з від'ємним диференціальним опором. Розглянемо більш детально ВАХ тунельного діода. Для випадку прямого зміщення вона має наступний вигляд:

$$I = A' \frac{qV}{4kT} (\epsilon_1 + \epsilon_2 - qV)^2, \quad (10.3)$$

де ϵ_1 і ϵ_2 - відстань від енергії Фермі до дна зони провідності або вершини валентної зони.

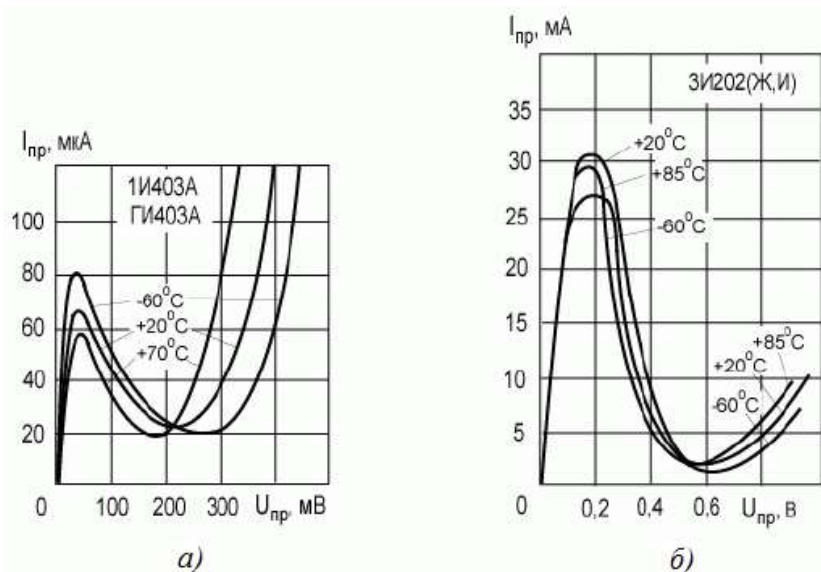


Рис. 10.5. Температурні залежності прямого струму від напруги в тунельних діодах: а) германієвий діод 1И403; б) арсенід галієвий діод 3И202.

Розрахунок ВАХ тунельного діода за рівнянням (10.3) добре узгоджується з експериментом. На рис. 10.5. наведені температурні залежності прямого струму від напруги в тунельних діодах, виготовлених з германію й арсеніду галію. Видно, що у діода з більш широкозонним матеріалом GaAs, ніж Ge, мінімум струму спостерігається при великих значеннях прямої напруги. Відзначимо, що тунельний діод має високі значення максимальної граничної частоти $f_{max} \sim 10^9$ Гц, оскільки тривалість процесів при тунелюванні складають наносекунди, тобто $\tau_{min} \sim 10^{-9}$ с. З цієї причини тунельні діоди використовуються в НВЧ-техніці.

Розглянемо ВАХ p - n -переходу в особливому випадку, коли енергія Фермі в електронному й дірковому напівпровідниках збігається або знаходиться на відстані $+kT/q$ від дна зони провідності або стелі валентної зони. У цьому випадку ВАХ діода при зворотному зміщенні буде точно така ж, як і у тунельного діода, тобто при зростанні зворотної напруги буде швидке зростання зворотного струму.

При прямому зміщенні тунельна компонента ВАХ буде повністю відсутня у зв'язку з тим, що немає повністю заповнених станів у зоні провідності. Тому при прямому зміщенні в таких діодах до напруг, більших або рівних половині ширини

забороненої зони, струм буде відсутній. З точки зору випрямного діода ВАХ такого діода буде інверсною, тобто буде висока провідність при зворотному зміщенні і мала при прямому. Такі тунельні діоди отримали назву обернених діодів. ВАХ оберненого діода зображена на рис. 10.6. Таким чином, обернений діод - це тунельний діод без ділянки з негативним диференціальним опором. Висока нелінійність ВАХ при малих напругах поблизу нуля (порядку мікрвольт) дозволяє використовувати цей діод для детектування слабких сигналів у НВЧ-діапазоні.

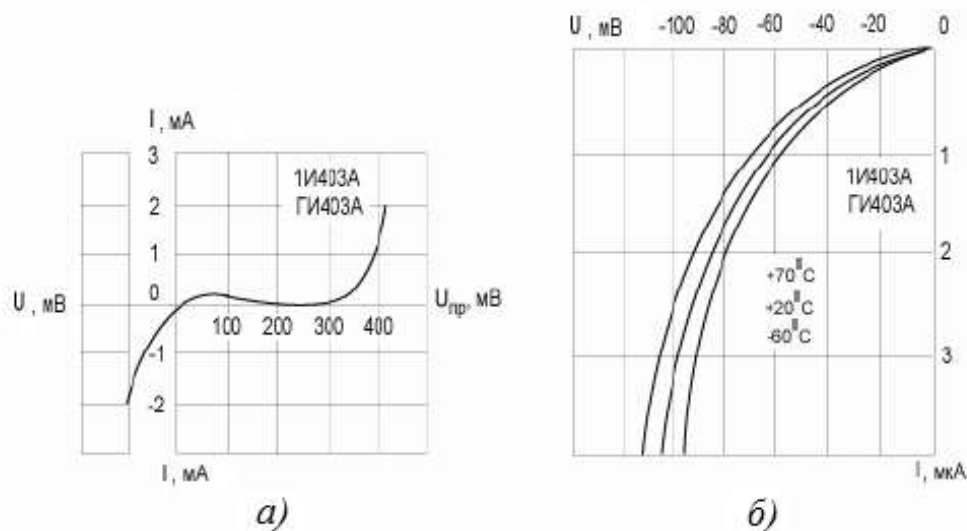


Рис. 10.6. Вольт-амперна характеристика германієвого оберненого діода ГИ403: а) повна ВАХ; б) зворотна ділянка ВАХ при різних температурах.

Порядок виконання роботи

1. Вимірювання прямої вітки ВАХ тунельного діода.

1.1 Перемикачем S перевести макет в режим вимірювання ВАХ.

1.2 Підключити вимірювальні прилади по схемі, зображеній на рис 10.7, амперметр ввімкнути в режим вимірювання постійного струму з номіналом 20 мА, вольтметр – в режим вимірювання постійної напруги з номіналом 1 В.

1.3. Ввімкнути живлення діода.

1.4. Плавно змінюючи опір змінного резистора R_2 , вимірювати напругу на тунельному діоді через 30–40 мВ і реєструвати покази амперметра в таблиці.

U , мВ	0	30	60	90	120	150
I , мА							

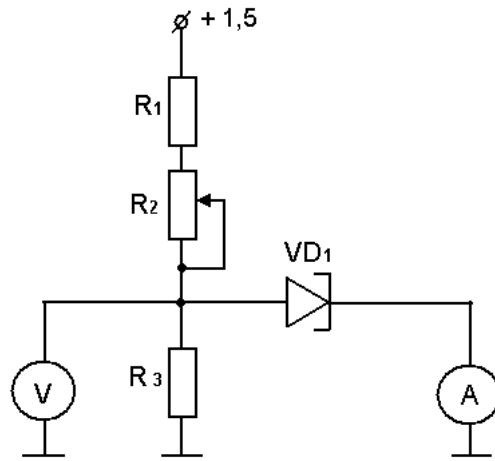


Рис.10.7. Схема для дослідження ВАХ тунельного діода.

1.5. Побудувати графік прямої вітки ВАХ тунельного діода.

1.6. Оцінити величину від'ємного диференціального опору на ділянці спаду прямої вітки ВАХ.

1.7. Зареєструвати напругу зміщення і струм діода в точці максимуму і мінімуму прямої вітки ВАХ.

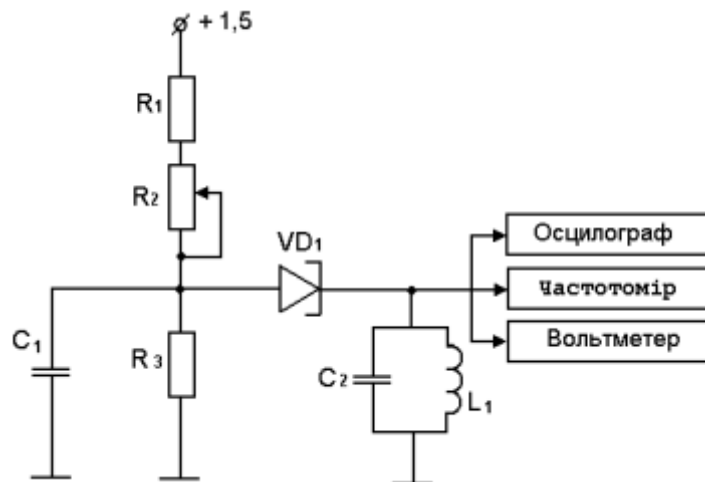


Рис.10.8. Схема вимірювання характеристик генератора на тунельному діоді.

2. Дослідження резонансного генератора на тунельному діоді.

2.1. Перемикачем S перевести макет в режим вимірювання характеристик генератора на тунельному діоді.

2.2 Підключити вимірювальні прилади по схемі на рис. 10.8.

2.3. Ввімкнути живлення діода.

2.4. Плавно збільшуючи напругу на діоді за допомогою змінного резистора R_2 , отримати на екрані осцилографа періодичні коливання.

2.5. Форму коливань перемалювати у зошит.

2.6. Плавно збільшуючи напругу зміщення, зняти покази вольтметра змінного струму, частотоміра та вольтметра постійного струму.

2.7. Дані вимірювань занести в таблицю.

U_D , мВ				
$U_{вих}$, мВ				
$F_{вих}$, кГц				

2.8 Напругу зміщення збільшувати до зникнення коливань.

2.9. Побудувати графіки залежності амплітуди та частоти коливань від напруги зміщення на тунельному діоді.

Контрольні запитання

1. У чому полягає відмінність тунельного діода від звичайного?
2. У чому полягають особливості ВАХ тунельного діода?
3. Покажіть на ВАХ тунельного діода ділянку з від'ємним диференціальним опором.
4. Чому при прямому зміщенні ВАХ тунельного діода є N -подібною.
5. Де використовуються тунельні діоди?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 11

Амплітудно-частотні характеристики електричних фільтрів

Мета роботи: Вивчення найпростіших електричних фільтрів та зняти АЧХ фільтрів.

Прилади і матеріали

1. Панель з набором радіоелементів.
2. Генератор сигналів низькочастотний ГЗ-118.
3. Вольтметр В7-35.
4. З'єднувальні проводи.

Теоретичні відомості

1. Загальні відомості про фільтри

Електричний фільтр - це частотно-вибірковий пристрій, який пропускає сигнали певних частот і затримує або послаблює сигнали інших частот. Електричні фільтри класифікують за такими ознаками:

- по амплітудно-частотній характеристиці (АЧХ) вони поділяються на фільтри нижніх частот (ФНЧ); фільтри верхніх частот (ФВЧ); смугові фільтри (СФ); режекторні (загороджувальні) фільтри (РЖ); резонансні фільтри (РЗ). В окрему групу можна виділити фазові фільтри (ФФ);

- в залежності від поліномів, які використовуються при апроксимації функції передачі, розрізняють фільтри критичного затухання, Бесселя, Баттерворта, Чебишева;

- по елементній базі вони поділяються на пасивні і активні. Активні фільтри містять в RLC схемі активні елементи, в якості яких використовуються операційні підсилювачі.

Основні характеристики і параметри фільтрів. До характеристик фільтрів відносяться функція передачі, коефіцієнт передачі, амплітудно-частотна характеристика (АЧХ), фазо-частотна характеристика (ФЧХ), частота зрізу $\omega_{зр}$ ($f_{зр}$), стала часу τ , смуга пропускання (загородження) $\Delta\omega$ (Δf), резонансна частота, добротність.

Основною характеристикою фільтра є комплексний коефіцієнт передачі напруги:

$$K = \frac{U_2}{U_1}, \quad (11.1)$$

де U_2 , U_1 - комплексні значення напруги на виході та вході фільтра. Записавши формулу (1) в показниковій формі, отримаємо:

$$\dot{K} = |\dot{K}| \cdot e^{j\phi} = K \cdot e^{j\phi},$$

де K - модуль коефіцієнта передачі, показує, в скільки разів вихідна напруга відрізняється від вхідної, а ϕ - його аргумент, показує фазовий зсув вихідної напруги відносно вхідної.

Функція передачі - це відношення величини вихідної напруги до величини вхідної напруги фільтра

$$K(p) = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}. \quad (11.2)$$

В загальному випадку електричний фільтр можна розглядати як чотириполюсник з функцією передачі

$$K(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{a_m p^m + a_{m-1} p^{m-1} + \dots + a_1 p + a_0}{b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_1 p + b_0}, \quad (11.3)$$

де $U_1(p)$ і $U_2(p)$ - вхідна і вихідна напруги чотириполюсника в операторній формі; a і b - дійсні сталі величини; $m, n = 1, 2, 3, \dots$; n - визначає порядок фільтра.

Для сталої частоти $p = j\omega$, функцію передачі можна звести до виразу

$$K(p) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} = \frac{a_m(j\omega)^m + a_{m-1}(j\omega)^{m-1} + \dots + a_1(j\omega) + a_0}{b_n(j\omega)^n + b_{n-1}(j\omega)^{n-1} + \dots + b_1(j\omega) + b_0} = \dot{z}$$

$$= A(\omega) + jB(\omega). \quad (11.4)$$

Залежність модуля коефіцієнта передачі (або функції передачі) від частоти (11.4) називається *амплітудно-частотною характеристикою*

$$|K(j\omega)| = \sqrt{A^2(\omega) + B^2(\omega)}.$$

Фазо-частотна характеристика також може бути знайдена з (11.4) і представлена у вигляді

$$\varphi(\omega) = \text{arctg} \frac{B(\omega)}{A(\omega)}.$$

Діапазон $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ або смуги частот, в яких проходять сигнали, називаються *смугами пропускання*. У смузі пропускання значення коефіцієнта передачі фільтра

відносно велике і в ідеальному випадку залишається сталим. Для смугового фільтра частоти ω_1 та ω_2 визначаються при спаді коефіцієнта передачі на 3 дБ (або по абсолютній величині $1/\sqrt{2}$ в разі).

Діапазон частот $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$, при яких сигнали послаблюються, утворюють загороджувальну смугу. У ній коефіцієнт передачі фільтра відносно малий і в ідеальному випадку дорівнює нулю. Для загороджувального фільтра частоти ω_1 та ω_2 визначаються при спаді коефіцієнта передачі на 3 дБ (або по абсолютній величині в $1/\sqrt{2}$ разів).

Частота зрізу $\omega_{зр}$ ($f_{зр}$) - частота, на якій спостерігається спад коефіцієнта передачі на 3 дБ у порівнянні з коефіцієнтом передачі на нульовій (для ФНЧ) або нескінченній (для ФВЧ) частоті.

Резонансна частота f_p - частота, на якій коефіцієнт передачі фільтра має максимальне значення (для смугового фільтра) або мінімальне значення (для загороджувального фільтра).

Добротність Q - добротність смугового фільтра визначається як відношення резонансної частоти до смуги пропускання.

$$Q = \frac{f_{рез}}{\omega_2 - \omega_1}$$

2. Фільтри нижніх частот

2.1. Пасивні фільтри нижніх частот (ФНЧ) першого порядку

Електричний фільтр нижніх частот без змін передає сигнали нижніх частот, а на високих частотах забезпечує загасання сигналів відносно вхідних сигналів.

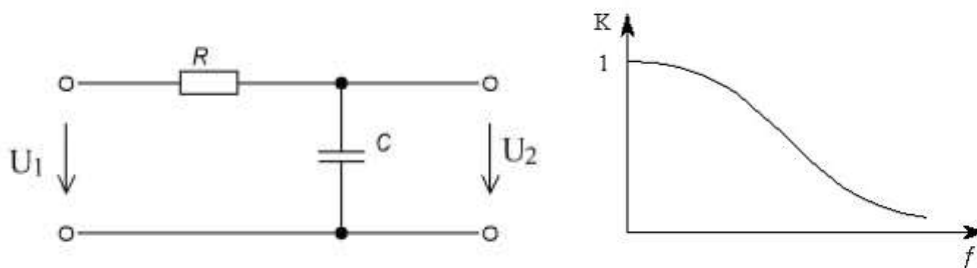


Рис. 11.1. RC-фільтр нижніх частот

На рис. 11.1. зображена схема найпростішого RC-фільтра нижніх частот першого порядку та його АЧХ. Комплексне значення вихідної напруги:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}}$$

Відповідно, коефіцієнт передачі в комплексному вигляді може бути виражений формулою:

$$K = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

звідси отримаємо формули для АЧХ:

$$K = |K| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}, \quad (5)$$

Вважаючи, що $K = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_{зр} RC)^2}}$, отримаємо вираз для частоти зрізу $\omega_{зр}$:

$$\omega_{зр} = \frac{1}{RC}; \quad f_{зр} = \frac{1}{2\pi RC}$$

$K = 1 = 0$ дБ (рис.1.) на нижніх частотах $f \ll f_{зр}$. На високих частотах $f \gg f_{зр}$, згідно з формулою (11.5) $K \approx 1/(\omega RC)$, тобто коефіцієнт передачі обернено пропорційний частоті. При збільшенні частоти в 10 разів коефіцієнт підсилення зменшується в 10 разів, тобто він зменшується на 20 дБ на декаду або на 6 дБ на октаву.

$$K = \frac{1}{\sqrt{2}} = -3 \text{ дБ} \quad \text{при } f = f_{зр}.$$

2.2. Пасивні фільтри верхніх частот (ФВЧ) першого порядку

Схема найпростішого пасивного ФВЧ першого порядку наведена на рис. 2. ФВЧ передає без зміни сигнали високих частот, а на низьких частотах забезпечує загасання сигналів і випередження їх по фазі відносно вхідних сигналів.

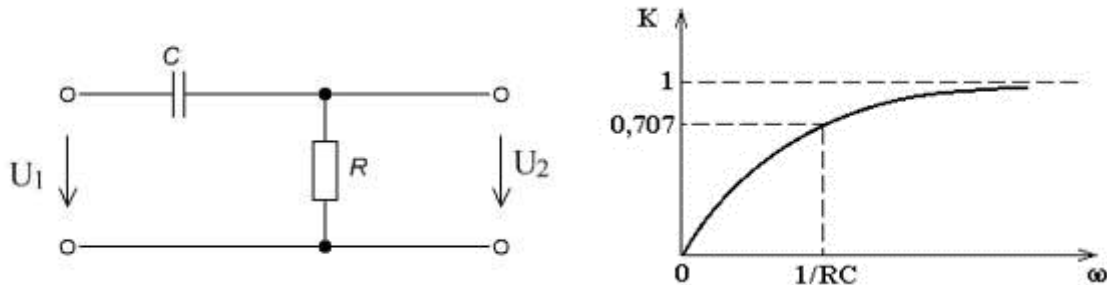


Рис. 11.2. RC-фільтр верхніх частот

Комплексне значення вихідної напруги:

$$U_2 = U_1 \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}}$$

Відповідно, коефіцієнт передачі в комплексному вигляді виражається формулою:

$$K = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$$

Звідси знаходимо вирази для АЧХ, ФЧХ і частоти зрізу

$$K=|K|=\frac{\omega RC}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}}=\frac{1}{\sqrt{1+\frac{1}{(\omega RC)^2}}}, \quad (11.6)$$

$$\phi = \arctg \frac{1}{\omega RC}; \quad \omega_{зр} = \frac{1}{RC}.$$

З формули (11.6) можна зробити висновки, що при $\omega \rightarrow 0$, $K \rightarrow 0$, та $\omega \rightarrow \infty$, $K \rightarrow 1$ (рис.2.). При $f=f_{зр}$, як і для фільтра нижніх частот,

$$K = \frac{1}{\sqrt{2}} = -3 \text{ Дб}$$

При послідовному з'єднанні декількох ФВЧ результуюча частота зрізу

$$\omega_{зр} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \omega_{зр_i}^2}$$

Якщо всі фільтри мають рівні частоти зрізу, то

$$\omega_{зр} = \omega_{зр_i} \sqrt{n}$$

2.3. Пасивний смуговий RC-фільтр.

Шляхом послідовного з'єднання ФВЧ і ФНЧ отримують смуговий (вибірковий) RC-фільтр (рис. 11.3.). Його вихідна напруга близька до нуля на високих та низьких частотах.

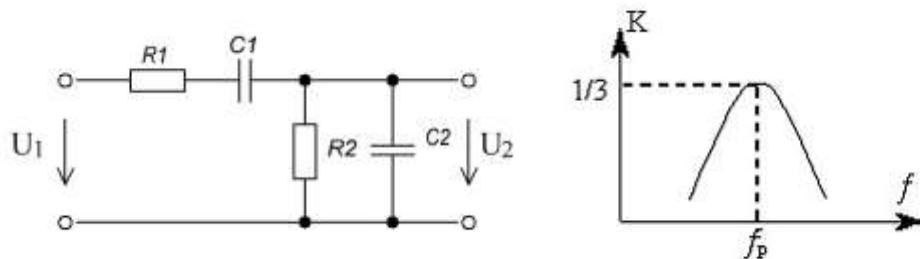


Рис. 11.3. Пасивний смуговий RC-фільтр та його АЧХ

Вважаючи, що $R_1=R_2=R$, та $C_1=C_2=C$, то вихідна напруга смугового RC-фільтра

$$U_2 = U_1 \frac{j\omega RC}{(1+j\omega RC)^2 + j\omega RCR}$$

Коефіцієнт передачі в комплексному вигляді виражається формулою:

$$K = \frac{U_2}{U_1} = \frac{j\omega RC}{1+3j\omega RC+\omega^2 R^2 C^2}$$

Звідси знаходимо вирази для АЧХ, ФЧХ

$$K=|K|=\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\omega RC}-\omega RC\right)^2+9}}; \quad \phi = \arctg \frac{1-\omega^2 R^2 C^2}{3\omega RC}$$

Вихідна напруга максимальна при $\omega RC=1$, відповідно, резонансна частота

$$f_p = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Фазовий зсув на резонансній частоті дорівнює 0. Коефіцієнт підсилення $K_p=1/3$ (рис. 11.3.).

2.4. Смуговий (двоконтурний вибірковий) LC-фільтр. Якщо в схемі рис. 11.3 замінити опір на індуктивність, то отримаємо схему пасивного смугового LC-фільтра (рис. 11.4).

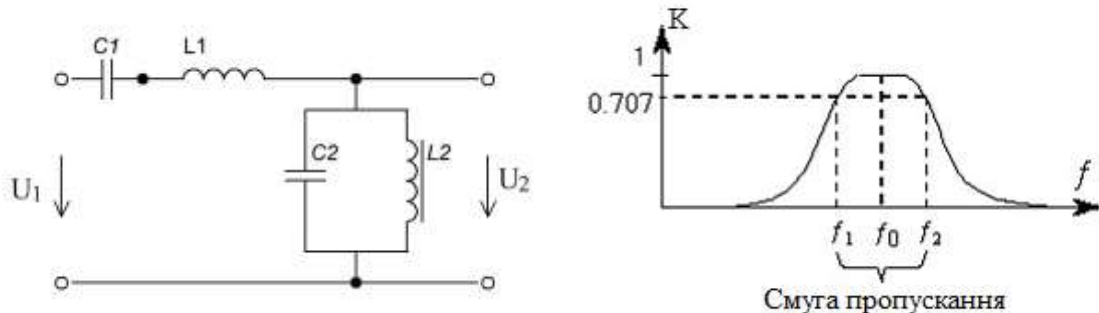


Рис. 11.4. Схема пасивного смугового LC-фільтра (а) та його АЧХ (б)

При співпаданні частот, на яких спостерігається резонанс напруг в послідовному контурі L_1C_1 та резонанс струмів в паралельному коливальному контурі L_2C_2 , опір поздовжнього плеча L_1C_1 виявиться мінімальним, а поперечного L_2C_2 - максимальним. Коефіцієнт передачі фільтра за таких умов приймає найбільше значення. При відхиленні частоти вхідних коливань від резонансної частоти f_0 коефіцієнт передачі фільтра зменшується.

2.5. Пасивний фільтр нижніх частот другого порядку

На основі виразу (4) запишемо в загальному вигляді функцію передачі ФНЧ другого порядку

$$K(p) = \frac{K_0}{(1+a_1 p + b_1 p^2)}. \quad (11.7)$$

Дана функція передачі не може бути реалізована за допомогою пасивних RC-кіл. Подібний фільтр може бути реалізований із застосуванням індуктивності. На рис. 11.5 показана схема пасивного ФНЧ другого порядку.

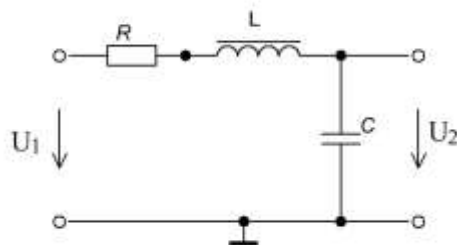


Рис. 11.5. Пасивний ФНЧ другого порядку

Функція передачі фільтра має вигляд

$$K(p) = \frac{1}{(1 + \omega_{зр} RCp + \omega_{зр}^2 LCp^2)}.$$

Розрахувати фільтр можна, скориставшись формулами

$$R = \frac{a_1}{(\omega_{\text{ф}} C)} ; \quad L = \frac{b_1}{(\omega_{\text{ф}}^2 C)} .$$

Наприклад, для ФНЧ другого порядку типу Баттерворта з коефіцієнтами $a_1=1,414$ і $b_1=1,000$, задавши частоту зрізу $f_{\text{зр}}=10$ Гц і ємність $C=10$ мкФ, з останніх отримаємо $R=2,25$ кОм і $L=25,3$ Гн.

Подібні фільтри незручні для реалізації через занадто велику індуктивність. Задану функцію передачі можна реалізувати за допомогою операційного підсилювача з відповідними RC-колами, що дозволяє не використовувати індуктивність.

2.6. Загороджувальні смугові фільтри. АЧХ загороджувального фільтра можна отримати з частотної характеристики ФНЧ (11.7) шляхом заміни змінної P виразом $\Delta\Omega/(P+1/P)$. Тут $\Delta\Omega=1/Q$ - нормована смуга частот. $Q=f_p/(f_{\text{max}}-f_{\text{min}})=f_p/\Delta f$, де Δf - смуга частот, на краях якої коефіцієнт передачі зменшується на 3 дБ (Q - добротність заглушення сигналу).

Так, як і у випадку смугових фільтрів, при перетворенні порядок фільтра подвоюється. Так при перетворенні функції передачі ФНЧ першого порядку отримаємо загороджувальний фільтр другого порядку з функцією передачі.

$$K(p) = \frac{K_0(1+p^2)}{1+\Delta\Omega p+p^2} = \frac{K_0(1+p^2)}{1+\left(\frac{1}{Q}\right)p+p^2} .$$

Звідси отримаємо вирази для АЧХ та ФЧХ фільтра

$$|K| = \frac{K_0|1-\Omega^2|}{\sqrt{1+\Omega^2}} = \frac{K_0(1+p^2)}{1+\left(\frac{1}{Q}\right)p+p^2} ; \quad \varphi = \text{arctg} \frac{\Omega}{\Omega(\Omega^2-1)} .$$

2.7. Пасивний загороджувальний RLC-фільтр

Приклад пасивного загороджувального фільтра наведено на рис. 11.6. Функція передачі такого фільтра має вигляд

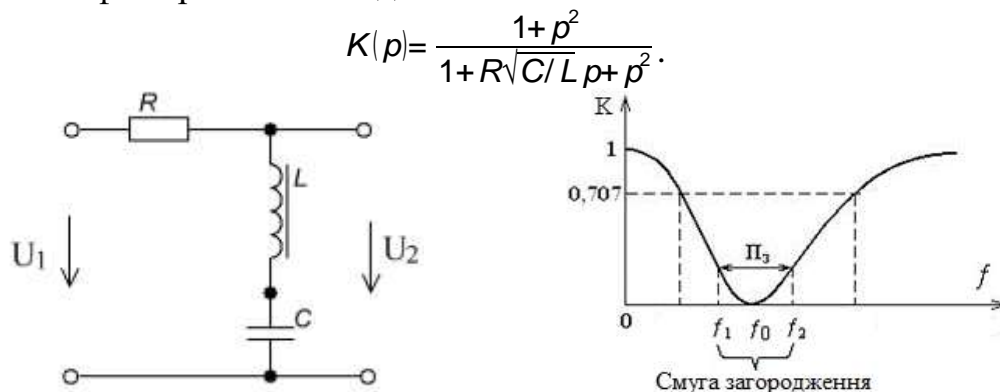


Рис. 11.6. Схема загороджувального RLC-фільтра

Резонансна частота і добротність затухання знаходяться як

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} ; \quad Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} .$$

Прикладами пасивних загороджувальних фільтрів є також місток Віна-Робінсона (рис. 11.7) та подвійний Т-подібний місток (рис. 11.8).

2.8. Місток Віна-Робінсона

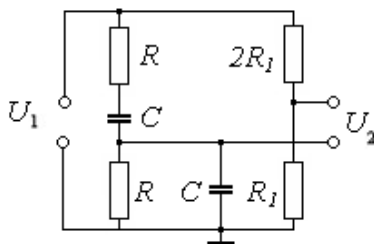


Рис. 11.7. Схема фільтра Місток Віна-Робінсона

Омічний подільник напруги забезпечує частотно-незалежну напругу, рівну $1/3U_{ex}$.

При цьому на резонансній частоті вихідна напруга рівна 0. На відміну від смугового фільтра АЧХ на резонансній частоті має мінімум. Схема може бути використана для приглушення сигналів в певній частотній області.

Коефіцієнт передачі

$$|K| = \frac{1 - \Omega^2}{3\sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + 9\Omega^2}};$$

Фазовий зсув

$$\varphi = \arctg \frac{3\Omega}{\Omega^2 - 1}; \Omega \neq 1.$$

2.9. Подвійний Т-подібний фільтр (загороджувальний RC-фільтр).

Подвійний Т-подібний фільтр має частотну характеристику, ідентичну характеристикі містка Віна-Робінсона.

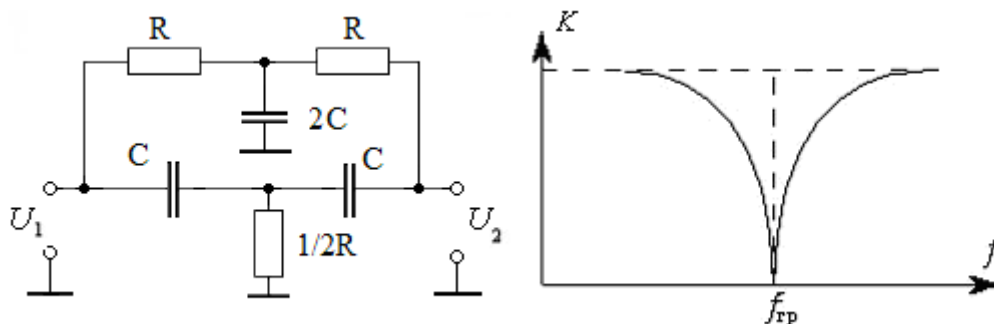


Рис. 11.8. Подвійний Т-подібний фільтр (а) і його АЧХ (б).

На відміну від містка Віна-Робінсона, вихідна напруга знімається відносно спільної точки.

Для високих та низьких частот $U_{вих} = U_{ex}$.

Сигнали високих частот будуть повністю передаватися через два конденсатора С, а низьких - через резистори R.

Коефіцієнт передачі і фазовий зсув:

$$|K| = \frac{1 - \Omega^2}{\sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + 16\Omega^2}}, \quad \phi = \arctg \frac{4\Omega}{\Omega^2 - 1}$$

Добротність даних фільтрів мала. Вона може бути підвищена, якщо включити фільтр в коло зворотного зв'язку операційного підсилювача.

3. Порядок виконання роботи.

1. Ознайомитись з обладнанням до лабораторної роботи.
2. Скласти схему (рис. 11.9.) та дослідити паралельний контур як вибірковий фільтр. Результати дослідження записати в табл.1.
3. Скласти схему (рис. 11.10.) та дослідити пасивний загороджувальний *RLC*-фільтр. Результати дослідження записати в табл.2.

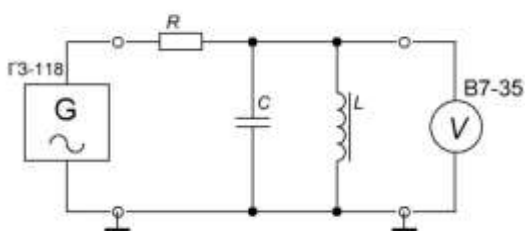


Рис. 11.9.

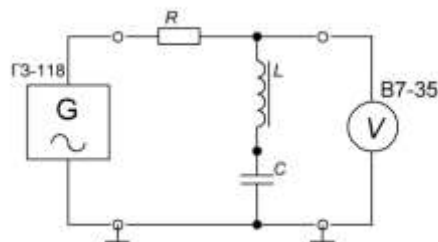


Рис. 11.10.

4. Скласти схему (рис. 11.11.) та дослідити пасивний фільтр нижніх частот другого порядку. Результати дослідження записати в табл. 11.3
5. Скласти схему (рис. 11.12.) та дослідити пасивний фільтр верхніх частот другого порядку. Результати дослідження записати в табл. 11.4.
6. На основі проведених досліджень побудувати АЧХ фільтр. Визначити резонансну частоту. Визначити модуль коефіцієнта передачі.

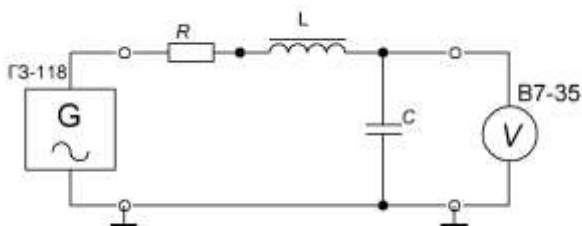


Рис. 11.11.

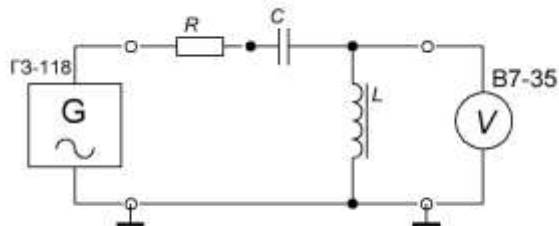


Рис. 11.12.

Контрольні запитання

1. Що називають електричним фільтром?
2. Як класифікують електричні фільтри?
3. Основні характеристики та параметри електричних фільтрів.
4. Яка різниця між електричними фільтрами першого та вищих порядків?
5. Які ви знаєте фільтри нижніх частот?
6. Які ви знаєте фільтри верхніх частот?
7. Загороджувальні та смугові фільтри.

№	f, Гц	U ₂ , мВ
1	100	
2	300	
3	500	
4	700	
5	800	
6	900	
7	950	
8	1000	
9	1020	
10	1040	
11	1060	
12	1080	
13	1100	
14	1130	
15	1160	
16	1200	
17	1250	
18	1300	
19	1350	
20	1400	
21	1600	
22	1800	
23	2000	
24	2200	
25	2500	
26	3000	
27	3500	

№	f, Гц	U ₂ , мВ
1	100	
2	200	
3	300	
4	400	
5	500	
6	600	
7	700	
8	800	
9	900	
10	1000	
11	1060	
12	1100	
13	1160	
14	1200	
15	1260	
16	1300	
17	1400	
18	1500	
19	1600	
20	1700	
21	1800	
22	1900	
23	2000	
24	2200	
25	2500	
26	3000	
27	3500	

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 12

Вивчення інтегрального операційного підсилювача в різних режимах роботи

Мета роботи: Складання та вивчення пристроїв із використанням інтегрального операційного підсилювача.

Прилади і матеріали

1. Панель для складання та дослідження пристроїв:
 - а) інвертуючого підсилювача змінної напруги;
 - б) неінвертуючого підсилювача змінної напруги;
 - в) інтегруючого пристрою;
 - г) диференціатора.
2. Біполярне джерело живлення.
3. Осцилограф.
4. Прилад Х1-46.
5. Електронний вольтметр.
6. Генератор звукової частоти.
7. З'єднувальні проводи.

Теоретичні відомості

Операційні підсилювачі

Операційними називають підсилювачі, здатні виконувати різноманітні математичні операції над аналоговими сигналами. Умовне позначення операційного підсилювача (скорочено ОП) і призначення його основних виводів подано на рис.12.1. Вхід 1 називають неінвертуючим. Зміна вихідного сигналу синфазна зі зміною сигналу на цьому вході. Вхід 2 називають інвертуючим. Зміна вихідного сигналу відбувається з відставанням на фазовий кут π відносно сигналу на цьому вході.

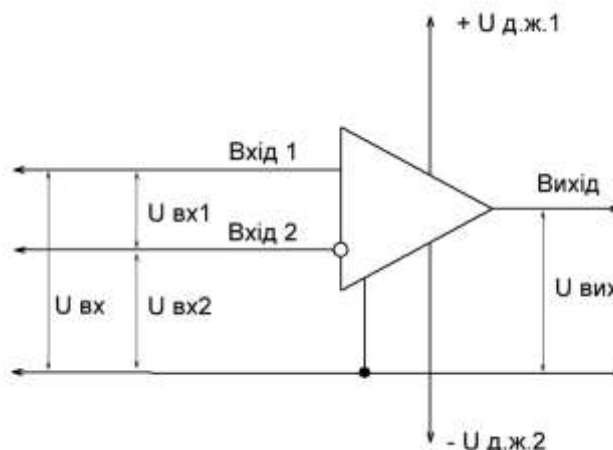


Рис. 12.1. Умовне позначення ОП.

ОП живиться від двох різнополярних джерел напруги, що дає можливість одержати нульовий рівень вихідної напруги при відсутності вхідного сигналу.

Розрізняють синфазні вхідні сигнали $U_{вх1}$ та $U_{вх2}$, які діють, відповідно, між неінвертуючим та інвертуючим входами і спільною шиною, та диференціальний вхідний сигнал $U_{вх}$, який діє між цими входами. Зрозуміло, що:

$$U_{вх} = U_{вх1} - U_{вх2}$$

Вводять поняття коефіцієнта підсилення ОП (за напругою), який покладають рівним відношенню зміни вихідної напруги до зміни диференціальної напруги на вході:

$$K = \frac{\Delta U_{вх}}{\Delta U_{вх}}$$

Ідеальний ОП реагує тільки на диференціальний вхідний сигнал і зовсім не збудливий до зміни на одну і ту ж величину синфазних сигналів.

При нульовому значенні вхідного (диференціального) сигналу вихідна напруга реального ОП може бути відмінна від нуля. У цьому випадку на вхід ОП подають невелику, комплектуючу напругу відповідної полярності, яку називають напругою зміщення ($U_{зм}$).

Важливим параметром ОП є максимальна вихідна напруга, яку може розвинути підсилювач при заданому опорі навантаження, який подається в паспорті ОП. Принципову електричну схему одного з найпростіших ОП (К140УД1) подано на рисунку 2.

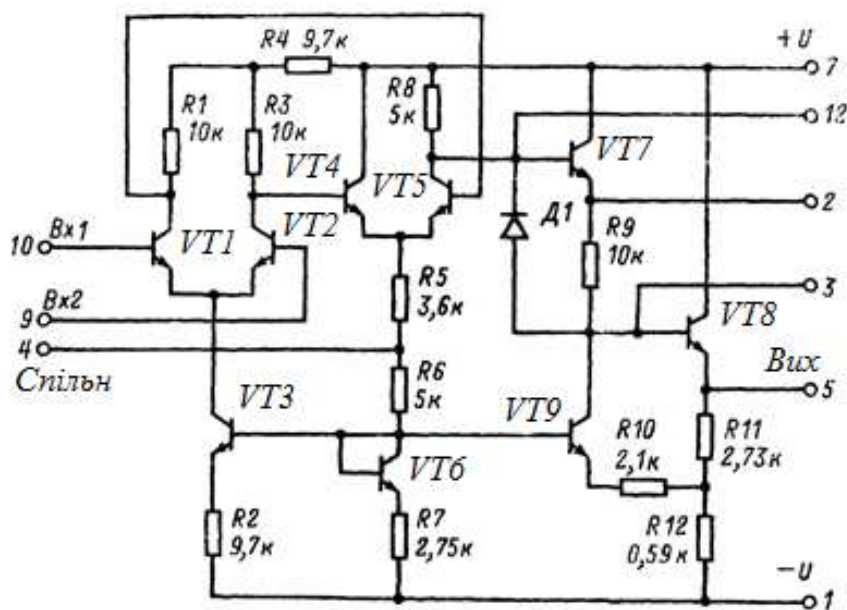


Рис. 12.2. Схема ОП

Його перший диференціальний каскад працює на транзисторах VT1 і VT2. Емітерні струми цих транзисторів стабілізуються генератором струму, який зібрано на транзисторах VT3, VT6.

Підсилений першим каскадом сигнал поступає на вхід другого диференціального каскаду, який працює на транзисторах VT4 і VT5. З колектора VT5 сигнал поступає на вхід третього каскаду, який працює на транзисторі VT8 і

зібраний за схемою емітерного повторювача. Вихідний каскад ОП К140УД1 працює на транзисторі VT7 і також зібраний за схемою емітерного повторювача. До виводів 2, 3, 12 підключаються зовнішні елементи корекції у вигляді резисторів і конденсаторів.

У структурі розглянутого ОП можна виділити три основні частини: диференціальні каскади підсилення напруги, каскад зсуву рівня напруги і вихідний каскад підсилення потужності. Таку ж структуру мають всі інші ОП загального застосування, які випускаються промисловістю. Існують тільки схемотехнічні відмінності названих складових частин.

Розглянемо окремі пристрої, у яких використовуються ОП. При аналізі їх роботи ОП будемо вважати ідеальним (нескінченно великий коефіцієнт підсилення, нескінченно великий вхідний опір, рівний нулю вихідний опір і рівна нулю напруга зміщення).

Інвертуючий підсилювач.

Схему такого підсилювача подано на рис. 12.3. Для нього справедливі співвідношення:

$$I_1 = \frac{U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх}}}{R_1} \quad (12.1)$$

$$I_2 = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{вих}}}{R_2} \quad (12.2)$$

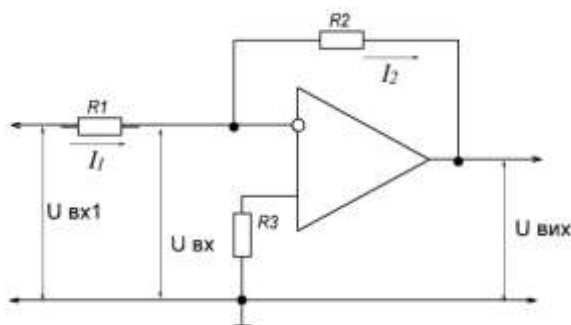


Рис. 12.3. Інвертуючий підсилювач

Оскільки підсилювач ідеальний, то:

$$I_2 = I_1,$$

а також

$$K = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \infty,$$

а отже

$$U_{\text{вх}} = 0.$$

На основі співвідношення (1) і (2) одержимо:

$$\frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх1}}} = - \frac{R_2}{R_1} \quad (12.3)$$

Знак "-" у правій частині формули (3) вказує на те, що вихідний сигнал, порівняно з вхідним, зсунутий на фазовий кут 180° . Оскільки неінвертуючий вхід ОП в розглядуваному підсилювачі з'єднаний зі спільною шиною, а $U_{\text{вх}} = 0$, то можна вважати, що потенціал його інвертуючого входу також рівний нулю. Тому рівність (1) можна записати у вигляді:

$$I_1 = \frac{U_{\text{вх1}}}{R_1}$$

Це означає, що вхідний опір інвертуючого підсилювача рівний опору резистора R_1 .

Вхідний струм реального ОП не рівний нулю. Спади напруги, які зумовлюються цим струмом на резисторах R_1 та R_2 , можуть зумовлювати нестабільність роботи підсилювача (зміщення нуля). Щоб усунути цей недолік, неінвертуючий вхід ОП з'єднують зі спільною шиною не безпосередньо, а через резистор, опір якого рівний опору паралельно ввімкннутих резисторів R_1 та R_2 (при $R_2 \gg R_1$ його можна вважати R_1).

2. Неінвертуючий підсилювач.

Схему такого підсилювача подано на рис. 12.4.

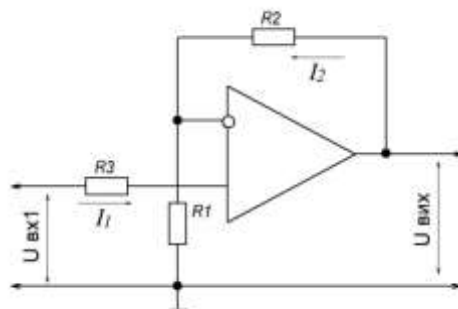


Рис. 12.4. Неінвертуючий підсилювач

Тут вхідний сигнал поступає на неінвертуючий вхід ОП, а частина вихідної напруги через ділянку R_1 , R_2 подається на його інвертуючий вхід. Резистор R_3 усуває вплив вхідного струму ОП на зміщення нуля.

Оскільки ОП ідеальний, то $U_{\text{вх}} = 0$, а отже,

$$U_{\text{ex1}} = U_{\text{eux}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Як і у випадку інвертуючого підсилювача, коефіцієнти передачі напруги неінвертуючого підсилювача залежать тільки від параметрів, якими характеризуються резистори R_1 і R_2 .

$$\frac{U_{\text{eux}}}{U_{\text{ex}}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

Характерним для неінвертуючого підсилювача є великий вхідний опір. Якщо на інвертуючий вхід ОП подати всю вихідну напругу ($R_2=0$), то одержується підсилювач з коефіцієнтом передачі, рівним 1, тобто повторювач напруги.

3. Інтегратор.

Схему такого пристрою подано на рис. 12.5.

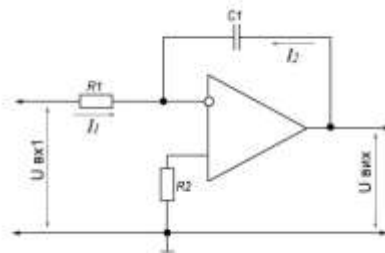


Рис. 12.5.

У даному випадку:

$$I_1 = \frac{U_{\text{ex1}}}{R_1}$$

Оскільки ОП ідеальний, то

$$I_1 = -I_2,$$

або

$$I_2 = C_1 \frac{dU_{\text{eux}}}{dt}$$

$$\frac{U_{\text{ex1}}}{R_1 C_1} = - \frac{dU_{\text{eux}}}{dt}$$

Звідки знаходимо

$$U_{\text{вих}} = - \int_0^t \frac{U_{\text{вх}}}{R_1 C_1} dt = - \frac{1}{R_1 C_1} \int_0^t U_{\text{вх}} dt$$

4. Диференціатор.

Схему пристрою подано на рис. 12.6.

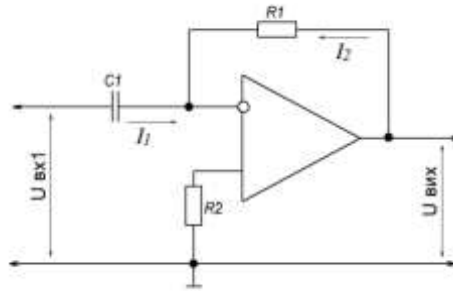


Рис. 12.6. Диференціатор

У даному випадку

$$I_1 = C_1 \frac{dU_{\text{вх}1}}{dt}; \quad I_2 = \frac{U_{\text{вих}}}{R_1}$$

Оскільки ОП ідеальний, то

$$I_1 = - I_2,$$

або

$$C_1 \frac{dU_{\text{вх}1}}{dt} = - \frac{U_{\text{вих}}}{R_1}$$

Звідки знаходимо:

$$U_{\text{вих}} = - R_1 C_1 \frac{d}{dt} U_{\text{вх}1}$$

Експериментальна установка.

До складу установки входять:

1. Панель для складання та дослідження пристроїв:
 - а) інвертуючого підсилювача змінної напруги (рис. 12.7. а);
 - б) неінвертуючого підсилювача змінної напруги (рис. 12.7. б);
 - в) інтегруючого пристрою (рис. 12.7. в);

г) диференціатора (рис. 12.7. з)

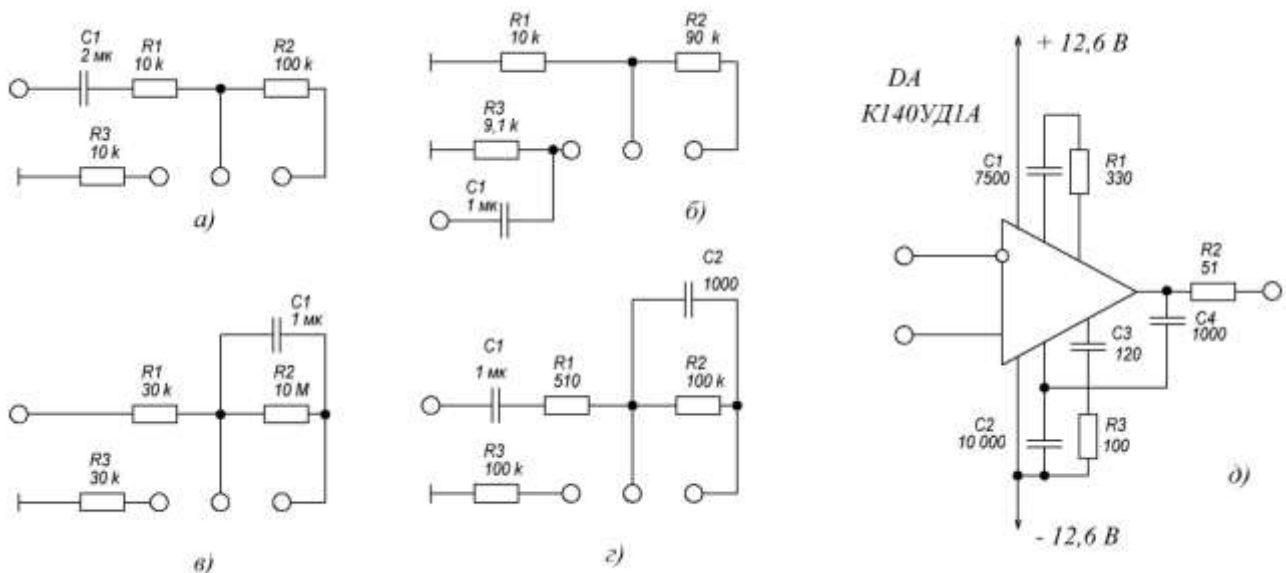


Рис. 12.7. Елементи експериментальної установки

На панелі встановлені: операційний підсилювач з колами корекції АЧХ (рис. 12.7.д.), резистори і конденсатори, необхідні для складання пристроїв, контактні гнізда для виконання з'єднань, яких не вистачає, затискачі для вмикання джерела

Порядок виконання роботи

1. Накресліть схеми пристроїв, які потрібно скласти і дослідити. Вкажіть номінали елементів, що використовуються в цих схемах.
2. Складіть інвертуючий підсилювач змінної напруги. Підключіть джерело живлення до відповідних затискачів панелі. Подайте на вхід підсилювача напруги від генератора звукової частоти, а вихідну напругу підсилювача - на осцилограф. Знайдіть коефіцієнти підсилення на частотах 100, 1000 і 10 000 Гц при вхідній напрузі 1 В. Порівняйте одержані значення з розрахунковими. Дослідити АЧХ.
3. Складіть неінвертуючий підсилювач змінної напруги. Розрахуйте коефіцієнт підсилення. Повторіть операції, вказані в пункті 2, при вхідній напрузі 0,5 В. Дослідити АЧХ.
4. Складіть інтегруючий пристрій. Запишіть вираз для вихідної напруги у випадку, коли вхідна напруга змінюється за гармонічним законом. Вивчіть осцилограму вихідної напруги, якщо напруга на вході підсилювача складає 100 мВ, а її частота складає 100 Гц. Порівняйте одержаний результат із розрахунковим значенням. Дослідити АЧХ.
5. Складіть схему диференціатора. Запишіть вираз для вихідної напруги у випадку, коли вхідна напруга змінюється у часі за гармонічним законом. Вивчіть осцилограму вихідної напруги, якщо напруга на вході складає 100 мВ, а її частота 100 Гц. Порівняйте одержаний результат з розрахунком. Дослідити АЧХ.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 13

Дослідження роботи мікросхем

Мета роботи: Вивчення принципу дії цифрових інтегральних мікросхем.

Прилади і матеріали

1. Панель з досліджуваними мікросхемами.
2. Джерело живлення (5 В).
3. З'єднувальні проводи.

Теоретичні відомості

1. Мікросхема К155ЛЕ1.

Мікросхеми К155ЛЕ1, КМ155ЛЕ1 представляють собою чотири логічних елементи 2АБО-НЕ (рис. 13.1). Зарубіжними аналогом мікросхем К155ЛЕ1, КМ155ЛЕ1 є мікросхема 7402

Принципова схема одного елемента мікросхеми К155ЛЕ1 показана на рис.13.2.

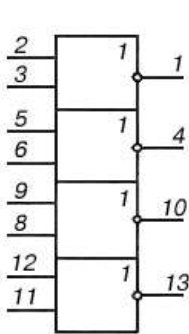


Рис. 13.1.

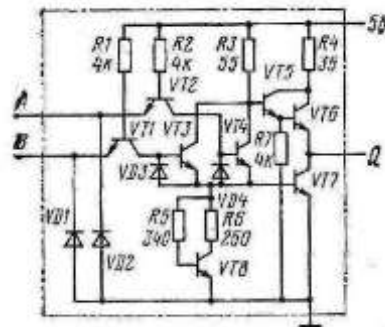
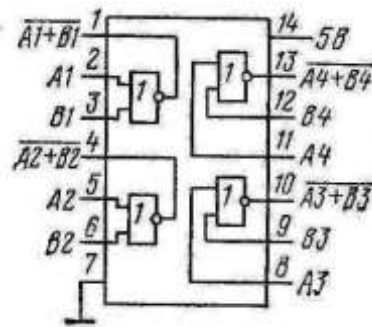
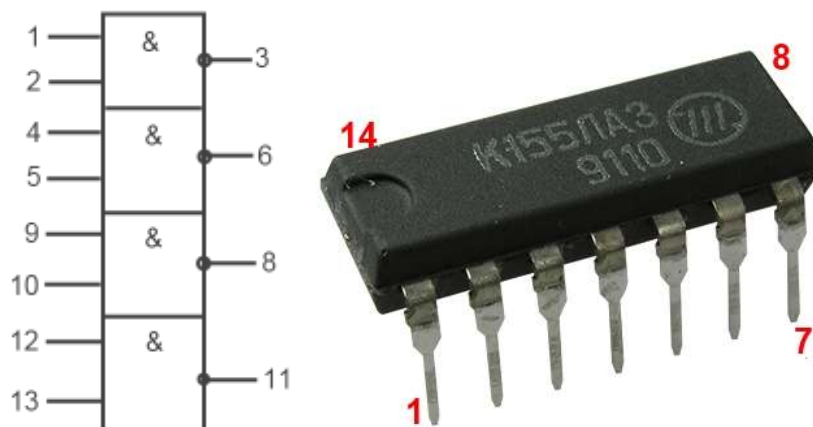


Рис. 13.2.

2. Мікросхема К155ЛА3.

У функціональній структурі мікросхеми К155ЛА3 є 4 самостійних логічних елементи 2І-НЕ. (загальний вивід - 7, вивід 14 - позитивний полюс живлення).

Аналогом мікросхеми К155ЛА3 є зарубіжна мікросхема SN7400.



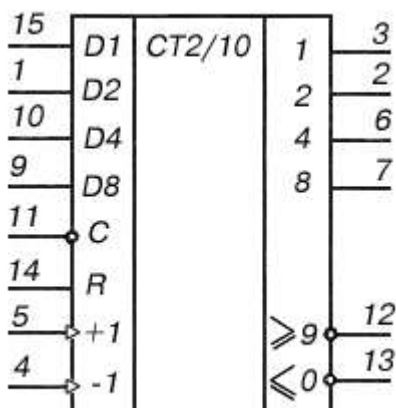
3. Мікросхема КМ155ИЕ6.

Зарубіжні аналоги SN74192N, SN74192J

Мікросхема являє собою двійково-десятковий реверсивний лічильник. Містить 268 інтегральних елементів. Корпус КМ155ИЕ6 типу 201.16-6.

Імпульсні тактові входи для рахунку на збільшення C_u (вивід 5) і на зменшення C_d (вивід 4) окремі. Стан лічильника змінюється по позитивних перепадах тактових імпульсів від низького рівня до високого на кожному з цих тактових входів.

Умовне позначення:



- 1 - вхід інформаційний D2;
- 2 - вихід другого розряду Q2;
- 3 - вихід першого розряду Q1;

- 4 - вхід "зворотний рахунок";
- 5 - вхід "прямий рахунок";
- 6 - вихід третього розряду Q3;
- 7 - вихід четвертого розряду Q4;
- 8 - загальний;
- 9 - вхід інформаційний D8;
- 10 - вхід інформаційний D4;
- 11 - вхід попереднім записом;
- 12 - вихід "пряме перенесення";
- 13 - вихід "зворотний перенос";
- 14 - вхід установки "0" R;
- 15 - вхід інформаційний D1;
- 16 - напруга живлення.

4. Мікросхема КР514ИД2.

Мікросхеми 514ИД2, КР514ИД2 призначенні для управління напівпровідниковими семисегментними цифро-буквеними індикаторами, які використовуються в електронній апаратурі.

КР514ИД2 - мікросхема дешифратор двійково-десятькового коду для 7-сегментного світлодіодного індикатора із загальним анодом.



Призначення виводів:

X0, X1, X2, X3 - інформаційні входи;

VI - вхід гашення;

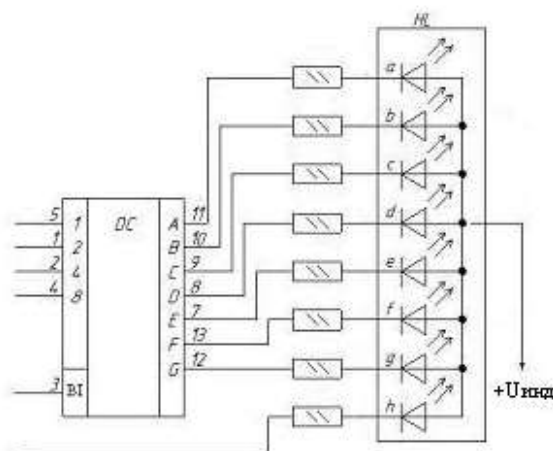
A, B, C, D, E, F, G-виходи, що підключаються до сегментних індикаторів;

Ucc – живлення +5 В;

Gnd – спільний;

Таблиця істинності КР514ИД2.

X0	X1	X2	X3	A	B	C	D	E	F	G	Символ
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	2
1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	3
0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	4
1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	5
0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	6
1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	7
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	9
0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	1	с
1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	э
0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	u
1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	с -
0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	t



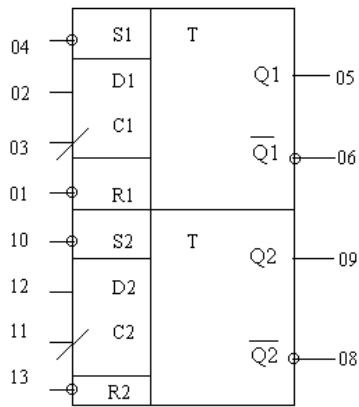
Типова схема підключення індикатора з спільним анодом до мікросхеми КР514ИД2

5. Мікросхема КР1533ТМ2.

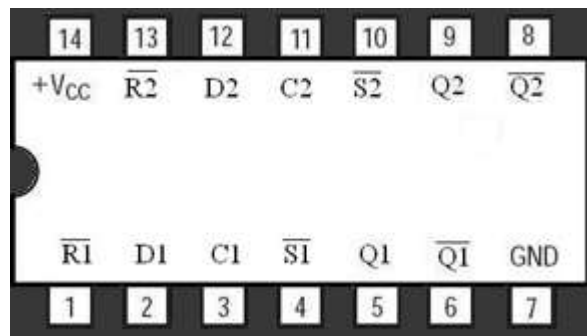
Тригер - електронна логічна схема, що має два стійкі стани, у яких вона може перебувати, доки не зміняться відповідним чином сигнали керування.

Мікросхема КР1533ТМ2 містить два незалежних D-тригера, що спрацьовують по фронту тактового сигналу на вході С. Низький рівень напруги (лог. "0") на входах установки (S) або скидання (R) встановлює виходи тригера у відповідний стан незалежно від стану інших входів (С і D).

При наявності на входах встановлення і скидання лог. "1" потрібно попереднє встановлення інформації по входу даних відносно фронту тактового сигналу, а також відповідна витримка інформації після подачі фронту синхронізуючого сигналу.



Умовне схематичне позначення мікросхеми КР1533ТМ2.



Розміщення виводів мікросхеми КР1533ТМ2.

Входи				Виходи	
\bar{S}	\bar{R}	C	D	Q	\bar{Q}
0	1	X	X	1	0
1	0	X	X	0	1
0	0	X	X	H	H
1	1	—	1	1	0
1	1	—	0	0	1
1	1	0	X	Q ₀	\bar{Q}_0

Таблиця істинності

0 - низький рівень;

1 - високий рівень;

X - будь-який стан;

Q₀ - попередній стан виходу;

H - невизначений стан (неприпустимий режим).

Порядок виконання роботи

1. Дослідити роботу мікросхеми К155ЛЕ1. За результатами проведених досліджень побудувати таблицю істинності логічного елемента АБО-НЕ.

2. Дослідити роботу мікросхеми 155ЛА3. За результатами проведених досліджень побудувати таблицю істинності логічного елемента І-НЕ.
3. Дослідити роботу мікросхеми КМ155ИЕ6 та КР514ИД2. Дослідити залежність показів семисегментного цифро-буквеного індикатора від двійкового коду на входах та виходах мікросхем. За результатами проведених досліджень побудувати таблиці істинності.
4. Дослідити роботу одного з D-тригерів мікросхеми КР1533ТМ2.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум : навч. посіб. / За ред. А.Г.Соскова. 3-е вид. К. : Каравела, 2004. 432 с.
2. Мілих В. І. Шавьолкін О. О. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : підручник для студ. вузів / за ред. В. І. Мілих. 2-ге вид. К. : Каравела, 2008. 687 с.
3. Бойко В. І., Гуржій А. М., Жуйков В. Я. та ін. Основи схемотехніки електронних систем : підручник. К. : Вища шк., 2012. 527с.
4. Жуйков В. Я., Бойко В. І., Зорі А. А., Співак В. М. Схемотехніка електронних систем : підручник в двох томах. К. : Аверс, 2002. 772 с.
5. Сисоєв В. М. Основи радіоелектроніки. К. : Вища шк., 2004.
6. Городжа А. Д. Загальна Електротехніка та основи електроніки. К. : КНУБА, 2000. 150 с.
7. Малинівський С. М. Загальна електротехніка та основи електроніки. Львів : Ви-во Львівської політехніки, 2001. 596 с.
8. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник для студ. вищ. закл. освіти у 4-х т. / Під ред. В. І. Сенька. Т.2: Аналогові та імпульсні пристрої. К. : ТОВ "Видавництво Обереги", 2000. 510 с.
9. Зубчук В. И., Сигорский В. П., Шкуро А. Н. Справочник по цифровой схемотехнике. К. :Техніка, 1990. 448 с.
10. Бабич М. П., Жуков І. А. Комп'ютерна схемотехніка : навч. посіб. К. : «МК-Прес», 2004. 412 с.
11. Щерба А. А., Рябенський В. М., Кучеренко М. Є., Победаш К. К., Чибеліс В. І., Кінаш А. Т., Солобуто Л. В. Електротехніка та електроніка. Теоретичні відомості, розрахунки та дослідження за підтримкою комп'ютерних технологій : навч. посіб. / За заг. ред. А. А. Щерби та В. М. Рябенського. К. : «Корнійчук», 2007. 488 с.
12. Прянишников В. А. Электроника : курс лекций. СПб. : "Корона принт", 2000. 416 с.
13. Рябенський В. М., Жуйков В. Я., Гулий В. Д. Цифрова схемотехніка : навч. посіб. Львів : Новий світ – 2000, 2009. 736 с.
14. Божко В. В., Новосад О. В. Фізична електроніка : метод. рек. до лаб. роб. Луцьк : Вежа-Друк, 2016. 60 с.
15. Новосад О. В., Федосов С. А. Радіотехнічні кола та сигнали : курс лекцій. Луцьк : Вежа-Друк, 2016. 100 с.
16. Новосад О. В., Федосов С. А. Основи теорії кіл, сигнали та процеси в електроніці. Луцьк : Вежа, 2016. 100 с
17. Божко В. В., Новосад О. В. Електрика і магнетизм : курс лекцій у 2 ч. Ч. 1. Електростатика. Постійний електричний струм. Луцьк : Вежа, 2018. 100 с.
18. Новосад О. В., Божко В. В. Електрика і магнетизм : курс лекцій у 2 ч. Ч. 2. Електромагнетизм. Електромагнітні коливання та хвилі. Луцьк : Вежа, 2018. 84 с.

19. Федосов С. А., Замуруєва О. В., Захарчук Д. А., Кевшин А. Г., Новосад О. В. Структурні елементи напівпровідникових пристроїв: курс лекцій. Ч. 1. : *p-n* переходи. 2020. 84 с.
20. Федосов С. А., Замуруєва О. В., Сахнюк В. Є., Новосад О. В., Коровицький А. М. Структурні елементи напівпровідникових пристроїв : курс лекцій. Ч. 2 : Контакти метал-напівпровідник. 2020. 92 с.
21. Федосов С. А., Замуруєва О. В., Сахнюк В. Є., Захарчук Д. А., Кевшин А. Г., Новосад О. В. Структурні елементи напівпровідникових пристроїв : задачі. Луцьк : Вежа-Друк, 2020. 32 с.
22. Рибалко М. П., Есауленко В. О., Костенко В. І. Теоретичні основи електротехніки: Лінійні електричні кола : підручник. Донецьк : Новий світ, 2003. 513 с.
23. Титаренко М. В. Електротехніка та основи електроніки : навч. посіб. для студ. інженерно-технічних спец. вузів / М.В. Титаренко. К.: Кондор, 2004. 240 с.
24. Шегедін О. І. Маляр В. С. Теоретичні основи електротехніки. Частина 1 : навч. посіб. для студ. дистанційної форми навчання електротехнічних та електромеханічних спеціальностей вищих навчальних закладів. Львів : Новий Світ, 2004. 168 с.
25. Поп С. С., Шароді І. С. Фізична електроніка. Львів : Євросвіт, 2001. 248 с.
26. Левитський С. М. Вступ до фізичної електроніки. К. : Київ. ун-т, 2001. 172 с.
27. Гуртов В. А. Твердотельная электроника : учеб. пособие. 2-е изд., доп. М. : Техносфера, 2005. 408 с.
28. Гаман В. И. Физика полупроводниковых приборов. Томск : Изд-во Томского ун-та, 1989. 336 с.
29. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2 книгах. Кн. 2. М. : Мир, 1984. 456 с.

Навчально-методичне видання

Новосад Олексій Володимирович
Федосов Сергій Анатолійович
Божко Володимир Васильович
Кевшин Андрій Григорович

Електроніка

*Методичні рекомендації
до лабораторних робіт*

Друкується в авторській редакції