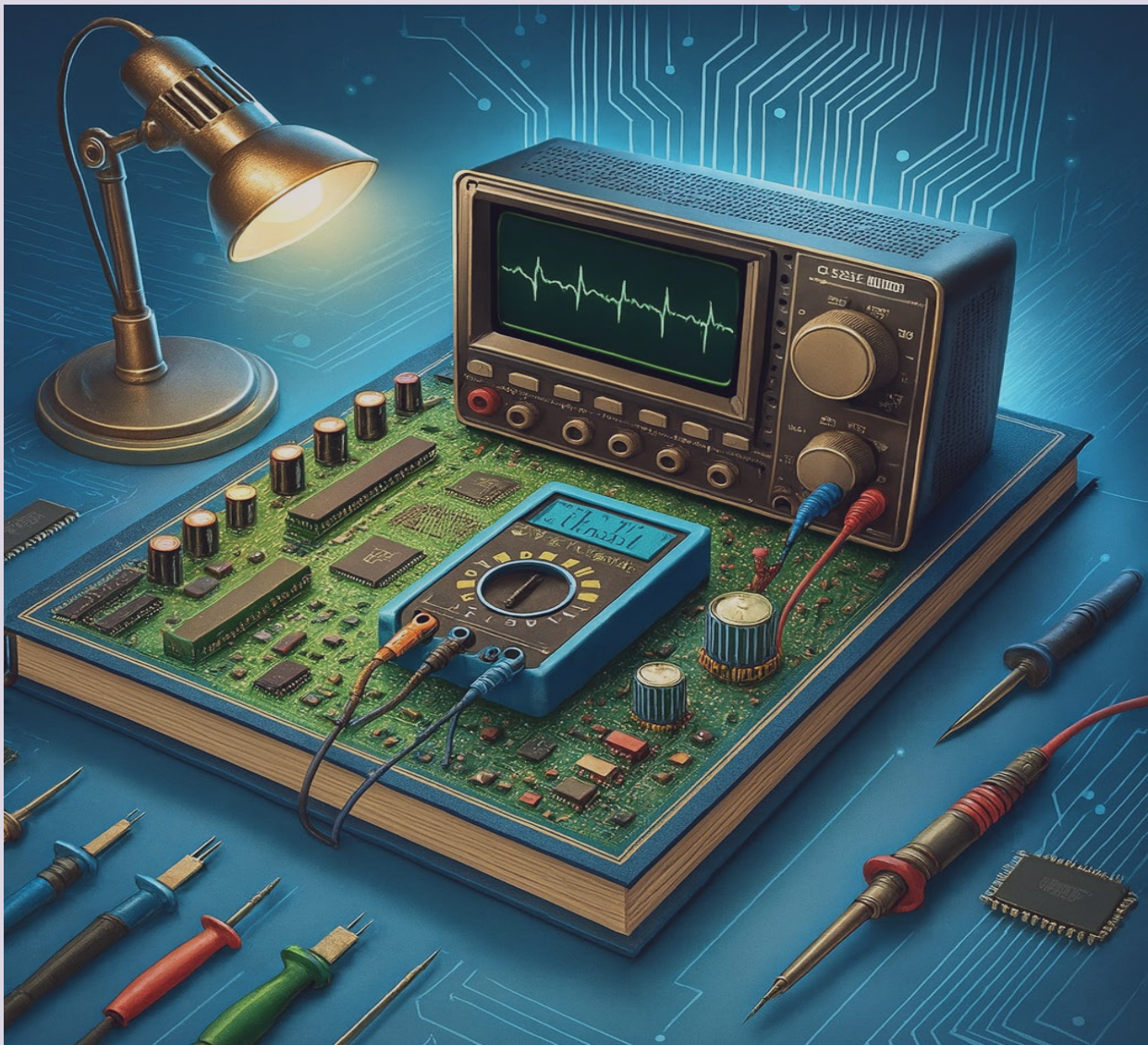


Новосад О. В.

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ЕЛЕКТРОНІКИ



Волинський національний університет імені Лесі Українки
Навчально-науковий фізико-технологічний інститут

О. В. Новосад

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ЕЛЕКТРОНІКИ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Електронне видання на CD-ROM

Луцьк
Вежа-Друк
2025

УДК 621.382

Н-72

*Надано гриф «Рекомендовано» та рекомендовано до друку вченою радою
Волинського національного університету імені Лесі Українки
(протокол № 14 від 27 листопада 2025 р.).*

Рецензенти:

Луньов С. В. – доктор фіз.-мат. наук, професор, професор кафедри фізики та вищої математики Луцького національного технічного університету

Шигорін П. П. – кандидат фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної фізики імені А.В. Свідзинського Волинського національного університету імені Лесі Українки

Новосад О. В.

Н-72 Лабораторний практикум з електроніки : навч. посіб / О. В. Новосад.
– Луцьк : Вежа-Друк, 2025. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM). – Об'єм
даних 6,76 Мб.

ISBN 978-966-940-706-1

У навчальному виданні «Лабораторний практикум з електроніки : навчальний посібник» поданий теоретичний матеріал для підготовки до лабораторних робіт з освітньої компоненти «Електроніка» для здобувачів освіти спеціальності Е6 Прикладна фізика та наноматеріали.

Рекомендовано для здобувачів освіти інженерно-технічних та природничих спеціальностей, які виконують лабораторні роботи з електроніки.

УДК 621.382

ISBN 978-966-940-706-1

© Новосад О. В., 2025

© Волинський національний університет
імені Лесі Українки, 2025

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ЕЛЕМЕНТНА БАЗА ЕЛЕКТРОНІКИ.....	14
Лабораторна робота № 1. Дослідження роботи напівпровідникового діода та схем випрямлення змінного струму	14
Лабораторна робота № 2. Дослідження фотодіодів та світлодіодів	23
Лабораторна робота № 3. Зняття характеристик біполярних транзисторів.....	30
Лабораторна робота № 4. Дослідження статичних характеристик і параметрів польових транзисторів	35
Лабораторна робота № 5. Дослідження роботи тиристора та використання тиристора в схемах регулювання потужності	47
Лабораторна робота № 6. Дослідження еквівалентів приладів з від’ємним диференціальним опором	55
Лабораторна робота № 7. Датчики на основі ефекту Холла.....	61
РОЗДІЛ 2. АНАЛОГОВІ ТА ЦИФРОВІ ПРИСТРОЇ	68
Лабораторна робота № 8. Пайка як метод з’єднання компонентів електронних пристроїв	68
Лабораторна робота № 9. Дослідження різних типів сигналів та визначення їх характеристик	73
Лабораторна робота № 10. Дослідження ВАХ стабілітрона та компенсаційного стабілізатора напруги.....	83
Лабораторна робота № 11. Дослідження варикапів	89
Лабораторна робота № 12. Тунельний діод і резонансний генератор на його основі	95
Лабораторна робота № 13. Амплітудно-частотні характеристики електричних фільтрів.....	103
Лабораторна робота № 14. Вивчення інтегрального операційного підсилювача в різних режимах роботи	117
Лабораторна робота № 15. Дослідження ЦАП на базі матриці R-2R.....	127
Лабораторна робота № 16. Дослідження АЦП послідовного наближення.....	133
Лабораторна робота № 17. Дослідження мікросхем логічних елементів та мікросхем для керування семисегментним цифро-буквеним індикатором	138

Лабораторна робота № 18. Дослідження тригерів.....	148
Лабораторна робота № 19. Дослідження принципу роботи та застосувань цифрового компаратора у схемах порівняння двійкових чисел.....	162
Лабораторна робота № 20. Дослідження принципу дії підсилювача звуку на мікросхемі LM386	167
Лабораторна робота № 21. Дослідження мультівібратора на аналоговій мікросхемі LM324	173
Лабораторна робота № 22. Дослідження фотореле та його використання у приладах автоматичного управління.....	178
Лабораторна робота № 23. Вивчення принципу дії регістра 74НС574 та його застосувань у цифрових схемах.....	183
Лабораторна робота № 24. Програмування та дослідження мікроконтролера АТmega328Р для керування символьним LCD-дисплеєм.....	189
ДОДАТКИ.....	195
А. Перелік графічних позначень елементів електронних схем.....	195
Б. Написи і позначення на шкалах електровимірювальних приладів.....	197
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ТА РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	199

ВСТУП

Освітній компонент «Електроніка» спрямований на засвоєння здобувачами освіти основ теоретичних і практичних знань, необхідних для розуміння принципів роботи сучасних електронних пристроїв і систем, що оточують нас у повсякденному житті – від смартфонів до медичного обладнання. Знання з електроніки дають змогу проєктувати, аналізувати та вдосконалювати електронні схеми, а також ефективно працювати з цифровими й аналоговими сигналами. Це формує технічне мислення, розвиває навички розв’язання інженерних задач і відкриває широкі можливості у сферах ІТ, робототехніки, телекомунікацій та автоматизації.

Важливою складовою вивчення електроніки є виконання лабораторних робіт. Виконання лабораторних робіт з електроніки дозволяє закріпити теоретичні знання через практичний досвід, сформувати навички роботи з вимірювальним обладнанням і реальними електронними компонентами, навчитися аналізувати поведінку електронних схем з урахуванням похибок, розвинути вміння знаходити й усувати помилки під час вимірювань і монтажу схем, формувати дослідницькі компетентності й навички обробки експериментальних даних. А також підготуватися до реальної інженерної діяльності, що вимагає логічного та системного мислення, уміння моделювати, тестувати й оптимізувати електронні системи.

Лабораторний практикум з освітнього компонента «Електроніка» для здобувачів освіти спеціальності Е6 Прикладна фізика та наноматеріали передбачає виконання робіт, описаних у даному навчальному посібнику. Теоретичні відомості до кожної лабораторної роботи дають мінімальний об’єм інформації про досліджуване явище, фізичний об’єкт, електронну систему, якого достатньо для підготовки та проведення відповідного дослідження. Переважна частина запропонованих лабораторних робіт може використовуватися здобувачами освіти інших природничих та технічних спеціальностей 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 детальний перелік вимірювальних приладів та обладнання, описано послідовність виконання лабораторних робіт, наведено зразки таблиць для запису результатів вимірювань та розрахунків, а також контрольні запитання. 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 матеріалу, рекомендується використати інформаційні джерела, список яких подано в кінці навчального посібника.

Основна спрямованість навчального посібника — дати можливість здобувачам освіти за допомогою досліду вивчити фізичні явища та процеси в електронних елементах, приладах та ситемах. Опис лабораторних робіт не претендує на те, щоб створити у здобувачів освіти повне уявлення про явища, які вивчаються. Таке уявлення може сформуватись лише внаслідок опрацювання лекцій та підручників. Для успішного виконання робіт необхідна попередня самостійна підготовка, в першу чергу, теоретична.

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

Під час заняття здобувачі освіти 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 та розрахунки, висновки за результатами роботи. Графіки повинні бути виконані на міліметровому папері, дозволяється оформити звіт (графіки) з використанням прикладних комп'ютерних програм, наприклад 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 здобувачі освіти проходять інструктаж із безпеки праці та навчання, надання першої (долікарської) допомоги при характерних ушкодженнях, який проводить викладач перед початком занять у лабораторії і реєструється в журналі.

3. До роботи в лабораторії допускаються лише здобувачі освіти, 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 потрібно бути обережними, дотримуватись порядку і чистоти на робочому місці, виконувати 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. Здійснюйте 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 вийшли з ладу, відбулась поломка чи розбиття приладу, то про це негайно потрібно 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 та обладнанням

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

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. Зібране електричне коло можна підключати до джерела струму тільки після його 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 неізольованих 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 завершення вимірювань потрібно відключити джерело струму.

8. Після закінчення розрахунків і перегляду отриманих результатів викладачем електричне коло потрібно розібрати та привести робоче місце в порядок.

Деякі відомості про похибки

Пряме вимірювання – це вимірювання, при якому сигнал, що поступає на вхід засобів вимірювання, містить інформацію про фізичну величину, яка вимірюється.

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

Розрізняють три основні 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 методами теорії ймовірностей та 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:

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

Зведена похибка

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_n} \cdot 100\%,$$

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

З формул (1) та (2) видно, що для того, щоб знайти абсолютну і відносну похибки, потрібно знати не тільки значення вимірюваної величини, отримане з досліду, 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

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{X} \cdot 100\% = \pm \frac{X_n}{X} \cdot \gamma,$$

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

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

$$\delta_I = \pm \gamma_I \cdot \frac{I_n}{I};$$

$$\delta_U = \pm \gamma_U \cdot \frac{U_n}{U};$$

$$\delta_P = \pm \gamma_P \cdot \frac{P_n}{P};$$

де $\gamma_I, \gamma_U, \gamma_P$ – клас точності відповідного приладу; I_n, U_n, P_n – номінальне значення вимірювальної величини (кінцевий діапазон вимірюваної величини); I, U, P – виміряні 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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4. Визначити середнє квадратичне відхилення результатів вимірювань

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}.$$

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

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

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

6. Записати результат вимірювань

$$X = \bar{X} - \Delta X.$$

Більш детально з основами теорії похибок під час вимірювань фізичних величин можна познайомитись в роботі [1].

Таблиця 1. Залежність коефіцієнта Стюдента 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	11	2,20	3,11
4	2,78	4,60	12	2,18	3,05
5	2,57	4,03	13	2,16	3,01
6	2,45	3,71	14	2,14	2,98
7	2,36	3,50	15	2,13	2,95
8	2,306	3,25	16	2,12	2,92
9	2,26	3,25	17	2,11	2,90
10	2,23	3,17	20	2,08	2,84

РОЗДІЛ 1. ЕЛЕМЕНТНА БАЗА ЕЛЕКТРОНІКИ

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 міст.
3. Осцилограф.
4. Резистор.
5. Конденсатори.
6. Перемикач.
7. Трансформатор.
8. З'єднувальні проводи.

Теоретичні відомості

До напівпровідників належать матеріали, які за значенням питомої електропровідності знаходяться посередині між провідниками та діелектриками (ізоляторами). Концентрація вільних носіїв заряду у напівпровідниках становить $10^{12} \leq n \leq 10^{19} \text{ (см}^{-3}\text{)}$. Питома електропровідність напівпровідників за значенням менша від електропровідності металів ($\sigma \approx 10^8 - 10^6 \text{ См/м}$) і більша від електропровідності діелектриків ($\sigma \approx 10^{-9} - 10^{-22} \text{ См/м}$). Напівпровідники проявляють відмінні від металів властивості, вони за своїми властивостями більш подібні до діелектриків.

Особливістю напівпровідникових матеріалів є сильна залежність їх фізичних властивостей від зовнішніх факторів: електричного поля, опромінення світлом або іонізованими частинками, а також при внесенні у напівпровідник домішок або внаслідок його нагрівання, зміні тиску тощо. Наприклад, при нагріванні питомий опір провідників (металів) збільшується, а напівпровідників і діелектриків навпаки – зменшується. Таких прикладів можна навести дуже багато. Це свідчить про

різний характер механізмів провідності цих матеріалів.

На практиці властивості однорідних напівпровідників здебільшого використовуються в напівпровідникових резисторах. Більшість сучасних напівпровідникових приладів й елементів електроніки створено з неоднорідних напівпровідникових структур, основними 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 контакт не можна утворити простим дотиком напівпровідникових пластин різного типу провідності, тому що він буде забруднений оксидами, повітрям і т. д. Електронно-дірковий перехід отримують дифузією або вплавленням відповідних домішок у монокристал напівпровідника, вирощуванням *n-p*-переходу з розплаву напівпровідника та іншими методами.

Властивості *n-p*-переходу залежать від його конструктивних особливостей, методу одержання, співвідношення концентрації донорних та акцепторних домішок.

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

У напівпровіднику *n*-типу провідності вільними носіями заряду є електрони, а у напівпровіднику *p*-типу провідності – дірки. Рухомі носії заряду, що знаходяться поблизу *n-p*-переходу, дифундують через *n-p*-перехід і взаємно рекомбінують. Внаслідок рекомбінації утворюється збіднений вільними носіями шар просторових зарядів. У реальних умовах ширина такого шару становить десятки частки мікрометра. У напівпровіднику *p*-типу він утворюється негативними іонами акцепторної домішки, а в напівпровіднику *n*-типу він утворюється позитивно зарядженими 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.

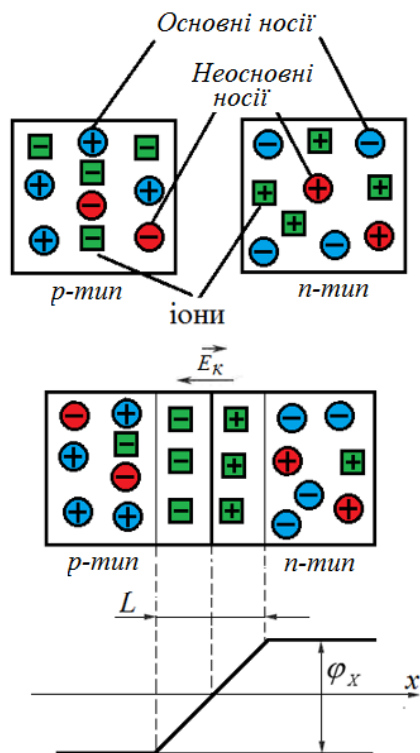


Рис. 1.1. Утворення потенціального бар'єру в n - p -переході.

Електричне поле просторових зарядів напрямлене від позитивних іонів-донорів до негативних іонів-акцепторів, тому це електричне поле гальмує рух основних носіїв заряду і прискорює рух неосновних. Тепер будь-який електрон, що перейшов з напівпровідника n -типу провідності в напівпровідник p -типу, потрапляє в електричне поле, яке намагається повернути його назад в напівпровідник n -типу провідності. Аналогічно дірки відштовхуються у напівпровідник p -типу провідності. Завдяки наявності збідненого вільними носіями шару шириною L (рис. 1.1), електрична провідність n - p -переходу зменшується відносно провідності решти напівпровідникової структури, а наявність просторових зарядів й електричного поля, обумовленого цими зарядами, робить його провідність залежною від напрямку дії зовнішнього електричного поля.

Слід мати на увазі, що у напівпровідникових кристалах неперервно утворюються та рекомбінують «теплові» електронно-діркові пари, які постійно створюють деяку кількість неосновних носіїв заряду. Перш ніж рекомбінувати з основними носіями, неосновні носії, які знаходяться біля n - p -переходу, можуть потрапити в поле потенціального бар'єра і обумовити дрейфовий струм. За

відсутності зовнішніх впливів цей дрейфовий струм компенсується дифузійним струмом основних носіїв. Тобто встановиться динамічна рівновага n - p -переходу.

Якщо до n - p -переходу прикласти зовнішнє електричне поле, то через нього буде проходити електричний струм, величина цього струму залежить від напрямку прикладеного поля (рис. 1.2).

Під дією зовнішнього електричного поля E , спрямованого проти потенціального бар'єра (рис. 1.2, а), висота потенціального бар'єру зменшується, а потім потенціальний бар'єр зникає взагалі. Основні носії заряду будуть рухатися в напрямку n - p -переходу, його ширина й опір зменшиться. 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 зі збільшенням напруги, крива 1 на рис. 1.2, в. Таке вмикання n - p -переходу називається прямим (рис. 1.2, а).

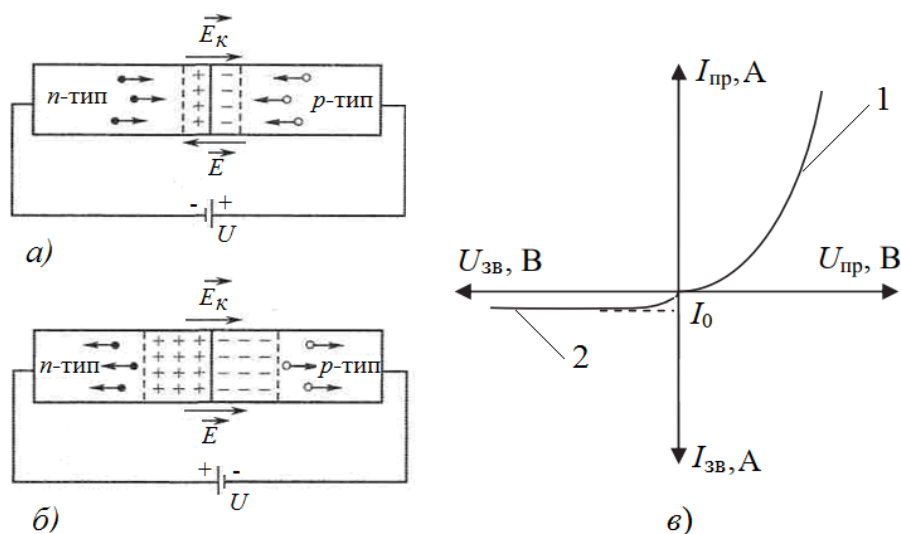


Рис. 1.2. Пряме (а) та зворотнє (б) вмикання електронно-діркового переходу до зовнішнього джерела живлення та його ВАХ (в).

Якщо зовнішнє електричне поле по напрямку співпадає з електричним полем потенціального бар'єра (рис. 1.2, б), то із підвищенням його напруженості висота потенціального бар'єру зростає. Відповідно, буде збільшуватись ширина (L) збідненої вільними носіями зони, що призведе до зростання електричного опору n -

p-переходу. Кількість основних носіїв зряду, здатних подолати дію такого поля, буде зменшуватися, дифузійний струм основних носіїв буде також зменшуватись. Основні носії заряду під дією зовнішнього електричного поля відтягуються від приконтактних шарів у глибину напівпровідникового кристалу. Для неосновних носіїв потенціальний бар'єр в *n-p*-переході відсутній, і вони будуть втягуватися полем в *n-p*-перехід. Таке вмикання електронно-діркового переходу називають зворотним. При ньому основний дрейфовий струм, що утворюється неосновними носіями, має мале значення, яке практично не залежить від зовнішньої напруги (крива 2 на рис. 1.2, в), але істотно залежить від температури.

Таким чином, основною властивістю *n-p*-переходу є його однобічна провідність і нелінійність ВАХ (рис. 1.2, в).

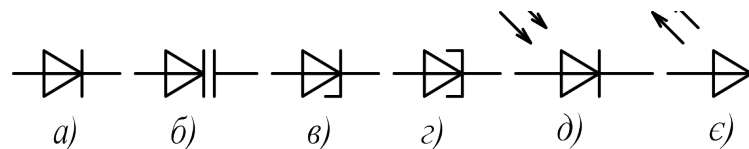


Рис. 1.3. Умовні графічні позначення напівпровідникових діодів: а – загальне; б – варикап; в – стабілітрон; г – тунельний діод; д – фотодіод, е – світлодіод.

Напівпровідниковий діод – це електронний елемент з двома виводами (електродами), який має один електронно-дірковий перехід. Різні типи напівпровідникових діодів відрізняються основним матеріалом, з якого їх виготовлено, технологією виробництва та конструкцією, що зумовлює різноманітність їхніх електричних параметрів й галузей застосування (рис. 1.3).

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.

Для напівпровідникових діодів використовується буквено-цифрове або колірне маркування.

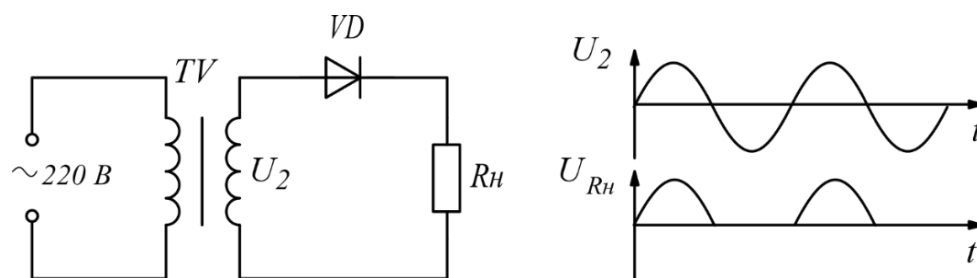


Рис. 1.4. Однопівперіодний випрямляч та часові діаграми його роботи.

Сучасні електронні пристрої містять велику кількість транзисторів, фотоелементів, ІМС. Майже усі вони живляться постійним струмом, який отримують випрямленням змінного струму.

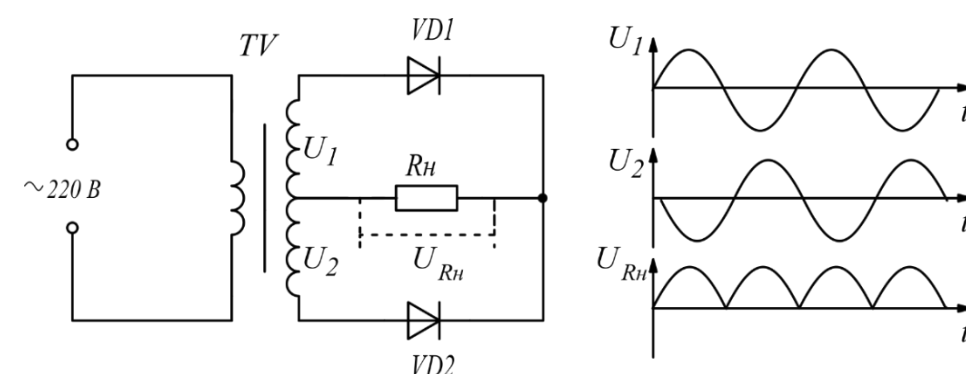


Рис. 1.5. Двопівперіодний випрямляч та часові діаграми його роботи.

Найпростіший однопівперіодний випрямляч змінного струму (рис. 1.4) складається з послідовно увімкнених 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 одноктні випрямлячі застосовуються в схемах, нечутливих 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 одноктна (місткова) схема випрямляча (рис. 1.6). У цій схемі первинна обмотка трансформатора вмикається в мережу однофазного змінного струму, а до вторинної обмотки приєднуються чотири випрямні діоди, з'єднані за містковою схемою,

причому в одну діагональ містка вмикається вторинна обмотка трансформатора, в іншу - опір навантаження. Через навантаження випрямлений струм проходить за два півперіоди (рис. 1.6).

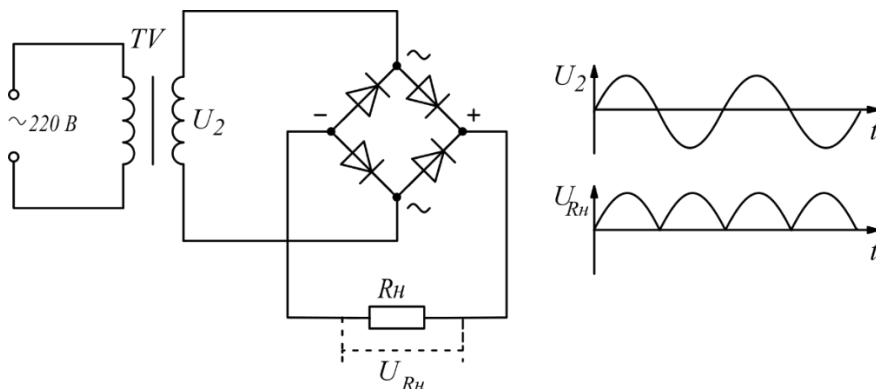


Рис. 1.6. Місткова схема випрямляча.

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.

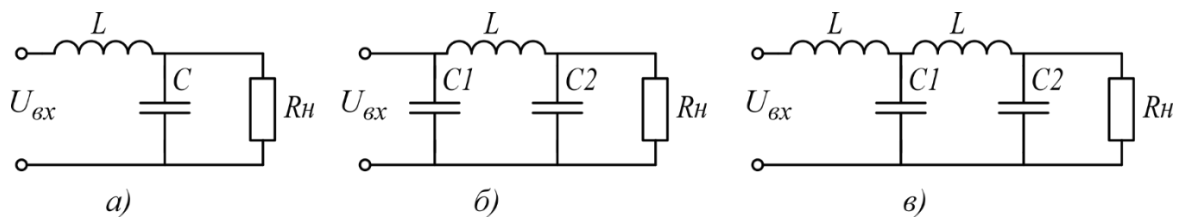


Рис. 1.7. Згладжувальні фільтри.

Згладжувальні 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

Завдання 1. Дослідження вольт-амперних та вольт-фарадних характеристик діодів

1. Ознайомитись з паспортом та порядком роботи за установкою для вивчення *p-n*-переходу ФПК-06.
2. Під'єднати панель з діодами до ФПК-06.
3. Дослідити ВАХ та ВФХ запропонованих діодів згідно з п. 7 «Порядок роботи» паспорта установки для вивчення *p-n*-переходу ФПК-06.
4. За результатами досліджень побудувати графічно ВАХ та ВФХ.

5. Ознайомитись з основними електричними параметрами напівпровідникових діодів (табл. 1.1).

6. Використовуючи результати досліджень, зробити висновки.

Завдання 2. Дослідження схем випрямлення змінного струму

1. Отримати осцилограму змінного струму.

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

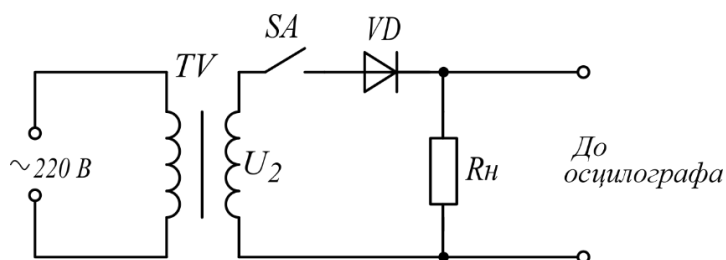


Рис. 1.8. Схема електричного кола для дослідження однопівперіодного випрямлення змінного струму.

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

4. Увімкнути в місткову схему випрямлення змінного струму ємнісний фільтр (рис. 1.9), отримати осцилограму.

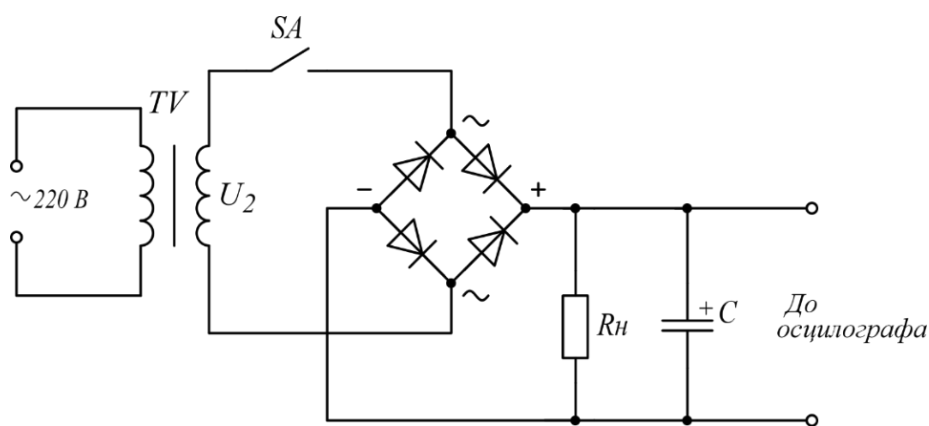


Рис. 1.9. Схема електричного кола для дослідження двопівперіодного випрямлення змінного струму.

5. На міліметровому папері відобразити одержані осцилограми.

6. На основі проведених досліджень зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Які речовини належать до напівпровідників?
2. У чому полягає відмінність між напівпровідниками електронного та діркового типів провідності?
3. Які домішки називають донорними?
4. Які домішки називають акцепторними?
5. Які основні характеристики напівпровідникових матеріалів ви знаєте?
6. Опишіть механізм утворення *p-n*-переходу.
7. Охарактеризуйте ВАХ напівпровідникового діода.
8. Назвіть основні типи діодів.
9. Зобразіть умовні схематичні позначення різних типів діодів.
10. Які існують схеми увімкнення діодів?
11. Перерахуйте основні електричні параметри та характеристики діодів.
12. Де використовують діоди?

Таблиця 1.1. Електричні параметри деяких напівпровідникових діодів.

Тип діода	Граничний струм $I_{пр. max}, A$	Прямий спад напруги $U_{пр}, A$	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

Лабораторна робота № 2

Дослідження фотодіодів та світлодіодів

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

Прилади і матеріали

1. Установка для вивчення фотодіода і світлодіода ФДСВ-05.
2. Осцилограф.
3. Лампа розжарювання.
4. З'єднувальні проводи.

Теоретичні відомості

Фотодіоди. Напівпровідниковий фотодіод - це напівпровідниковий діод, зворотний струм якого залежить від рівня освітленості.

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 увімкнення 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 вмикати у схеми як із зовнішнім джерелом живлення, так і без нього. Режим роботи фотодіода із зовнішнім джерелом живлення називають фотодіодним, а без зовнішнього джерела живлення – фотовентильним або генераторним.

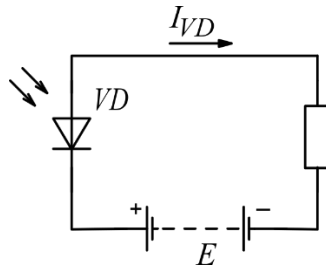


Рис. 2.1. Схема вмикання фотодіода.

У вентильному режимі роботи 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 $\Phi = \text{const}$) 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 з ладу фотодіода.

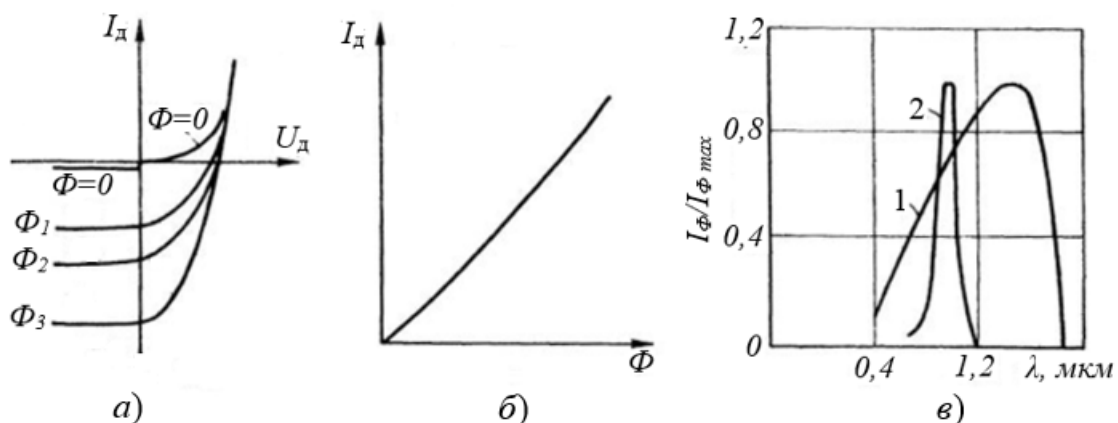


Рис. 2.2. Характеристики фотодіода: а) ВАХ; б) світлова характеристика; в) спектральна характеристика (1 – германієвий фотодіод; 2 – кремнієвий фотодіод).

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 зі зменшенням довжини хвилі квантів світла. Тобто короткохвильова межа чутливості залежить від товщини бази та від швидкості поверхневої рекомбінації вільних носіїв заряду. 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} – сила фотоструму, Φ – освітленість.

Світлодіоди. Світлодіод – це 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 ультрафіолетової ділянки спектру. 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. Також світлодіоди можна удосконалити 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 електрони та 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, виготовлені з непрямозонних напівпровідників (наприклад, з кремнію або германію, а також з сплавів SiGe, SiC), світло практично не випромінюють. Втім, у зв'язку з постійним розвитком кремнієвих технологій, роботи зі створення світлодіодів на основі кремнію активно ведуться.

Оптрони. Оптрон – це електронний пристрій, який передає сигнал між двома електричними колами за допомогою світла, не маючи прямого електричного з'єднання між ними. Складається зі світлодіода, який випромінює світло при поданні струму, та фотодетектора (фототранзистора, фотодіода, фототріака), який реагує на це світло. Основна мета використання оптрона – це гальванічна розв'язка, тобто розділення кіл, щоб шуми, завади або високі напруги в одній частині схеми не впливали на іншу.

Оптопара – це більш загальний термін, який описує будь-яку пару «світлодіод–фотоприймач», що передає сигнал оптично. Тобто кожен оптрон є оптопарою, але оптопара може мати різні конструкції й призначення (для перемикання, передачі сигналів, регулювання потужності).

Основні типи оптронів: фототранзисторні (для передачі цифрових сигналів), фототиристорні (фотосимісторні) (для управління змінним струмом і силовими навантаженнями), фотодіодні (швидкісні для високочастотних сигналів).

Порядок виконання роботи

Завдання 1. Дослідити роботу світлодіодів.

1. Підготуйте лабораторне обладнання до роботи, згідно з п. 6 паспорта до установки, для вивчення фотодіода і світлодіода ФДСВ-05.
2. Встановіть постійну пряму напругу живлення світлодіодів переведенням перемикача (поз. 5, рис. 2.3) у положення «-», регулятор «РІВЕНЬ» (поз. 4, рис. 2.3) переводиться в крайнє положення за годинниковою стрілкою.
3. Послідовно, за допомогою перемикача (поз. 2, рис. 2.3), підключіть світлодіоди, розташовані на стенді.
4. Обертанням регулятора «РІВЕНЬ» дослідіть залежність сили світла від прямого струму через світлодіод.

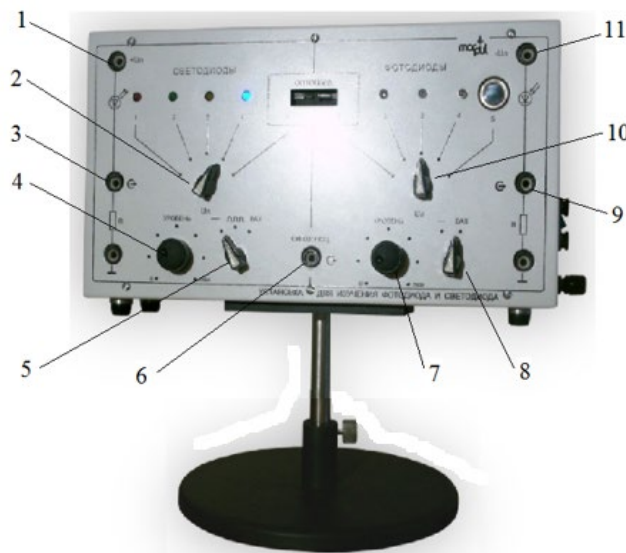


Рис. 2.3. Установка для вивчення фотодіода і світлодіода ФДСВ-05.

Завдання 2. Дослідження ВАХ світлодіодів.

1. Встановіть двохполярну 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 провoda до верхнього, а спільним кінцем – до нижнього гнізда (поз. 3, рис. 2.3).
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, рис. 2.3).

Завдання 3. Дослідження роботи фотодіодів.

1. Переведенням перемикача (поз. 8, рис. 2.3) у положення «-», регулятор «РІВЕНЬ» (поз. 7) переводиться в середнє положення. «Y» – вхід осцилографа, підготовленого по п. 6.7 паспорта до установки, підключається сигнальним кінцем з'єднувального провoda до верхнього, а спільним кінцем – до нижнього гнізда (поз. 9, рис. 2.3).

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

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

4. Освітїть 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.

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

Завдання 4. Дослідження ВАХ фотодіодів.

1. Встановіть двохполярну 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).

2. На осцилографі встановіть масштаб по горизонталі 0,5 В/под.

3. На екрані осцилографа одержить ВАХ у прямокутній системі координат з початком у центрі екрана.

4. Вибір фотодіодів здійснюється перемикачем (поз. 10, рис. 2.3).

5. Наближенням джерела світла до фотодіода продемонструйте зміну зворотної вітки ВАХ (збільшення зворотного струму).

Завдання 5. Дослідження оптоелектронної пари світлодіод–фотодіод.

1. Встановіть живлення світлодіодів періодичними прямокутними імпульсами переведенням перемикача (поз. 5, рис. 2.3) у положення «_ _ _». Регулятор «УРОВЕНЬ» світлодіодів переводиться в крайнє положення за годинниковою стрілкою. Перемикачем (поз. 2, рис. 2.3) напруга живлення подається на інфрачервоний світлодіод оптопари.

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

3. На екрані осцилографа, що підключається як і в п. 3 та 4, дослідіть приймання фотодіодом прямокутного сигналу, випромінюваного світлодіодом. Поворотом регулятора «РІВЕНЬ» (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.

За результатами проведених досліджень зробити висновки.

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 різниця між вентильним та фотодіодним режимами роботи фотодіода?
6. У чому полягає основна особливість ВАХ фотодіода?
7. У чому полягає відмінність лазера та світлодіода?
8. З чого складається оптоелектронна пара?
9. Як вмикаюся в електричне коло фотодіоді та світлодіоди?
10. З яких речовин виготовляють фотодіоді та світлодіоди?

Лабораторна робота № 3

Зняття характеристик біполярних транзисторів

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

Прилади і матеріали

1. Панель з досліджуваним транзистором.
2. Регульовані блоки живлення (0-12 В, 0-20 В).
3. Реостат (28 Ом).
4. Вольтметр (В7-21А, М2042).
5. Міліамперметр (МВА-47/5).
6. Мікроампервольтметр (М 109/1).
7. З'єднувальні проводи.

Теоретичні відомості

Біполярний транзистор (*BJT*-транзистор – Bipolar Junction Transistor) – це напівпровідниковий електронний елемент, який має два *n-p*-переходи та три виводи, призначений для підсилення та генерування електричних сигналів, а також може працювати як електронний ключ. Транзистори – найбільш поширені елементи сучасної напівпровідникової електроніки. За роки свого розвитку транзистори істотно й неодноразово видозмінювалися за конструкцією, технологією виготовлення, електричними параметрами. Проте основні фізичні процеси, які відбуваються в них, залишилися незмінними.

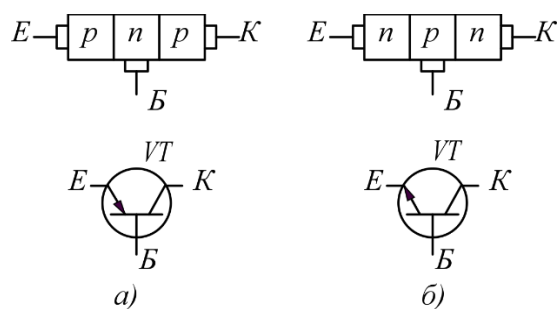


Рис. 3.1. Будова та умовне схематичне позначення біполярного транзистора структури *p-n-p* (а) та *n-p-n* (б).

Біполярний транзистор складається з трьох шарів напівпровідника, два з них мають однаковий тип провідності і розділені між собою шаром напівпровідника іншого типу електропровідності. Внаслідок цього утворюються транзисторні $p-n-p$ або $n-p-n$ структури з двома $n-p$ -переходами (рис. 3.1). Середню область називають базою (B), а дві крайні – колектором (K) та емітером (E). Транзистори структури $p-n-p$ називають транзисторами прямої провідності (рис. 3.1, *а*), а транзистори структури $n-p-n$ – зворотної провідності (рис. 3.1, *б*).

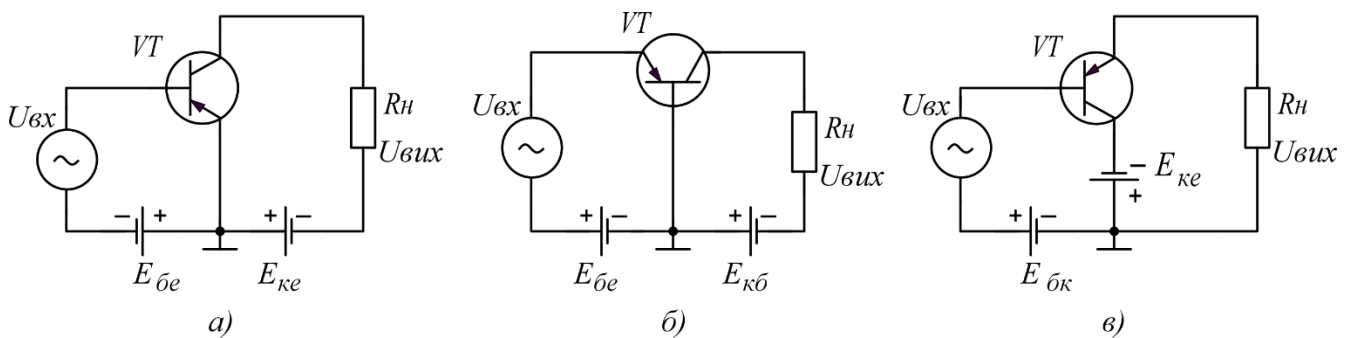


Рис. 3.2. Схеми вмикання транзистора: *а*) зі спільним емітером; *б*) зі спільною базою; *в*) зі спільним колектором.

Існують три основні схеми вмикання транзистора (рис. 3.2): із спільним емітером, із спільною базою та із спільним колектором.

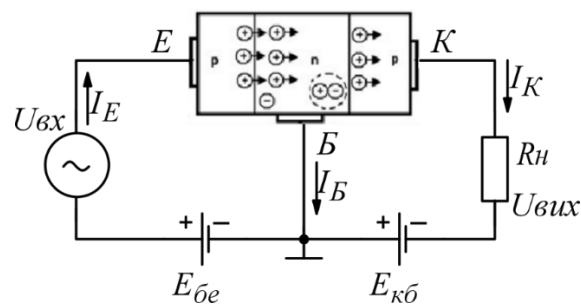


Рис. 3.3. Принцип дії біполярного транзистора.

Принцип дії транзистора ґрунтується на взаємодії двох $p-n$ -переходів (рис. 3.3). Один із $p-n$ -переходів транзистора через електроди з'єднують з джерелом постійної напруги, причому напівпровідник p -типу провідності використовується при роботі транзистора як основне джерело носіїв заряду (емітер). Через середній шар (базу) носії заряду проходять у другий напівпровідник p -типу провідності (колектор), який є збирачем носіїв заряду, інжектованих емітером, що пройшли

через шар бази. За допомогою струму в колі емітера у транзисторі здійснюється керування струмом у колі колектора. Обидва кола мають джерела електричної енергії.

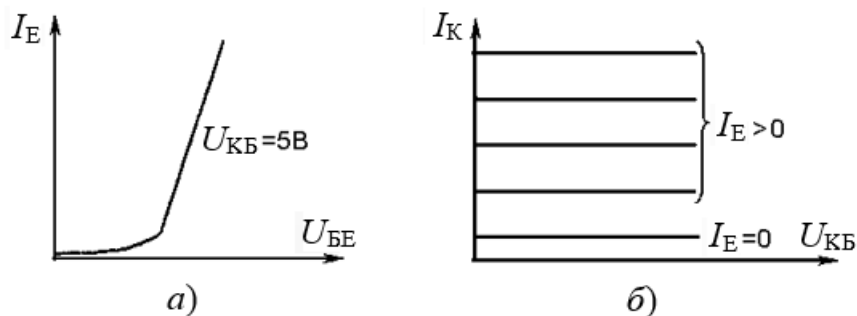


Рис. 3.4. ВАХ транзистора, увімкненого за схемою із спільною базою: а) вхідні; б) вихідні.

Залежність між струмом і напругою у вхідному та вихідному колах транзистора визначається його ВАХ. Сім'я ВАХ при вмиканні транзистора за схемою із спільною базою показана на рис. 3.4.

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

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

2) режим відсікання (відсічки) струму – на обидва *p-n*-переходи подані зворотні напруги. У такому випадку обидва переходи закриті, 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 *p-n*-переходи подані прямі напруги, тобто обидва *p-n*-переходи зміщено у прямому напрямку (транзистор повністю відкритий). У цьому режимі й емітер, і колектор інжектують електрони в базу, у результаті чого у 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 вищим, ніж в активному або інверсному режимах. Слід також

зазначити, що у зв'язку з насиченням бази транзистора і його $p-n$ -переходів надлишковими носіями заряду, їхні опори стають малими. 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 $p-n$ -переходу подається 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, то транзистор в інверсному режимі роботи практично не використовується.

Конструктивно біполярні транзистори виготовляються в металевих, пластмасових або керамічних корпусах. Як і для напівпровідникових діодів, для транзисторів існує буквено-цифрове або колірне маркування.

Біполярні транзистори сьогодні хоч і частково витіснені МДН-транзисторами (MOSFET), але все одно дуже широко застосовуються завдяки простоті, низькій вартості та хорошим характеристикам у певних режимах.

Основні сфери використання біполярних транзисторів: **підсилювальні каскади** (у радіоприймачах і підсилювачах звуку, у вимірювальній апаратурі для посилення слабких сигналів, у схемах передпідсилювачів мікрофонів та датчиків); **ключові (комутуючі) елементи** (у цифрових схемах, для керування реле, двигунами, світлодіодами від мікроконтролера, у перемикачах і генераторах); **силова електроніка** (в імпульсних блоках живлення (на вихідних каскадах або для допоміжних вузлів), у DC-DC перетворювачах, у схемах стабілізаторів напруги); **радіотехніка та зв'язок** (генератори високої частоти, підсилювачі проміжної та високої частоти, модулятори та демодулятори сигналів.); **імпульсна техніка** (у схемах формування та обробки імпульсів, у пристроях автоматики та цифрових індикаторах старого зразка); **автомобільна та побутова електроніка** (керування датчиками й актуаторами, використання в системах запалювання, підсилювачах аудіо, блоках живлення).

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло, схема якого зображена на рис.3.5, для дослідження транзистора, ввімкненого із спільним емітером.

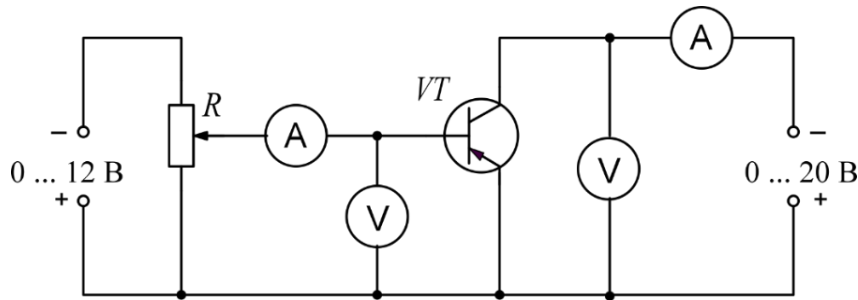


Рис. 3.5. Схема досліджуваного електричного кола.

2. Встановити напругу на колекторі транзистора $U_{KE}=0$.
3. 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.
4. Побудувати графічно сім'ю вхідних статичних характеристик біполярного транзистора.
5. 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.
6. Побудувати графічно сім'ю вихідних статичних характеристик транзистора.
8. Користуючись сім'єю вихідних статичних характеристик транзистора, визначити його коефіцієнт підсилення за струмом:

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B},$$

при $U_{KE}=\text{const.}$

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

$$R_{BX} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B},$$

при $U_{KE}=\text{const.}$

Контрольні запитання

1. З чого конструктивно складається біполярний транзистор?
2. У яких електронних пристроях використовують біполярні транзистори?
3. Як на електронних схемах позначають біполярні транзистори?
4. Поясніть принцип дії біполярного транзистора.
5. Назвіть основні режими роботи біполярних транзисторів.
6. Які існують типи маркування біполярних транзисторів.
7. Які розрізняють схеми вмикання транзисторів?
8. У чому особливість активного режиму роботи біполярного транзистора?
9. У чому особливість режиму відсікання біполярного транзистора?
10. Зобразіть та поясніть вхідні та вихідні ВАХ транзистора.
11. Як визначається коефіцієнт підсилення за струмом біполярного транзистора?

Лабораторна робота № 4

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. Регульовані джерела живлення (0-10 В, 0-25 В).
3. Два вольтметри.
4. Мікроамперметр.

Теоретичні відомості

Напівпровідникові електронні елементи, в основі принципу дії яких лежить зміна електропровідності каналу поперечним електричним полем, називають

польовими транзисторами. В утворенні електричного струму через польовий транзистор беруть участь носії одного типу (електрони або 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 МДН-транзистори з індукованим каналом.

Польові транзистори з керуючим p - n -переходом ($JFET$ -транзистори)

Принцип дії польового транзистора з керуючим p - n -переходом розглянемо на основі моделі, показаної на рис. 4.1, *а*. Каналом для проходження струму в такому транзисторі є шар напівпровідника n -типу провідності, розміщений між двома p - n -переходами. Електрод, від якого починають рух носії заряду (в даному випадку електрони), називають витком (B), а електрод, до якого вони рухаються - стоком (C). 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 спільний зовнішній електрод, який називається затвором ($З$). Подібну конструкцію мають і польові транзистори з каналом p -типу.

Умовні позначення польових транзисторів з каналами n - та p -типу наведено на рис. 4.1, *б* та рис. 4.1, *в*.

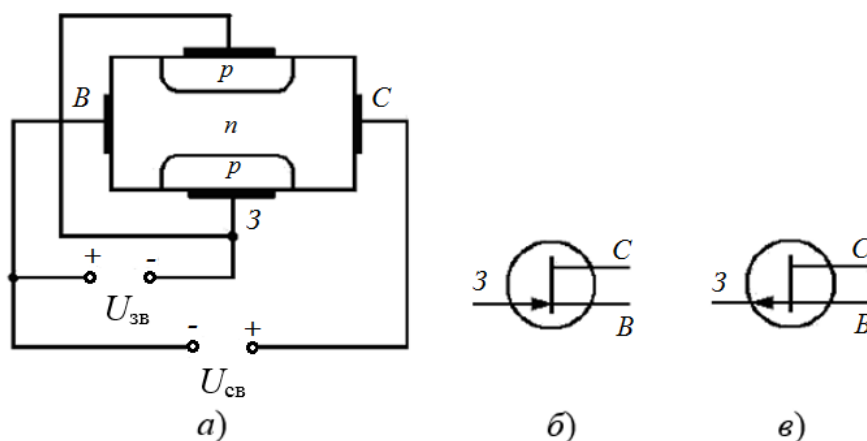


Рис. 4.1. *а*) будова польового транзистора з керуючим p - n -переходом; *б*) умовне позначення польового транзистора з індукованим каналом n -типу *в*) умовне позначення польового транзистора з індукованим каналом p -типу.

Полярність зовнішніх напруг, які подаються на транзистор, показана на рис. 4.1, *а*. Керуюча (вхідна) напруга подається між затвором і витком. Напруга $U_{зв}$ зворотна для обох p - n -переходів. У вихідне коло, в яке входить канал транзистора, подається напруга $U_{св}$ позитивним полюсом до стоку.

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 площі поперечного 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. 4.2.

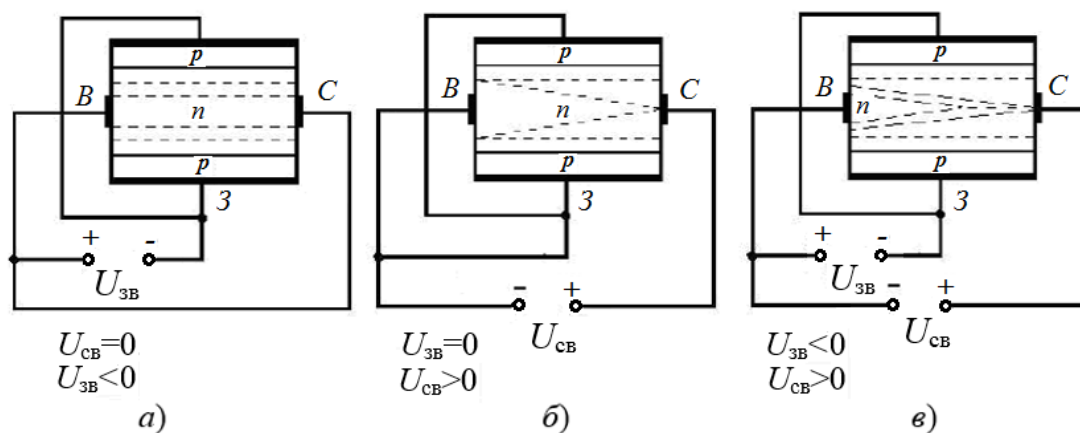


Рис. 4.2. Вплив напруг $U_{зв}$ та $U_{св}$ на провідність каналу.

На рис. 4.2, *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. 4.2, *б* ілюструє зміну площі перерізу каналу при дії тільки напруги $U_{св}$ ($U_{зв}=0$). При $U_{св}>0$ 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 $U_{\text{св}}$. Зважаючи на це, потенціали точок каналу n -типу будуть неоднаковими по його довжині, зростаючи в напрямку стоку від нуля до $U_{\text{св}}$. Потенціал точок p -області відносно витоку визначається потенціалом затвора відносно витоку і в даному випадку дорівнює нулю. У зв'язку із зазначеним, зворотна напруга, прикладена до p - n -переходів, зростає в напрямку від витоку до стоку, і переходи розширюються в напрямку стоку. Дане явище призводить до зменшення площі перерізу каналу від витоку до стоку (рис. 4.2, б). Підвищення напруги $U_{\text{св}}$ викликає збільшення спаду напруги в каналі і зменшення його перерізу, а отже, призводить до зменшення провідності каналу. При певній напрузі $U_{\text{св}}$ відбувається звуження каналу, при якому границі обох p - n -переходів змикаються (рис. 4.2. б) і опір каналу стає високим. На рис. 4.2, в відображено результат впливу на канал обох напруг $U_{\text{зв}}$ і $U_{\text{св}}$.

Стокові вольт-амперні характеристики (вихідні ВАХ) польового транзистора з керуючим p - n -переходом і каналом n -типу показані на рис. 4.3, 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 $U_{\text{св}}$ (початкова область), 2 – слабка залежність струму стоку від напруги $U_{\text{св}}$ (режим насичення струму стоку), 3 – область електричного пробоя p - n -переходу.

В області малої напруги $U_{\text{св}}$ (рис. 4.3, 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 $I_{\text{с}}$ від напруги $U_{\text{св}}$. 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.

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 $U_{\text{св.нас}}$. Подальше підвищення напруги мало змінює значення струму, оскільки одночасно зі зростанням напруги буде збільшуватися опір каналу, бо збіднена носіями область об'ємного заряду продовжує збільшуватися,

заповнюючи канал від стоку до витіку. 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 пробую відповідає точці в.

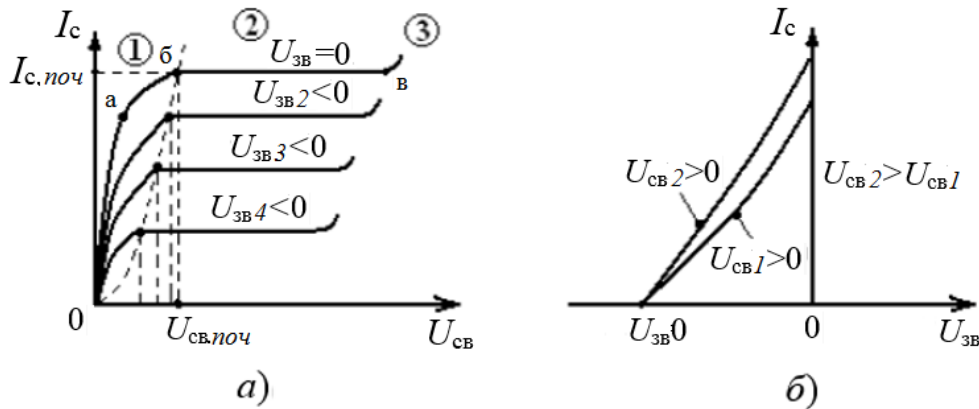


Рис. 4.3. а) стокові (вихідні) ВАХ польового транзистора. б) стік-затворні ВАХ польового транзистора.

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. 4.3, 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 б ВАХ 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 ВАХ показує залежність струму стоку від напруги затвор-витік при фіксованій напрузі стік-витік. Приблизний вигляд цієї характеристики

зображений на рис. 4.3, б. Стік-затворна характеристика пов'язана з вихідними характеристиками польового транзистора і може бути побудована на їх основі.

При роботі транзистора на похилій ділянці стокової ВАХ при заданій напрузі $U_{зв}$ струм стоку визначають з виразу:

$$I_c = I_{c.n.} \left(1 - \frac{U_{зв}}{U_{зв}(0)} \right)^2, \quad (4.1)$$

де $I_{c.n.}$ – 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 $U_{св}$

$$S = \frac{dI_c}{dU_{зв}}. \quad (4.2)$$

Крутизна характеристики приймає максимальне значення $S_{п}$ при $U_{зв}=0$. Для визначення значення крутизни при будь-якій напрузі $U_{зв}$ потрібно продиференціювати вираз (4.1):

$$\frac{dI_c}{dU_{зв}} = \left(\frac{2I_{c.n.}}{U_{зв}(0)} \right) \left(1 - \frac{U_{зв}}{U_{зв}(0)} \right). \quad (4.3)$$

При $U_{зв}=0$ вираз (4.3) матиме вигляд:

$$\frac{dI_c}{dU_{зв}} = S_{п.} = \left(\frac{2I_{c.n.}}{U_{зв}(0)} \right). \quad (4.4)$$

Підставивши (4.4) у вираз (4.3), отримаємо:

$$S = S_{п.} \left(1 - \frac{U_{зв}}{U_{зв}(0)} \right). \quad (4.5)$$

Основними параметрами польового транзистора є максимально допустимий струм стоку – $I_{с.макс.}$, 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. 4.3, 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. 4.3, б). Вхідний опір $R_{вх}=dU_{зв}/dI_з$ транзистора визначається опором p - n -переходів, зміщених у зворотному напрямку.

МНД-транзистори (MOSFET-транзистори)

МНД-транзистори (метал-діелектрик-напівпровідник) 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, у 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. Часто МНД-транзистори називають MOSFET-транзисторами (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor).

Найчастіше МНД-транзистори виготовляють з кремнію. Як діелектрик використовують оксид кремнію. Звідси інша назва цих транзисторів - МОН-транзистори (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 – це чотирьохелектродний елемент. 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. 4.5. На рис. 4.5, *а*, та рис. 4.5, *б* – транзистори з вбудованим і з індукованим каналом n -типу, на рис. 4, *в*, *г* – транзистори з каналом p -типу.

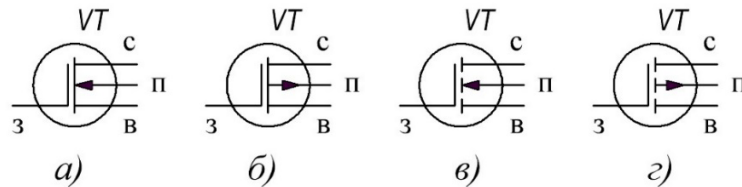


Рис. 4.5. Умовні позначення МНД-транзисторів. *а*) транзистори з вбудованим каналом n -типу; *б*) транзистори з вбудованим каналом p -типу; *в*) транзистори з індукованим каналом n -типу; *г*) транзистори з індукованим каналом p -типу.

Розглянемо особливості МНД-транзисторів з вбудованим каналом. Конструкція такого транзистора з каналом n -типу показана на рис. 4.6, *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. 4.6, *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 помітне зростання об'ємного заряду в області стоку, оскільки тут зворотна напруга на переході має найбільше значення. У результаті площа перерізу 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 $U_{\text{св}}$ 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.

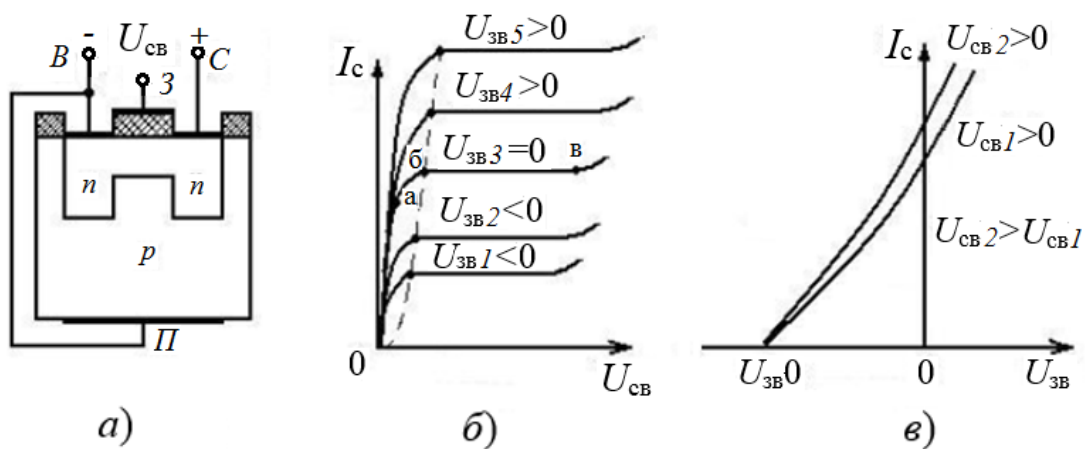


Рис. 4.6. а) будова МНД-транзистора з вбудованим каналом n -типу; б) стокові (вихідні) характеристики польового транзистора з вбудованим каналом n -типу; в) стік-затворна характеристика транзистора з вбудованим каналом.

Далі розглянемо вплив напруги $U_{\text{зв}}$ на хід стокових характеристик. У випадку прикладання до затвору напруги $U_{\text{зв}} < 0$ 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 $U_{\text{зв}} < 0$ розташовуються нижче кривої, що відповідає $U_{\text{зв}} = 0$. Режим роботи транзистора, при якому відбувається зменшення концентрації заряду в каналі, називають режимом збідніння.

При подачі на затвор напруги $U_{\text{зв}} > 0$ 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 $U_{\text{зв}} > 0$ 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 $U_{сз.пр}$ (область 3). Якщо $U_{зв}<0$ напруга $U_{сз}$ збільшується, у зв'язку з чим пробій починається при меншій напрузі $U_{сз}$.

Стік-затворна характеристика транзистора з вбудованим каналом зображена на рис. 4.6. 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. 4.7, 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 якій індукується канал, називають пороговою напругою $U_{зв.пор}$.

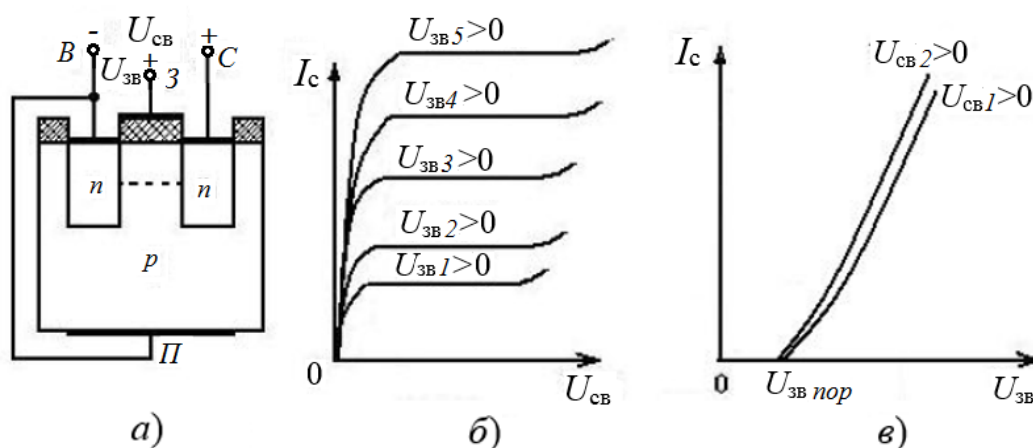


Рис. 4.7. а) конструкція МНД-транзистора з індукованим каналом n -типу; б) стокові характеристики польового транзистора з індукованим каналом n -типу; в) стік-затворна характеристика транзистора з індукованим каналом.

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

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись в табл. 4.3 з довідниковими даними польового транзистора КП301Б. Виписати їх в зошит.

2. Скласти електричне коло відповідно до схеми (рис. 4.8) для дослідження транзистора КП301Б.

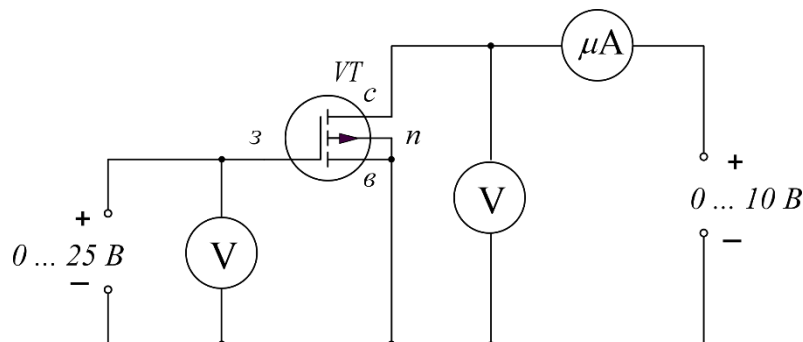


Рис. 4.8. Схема для дослідження транзистора КП301Б.

3. Межу вимірювань струму мікроамперметра встановити на 200 мкА.
4. Межу вимірювань напруги обох вольтметрів встановити на 20 В.
5. Зняти сім'ю стік-затворних характеристик $I_{\text{с}}=f(U_{\text{зв}})$ при напругах $U_{\text{св}}=2$ В та $U_{\text{св}}=4$ В, $U_{\text{св}}=6$ В.
6. Напругу $U_{\text{зв}}$ змінювати в межах від 1 до 12 В через 1 В.
7. Результати вимірювань записати в табл. 4.1.
8. Зняти сім'ю стокових характеристик $I_{\text{с}}=f(U_{\text{св}})$ при напрузі на затворі: $U_{\text{зв}}=5$ В; $U_{\text{зв}}=6$ В; $U_{\text{зв}}=7$ В; $U_{\text{зв}}=8$ В.

Таблиця 4.1.

$U_{ЗВ}$, В	I_C , мкА		
	$U_{СВ}=2$ В	$U_{СВ}=4$ В	$U_{СВ}=6$ В

9. Напругу $U_{СВ}$ змінювати в мажах від 1 до 10 В через 1 В.
10. Результати занести до табл. 4.2.
11. На основі проведених досліджень зробити висновки.

Таблиця 4.2.

$U_{СВ}$, В	I_C , мкА			
	$U_{ЗВ}=5$ В	$U_{ЗВ}=6$ В	$U_{ЗВ}=7$ В	$U_{ЗВ}=8$ В

Контрольні запитання

1. Дайте визначення термінам «транзистор» та «польовий транзистор».
2. Поясніть відмінність польових транзисторів з керуючим p - n -переходом та польових транзисторів ізольованим затвором.
3. Поясніть принцип дії польового транзистора з керуючим p - n -переходами.
4. Намалюйте умовні графічні позначення різних типів польових транзисторів.
5. Як називаються виводи польових транзисторів?
6. Поясніть принцип дії та будову польового транзистора з ізольованим затвором.
7. Поясніть принцип дії та будову польового транзистора з індукованим каналом n -типу.
8. Зобразіть типові статичні характеристики польового транзистора та коротко охарактеризуйте їх.
9. Як визначити крутизну стік-затворної характеристики та активну вихідну провідність?
10. Де використовують польові транзистори?

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.

Таблиця 4.3. Електричні параметри польового транзистора КП301Б.

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	$(-45...+70)$ °С

Лабораторна робота № 5

Дослідження роботи тиристора та використання тиристора 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 (0-12 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 проводи.

Теоретичні відомості

Тиристорами називаються напівпровідникові електронні елементи з трьома і більше p - n -переходами. Найчастіше тиристори використовують в якості електронних ключів у 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 струм у зворотному напрямку та симетричні.

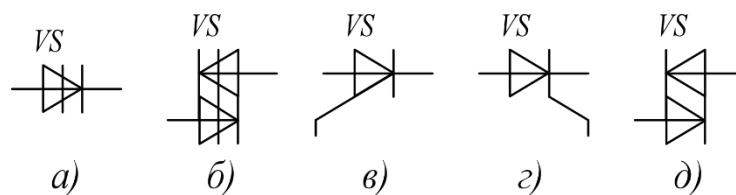


Рис. 5.1. Умовні графічні позначення тиристорів: *а* – диністор; *б* –симетричний тиристор (симетричний диністор); *в* – тиристор з керуванням по аноду; *г* – тиристор з керуванням по катоду; *д* –симетричний триністор (симістор).

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

Принцип дії тиристорів. Найпростіші діодні тиристори, що вмикаються в зворотному напрямку, зазвичай виготовляються з кремнію і складаються з чотирьох p - і n -областей, які чергуються (рис. 5.2, *а*). Область p_1 , у 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. 5.2, *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 $p_1-n_1-p_2$.

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 більший одиниці.

Якщо до тиристора підключити джерело напруги, як показано на рис. 5.2. а, то p - n -переходи Π_1 і Π_3 виявляться відкритими, а перехід Π_2 —закритим. Його називають колекторним переходом. Майже весь спад напруги формується на ньому.

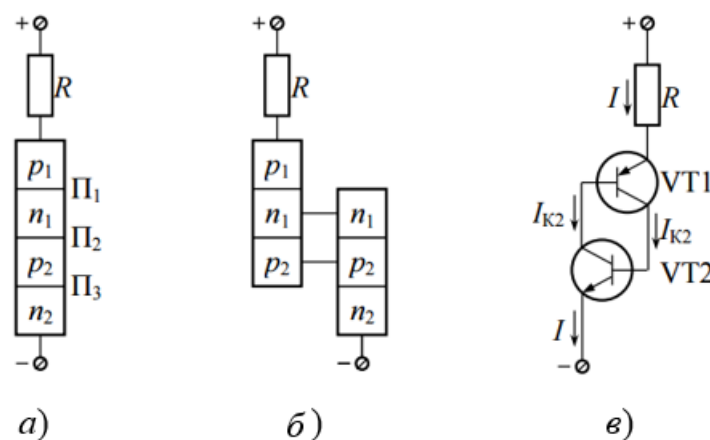


Рис. 5.2. Структура діодного тиристора.

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 $U_{\text{вкл}}$ 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 P_1 і P_3 , і збільшення інжекції через них, що викликає подальше зростання колекторного струму і збільшення струмів інжекції. Процес відбувається лавиноподібно, і опір переходу P_2 стає малим. У результаті падіння напруги на тиристорі стає незначним, а струм через нього обмежується тільки опором R .

На ВАХ (рис. 5.3) закритому стану тиристора відповідає ділянка 1. Процес лавинного розмноження носіїв заряду відображає ділянку 2 з негативним диференціальним опором. Після перемикавання ВАХ тиристора аналогічна вітці ВАХ діода, зміщеного в прямому напрямку (ділянка 3).

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

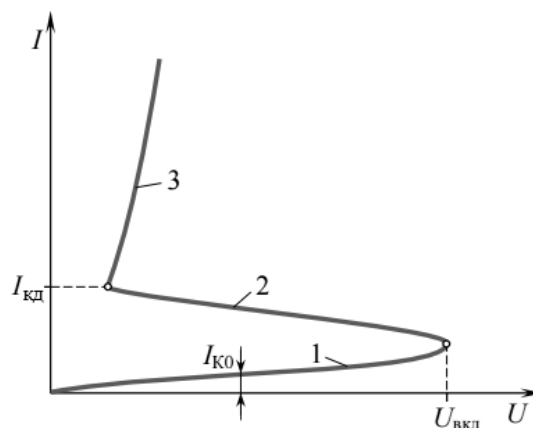


Рис. 5.3. ВАХ тиристора.

Керовані тиристори. Тріодний тиристор відрізняється від діодного тим, що одна з його 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. 5.4, а показано включення джерела керуючого струму в базову p -область другого еквівалентного транзистора. Струм, що викликає перемикавання тиристора, називають керуючим струмом $I_{\text{К}}$.

Симістори. У сучасній електроніці для комутації кіл 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).

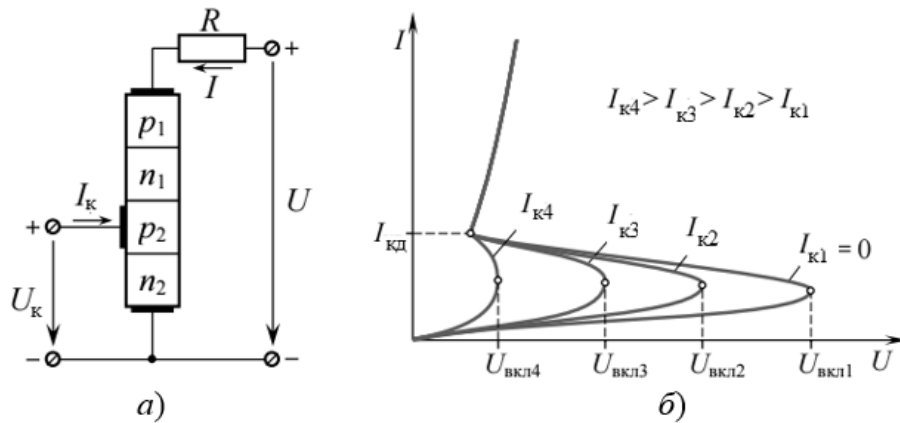


Рис. 5.4. Тиристор, керований по катоду: а) структурна схема; б) ВАХ.

Використання тиристорів, схеми вмикання. На даний час тиристори знаходять найрізноманітніше застосування як в промисловій, так і в побутовій апаратурі. Наприклад, у пристроях електроживлення (випрямлячі, перетворювачі енергії, частотні регулятори, регулятори потужності), також застосовуються в пристроях керування електроприводом, пристроях захисту і комутації.

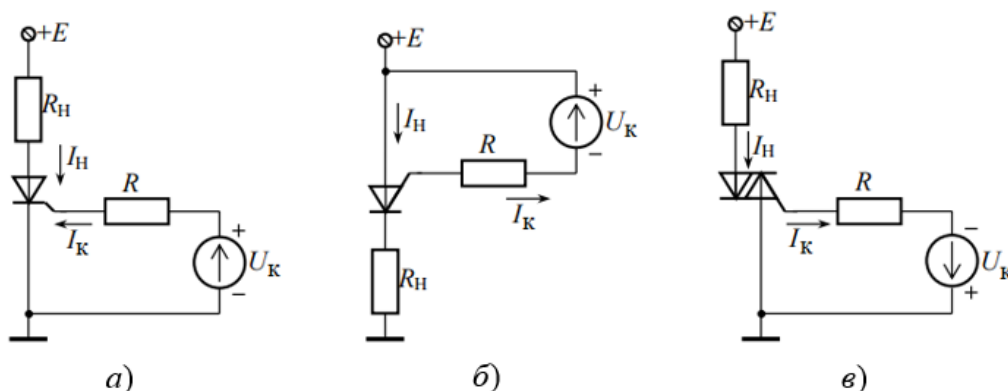


Рис. 5.5. Схеми ввімкнення тиристорів: а) з керуванням по катоду; б) з керуванням по аноду; в) керування симістором.

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. Регулювання потужності, з використанням тиристора, досягається подачею на навантаження змінної напруги протягом лише частини періоду (рис. 5.6). Такий спосіб регулювання потужністю одержав назву фазового регулювання.

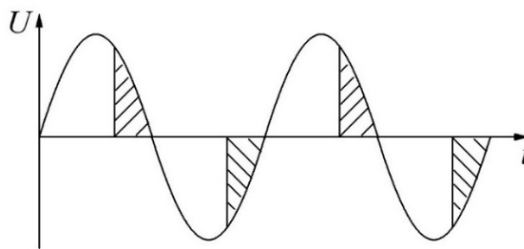


Рис. 5.6. Напруга при фазовому регулюванні потужності.

У схемі, зображеній на рис. 5.9, в діагональ містка увімкнений тиристор. Керування тиристором здійснюється напругою, яка знімається з конденсатора C . Час вмикання тиристора відносно фази напруги живлення, відповідно, і потужність споживача залежать 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 проходить через споживач, залежить від часу знаходження тиристора у відкритому стані.

Порядок виконання роботи

Завдання 1. Дослідження електронного ключа на тиристорі

1. Скласти електричне коло (рис. 5.7) для дослідження електронного 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 , записати значення сили струм керуючого електрода тиристора VS і напругу на ньому, при якій ввімкнеться лампа.

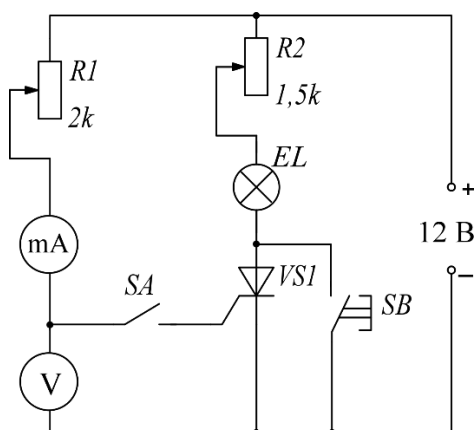


Рис. 5.7. Схема для дослідження електричного ключа на тиристорі.

5. Вимикачем SA вимкнути напругу на керуючому електроді, відмітивши при цьому стан, у якому буде знаходитись тиристор.

6. Натисканням кнопки SB заблокувати тиристор VS , відмітивши, у якому стані він буде знаходитись після відпускання кнопки.

7. Вимкнути напругу живлення схеми.

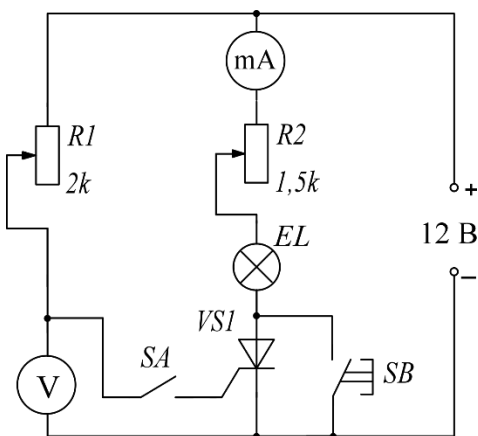


Рис. 5.8. Схема для дослідження електричного ключа на тиристорі.

8. Скласти електричну схему (рис. 5.8), ввімкнувши міліамперметр в анодне коло тиристора.

9. Збільшуючи опір резистора R_2 , записати у звіт значення сили струму, при

якому відбудеться вимкнення тиристора VS .

10. Усі висновки, зроблені на основі досліджень, подати у формі звіту до лабораторної роботи.

Завдання 2. Використання тиристора у схемі регулювання потужності електричного струму

1. Скласти електричне коло відповідно до схеми, зображеної на рис. 5.9, у якому споживана потужність регулюється тиристором.

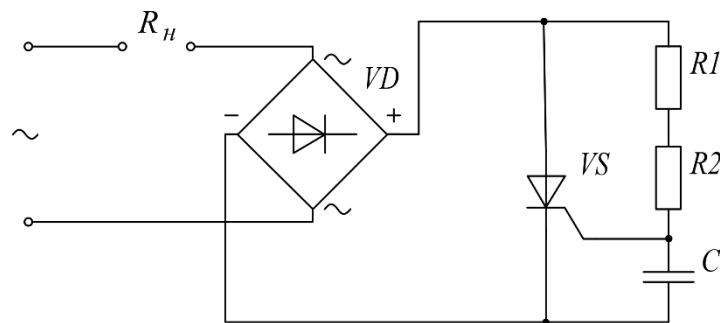


Рис. 5.9. Схема регулювання потужності тиристором.

2. Подати напругу живлення на коло.
3. Дослідити, що час і величина сили струму, який протікає через резистор навантаження R_n , залежить від часу знаходження тиристора у відкритому стані.
4. Отримати на осцилографі різні форми напруги на навантаженні, при двохпівперіодному випрямленні з фазовим регулюванням потужності.
5. На основі проведених досліджень зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення тиристора.
2. З чого складається тиристор?
3. Як називаються електроди тиристорів?
4. Назвіть основні типи тиристорів.
5. Як на схемах електричних кіл позначають тиристори?
6. Яка причина нелінійності ВАХ тиристора?
7. Які тиристори називаються керованими тиристорами?
8. Яке призначення керуючого електрода в тиристорі?
9. Як перевести тиристор з відкритого стану в закритий?

10. У чому полягає суть фазового регулювання споживаною потужністю?
11. Перерахуйте особливості симісторів.
12. У яких пристроях використовують тиристори?

Лабораторна робота № 6

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.
7. З'єднувальні проводи.

Теоретичні відомості

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

На рис. 6.1, 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. 6.1, а). На ділянці OF транзистори працюють у режимі відсікання, на ділянці FK - у лінійному режимі, на ділянці KG - у режимі

насичення. Якщо навантажувальна пряма MD перетинає ВАХ S-типу у трьох точках, то пристрій може виконувати функції тригера. Якщо пряма навантаження 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 прямою навантаження BC у двох точках пристрій працює в пороговому (ключовому) режимі. Таким чином, однакові пристрої можуть виконувати різні функції, що є їх основною перевагою.

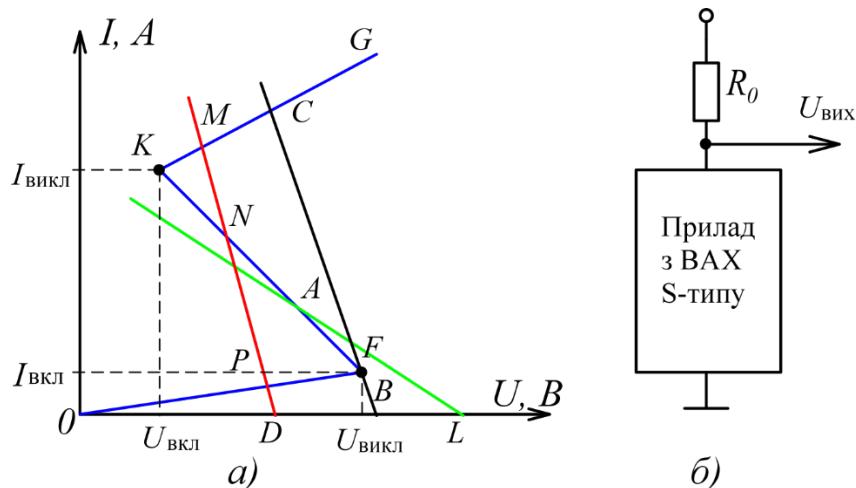


Рис. 6.1. а) вибір робочої точки на ВАХ S-типу, б) структурна схема радіотехнічного приладу, який містить прилад з від'ємним диференціальним опором.

Короткий порівняльний аналіз промислових приладів з від'ємним диференціальним опором дозволяє зробити висновок, що ці прилади (диністори, тиристори, одноперехідні і лавинні транзистори) можуть працювати в будь-якому з режимів (підсилювальному, генераторному, ключовому). Для них характерна мала споживана потужність 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 багатьма характерними для цих приладів недоліками. 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. Усі ці недоліки і визначили область їх застосування в імпульсних пристроях, які не вимагають високих метрологічних характеристик.

Природно, що потреби практичного використання вимагають варіювання основних параметрів ВАХ. Тому постає задача створення приладів, у 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 перерахованих недоліків є розробка транзисторних аналогів, або, як їх часто називають, еквівалентів. Слід відмітити, що ця назва не відповідає еквівалентності фізичних процесів у вказаних пристроях, а лише аналогію їх ВАХ.

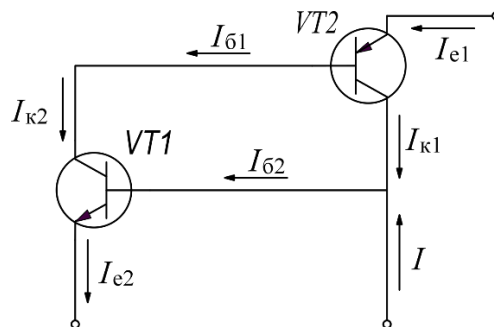


Рис. 6.2. Схема тиристорної *p-n-p-n*-структури.

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

На рис. 6.2 зображений двополіусник – аналог *p-n-p-n*-структури.

Якщо в двополіуснику 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 двополіусник 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. 6.3.

При роботі на ділянці OF ВАХ (рис. 6.1, a) пристрій практично не споживає струму від джерела живлення, так як транзистори закриті. Напруга, при якій відкриваються транзистори, близька до напруги пробою. При увімкненні 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 пробою транзисторів. При великих значеннях опорів резисторів $R_{кб}$ (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 за напруги пробою транзисторів. У цьому випадку від'ємний диференціальний опір зменшиться, відповідно, зміняться параметри ВАХ.

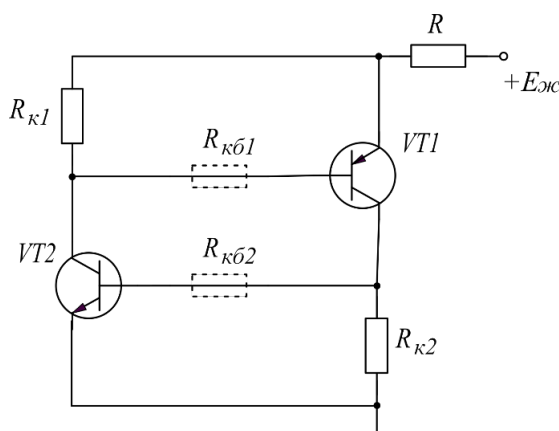


Рис. 6.3. Схема транзисторного еквівалента.

Різновидністю транзисторних еквівалентів $p-n-p-n$ -структури є схема, зображена на рис. 6.4.

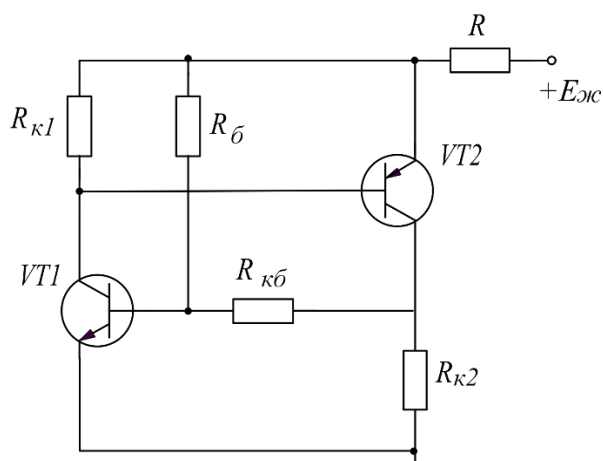


Рис. 6.4. Схема асиметричного транзисторного еквівалента $p-n-p-n$ -структури.

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

Коли спад напруги на резисторах $R_{кб}$ і $R_{к2}$ стає рівним напрузі на переході база-емітер $U_{бел}$, 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 $R_б$, а транзистор $VT2$ – потужний з низькоомним колекторним резистором.

Після вмикання пристрою більша частина струму проходить через колекторне коло потужного транзистора. Введенням резистора $R_{кб}$ у коло додатного зворотного зв'язку і зміною величини його опору 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 рис. 6.5.

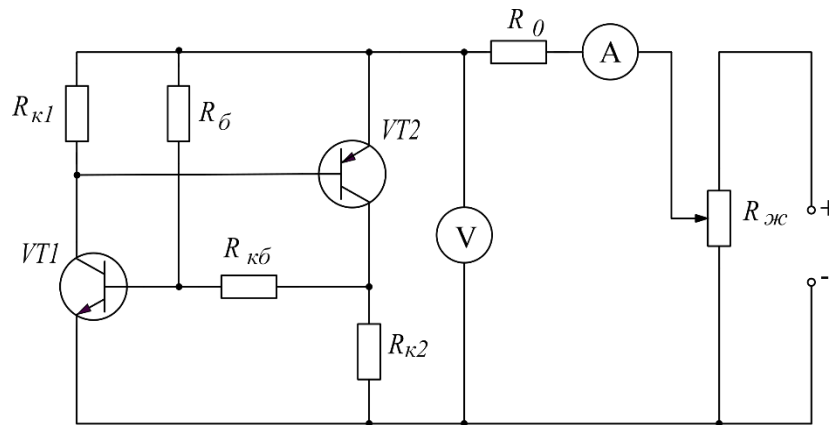


Рис. 6.5. Схема для дослідження транзисторного еквівалента $p-n-p-n$ -структури.

2. Межі вимірювань струму амперметра встановити на 200 мА.
3. Зняти ВАХ, змінюючи напругу живлення резистором $R_{жс}$ 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 записати у таблицю.
7. За даними таблиці побудувати графік ВАХ приладу.
8. За результатами проведених досліджень зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Чому еквіваленти приладів з від'ємним диференціальним опором на транзисторних схемах є багатофункціональними?
2. Які транзистори використовують у схемах, представлених в даній лабораторній роботі.
3. Поясніть особливості ВАХ еквівалентів приладів з від'ємним диференціальним опором.
4. Дайте визначення зворотного зв'язку в електронних пристроях.
5. Де в сучасній електроніці використовуються еквіваленти приладів з від'ємним диференціальним опором?
6. Охарактеризуйте основні електричні схеми еквівалентів приладів з від'ємним диференціальним опором.
7. Чим обумовлюється ділянка з від'ємним диференціальним опором?

Лабораторна робота № 7

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 проводи.

Теоретичні відомості

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

$$E_H = R \cdot H \cdot j \cdot \sin \alpha, \quad (7.1)$$

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

$$E_H = R \cdot H \cdot j.$$

Величина R називається коефіцієнтом (сталою) Холла і є основною характеристикою ефекту Холла. Ефект відкритий Едвіном Гербертом Холлом у 1879 році в тонких пластинках золота. Для спостереження ефекту Холла вздовж прямокутних пластин (рис. 7.1) з досліджуваних речовин, довжина яких l значно більша за ширину b і товщину 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 :

$$U_H = E_H \cdot b = \frac{R \cdot H \cdot j}{d} \quad (7.2)$$

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

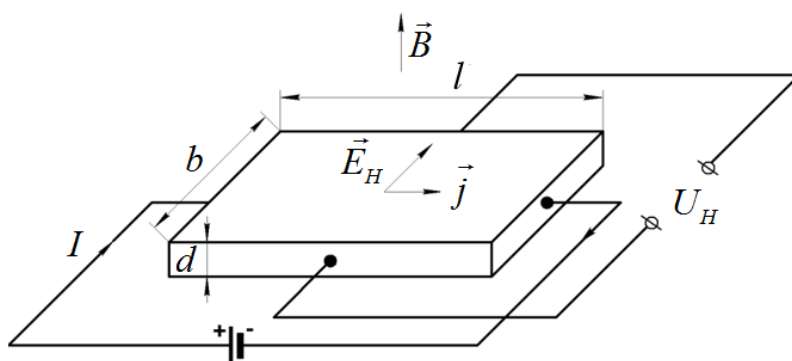


Рис. 7.1. Виникнення ефекту Холла.

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

$$\vec{j} = n \cdot e \cdot \vec{v}_{др},$$

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

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

під дією якої частинки відхиляються в напрямку, перпендикулярному $\vec{v}_{др}$ і $\vec{B}$. 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

$$e \cdot E_H = e \cdot B \cdot v_{dp},$$

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

звідси

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

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 менша і $R \sim 10^5 \text{ (см}^3/\text{Кл)}$. Коефіцієнт Холла R може бути виражений через рухливість носіїв заряду

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

і питому електропровідність

$$\sigma = \frac{j}{E} = \frac{n \cdot e \cdot v_{dp}}{E}.$$

$$R = \frac{\mu}{\sigma} \quad (7.3)$$

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

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 :

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

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

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

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

а знак R вказує на переважаючий тип провідності.

Датчики магнітного поля, генератор Холла

Датчики магнітного поля забезпечують на виході електричну напругу, пропорційну величині індукції магнітного поля. У вимірювальній техніці широко застосовується генератор Холла, який є вимірювальним приладом для визначення індукції магнітного поля. Його принцип дії заснований на вимірюванні напруги Холла U_H , пропорційної до індукції магнітного поля, при постійному керуючому струмі I .

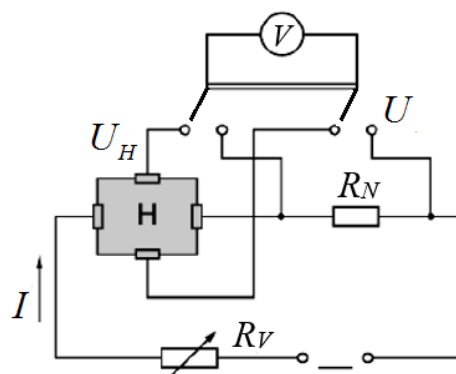


Рис. 7.2. Генератор Холла.

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 напруги Холла. За наявності двох прямокутних, розташованих один навпроти одного, датчиків Холла можна визначити напрямок магнітного поля.

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 від 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. Датчики на базі сенсора SS94A1 мають двохтактний 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 параметри та характеристики досліджуваного датчика Холла

Датчик Холла ДХК-0,5А призначений для вимірювання величини індукції магнітного поля на основі перетворення магнітної індукції у вихідну напругу. Датчик виконаний на основі планарної топологічної структури, сформованої на поверхні кремнієвого кристала. На рис. 7.3 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).

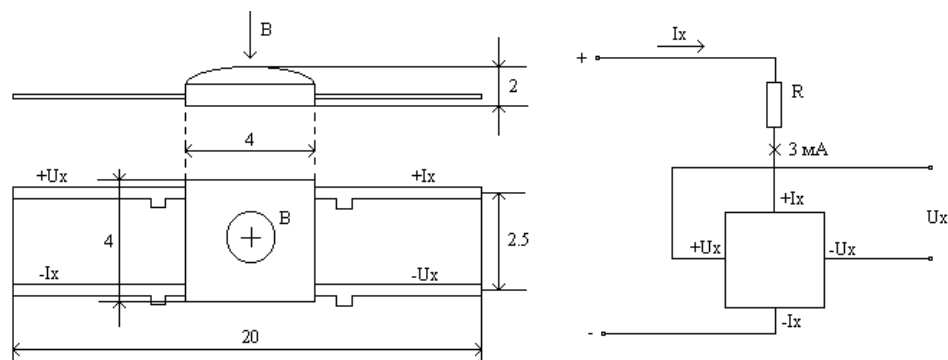


Рис. 7.3. Розміщення виводів датчика Холла ДХК-0,5А та схема його вмикання.

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:

$$U_{вих} = U_X - (-U_X) = K \cdot \left(\frac{I_X}{3} \right) \cdot B$$

де I_X – значення керуючого струму в мА, K – чутливість в мВ/Т (близько 280 мВ/Т), B – величина магнітної індукції в теслах.

На рис. 7.3 показана схема вмикання датчика ДХК-0,5А. Датчик є знакочутливим як до напрямку магнітної індукції, так і до полярності керуючого струму.

Порядок виконання роботи

1. Розмістити датчик Холла між полюсами електромагніту.
2. Підключити електромагніт до джерела живлення Б5-49.
3. Увімкнути живлення датчика Холла та за допомогою змінного резистора і мультиметра встановити робочий струм датчика 5 мА.

4. До сигнальних виходів датчика під'єднати вольтметр.
5. Змінюючи силу струму джерела живлення, зняти залежність показів вольтметра від сили струму через котушки електромагніту.
6. Повторити вимірювання при силі струму 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 сили струму живлення електромагніту.
8. При сталому значенні сили струму живлення електромагніту зняти залежність напруги Холла від керуючого струму датчика. Повторити вимірювання, змінивши напругу живлення електромагніту.
9. Провести градування електромагніту, знаючи чутливість датчика та вважаючи, що залежність вихідної напруги датчика Холла від величини магнітного поля є прямою лінією.
10. Оцінити значення сталої Холла напівпровідникового матеріалу датчика, вважаючи, що товщина пластини напівпровідника 0,5 мм.
11. На основі проведених досліджень зробити висновки.

Контрольні запитання

1. У чому полягає ефект Холла?
2. Як в електроніці використовується ефект Холла?
3. Перерахуйте основні типи датчиків Холла.
4. Для чого призначений датчик Холла ДХК-0,5А?
5. Перерахуйте основні параметри датчиків Холла.
6. Як за допомогою ефекту Холла визначають тип провідності напівпровідникового матеріалу.
7. Поясніть принцип дії датчика Холла.
8. Що собою являють генератори Холла?
9. У чому особливість датчика Холла з логічним виходом?
10. Запишіть та поясніть формулу для визначення напруги Холла.

РОЗДІЛ 2. АНАЛОГОВІ ТА ЦИФРОВІ ПРИСТРОЇ

Лабораторна робота № 8

Пайка як метод з'єднання компонентів електронних пристроїв

Мета роботи: засвоїти принципи й прийоми ручного паяння ТHT- та SMD-компонентів. Навчитися користуватись класичним паяльником і гарячоповітряною станцією Lukey 852D+FAN. Відпрацювати техніку формування якісного паяного з'єднання та навички демонтажу. Ознайомитися з типами припоїв і флюсів, типами жал, профілем температур і контролем якості.

Прилади і матеріали

1. Паяльна станція Lukey 852D+FAN з набором насадок.
2. Паяльник (25–60 Вт) або паяльна станція з регулюванням температури, набір жал (конусне, типу «олівець», «плоске»).
3. Тримач для паяння «Третя рука».
4. Цифровий електронний мікроскоп GAOSUO G1200HDB.
5. Припої, флюси, паяльна оплітка, спиртові серветки.
6. Мультиметр.

Теоретичні відомості

У паянні використовують різні методи залежно від типу елементів, складності монтажу та вимог до якості з'єднань. До основних методів паяння відносять: ручне паяння, паяння у ванні з розплавленим припоєм, поверхневий монтаж (SMT) та паяння в печі, паяння гарячим повітрям, лазерне паяння, індукційне паяння, ультразвукове паяння.

Ручне паяння

Це найстаріший і одночасно найпоширеніший метод монтажу електронних елементів та ремонту електронних пристроїв. За допомогою ручного паяння здійснюють як первинний монтаж окремих вузлів, так і модифікацію або ремонт готових плат. Суть цього методу полягає у нагріванні контактів електронних

елементів і майданчиків друкованої плати за допомогою паяльника або паяльної станції, після чого на поверхню подається припій, який під дією температури розплавляється та утворює надійне електричне і механічне з'єднання.

Під час ручного паяння використовують: паяльники (звичайні електричні (25 – 100 Вт), паяльні станції з регулюванням температури, фени з гарячим повітрям); припої (свинцеві (Sn-Pb, найпоширеніший склад 60:40), безсвинцеві (Sn-Cu, Sn-Ag-Cu); флюси – для покращення змочування та очищення контактів від оксидів (каніфоль, рідкі активні флюси); допоміжні засоби (підставка для паяльника, губка або латунна стружка для очищення жала, відсмоктувач припою, паяльна оплітка, пінцети, збільшувальна оптика).

У технології ручного паяння виділяють наступні етапи: підготовка поверхні (очищення контактів від бруду й оксидів, за потреби нанесення флюсу); нагрів (жало паяльника прикладається одночасно до виводу компонента і контактного майданчика, температура зазвичай 280–350 °С для свинцевого припою, 320–380 °С для безсвинцевого припою); подача припою (припій подається не на жало, а безпосередньо в зону контакту, розплавлений метал розтікається і змочує поверхні); формування з'єднання (після видалення жала припій охолоджується, утворюючи блискучий рівний шов), очищення (залишки флюсу бажано видалити ізопропіловим спиртом, особливо у випадку активних кислотних флюсів).

До недоліків під час ручного паяння можна віднести те, що може утворитися «холодний шов» (матовий, зернистий припій, поганий контакт через недостатнє нагрівання). Може відбутися перегрів елемента пристрою. Це призводить до пошкодження кристалу мікросхеми або відшарування доріжки на платі. Надлишок припою може спричинити електричне замикання сусідніх доріжок. Може спостерігатись недостатня змочуваність через відсутність флюсу або забрудненість поверхні оксидами.

До переваг ручного паяння відносять простоту і доступність; можливість ремонту і доопрацювання; використовується просте обладнання; підходить для поодиноких з'єднань та прототипів.

Припої та флюси

Припій – це сплав металів із температурою плавлення нижчою, ніж у елементів які потрібно з'єднати. Припій використовують для створення надійного електричного та механічного контакту.

Основні види припоїв та їх характеристики:

1. Свинцеві припої (Sn-Pb):

- найпоширеніший склад: Sn60Pb40 (60 % олова, 40 % свинцю);
- температура плавлення: $\sim 183\text{--}190\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- переваги: легко плавляться, утворюють блискучі та гладкі шви, добре змочують поверхню;
- недоліки: токсичність свинцю.

2. Безсвинцеві припої:

- типові склади: Sn-Cu, Sn-Ag-Cu (SAC305 – 96,5% Sn, 3% Ag, 0,5% Cu);
- температура плавлення: $\sim 217\text{--}220\text{ }^{\circ}\text{C}$ (вища, ніж у свинцевих);
- переваги: екологічність, відповідність сучасним стандартам;
- недоліки: вимагають вищих температур, іноді утворюють матові шви.

3. Спеціальні припої:

- низькотемпературні (наприклад, Sn-Bi, плавляться при $\sim 138\text{ }^{\circ}\text{C}$) – для термочутливих компонентів;
- високотемпературні (Sn-Sb, Sn-Ag) – для міцних з'єднань, що працюють при високих навантаженнях.

Форма випуску:

- у вигляді дроту (з флюсом усередині або без);
- у вигляді паяльної пасти (застосовується для SMD);
- у вигляді стержнів та кульок.

Флюс – це допоміжна речовина, яка забезпечує якісне паяння. Основна функція флюсу полягає в очищенні поверхні від оксидів, запобіганню повторному окисненню під час нагріву, покращенню змочуваності припоєм.

Основні типи флюсів та їх характеристика:

1. На основі каніфолі:

- R (Rosin) (найменш активний, підходить для чистих поверхонь).

– RMA (Rosin Mildly Activated) (трохи активніший, універсальний для більшості монтажу).

– RA (Rosin Activated) (містить активні домішки, добре видаляє оксиди, але залишки треба обов'язково відмивати).

2. Водорозчинні (Water-Soluble Fluxes). Дуже активні, залишки легко змиваються водою. Використовуються у виробництві, але потребують обов'язкової промивки.

3. Безвідмивні (No-Clean Fluxes). Залишки після паяння хімічно інертні й не потребують очищення. Використовуються у побутовій електроніці, де неможливо промити плату.

Форма випуску: рідкі, гелі, флюсові олівці, флюс у складі припійної пасти.

Порядок виконання роботи

Завдання 1. Пайка ТНТ (класичним паяльником)

1.1. Встановити ТНТ-компонент (резистор, світлодіод) у плату, зафіксувати виводи.

1.2. Виставити температуру паяльника для припою SnPb 300°C, для безсвинцевого припою – 340 °C (за потреби скоригувати ± 20 °C).

1.3. Одночасно прогріти вивід і майданчик протягом 1 – 2 с, підвести припій до місця контакту (не на жало паяльника!).

1.4. Витягнути спочатку припій, потім паяльник, дати шву охолонути.

1.5. Оглянути шов за допомогою лупи або мікроскопу, обрізати виводи.

1.6. Повторити пункти для 1.3 – 1.5 з'єднань.

1.7. Зробити демонтаж одного опліткою.

Завдання 2. Пайка SMD (гарячим повітрям, Lukey 852D+FAN)

2.1. Нанести паяльну пасту або залудити майданчики тонким шаром припою, додати флюс.

2.2. Розташувати компонент 0805/1206 у потрібному місці.

2.3. Виставити на Lukey 852D+FAN температуру 300 °C, потік повітря 3 – 4; насадку підібрати під розмір зони нагріву.

2.4. Прогрівати ділянку круговими рухами на висоті 2 – 4 см до «вспливання» компонента й самовирівнювання за рахунок сил поверхневого натягу.

2.5. Дати охолонути компоненту та платі за необхідності виправити позиціювання коротким дотиком гарячого повітря.

Завдання 3. Демонтаж SMD компонента

1.1. Нанести флюс по периметру корпусу.

1.2. Підігріти вузол гарячим повітрям (300 – 330 °С, потік 3 – 5) до розплавлення припою та зняти SMD компонент пінцетом.

1.3. Очистити майданчики опліткою, знежирити, підготувати до повторної установки.

Завдання 4. Контроль якості та вимірювання

1. Здійснити візуальний контроль паяння: перевірити форму та блиск шва, перевірити відсутність пор, тріщин, містків, рівномірну змочуваність.

2. Здійснити електричний контроль: здійснити «прозвонювання» з'єднань, перевірити відсутність короткого замикання між сусідніми виводами.

3. Оформити фото: 2-3 найвдаліших і 1 дефектного шва з коротким коментарем причин і способів усунення.

Контрольні запитання

1. Які фізичні умови забезпечують змочуваність при паянні?
2. Чим відрізняються SnPb та безсвинцеві припої?
3. Для чого застосовують флюс і чим відрізняються R, RMA, RA?
4. Опишіть послідовність формування якісного ТНТ-шва.
5. На що впливають температура та потік повітря при роботі з Lukey 852D+FAN?
6. Перерахуйте типові дефекти паяння та способи їх уникнення.
7. Чому не рекомендується активне охолодження шва?
8. Які ризики перегріву SMD-компонентів і як їх мінімізувати?
9. Порівняйте методи демонтажу за допомогою оплітки, відсмоктувача, гарячого повітря.
10. Які ознаки «холодного шва»? Як його виправити?

Лабораторна робота № 9

Дослідження різних типів сигналів та визначення їх характеристик

Мета роботи: Навчитись визначати основні характеристики електричних сигналів за допомогою осцилографа.

Прилади і матеріали

1. Осцилограф USB приставка ISDS205A.
2. Осцилограф-мультиметр C1-107.
3. Генератор УТЛЕ01.01
4. Комп'ютер.
5. Мультиметр типу M890G.
6. З'єднувальні проводи.

Теоретичні відомості

Детермінований сигнал - це сигнал, значення якого в будь-який момент часу відомий, тобто це сигнал, значення якого в будь-який момент часу можна передбачити з імовірністю, рівною 1. У техніці та реальному світі таких сигналів немає, оскільки сигнали взаємодіють з електронними пристроями, навколишнім середовищем, різного роду перешкодами, шумами. До детермінованих сигналів можна віднести послідовності імпульсів (амплітуда, форма та положення в часі яких відомі), неперервні сигнали із відомими амплітудно-фазовими співвідношеннями тощо.

Реальні електричні сигнали, з певним наближенням, прийнято описувати моделлю сигналу. Існують різні методи задання моделі електричного сигналу: за допомогою формули (аналітичного виразу), осцилограми або методом спектрального представлення. Розглянемо детальніше модель детермінованого сигналу $s(t) = U_m \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$, зображеного на рис. 9.1. Зображений на рис. 9.1 гармонійний сигнал використовують як тестовий сигнал, а особливо часто його застосовують для аналізу різних електронних схем, пристроїв та електричних кіл.

Цей сигнал можна повністю задати за допомогою трьох параметрів: амплітудою (U_m), частотою (ω_0) і початковою фазою φ_0 .

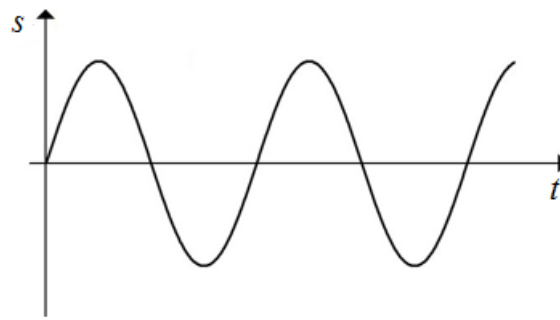


Рис.9.1. Найпростіший детермінований сигнал.

Випадковий сигнал - це сигнал, значення якого в будь-який момент часу передбачити неможливо. Миттєве значення випадкового сигналу передбачають лише з певною ймовірністю. Величина цієї ймовірності завжди менша за 1. Випадковим сигналом, наприклад, може бути напруга, яка відповідає музиці, людській мові, різні шуми, перешкоди. Приклади випадкових сигналів зображено на рис. 9.2.

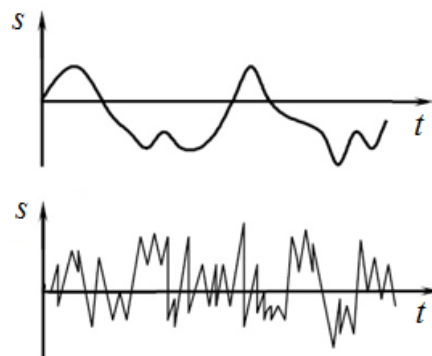


Рис. 9.2. Випадковий сигнал.

Усі детерміновані сигнали поділяються на дві групи: періодичні та неперіодичні. Періодичним детермінованим сигналом називають сигнал $s(t)$, який задовільняє умову:

$$s(t) = s(t + nT),$$

де $-\infty < t < \infty$, $n = \pm 1, \pm 2, \dots$.

Параметр T – це період сигналу.

По часу існування електричні сигнали поділяються на неперервні та імпульсні (рис. 9.3 та рис. 9.4).

Імпульсним сигналом називається сигнал, який існує в межах скінченного проміжку часу (τ_i). Проміжок часу τ_i – це тривалість імпульсу (рис. 9.5).

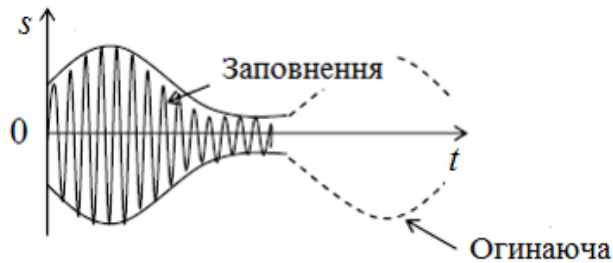


Рис. 9.3. Неперервний сигнал.

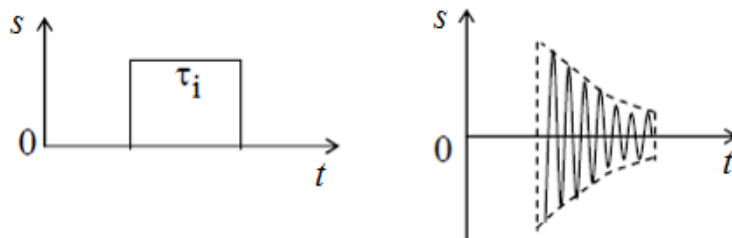


Рис. 9.4. Імпульсний сигнал.

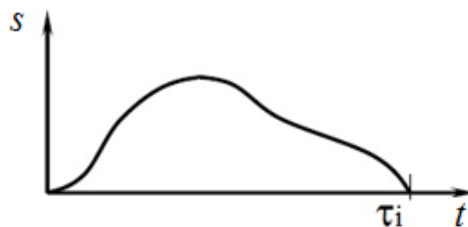


Рис. 9.5. Імпульс довільної форми.

Імпульсні сигнали характеризуються наступними параметрами:

– коефіцієнтом заповнення – відношення тривалості імпульсу (τ_i) до періоду сигналу (T):

$$\lambda = \frac{\tau_i}{T}$$

– щільністю – величина, обернена до коефіцієнту заповнення:

$$Q = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{\tau_i}$$

– середнім значення сигналу:

$$U_c = \frac{1}{T} \int_0^{\tau_i} s(t) dt$$

– середньо-випрямленим значення напруги сигналу:

$$U_{cv} = \frac{1}{T} \int_0^{\tau_i} |s(t)| dt$$

– середньоквадратичним значенням сигналу:

$$U_{ck} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{\tau_i} s^2(t) dt}$$

– коефіцієнтом амплітуди – перевищення амплітуди (A) імпульсного сигналу над його середньоквадратичним значенням:

$$K_A = \frac{A}{U_{ck}}$$

– потужністю сигналу – потужність, яка виділяється сигналом на резисторі опором 1 Ом.

$$P = \frac{2}{T} \int_0^{\tau_i} s^2(t) dt .$$

У загальному випадку, за характером зміни в часі, сигнали можна поділити на:

– неперервні в часі та довільні за величиною (рис. 9.6);

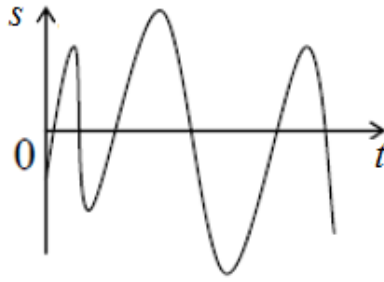


Рис. 9.6. Неперервний в часі і довільний за величиною сигнал.

– дискретні в часі і довільні за величиною (рис. 9.7);

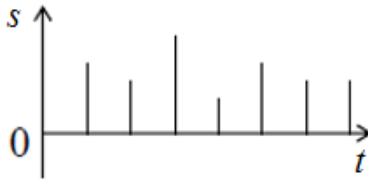


Рис. 9.7. Дискретний в часі та довільний за величиною сигнал.

– неперервні в часі та квантовані за величиною;

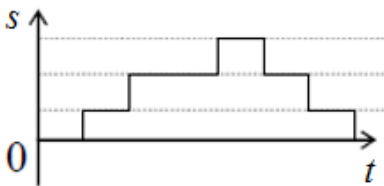


Рис. 9.8. Неперервний в часі та квантований за величиною сигнал.

– дискретні в часі та квантовані за величиною;

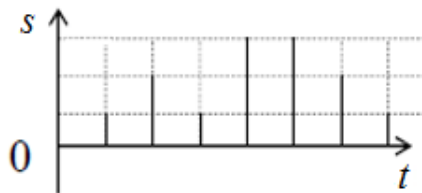


Рис. 9.9. Дискретний за часом і квантований за величиною сигнал.

Для математичного опису сигналу можна використовувати різні математичні представлення: спектральне (частотне) та часове.

Часове представлення здійснюється за допомогою функцій часу. Часове представлення сигналу визначає властивість і параметри сигналу у часовій області (форму, тривалість сигналу, енергію, потужність).

При практичному використанні сигналів потрібно знати їх властивості не тільки в часовій, а й в частотній області. Тому при аналізі та теоретичних

розрахунках сигнал представляють частотною характеристикою. У багатьох випадках це значно полегшує вирішення практичних завдань, зокрема, пов'язаних з обробкою сигналу. Частотні характеристики називають частотними спектрами, спектрами сигналу або спектральними характеристиками. Частотні спектри сигналів одержують та вивчають на спеціальних приладах, які називаються аналізаторами спектру.

Спектральний аналіз періодичних сигналів

Дослідження спектру сигналу становить важливе завдання спектрального аналізу. В основі спектрального аналізу сигналу лежить метод розкладання сигналу на спектральні складові. Методи спектрального аналізу розрізняються між собою для періодичних та неперіодичних сигналів.

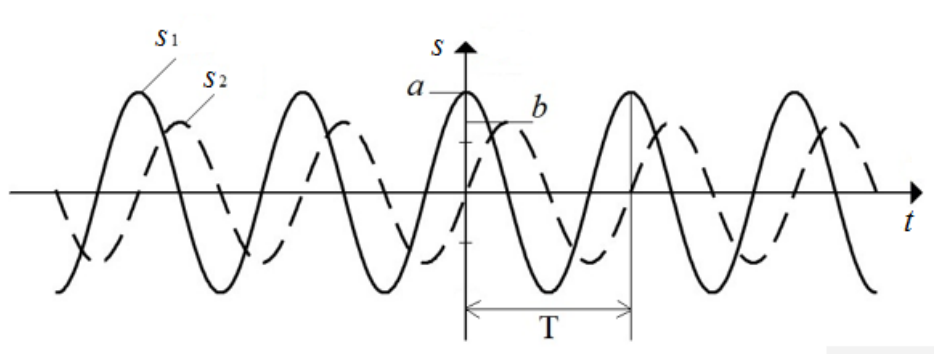


Рис. 9.10. Часове представлення сигналів $s_1(t) = a \cos(\omega t)$ та $s_2(t) = b \sin(\omega t)$.

Одними з найпростіших періодичних сигналів, які використовуються в електроніці та електриці, є сигнали, які змінюються за законом косинуса або синуса (рис. 9.10):

$$s_1(t) = a \cos(\omega t), \quad s_2(t) = b \sin(\omega t)$$

Також найпростішим періодичним коливанням є сума коливань, які змінюються за законом синуса і косинуса (рис. 9.11):

$$s(t) = a \cos(\omega t) + b \sin(\omega t)$$

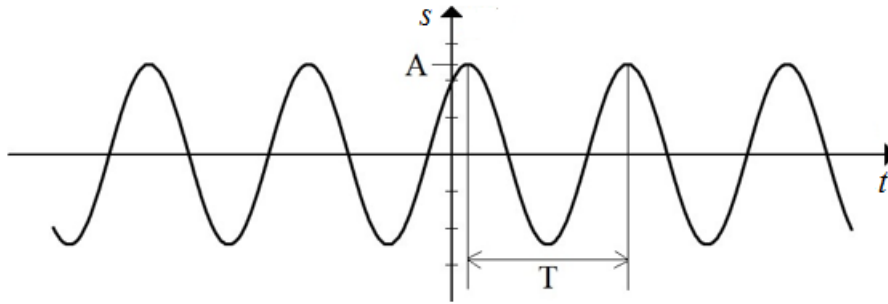


Рис. 9.11. Сума коливань, які змінюються за законом косинуса та синуса.

У даному випадку частота однакова для обох доданків. Додавши коливання, отримаємо:

$$s(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$$

$$A = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{b}{a}.$$

Фур'є ще в 20-х роках XIX століття показав, що будь-який періодичний сигнал можна подати у вигляді розкладу на гармонійні (коливання) складові.

Перша і основна форма запису ряду Фур'є має вигляд:

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t], \quad (9.1)$$

у (9.1) коефіцієнти Фур'є визначаються формулами:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) dt,$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) \cos n\omega_1 t dt, \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) \sin n\omega_1 t dt,$$

де, $n = 1, 2, 3, \dots$

У співвідношенні (9.1) частота $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ називається циклічною частотою основної (першої) гармонічної складової; $\frac{a_0}{2}$ – перший елемент суми (9.1), який відображає постійну складову періодичного сигналу $s(t)$; a_n і b_n , $n = 1, 2, \dots$ – відповідно косинусоїдальні і синусоїдальні коефіцієнти ряду Фур'є.

Провівши нескладні математичні перетворення з використанням відомих тригонометричних співвідношень, ряд Фур'є (9.1) можна записати у вигляді:

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_1 t - \theta_n), \quad (9.2)$$

де, $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$, $\theta_n = \arctg \frac{b_n}{a_n}$ та $a_n = A_n \cos \theta_n$, $b_n = A_n \sin \theta_n$, що і дає другу форму запису ряду Фур'є.

Із (9.2) слідує, що періодичний сигнал $s(t)$ можна представити у вигляді суми його постійної складової $\frac{a_0}{2}$ та нескінченної послідовності гармонік (гармонічних складових). Кожна з цих гармонік має своє значення амплітуди (A_n), частоту ($n\omega_1$) та початкову фазу (θ_n).

Порядок виконання роботи.

Завдання 1. Ознайомитись з технічним описом та інструкцією з експлуатації цифрового портативного осцилографа DSO FNIRSI-150.

Завдання 2. Дослідити синусоїдальний сигнал.

2.1. Скласти електричне коло, схема якого зображена на рис. 9.12.

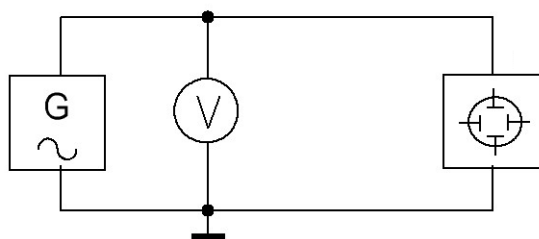


Рис. 9.12. Схема електричного кола для дослідження синусоїдального сигналу.

2.2. Увімкніть осцилограф та генератор. Отримане стійке зображення сигналу на екрані осцилографа перемалюйте в зошит.

2.3. Визначте період коливань досліджуваного сигналу.

2.5. Знаючи період сигналу, обчисліть його частоту та порівняйте отриманий результат з показами генератора.

2.6. Змінюючи частоту сигналу генератора, повторіть вимірювання 4-5 разів на різних частотах. Результати вимірювань запишіть в табл. 9.1.

Таблиця 9.1. Параметри досліджуваного сигналу.

№ п/п	Період сигналу, под.	Період сигналу, с.	Частота сигналу, Гц	Покази генератора УТЛЕ01.01

2.7. Встановіть найбільший вертикальний розмір синусоїди в межах робочої частини екрану осцилографа.

2.8. Виміряйте амплітуду сигналу в поділках. Визначте коефіцієнт відхилення променя по вертикалі та розрахуйте амплітуду сигналу у вольтах.

Таблиця 9.2. Параметри досліджуваного сигналу.

№ п/п	Частота сигналу, Гц	Амплітуда сигналу, под.	Амплітуда сигналу, В	Амплітуда напруги на виході генератора, В

2.9. Визначте діюче значення напруги вихідного сигналу звукового генератора за показами вольтметра та обчисліть амплітуду цього сигналу за формулою $U_m = U \cdot \sqrt{2}$. Порівняйте отриманий результат з результатом вимірювання амплітуди сигналу на екрані осцилографа.

2.10. Змінюючи частоту сигналу та напруг на виході генератора, повторіть вимірювання амплітуди 4-5 разів. Результати вимірювань запишіть в табл. 9. 2.

Завдання 3. Дослідити імпульсний сигнал.

3.1. Скласти електричне коло, схема якого зображена на рис. 9.13.

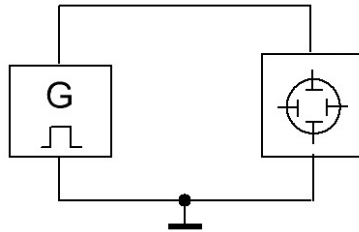


Рис.9.13. Схема електричного кола для дослідження імпульсного сигналу.

3.2. Отримайте на екрані осцилографа стійку картину прямокутних імпульсів та перемалуйте її в зошит.

3.3. Виміряйте період та тривалість прямокутного імпульсу та визначте прогальність імпульсу за формулою

$$Q = T/\tau = 1/D,$$

де τ -тривалість імпульсу, T - період імпульсу, D - коефіцієнт заповнення.

3.4 Результати вимірювань та обчислень запишіть у табл. 9.3.

Завдання 4. Дослідити сигнал пилкоподібної форми.

За результатами проведених досліджень зробити висновки.

Таблиця 9.3.Параметри імпульсного сигналу.

$T, \text{с}$	$\tau, \text{с}$	Q	D

Контрольні запитання

1. Що таке сигнал у електроніці та які основні його параметри?
2. Які характеристики визначають гармонічний (синусоїдальний) сигнал?
3. Що таке шпаруватість імпульсного сигналу і як її обчислити?
4. У чому відмінність між пилкоподібним та трикутним сигналами?
5. Як визначити середнє та діюче значення сигналу?
6. Що таке спектральний склад сигналу і для чого використовується його аналіз?
7. Які відмінності між аналоговими та цифровими сигналами?
8. Що таке співвідношення сигнал/шум і як воно впливає на якість сигналу?
9. У чому полягає суть амплітудної та частотної модуляції?
10. Що таке перехідний процес у сигналах і які його основні характеристики?

Лабораторна робота № 10

Дослідження ВАХ стабілітрона та компенсаційного стабілізатора напруги

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

Прилади і матеріали

1. Генератор електричних сигналів.
2. Панель із закріпленими на ній стабілітронами та резисторами.
3. Змонтований на панелі компенсаційний стабілізатор напруги.
4. Осцилограф.
5. Блок живлення.
6. Вольтметр.
7. Мультиметр.
8. З'єднувальні проводи.

Теоретичні відомості

Зворотне увімкнення n - p -переходу використовується в стабілітронах, робота яких ґрунтується на стабілізуючих властивостях явища електричного пробоя. Часто для виготовлення стабілітронів використовують кремній, що має вищу температурну стабільність, ніж германій. Інколи стабілітрони називають діодами Зенера.

Завдяки внутрішній електростатичній емісії під дією сильного електростатичного поля, створеного зворотною напругою, виникає електричний пробій n - p -переходу, наслідком якого є зворотний струм, практично незалежний від подальшої зміни напруги. У даному випадку електричний пробій оборотний, тобто він не супроводжується руйнуванням n - p -переходу.

Суть електричного пробоя полягає в тому, що електрони, рухаючись з великою швидкістю, при зіткненні з нейтральними атомами в n - p -переході 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 пробою спостерігатись не буде. ВАХ і схему увімкнення стабілітрона зображено на рис. 10.1, *а* та рис. 10.1. *б* відповідно. Тобто основна властивість стабілітрона полягає в тому, що при досягненні певної «стабілізаційної напруги» (напруги пробою) струм різко зростає, а напруга на виводах залишається майже сталою.

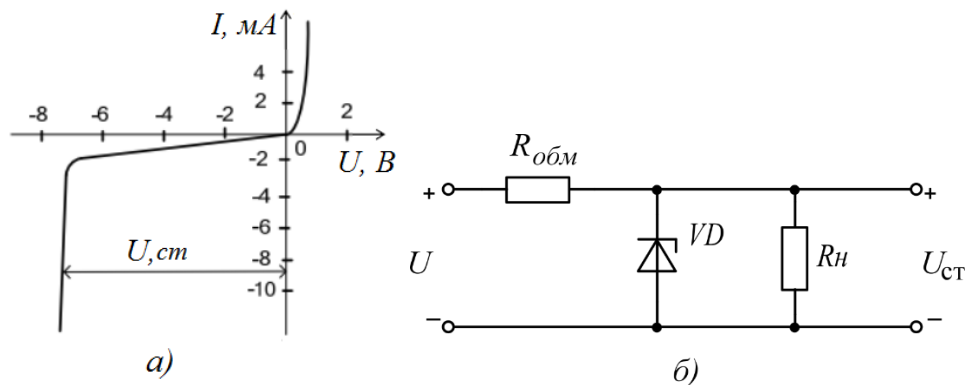


Рис. 10.1. ВАХ (*а*) та схема вмикання стабілітрона (*б*).

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 ($I_{ст. min}$) – 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 стабілітроном.

На даному етапі розвитку використовуються наступні типи стабілітронів:

1. Класичні кремнієві стабілітрони – для стабілізації постійної напруги в діапазоні від ≈ 2 В до сотень вольт.

2. Мініатюрні SMD-стабілітрони – застосовуються у портативній техніці, смартфонах, мікроконтролерних пристроях.

3. Стабілітрони для високих потужностей – використовуються в промисловій електроніці та блоках живлення.

4. Стабілітрони з низьким рівнем шуму – для точних вимірювальних схем.

5. TVS-діоди (Transient Voltage Suppressor) – це фактично «швидкі стабілітрони» для захисту від імпульсних перенапруг (блискавка, статика, імпульси мережі).

Для дослідження ВАХ стабілітрона за допомогою осцилографа використовують установку, електрична схема якої зображена на рис. 10.2. 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 силі струму, що протікає через стабілітрон. Прокалібрувавши осцилограф, можна експериментально знайти напругу стабілізації.

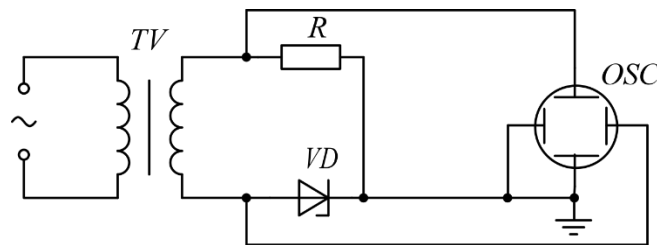


Рис. 10.2. Схема дослідження ВАХ стабілітрона за допомогою осцилографа.

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. 10.3), які можуть складатися з транзисторів, стабілітронів або ІМС. Призначення їх – підтримувати стабільною вихідну напругу.

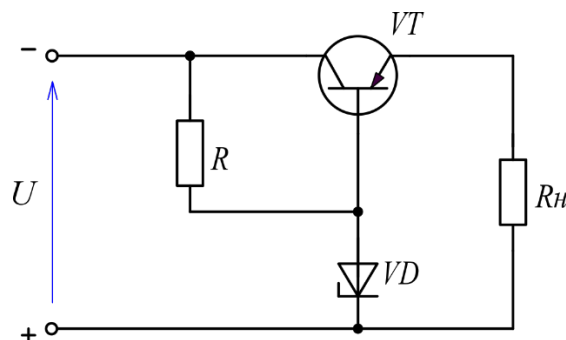


Рис. 10.3. Схема електронного стабілізатора напруги.

Якість стабілізаторів характеризуються коефіцієнтом стабілізації напруги:

$$K_{CT} = \frac{\frac{\Delta U_{Bx}}{U_{Bx}}}{\frac{\Delta U_{Bux}}{U_{Bux}}} \quad (10.1)$$

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

Стабілізатори напруги бувають параметричними і компенсаційними.

Параметричними називають стабілізатори, у яких для стабілізації напруги використовують характерні залежності параметрів нелінійних радіоелементів (ВАХ стабілітрона). На рис. 10.1 наведена схема параметричного стабілізатора постійної напруги.

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

При зміні 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 , залишається майже незмінною. Незмінною залишається напруга і на резисторі навантаження, який ввімкнений паралельно стабілітрону.

Розглянемо випадок, коли вхідна напруга залишається незмінною, а змінюється опір резистора навантаження. У цьому випадку струм, який проходить через стабілітрон, теж буде змінюватись, причому зі зменшенням R_n (зі 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.

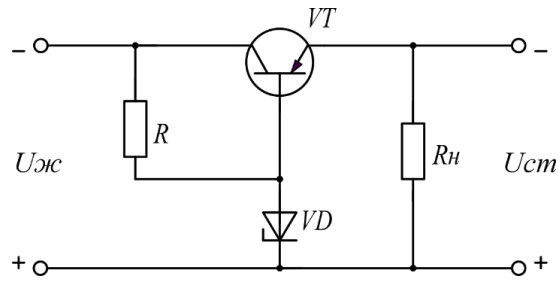


Рис. 10.4. Схема компенсаційного стабілізатора напруги.

Вказаних недоліків позбавлений компенсаційний стабілізатор, приклад схеми якого подано рис. 10.4. 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_H , рівна $U_{RH} = U_{VD} - U_{BE}$. Припустимо, що вхідна напруга стабілізатора зросла. 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 U_{BE} 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 електричне коло для одержання ВАХ стабілітрона осцилографічним методом (рис. 10.2).
2. Отримати на екрані осцилографа ВАХ стабілітронів КС168Д та КС133А (табл. 10.1).

Таблиця 10.1. Параметри досліджуваних стабілітронів

Тип стабілітрона	$U_{ст.}, В$	$I_{ст. min}, mA$	$I_{ст. max}, mA$	Диференціальний опір, Ом	$P_{max}, Вт$
КС168Д	6,12...7,48	3	50	30	0,3
КС133А	2,97...3,63	3	50	65	0,3

3. Скласти електричне коло, схема якого зображена на рис. 10.4, для проведення дослідження компенсаційного стабілізатором напруги.
4. Змінюючи напругу на вході стабілізатора напруги, виміряти напругу на виході стабілізатора. Результати досліджень записати в табл. 10.2.

Таблиця 10.2. Залежність вихідної напруги стабілізатора від вхідної

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

6. За даними табл. 10.2 побудувати навантажувальну характеристику стабілізатора напруги. Навантажувальна характеристика представляє собою графік залежності вихідної напруги від вхідної.

5. За формулою 10.1 визначити коефіцієнт стабілізації компенсаційного стабілізатора напруги.

6. За результатами проведених досліджень зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Які напівпровідникові матеріали використовують для виготовлення стабілітронів?

2. Назвіть основні параметри стабілітронів.

3. Які фізичні процеси використовуються в стабілітронах?

4. Як на електронних схемах позначають стабілітрони?

5. Чому звичайні випрямні діоди не можна використовувати в якості стабілітронів?

6. Що таке параметричний стабілізатор напруги?

7. Для чого призначені стабілізатори напруги?

8. Які недоліки параметричних стабілізаторів напруги?

9. Які існують схеми стабілізаторів напруги?

10. Що називають коефіцієнтом стабілізації стабілізатора напруги?

Лабораторна робота № 11

Дослідження варикапів

Мета роботи: Вивчити фізичні основи роботи варикапів та експериментально дослідити характеристики варикапів. Дослідити роботу варикапа в схемі генератора.

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 на 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 представляє 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_δ). Величина бар'єрної ємності діода може бути визначена з формули:

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

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 p - n -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. Умовне схематичне позначення варикапа зображено на рис. 11.1.

Основною характеристикою варикапа є залежність його ємності від напруги (вольт-фарадна характеристика), типовий вигляд якої зображено на рис. 11.2. Залежність ємності варикапа від прикладеної напруги визначається технологією виготовлення p - n -переходу.



Рис. 11.1. Умовне графічне позначення варикапа.

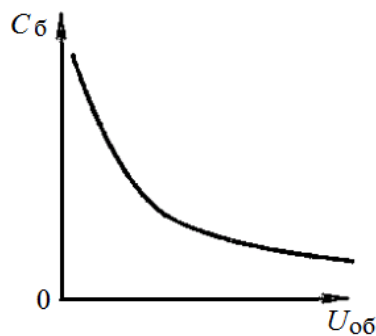


Рис. 11.2. Залежність бар'єрної ємності p - n -переходу від напруги.

Основні параметри варикапів

1. Номінальна електроємність (C_b) – це електроємність, яку вимірюють між виводами 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 перекривання 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

$$Z = R + jX = r_{\bar{o}} + \frac{r_{3\bar{o}}}{\omega^2 C_{\bar{o}}^2 r_{3\bar{o}}^2 + 1} - j \frac{\omega C_{\bar{o}} r_{3\bar{o}}^2}{\omega^2 C_{\bar{o}}^2 r_{3\bar{o}}^2 + 1}.$$

Поділивши дійсну частину опору на уявну і врахувавши, що $r_{3\bar{o}} \gg r_{\bar{o}}$, дістанемо зворотну величину добротності:

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{\omega C_{\bar{o}} r_{3\bar{o}}} + \omega C_{\bar{o}} r_{\bar{o}},$$

де $C_{\bar{o}}$ – ємність варикапа, $r_{\bar{o}}$ – опір бази, $r_{3\bar{o}}$ – опір зворотно зміщеного переходу варикапа.

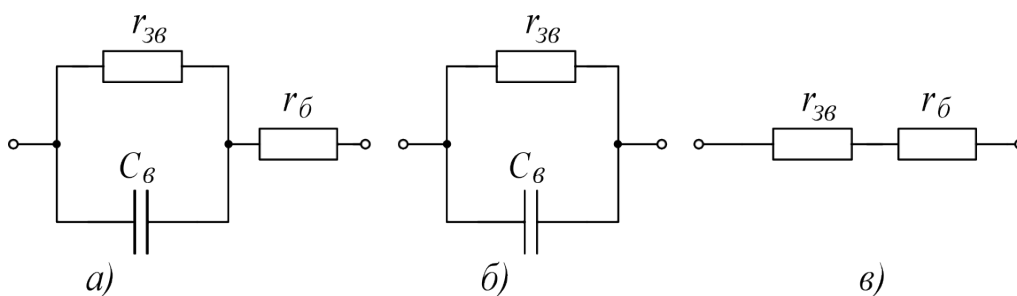


Рис. 11.3. Еквівалентна схема варикапа: а) повна; б) на низьких частотах; в) на високих частотах.

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

$$Q_{НЧ} = \omega C_{\bar{o}} r_{3\bar{o}}.$$

На високих частотах можна знехтувати першим доданком, і

$$Q_{ВЧ} = \frac{1}{\omega C_{\bar{o}} r_{\bar{o}}}.$$

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 варикапа 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 $r_{\bar{o}}$.

Варикапи працюють тільки при зворотному зміщенні, 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

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

1. Виміряйте залежність бар'єрної ємності варикапа від напруги. Отримані значення ємності занесіть в табл. 11.1.

Таблиця 11.1. Залежність бар'єрної ємності варикапа від напруги.

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

2. Виміряйте залежність дифузійної ємності варикапа від напруги. Результати вимірювань занесіть до табл. 11.2.

3. За даними табл. 11.1 та табл. 11.2 побудуйте залежність ємності варикапа від напруги.

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

Таблиця 11.2. 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
$C_{\text{диф}}, \text{пФ}$									

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

2.1. Підключити вимірювальні прилади згідно зі схемою, зображеною на рис. 11.4.

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

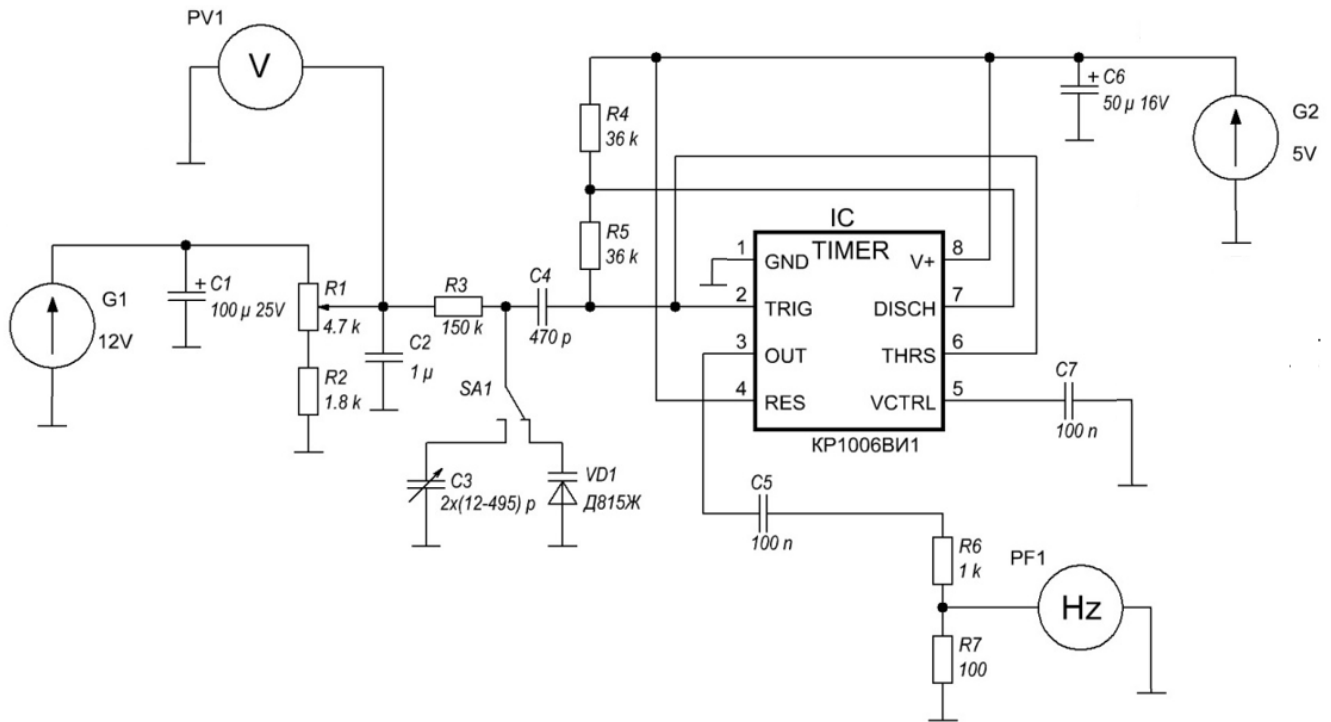


Рис. 11.4. Схема для дослідження роботи варикапа в схемі генератора.

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. 11.3.

Таблиця 11.3. Залежність частоти коливань генератора від напруги на варикапі.

$U, \text{В}$									
$f, \text{кГц}$									

2.4. За даними табл. 11.3 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 № 12

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

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. 12.1 наведена ВАХ тунельного діода при прямому ввімкненні.

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 дозованих зонах $p_{p0}, n_{n0} \gg N_C, N_V$. У цьому випадку рівень Фермі буде знаходитися в дозованих зонах p^+ і n^+ напівпровідників.

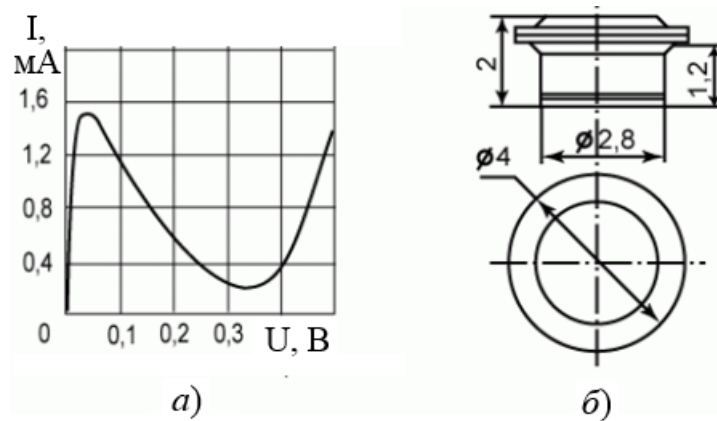


Рис. 12.1. Тунельний діод 1И104: а) вольт-амперна характеристика при прямому увімкненні; б) геометричні параметри діода.

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. 12.2. 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.

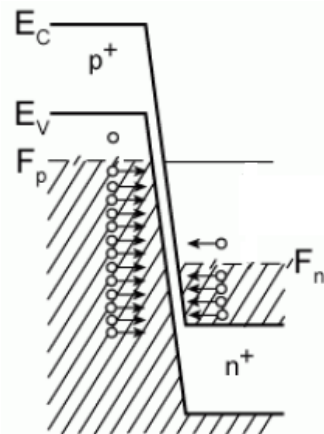


Рис. 12.2. Зонна діаграма p^+-n^+ -переходу в рівновазі.

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

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 2\varphi_0}{qN_D}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 E_g}{qN_D}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1 \cdot 10^{-12} \cdot 1}{1,6 \cdot 10^{-19}}} \approx 10^{-6} \text{ см} = 100 \text{ \AA}.$$

Дебройлівську довжину хвилі електрона оцінимо з простих співвідношень:

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

$$\lambda = \frac{\sqrt{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}}{6,3 \cdot 10^{-34}} \approx 140 \text{ \AA}.$$

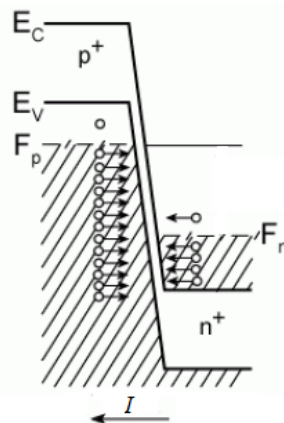


Рис. 12.3. Зонна діаграма тунельного діода при зворотному включенні.

Таким чином, геометрична ширина p^+-n^+ -переходу виявляється співрозмірною 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. 12.3 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 зі зростанням зворотної напруги. Така поведінка ВАХ різко відрізняє тунельний діод від звичайного випрямного діода.

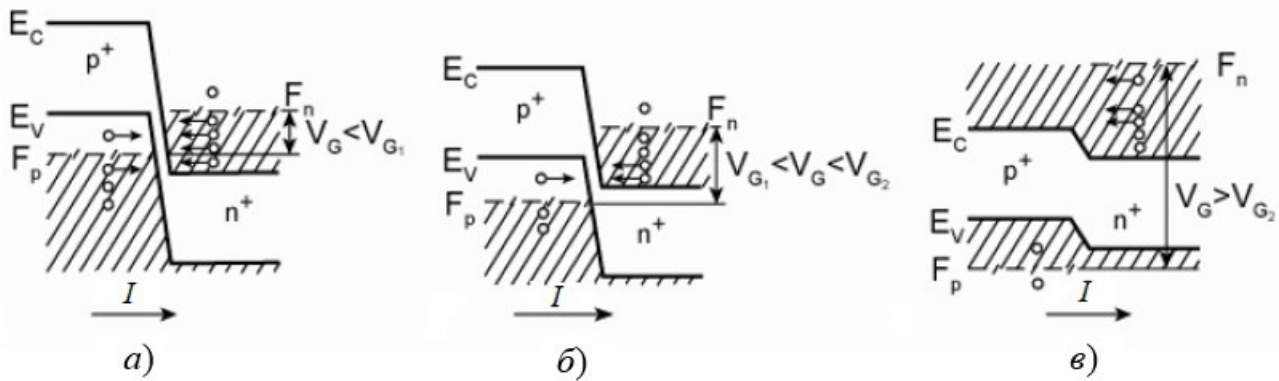


Рис. 12.4. Зонні діаграми тунельного діода при прямому зміщенні: а) ділянка 1, б) ділянка 2, в) ділянка 3.

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. 12.4 показані зонні діаграми тунельного діода при прямому зміщенні, що відповідають трьом ділянкам на прямій вітці 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. 12.4 – це ділянка з від’ємним диференціальним опором. Розглянемо більш детально ВАХ тунельного діода. Для випадку прямого ввімкнення вона має наступний вигляд:

$$I = A' \frac{qV}{4kT} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - qV)^2, \quad (12.3)$$

де ε_1 і ε_2 – відстань від рівня Фермі до дна зони провідності або вершини валентної зони.

Розрахунок ВАХ тунельного діода за рівнянням (12.3) добре узгоджується з експериментом. На рис. 12.5 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 складає наносекунди, тобто $\tau_{\min} \sim 10^{-9}$ с. З цієї причини тунельні діоди використовуються в НВЧ-техніці.

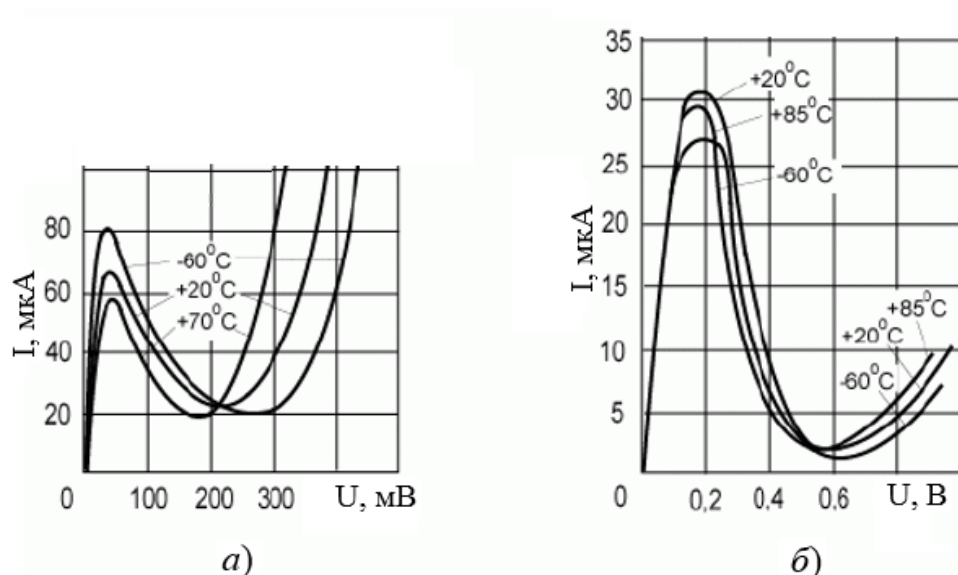


Рис. 12.5. Температурні залежності прямого струму від напруги в тунельних діодах: а) германієвий діод 1И403; б) арсенід галієвий діод 3И202.

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 швидко 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. 12.6. 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.

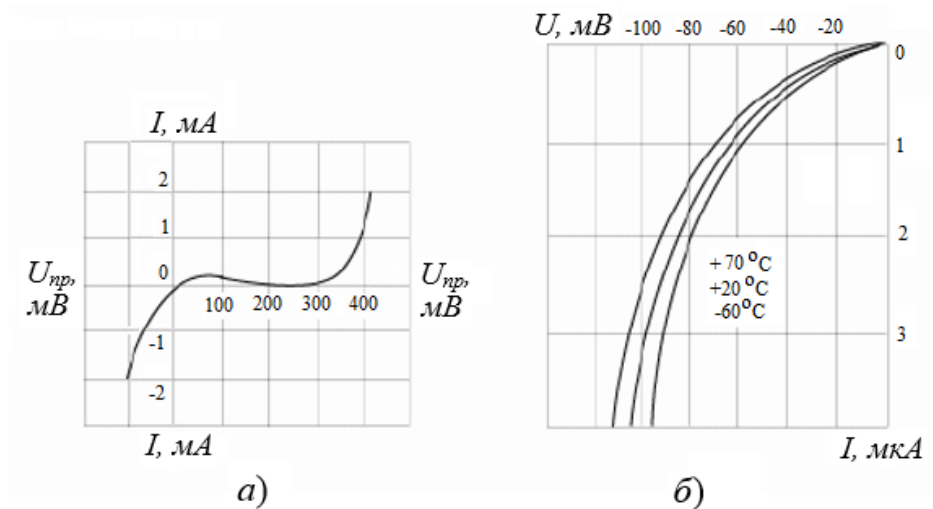


Рис. 12.6. Вольт-амперна характеристика германієвого оберненого діода ГИ403: а) повна ВАХ; б) зворотна ділянка ВАХ при різних температурах.

Порядок виконання роботи

Завдання 1. Дослідження прямої вітки ВАХ тунельного діода.

1. Перемикачем S перевести макет в режим вимірювання ВАХ.
2. Увімкнути вимірювальні прилади так, як це зображено на рис 12.7, амперметр увімкнути в режим вимірювання постійного струму з номіналом 20 мА, вольтметр – в режим вимірювання постійної напруги з номіналом 1 В.

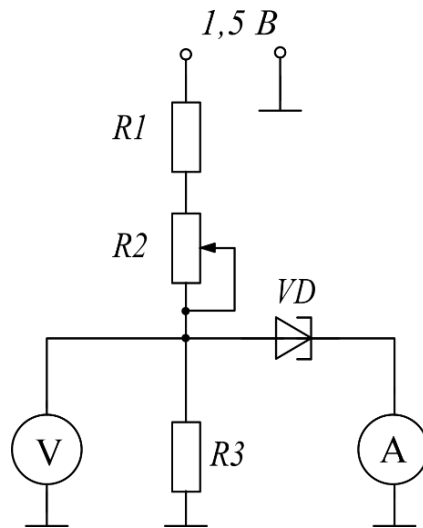


Рис. 12.7. Схема для дослідження ВАХ тунельного діода.

3. Увімкнути живлення діода.

4. Плавно змінюючи опір змінного резистора $R1$, встановлювати напругу на тунельному діоді через кожні 30 мВ, відповідно до табл. 12.1, записати відповідні покази амперметра в табл. 12.1.

Таблиця 12.1. Пряма вітка ВАХ тунельного діода.

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

5. Побудувати графік прямої вітки ВАХ тунельного діода.

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

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

Завдання 2. Дослідження резонансного генератора на тунельному діоді.

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

2. Підключити вимірювальні прилади по схемі на рис. 12.8.

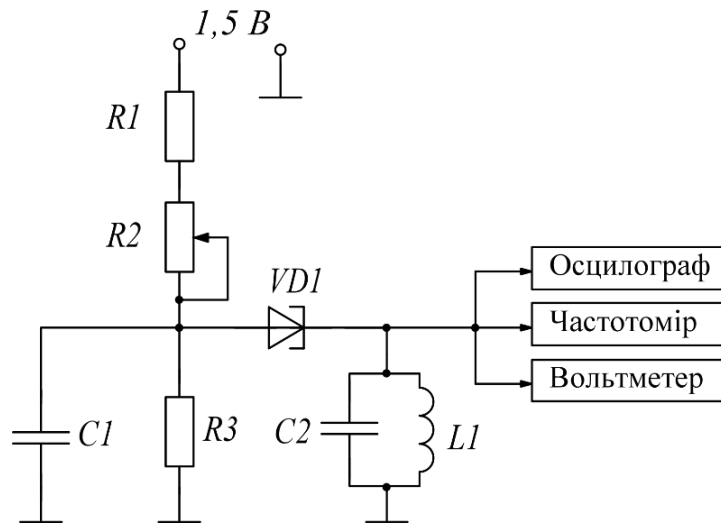


Рис. 12.8. Схема електричного кола для дослідження генератора на тунельному діоді.

3. Увімкнути живлення діода.
4. Плавно збільшуючи напругу на діоді за допомогою змінного резистора R_2 , отримати на екрані осцилографа періодичні коливання.
5. Форму коливань перемалювати у зошит.
6. Плавно збільшуючи напругу зміщення, зняти покази вольтметра змінного струму, частотоміра та вольтметра постійного струму.
7. Дані вимірювань занести в табл. 12.2.

Таблиця 12.2. Параметри резонансного генератора.

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

8. Напругу зміщення збільшувати до зникнення коливань.
9. Побудувати графіки залежності амплітуди та частоти коливань від напруги зміщення на тунельному діоді.
10. На основі проведених досліджень зробити висновки.

Контрольні запитання

1. У чому полягає відмінність тунельного діода від звичайного – випрямного? Чим обумовлюється дана відмінність?
2. У чому полягає особливість ВАХ тунельного діода?

3. Чому в тунельному діоді спостерігаються квантово-механічні явища?
4. Покажіть на ВАХ тунельного діода ділянку з від'ємним диференціальним опором.
5. Що означає термін «від'ємний диференціальний опір»?
6. Чому при прямому зміщенні ВАХ тунельного діода є N -подібною?
7. Де використовуються тунельні діоди?
8. Який діод називають оберненим?
9. Із яких матеріалів виготовляють тунельні діоди?
10. Запишіть формулу ВАХ тунельного діода у випадку прямого ввімкнення.

Лабораторна робота № 13

Амплітудно-частотні характеристики електричних фільтрів

Мета роботи: Вивчити принципи роботи електричних фільтрів різних типів (низькочастотних, високочастотних, смугових, загороджувальних); дослідити їх амплітудно-частотні характеристики; сформувати практичні навички вимірювання та аналізу параметрів 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

Електричним фільтром називають частотно-вибірковий електронний пристрій, який пропускає електричні сигнали певних частот і послаблює або затримує сигнали інших частот. Електричні фільтри класифікують за такими ознаками:

- по АЧХ (амплітудно-частотній характеристиці) вони поділяються на фільтри нижніх частот (ФНЧ); смугові фільтри (СФ); фільтри верхніх частот

(ФВЧ); 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;

- за елементною базою вони поділяються на пасивні та активні. Активні фільтри містять в RLC -схемі активні елементи, як активні елементи в них 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 електричного фільтра є комплексний коефіцієнт передачі напруги:

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}, \quad (13.1)$$

де $\dot{U}_1$, $\dot{U}_2$ – комплексні значення напруги на вході та виході фільтра. Формулу (13.1) можна записати в показниковій формі:

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

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

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

$$K(p) = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}. \quad (13.2)$$

У загальному випадку електричний фільтр можна розглядати як чотириполіусник з функцією передачі

$$K(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{a_m p^m + a_{m-1} p^{m-1} + \dots + a_1 p + a_0}{b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_1 p + b_0}, \quad (13.3)$$

де $U_1(p)$ і $U_2(p)$ - вхідна і вихідна напруги чотириполіусника 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

$$K(p) = \frac{U_2(j\omega)}{U_1(j\omega)} = \frac{a_m (j\omega^m) + a_{m-1} (j\omega^{m-1}) + \dots + a_1 (j\omega) + a_0}{b_n (j\omega^n) + b_{n-1} (j\omega^{n-1}) + \dots + b_1 (j\omega) + b_0} = \frac{A(\omega)}{B(\omega)}. \quad (13.4)$$

Залежність модуля коефіцієнта передачі (або функції передачі) від частоти (13.4) називається *амплітудно-частотною характеристикою*

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

Фазо-частотна характеристика також може бути знайдена з (13.4) і представлена у вигляді

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

Діапазон $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ або смуги частот, у 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 разів).

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.

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

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.

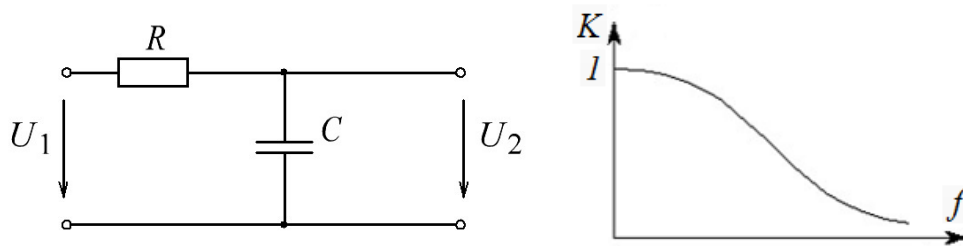


Рис. 13.1. RC-фільтр нижніх частот та його АЧХ.

На рис. 13.1 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:

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

звідси отримаємо формули для АЧХ:

$$K = |\dot{K}| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}, \quad (13.5)$$

Вважаючи, що

$$K = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega_{zp} RC)^2}},$$

отримаємо вираз для частоти зрізу ω_{zp} :

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

$K=1=0$ дБ (рис.1.) на нижніх частотах $f \ll f_{zp}$. На високих частотах $f \gg f_{zp}$, згідно з формулою (13.5) $K \approx 1/(\omega RC)$, тобто коефіцієнт передачі обернено пропорційний частоті. При збільшенні частоти в 12 разів коефіцієнт підсилення зменшується в 10 разів, тобто він зменшується на 20 дБ на декаду або на 6 дБ на октаву.

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

Пасивні фільтри верхніх частот (ФВЧ) першого порядку

Схема найпростішого пасивного ФВЧ першого порядку наведена на рис. 13. 2. ФВЧ передає без зміни сигнали високих частот, а на низьких частотах забезпечує загасання сигналів і випередження їх по фазі відносно вхідних сигналів.

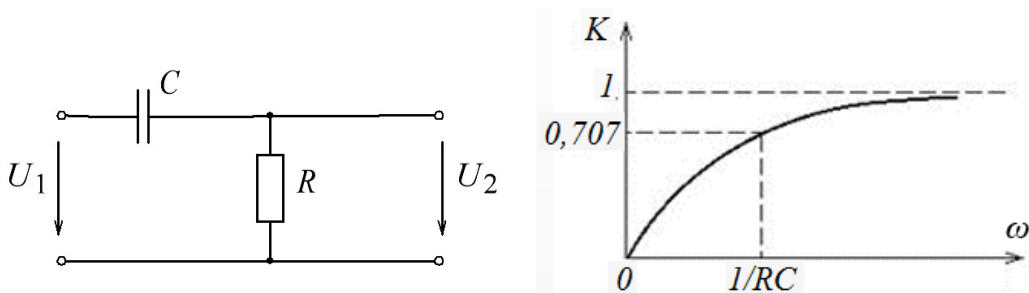


Рис. 13.2. RC-фільтр верхніх частот.

Комплексне значення вихідної напруги:

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

Відповідно, коефіцієнт передачі в комплексному вигляді виражається формулою:

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

Звідси знаходимо вирази для АЧХ, ФЧХ і частоти зрізу

$$K = |\dot{K}| = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega RC)^2}}}, \quad (13.6)$$

$$\varphi = \arctg \frac{1}{\omega RC}; \quad \omega_{zp} = \frac{1}{RC}.$$

З формули (13.6) можна зробити висновки, що при $\omega \rightarrow 0$, $K \rightarrow 0$, та $\omega \rightarrow 1$, $K \rightarrow 1$ (рис. 13.2). При $f=f_{zp}$, як і для фільтра нижніх частот,

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

При послідовному з'єднанні декількох ФВЧ результуюча частота зрізу

$$\omega_{zp} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \omega_{zp_i}^2}.$$

Якщо всі фільтри мають рівні частоти зрізу, то

$$\omega_{zp} = \omega_{zp_i} \sqrt{n}.$$

Пасивний смуговий RC-фільтр

Шляхом послідовного з'єднання ФВЧ і ФНЧ отримують смуговий (вибірковий) RC-фільтр (рис. 13.3) . Його вихідна напруга близька до нуля на високих та низьких частотах.

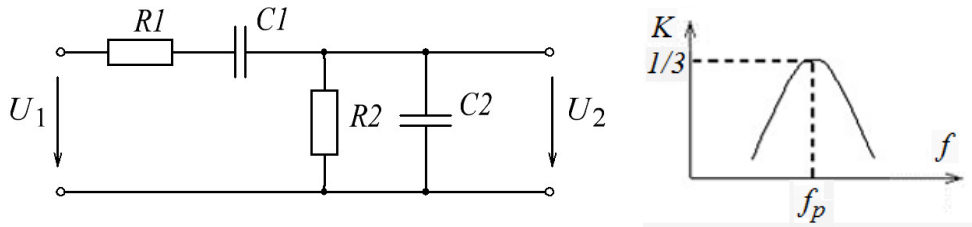


Рис. 13.3. Пасивний смуговий RC-фільтр та його АЧХ.

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

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 \cdot \frac{j\omega RC}{(1 + j\omega RC)^2 + j\omega RCR}.$$

Коефіцієнт передачі в комплексному вигляді виражається формулою:

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{j\omega RC}{1 + 3j\omega RC + \omega^2 R^2 C^2}.$$

Звідси знаходимо вирази для АЧХ, ФЧХ

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

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. 13.3).

Смуговий (двоконтурний вибірковий) LC-фільтр

Якщо в схемі рис. 13.3 замінити опір на індуктивність, то отримаємо схему пасивного смугового LC-фільтра (рис. 13.4).

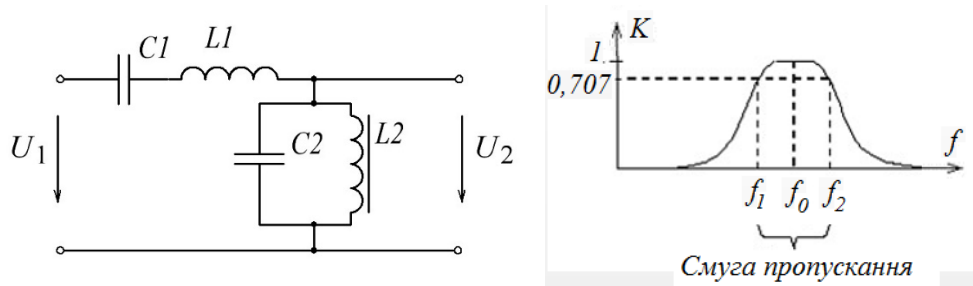


Рис. 13.4. Схема пасивного смугового LC-фільтра (а) та його АЧХ (б).

При співпаданні частот, на яких спостерігається резонанс напруг у 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.

Пасивний фільтр нижніх частот другого порядку

На основі виразу (13.4) запишемо в загальному вигляді функцію передачі ФНЧ другого порядку

$$K(p) = \frac{K_0}{(1+a_1p+b_1p^2)}. \quad (13.7)$$

Дана функція передачі не може бути реалізована за допомогою пасивних RC-кіл. Подібний фільтр може бути реалізований із застосуванням індуктивності. На рис. 13.5 показана схема пасивного ФНЧ другого порядку.

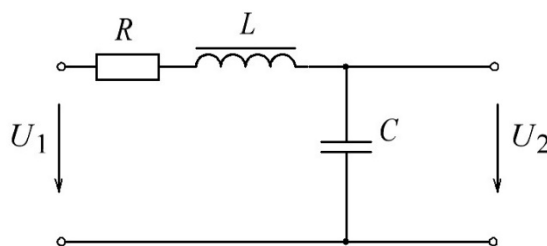


Рис. 13.5. Пасивний ФНЧ другого порядку.

Функція передачі фільтра має вигляд

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

Розрахувати фільтр можна, скориставшись формулами

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

Наприклад, для ФНЧ другого порядку типу Баттерворта з коефіцієнтами $a_1=1,414$ і $b_1=1,000$, задавши частоту зрізу $f_{zp}=10$ 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.

Загороджувальні смугові фільтри

АЧХ загороджувального фільтра можна отримати з частотної характеристики ФНЧ (13.7) шляхом заміни змінної P виразом $\Delta\Omega/(P+1/P)$. Тут $\Delta\Omega=1/Q$ - нормована смуга частот. $Q=f_p/(f_{max}-f_{min})=f_p/\Delta f$, 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.

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

Звідси отримаємо вирази для АЧХ та ФЧХ фільтра

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

Пасивний загороджувальний RLC -фільтр

Приклад пасивного загороджувального фільтра наведено на рис. 13.6.

Функція передачі такого фільтра має вигляд

$$K(p) = \frac{1+p^2}{1+R\sqrt{C/L}p+p^2}.$$

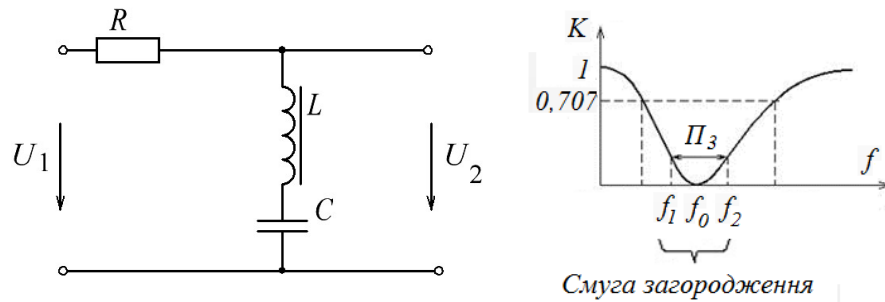


Рис. 13.6. Схема загороджувального RLC -фільтра.

Резонансна частота і добротність затухання знаходяться як

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

Прикладами пасивних загороджувальних фільтрів є також місток Віна-Робінсона (рис. 13.7) та подвійний Т-подібний місток (рис. 13.8).

Місток Віна-Робінсона

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

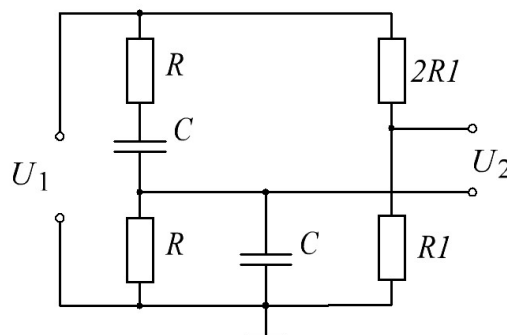


Рис. 13.7. Схема фільтра Місток Віна-Робінсона.

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

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

Подвійний Т-подібний фільтр (загороджувальний RC-фільтр)

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

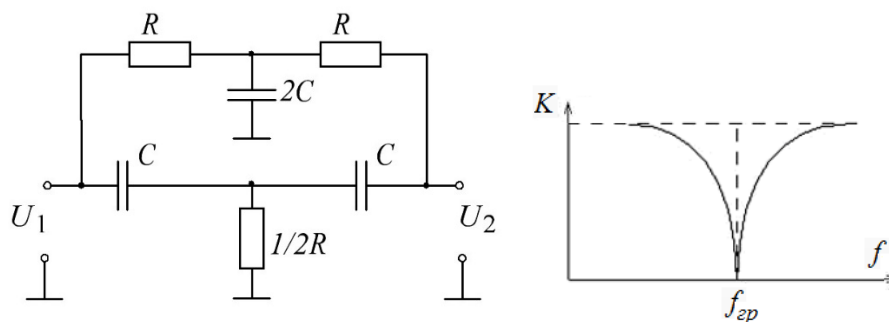


Рис. 13.8. Подвійний Т-подібний фільтр (а) і його АЧХ (б).

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

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

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

Коефіцієнт передачі і фазовий зсув:

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

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

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з обладнанням до лабораторної роботи.
2. Скласти електричне коло, схема якого зображена на рис. 13.9, та дослідити паралельний контур як вибіркоковий фільтр. Результати дослідження записати в табл.13.1.
3. Скласти електричне коло, схема якого зображена на рис.13.10 та дослідити пасивний загороджувальний RLC -фільтр.
4. Результати дослідження записати в табл. 13.2.

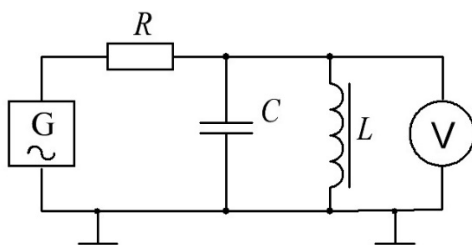


Рис. 13.9. Схема паралельного контура як вибіркоковий фільтр.

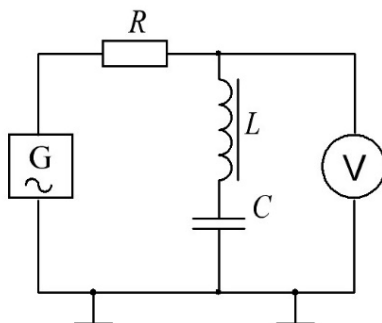


Рис. 13.10. Схема пасивного загороджувальний RLC -фільтр.

5. Скласти електричне коло, схема якого зображена на рис.13.13, та дослідити пасивний фільтр нижніх частот другого порядку. Результати дослідження записати в таблицю.
6. Скласти електричне коло, схема якого зображена на рис.13.12, та дослідити пасивний фільтр верхніх частот другого порядку. Результати дослідження записати в таблицю.

7. На основі проведених досліджень побудувати АЧХ фільтра. Визначити резонансну частоту. Визначити модуль коефіцієнта передачі.
8. На основі проведених досліджень зробити висновки.

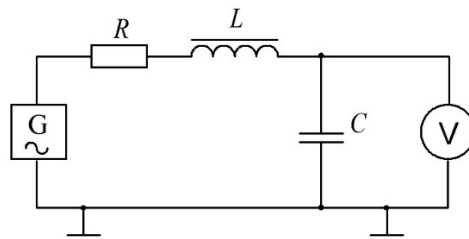


Рис. 13.11. Схема пасивного фільтра нижніх частот другого порядку.

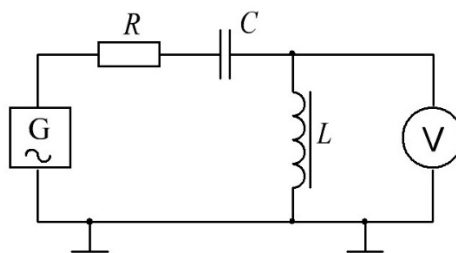


Рис. 13.12. Схема пасивного фільтра верхніх частот другого порядку.

Контрольні запитання

1. Що називають електричним фільтром?
2. Як класифікують електричні фільтри?
3. Що називають коефіцієнтом передачі електричного фільтра?
4. Основні характеристики та параметри електричних фільтрів.
5. Яка різниця між електричними фільтрами першого та вищих порядків?
6. Які ви знаєте фільтри нижніх частот?
7. Які ви знаєте фільтри верхніх частот?
8. Охарактеризуйте загороджувальні та смугові фільтри.
9. Зобразіть схему пасивного загороджувального RLC -фільтра та його АЧХ.
10. Зобразіть схему пасивного смугового RC -фільтра та його АЧХ.
11. Зобразіть схему смугового (двоконтурного вибіркового) LC -фільтра та його АЧХ.

Табл.13.1		
№	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	

Табл.13.2		
№	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 № 14

Вивчення інтегрального операційного підсилювача в різних режимах роботи

Мета роботи: Ознайомитися з будовою та принципом дії інтегрального операційного підсилювача; дослідити його роботу в різних режимах (інвертуючому, неінвертуючому, режимі компаратора тощо); отримати практичні навички складання схем, проведення вимірювань та аналізу характеристик операційного підсилювача.

Прилади і матеріали

1. Стенд «Електротехніка. Основи електроніки» УТЛЄ-01. Панель 4.3

Операційний підсилювач.

2. Осцилограф С1-107.
3. Генератор функціональний УТЛЄ01.01.
4. Мультиметр типу М-890G.
5. Двополярне джерело живлення.
6. З'єднувальні проводи.

Теоретичні відомості

Операційним підсилювачем (скорочено ОП) називають підсилювач, здатний виконувати різноманітні математичні операції над аналоговими сигналами. Умовні схематичні позначення операційного підсилювача зображено на рис. 14.1.

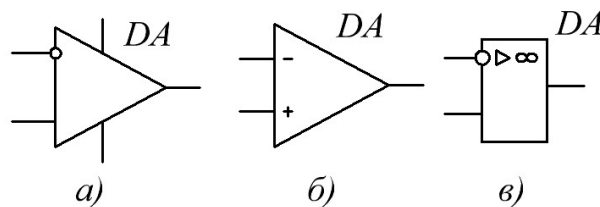


Рис. 14.1. Умовні позначення ОП.

Призначення та позначення основних виводів ОП подано на рис. 14.2. Вхід 1 (V_+) називають неінвертуючим. Зміна вихідного сигналу синфазна зі зміною сигналу на цьому вході. Вхід 2 (V_-) називають інвертуючим. Зміна вихідного

сигналу відбувається з відставанням на фазовий кут π відносно сигналу на цьому вході.

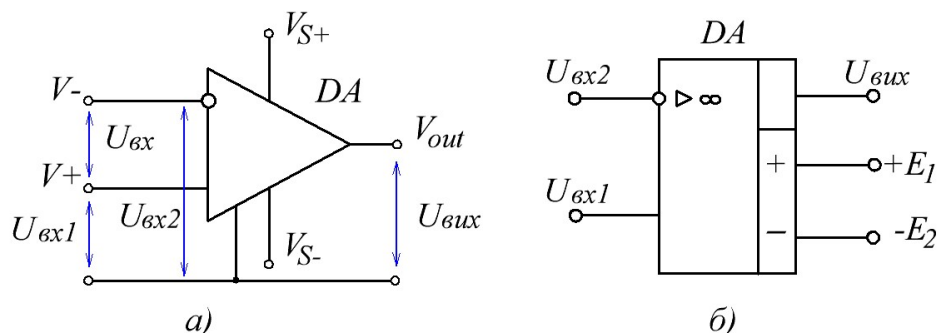


Рис. 14.2. Призначення основних виводів ОП.

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

Розрізняють синфазні вхідні сигнали U_{ex1} та U_{ex2} , які діють, відповідно, між неінвертуючим та інвертуючим входами і спільною шиною та диференціальний вхідний сигнал U_{ex} , який діє між цими входами. Зрозуміло, що:

$$U_{vix} = U_{ex1} - U_{ex2}.$$

Для практичних цілей та теоретичних розрахунків вводять поняття коефіцієнта підсилення ОП (за напругою), який покладають рівним відношенню зміни вихідної напруги до зміни диференціальної напруги на вході:

$$K = \frac{\Delta U_{vix}}{\Delta U_{ex}}.$$

Ідеальний ОП реагує тільки на диференціальний вхідний сигнал і зовсім не чутливий 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 рис. 14.3.

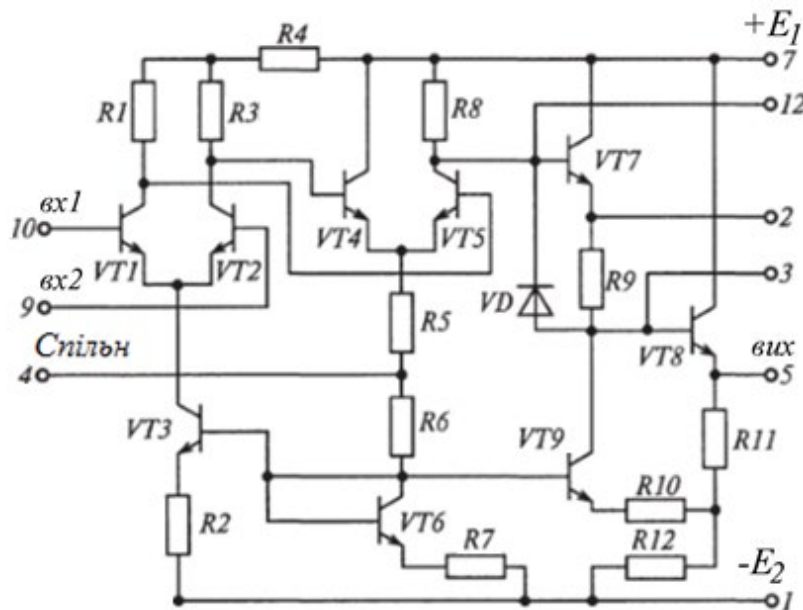


Рис. 14.3. Схема ОП.

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, 14 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. Аналізуючи їх роботу, 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 зображено на рис. 14.4.

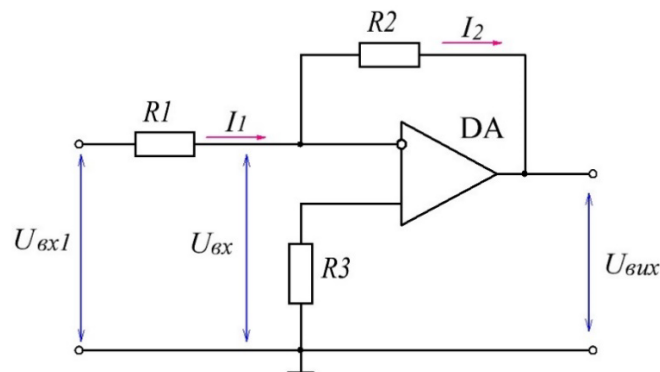


Рис. 14.4. Інвертуючий підсилювач.

Для нього виконуються співвідношення:

$$I_1 = \frac{U_{вх1} - U_{вх}}{R_1} \quad (14.1)$$

$$I_2 = \frac{U_{вх} - U_{вих}}{R_2} \quad (14.2)$$

Оскільки підсилювач ідеальний, то:

$$I_2 = I_1,$$

а також

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

а отже

$$U_{вх} = 0.$$

На основі (14.1) і (14.2) одержимо:

$$\frac{U_{вих}}{U_{вх1}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (14.3)$$

Знак "-" у формулі (14.3) 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 $U_{вх}=0$, то можна вважати, що потенціал його інвертуючого входу також рівний нулю. Тому рівність (14.1) можна записати у вигляді:

$$I_1 = \frac{U_{вх1}}{R_1}$$

Це означає, що вхідний опір інвертуючого підсилювача рівний опорі 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 опорі паралельно увімкннутих резисторів R_1 та R_2 (при $R_2 \gg R_1$ його можна вважати R_1)

Неінвертуючий підсилювач. Схему неінвертуючого підсилювача подано на рис. 14.5.

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

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

$$U_{вх1} = U_{вих} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

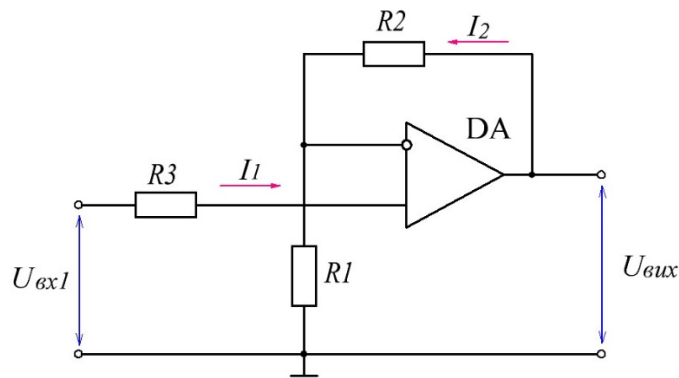


Рис. 14.5. Неінвертуючий підсилювач.

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

$$\frac{U_{вих}}{U_{вх}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

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.

Інтегратор (Інтегруючий підсилювач). Схему такого пристрою подано на рис. 14.6.

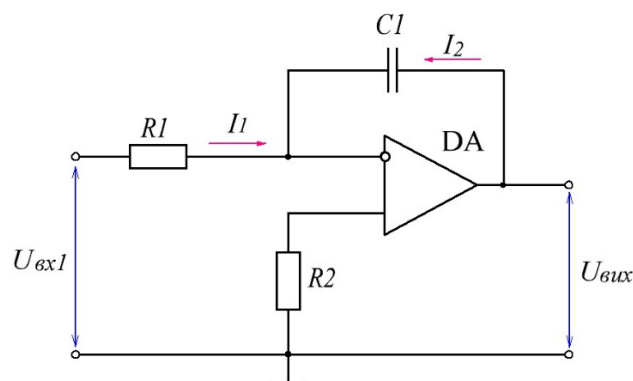


Рис. 14.6. Схема інтегратора.

У даному випадку:

$$I_1 = \frac{U_{вх1}}{R_1}$$

Оскільки операційний підсилювач ідеальний, то

$$I_1 = -I_2,$$

або

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

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

Звідки знаходимо

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

Диференціатор (диференціюючий підсилювач). Схему пристрою зображено на рис. 14.7.

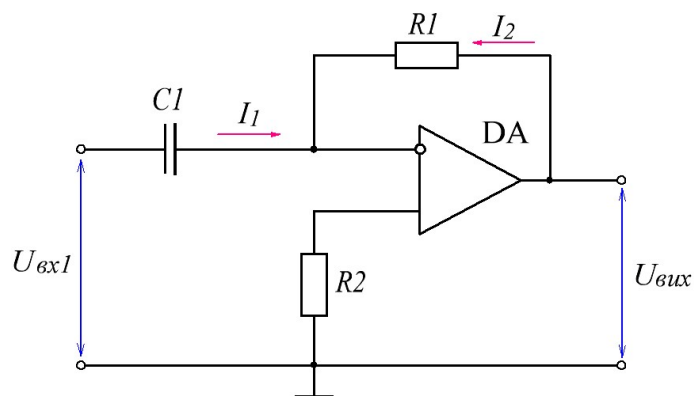


Рис. 14.7. Диференціатор.

У даному випадку

$$I_1 = C_1 \frac{dU_{\text{ex1}}}{dt};$$

$$I_2 = \frac{U_{\text{вих}}}{R_1}.$$

Оскільки операційний підсилювач ідеальний, то

$$I_1 = -I_2,$$

або

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

Звідки знаходимо:

$$U_{vux} = -R_1 C_1 \frac{d}{dt} \cdot U_{ex1}.$$

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись зі стендом для дослідження ОП в різних режимах роботи (рис.14.8.).
2. На стенді (рис. 14.8) встановлені операційний підсилювач, резистори, конденсатори, перемикачі необхідні для складання пристроїв, контактні гнізда для виконання з'єднань та підключення джерела живлення.
3. Підключіть позитивне джерело живлення до клем XS12 та XS13, а негативне джерело живлення підключіть до XS14 та XS15.
4. За допомогою мікроперемикачів SA1, SA10-11, SA20-22, SA30-31 та SA40-42 змінюються параметри роботи пристрою на основі ОП.
5. 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.

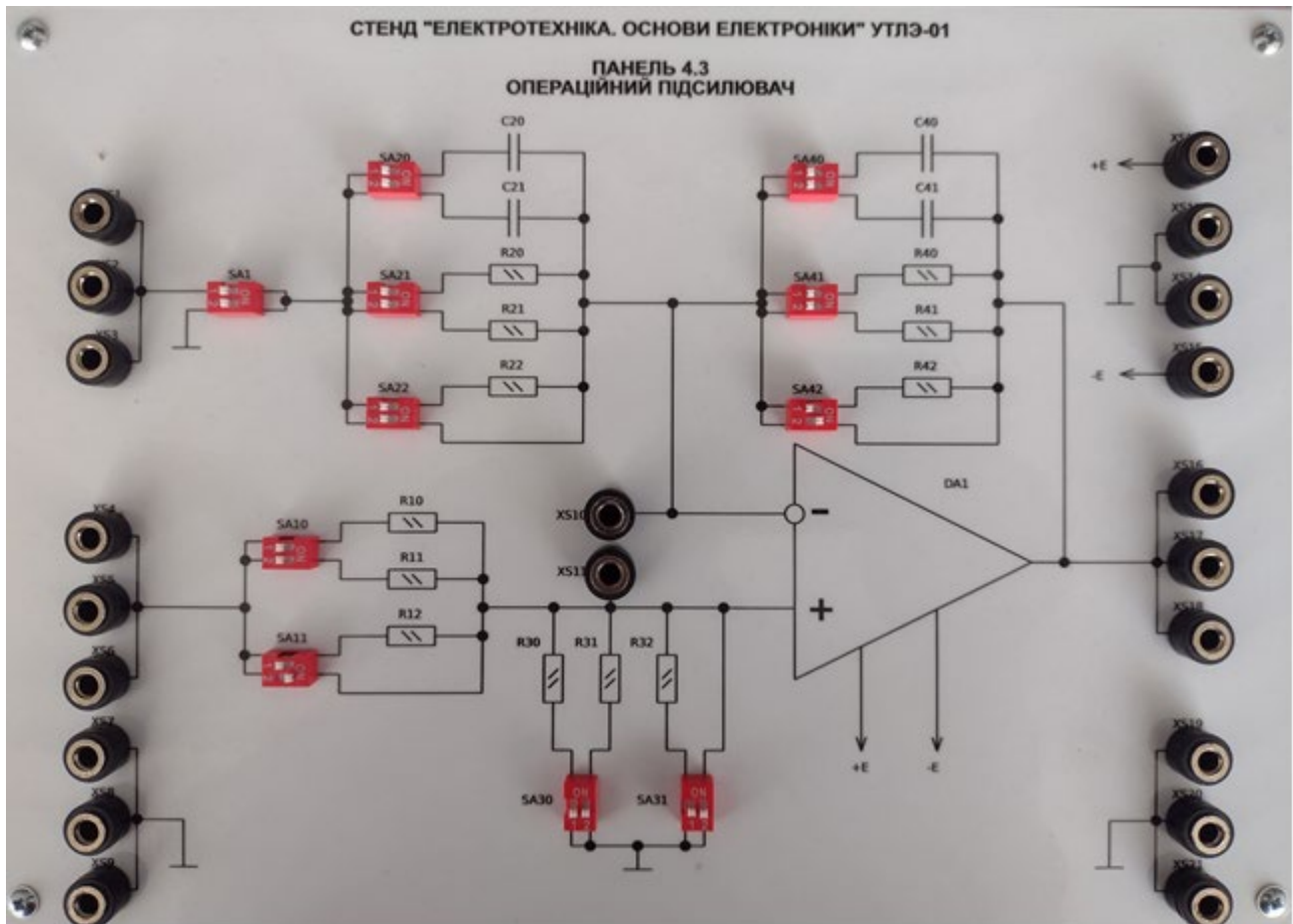


Рис. 14.8. Стенд «Електротехніка. Основи електроніки» УТЛЄ-01. Панель 4.3
Операційний підсилювач.

6. Складіть неінвертуючий підсилювач змінної напруги. Розрахуйте коефіцієнт підсилення. Повторіть операції, вказані в пункті 4, при входній напрузі 0,5 В.

7. Складіть інтегруючий пристрій. Запишіть вираз для вихідної напруги у випадку, коли входна 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.

8. Складіть схему диференціатора. Запишіть вираз для вихідної напруги у випадку, коли входна 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.

9. Накресліть схеми пристроїв на ОП, які потрібно скласти і дослідити згідно п. 5-8.

10. Вкажіть номінали елементів, що використовуються в цих схемах (табл. 14.1).

Таблиця 14.1. Номінальні значення опору резисторів та електричної ємності конденсаторів встановлених на панелі

<i>R10, R20, R30, R40</i>	<i>10 кОм</i>
<i>R11, R21, R31, R41</i>	<i>5,1 кОм</i>
<i>R12, R22, R32, R42</i>	<i>1 кОм</i>
<i>C21</i>	<i>10 мкФ</i>
<i>C41</i>	<i>1 мкФ</i>
<i>C20, C40</i>	<i>0,1 мкФ</i>

Контрольні запитання

1. Дайте визначення ОП.
2. Для чого призначені ОП?
3. Як позначають основні виводи ОП і для чого призначений кожен з них?
4. У чому відмінність ідеального ОП від реального ОП?
5. Як на схемах електричних кіл позначають ОП?
6. Намалюйте схему інвертуючого підсилювача.
7. Намалюйте схему неінвертуючого підсилювача.
8. Намалюйте схему інтегратора.
9. Намалюйте схему диференціатора.
10. Які є основні характеристики та параметри ОП?

Лабораторна робота № 15

Дослідження ЦАП на базі матриці R-2R

Мета роботи: Вивчити принцип дії та особливості побудови цифро-аналогових перетворювачів на основі резистивної матриці типу R-2R; дослідити залежність вихідної напруги від цифрового коду, сформулювати практичні навички аналізу та вимірювання характеристик цифро-аналогових перетворювачів.

Прилади і матеріали

1. Стенд «Електротехніка. Основи електроніки» УТЛЄ-01. Панель 6 «Цифро-аналоговий перетворювач».
2. Джерело живлення УТЛЄ01-02.
3. Мультиметр типу M890.
4. Генератор функціональний УТЛЄ01.01.
5. З'єднувальні проводи.

Теоретичні відомості

Цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) – це пристрої, призначені для перетворення цифрового сигналу в аналоговий сигнал. Найчастіше відбувається перетворення сигналу у вигляді напруги або струму. ЦАП знайшли широке використання у пристроях керування технологічними процесами, робототехніці, у пристроях відображення та передачі інформації, у вимірювальній техніці в аналогових мікропроцесорах та ін. Значення напруги на виході ЦАП залежить від «ваги» двійкового коду на його вході, тобто його еквіваленту в десятковій системі числення (рис. 15.1). У такому випадку напругу на виході можна розрахувати за формулою:

$$U_{\text{вих}} = \Delta U \cdot C$$

де, ΔU – крок квантування, C – число в двійковому коді.

$$C = q_n 2^{n-1} + q_{n-1} 2^{n-2} + \dots + q_2 2^1 + q_1 2^0$$

де 2^{n-1} – «вага» n -го розряду, $q_1 \dots q_n$ – коефіцієнти двійкових розрядів, які можуть набувати значення 1 або 0.

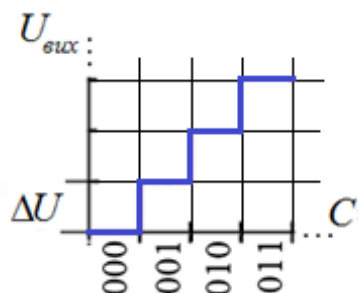


Рис. 15.1. Залежність вихідної напруги ЦАП від двійкового коду на вході.

Приклад: якщо на вхід ЦАП поданий числовий код $C(110100)$, то величина напруги на виході буде становити:

$$U_{\text{вих}} = \Delta U \cdot C = \Delta U \cdot (1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^2) = 52 \cdot \Delta U.$$

Перетворення цифрового сигналу в аналоговий полягає в тому, що для вхідного двійкового коду отримують струм I_0 , пропорційний до числа C , а потім перетворюють цей струм у вихідну напругу. Значення сили струму I_0 визначається сумою струмів I_i , які створюються для кожного розряду двійкового числа

$$I_0 = q_n I_n + q_{n-1} I_{n-1} + \dots + q_2 I_2 + q_1 I_1$$

Як видно з попереднього рівняння, додуються сили струмів лише тих розрядів, для яких $q_i=1$. Значення сил струмів I_i пропорційні вазі позиції двійкового числа. Значення сил струмів I_i зменшуються у два рази при переході від старшого розряду до наступного молодшого розряду.

Конструктивно ЦАП складається з джерела еталонної напруги $U_{\text{ет}}$, резистивної матриці, яка формує еталонні струми I_i , ключів, призначених для комутації струмів до входу підсилювача, інвертуючого операційного підсилювача, який перетворює струм у вихідну напругу, цифрової керуючої схеми. Проте основним елементом ЦАП є матриця резисторів, яка приєднана до входу підсилювача ключами, керування якими здійснюється двійковим кодом цифрової

комутуючої схеми. Резистивні матриці поділяються на дві групи: матриці з набору двійково-зважених за номіналами резисторів та матриці з резисторів тільки двох номіналів R - $2R$.

ЦАП на основі матриці R - $2R$

Схема ЦАП на основі матриці R - $2R$ зображена на рис. 15.2.

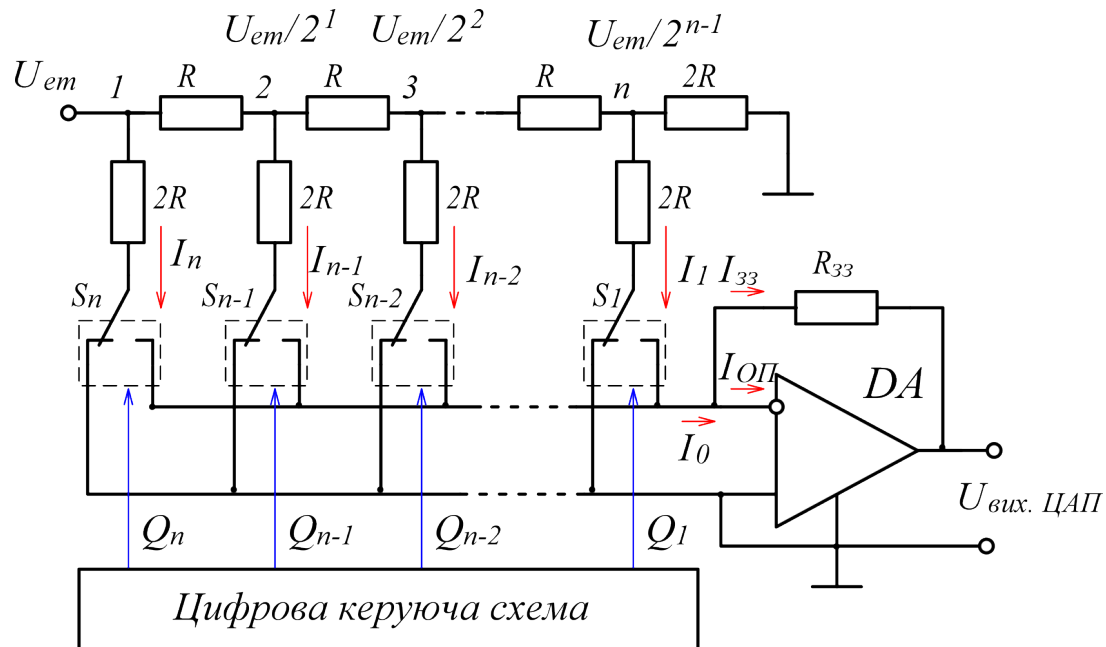


Рис. 15.2. Схема ЦАП на основі матриці R - $2R$. [2]

До основних особливостей матриці R - $2R$ можна віднести те, що опір в усіх вузлах матриці (1, 2, 3, ..., n) дорівнює R та не залежить від положення ключів. Ще однією важливою властивістю матриці R - $2R$ є те, що коефіцієнт передачі напруги між вузлами становить 0,5.

Вихідна напруга ЦАП з матрицею R - $2R$ визначається формулою:

$$U_{вих} = -I_0 R_{33}$$

$$\text{де } I_0 = q_n I_n + q_{n-1} I_{n-1} + \dots + q_2 I_2 + q_1 I_1$$

Оскільки напруга між сусідніми вузловими точками зменшується в два рази, то і сили струмів сусідніх розрядів також будуть зменшуватися в два рази.

$$I_n = \frac{U_{em}}{2R}; \quad I_{n-1} = \frac{U_{em}}{2^2 R}; \quad I_{n-2} = \frac{U_{em}}{2^3 R} \dots I_1 = \frac{U_{em}}{2^n R}.$$

$$I_0 = q_n \frac{U_{em}}{2R} + q_{n-1} \frac{U_{em}}{2^2 R} + \dots + q_1 \frac{U_{em}}{2^n R} = \frac{U_{em}}{2^n R} (q_n 2^{n-1} + q_{n-1} 2^{n-2} + \dots + q_1 2^0) = \frac{U_{em}}{2^n R} C$$

Відповідно, вихідна напруга ЦАП:

$$U_{вих} = -\frac{U_{em}}{2^n R} C R_{33} = -\Delta U \cdot C$$

У випадку коли $R_{33} = R$, то

$$U_{вих} = -\frac{U_{em}}{2^n} C = -\Delta U \cdot C$$

де, $\Delta U = \frac{U_{em}}{2^n}$ – крок квантування.

Панель 6. «Цифро-аналоговий перетворювач». Будова та принцип дії.

Панель дозволяє дослідити та вивчити принцип дії ЦАП, побудованого на матриці R - $2R$. Вона є односторонньою печатною платою (рис. 15.3), на лицьовій стороні якої нанесений рисунок умовної електричної схеми. Крім того, на лицьовій стороні встановлені клеми, призначені для підключення зовнішніх джерел живлення, сигналу та вимірювальних пристроїв, мікроперемикачі $SA1$ - $SA5$, які дозволяють змінювати параметри схеми, світлодіоди та кнопки. Плата закріплена на пластмасовому корпусі з гумовими ніжками.

ЦАП побудований на матриці R - $2R$ та двійковому реверсивному лічильнику. Виходи лічильника керують електронними ключами, які підключають елементи матриці R - $2R$ до опорної напруги або до «0». Стан виходів відображається за допомогою світлодіодів.

Панель дозволяє проводити роботу у двох режимах: режимі встановлення двійкового коду та режимі лічильника. У першому випадку двійковий код встановлюється за допомогою мікроперемикачів $SA1$ - $SA3$ (рис. 15.3). Положенню «ON» відповідає логічний «0». Після натискання кнопки «SET» ($SA7$) встановлений код з'являється на виході лічильника.

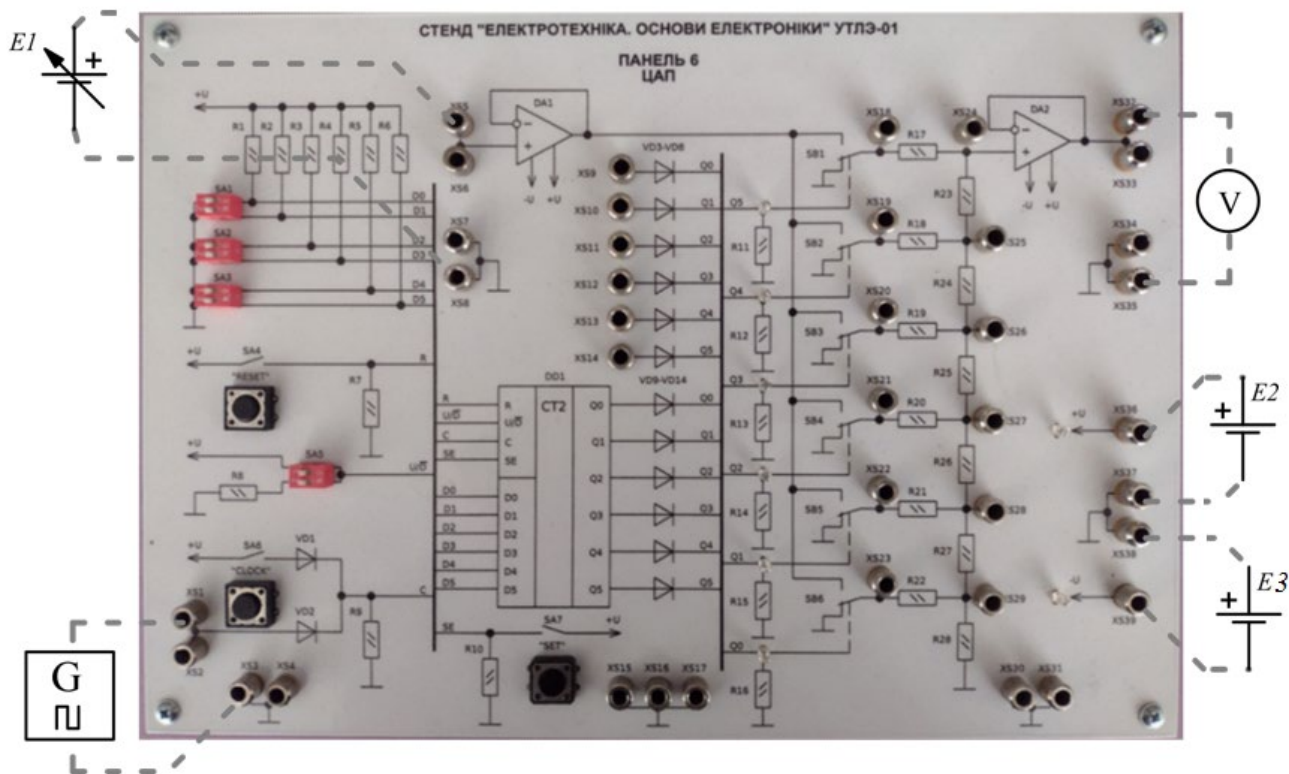


Рис. 15.3. Зовнішній вигляд панелі 6 ЦАП та схема підключення додаткових приладів. $E1$ – регульоване джерело напруги постійного струму; $E2, E3$ – джерела напруги постійного струму; G – генератор імпульсів; V – вольтметр постійного струму.

У другому випадку лічильник працює в режимі сумування (прямий напрям) або віднімання (зворотній напрям). Напрямок вибирається за допомогою $SA5$. При підключенні до «+U» лічильник працює у прямому напрямку, до «GND» – у зворотному напрямку. Код на виході лічильника змінюється при надходженні лічильного пульсу, який можна подати на клеми $XS1$ ($XS2$) або при натисканні кнопки «CLOCK» ($SA6$). Для скидання лічильника призначена кнопка «RESET» ($SA4$).

Джерела живлення підключаються до клем $XS36$ - $XS39$ (див рис. 15.3).

Опорна напруга підключається до клем $XS5$ - $XS8$, вихідний сигнал знімається з клем $XS32$ - $XS35$.

УВАГА! Категорично заборонено встановлювати опорну напругу величиною більшою, ніж $U_{ж} - 2B$ (де $U_{ж}$ напруга живлення панелі).

Напругу в різних плечах матриці $R-2R$ можна поміряти на клеммах $XS18$ - $XS29$.

Порядок виконання роботи

1. За допомогою з'єднувальних проводів під'єднайте всі додаткові прилади, необхідні для дослідження (рис. 15.5), а саме: нерегульовані джерела живлення до клем *XS36-XS37* та *XS38-XS39*, регульоване джерело живлення до клем *XS5(XS6)-XS7(XS8)*, генератор імпульсів до клем *XS1(XS2)-XS3(XS4)*.

2. Переведіть перемикачі *SA1-SA3* та *SA5* у положення «OFF».

3. Увімкніть джерела живлення. При правильному підключенні засвітяться відповідні світлодіоди. Встановіть опорну напругу, яка має бути меншою за напругу живлення не менш, ніж на 2 В.

Завдання 1. Режим двійкового коду.

1.1. Встановіть на перемикачах *SA1-SA3* необхідний двійковий код. Врахуйте, що положенню «ON» відповідає логічний «0».

1.2. Натисніть кнопку «SET» (*SA7*), при цьому засвітяться відповідні індикатори на виході лічильника, а на виході ЦАП (клеми *XS32(XS33)-XS34(XS35)*) встановиться напруга величиною, яка відповідає встановленому коду. Для того, щоб скинути дані на виході лічильника, натисніть кнопку «RESET».

1.3. Проведіть вимірювання вихідної напруги для різних значень двійкового коду. Дані запишіть до таблиці. Визначте крок квантування ЦАП.

1.4. За допомогою вольтметра можна вимірювати напругу як на виході ЦАП (клеми *XS32-XS35*), так і на окремих резисторах матриці *R-2R*.

Завдання 2. Режим лічильника.

2.1. За допомогою вимикача *SA5* виберіть напрямок рахунку лічильника. При увімкненому *SA5.1* (не залежно від стану *SA5.2*) рахунок буде відбуватися в сторону збільшення, при вимкненому *SA5.2* (*SA5.1* має бути вимкнений) - у сторону зменшення.

2.2. Натискаючи кнопку «CLOCK», спостерігайте зміну станів індикаторів на виході лічильника.

2.3. Увімкніть генератор імпульсів, спостерігайте зміну станів індикаторів на виході лічильника.

2.4. По завершенню роботи вимкніть додаткові прилади та відключіть їх від панелі.

2.5. За результатами проведених досліджень зробіть висновки.

Контрольні питання

1. Опишіть у загальному випадку процес перетворення цифрового коду в пропорційну йому аналогову величину в АЦП.
2. З яких основних частин складається ЦАП?
3. Яку функцію виконує резистивна матриця в схемі ЦАП?
4. Які бувають типи резистивних матриць?
5. Що таке «вага» двійкового коду?
6. За якою формулою визначається напруга на виході ЦАП?
7. У чому полягає перевага матриці $R-2R$ в порівнянні з матрицею двійково зважених резисторів?
8. Намалюйте схему ЦАП з матрицею резисторів $R-2R$ і поясніть її роботу.
9. Де використовуються ЦАП?
10. Яка різниця між цифровим та аналоговим сигналом?

Лабораторна робота № 16

Дослідження АЦП послідовного наближення

Мета роботи: Вивчити принцип дії аналого-цифрового перетворювача (АЦП) послідовного наближення, дослідити його структурну схему та алгоритм роботи; отримати практичні навички вимірювання параметрів АЦП, аналізу точності та швидкодії перетворення.

Прилади і матеріали

1. Стенд «Електротехніка. Основи електроніки» УТЛЄ-01. Панель 6 «Цифро-аналоговий перетворювач».
2. Стенд «Електротехніка. Основи електроніки» УТЛЄ-01. Панель 7 «Аналого-цифровий перетворювач».
2. Джерело живлення УТЛЄ01-02.
3. Мультиметр типу М890.

4. Генератор функціональний УТЛЄ01.01.

5. З'єднувальні проводи.

Теоретичні відомості

Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) – це пристрої, які перетворюють аналогові сигнали у цифровий код, тобто АЦП виконують функцію, обернену до ЦАП. АЦП входить до складу майже усіх цифрових приладів. На сучасному етапі розвитку АЦП виготовляють у вигляді однієї або декількох мікросхем. Один із варіантів архітектури АЦП зображений на рис. 16.1. До будови АЦП входять компаратор напруги (пристрій, призначений для порівняння двох напруг), ЦАП, генератор імпульсів, інвертор, реверсивний лічильник.

Під час надходження сигналів від генератора імпульсів на вхід 3 лічильника реверсним лічильником виконується підрахунок кількості імпульсів в залежності від надходження сигналів на його 1 та 2 входи від компаратора. Компаратор напруги здійснює порівняння вхідного аналогового сигналу ($U_{вх}$) з вихідною напругою цифро-аналогового перетворювача ($U_{вихЦАП}$). Якщо виконується умова, що $U_{вх} > U_{вихЦАП}$, то на вхід 1 реверсного лічильника надходить сигнал «1», а на вхід 2 реверсного лічильника надходить «0».

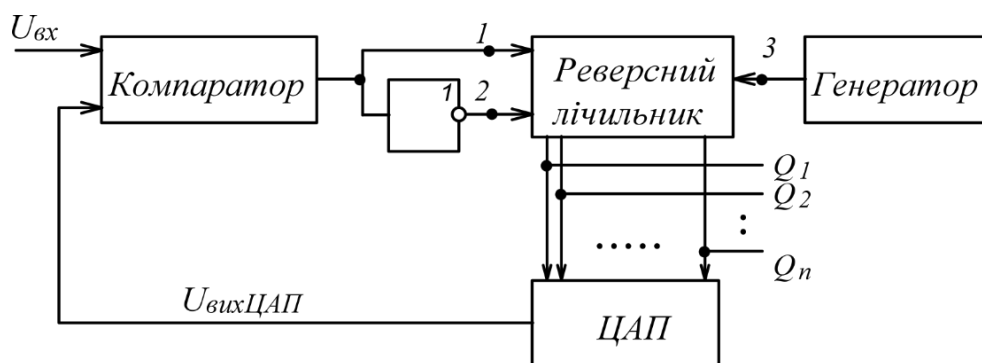


Рис. 16.1. Структурна схема АЦП. [2]

Реверсний лічильник здійснює підрахунок кількості імпульсів, які надходять від генератора імпульсів у прямому напрямку, тобто він працює у режимі сумування. Якщо виконується умова, при якій $U_{вх} < U_{вихЦАП}$, то на виході компаратора напруги і на вході 1 реверсного лічильника утворюється сигнал «0», а на вході 2 реверсного лічильника формується «1», відповідно, реверсний лічильник перейде у режим віднімання.

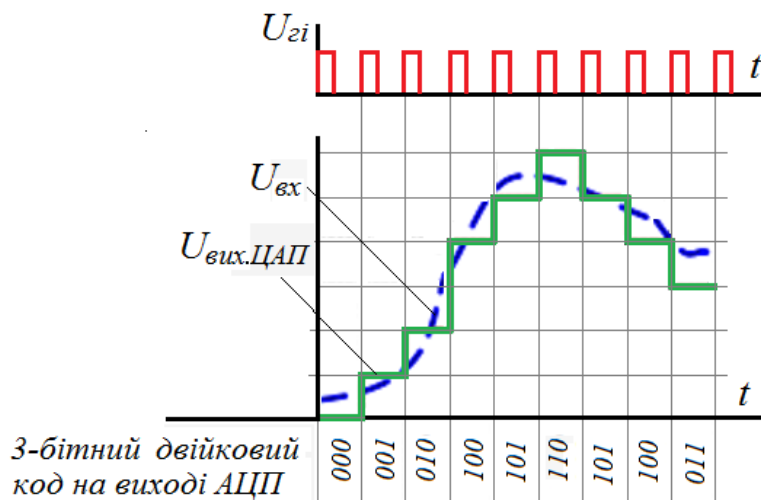


Рис. 16.2. Принцип дії АЦП.

Якщо виконується умова, що $U_{вх} > U_{вих.ЦАП}$, то двійковий код на виході реверсного лічильника буде зростати (рис. 16.2), що обумовить зростання напруги на виході ЦАП. У випадку, коли $U_{вих.ЦАП}$ стане вищою за $U_{вх}$, то зміниться сигнал на виході компаратора напруги і лічильник почне працювати в режимі віднімання. Отже, реверсивний лічильник разом з цифро-аналоговим перетворювачем відслідковують напругу на вході, і код на виході аналого-цифрового перетворювача (виході реверсного лічильника) буде пропорційний аналоговій величині сигналу на вході.

Панель 7 «Аналого-цифровий перетворювач»

Панель являє собою АЦП послідовного наближення і містить у собі компаратор, генератор, регулятор опорної напруги та регулятор вимірювального сигналу. У якості ЦАП має використовуватись Панель 6 «Цифро-аналоговий перетворювач».

Для проведення досліджень додатково необхідні джерела живлення +12 В та -12 В, вольтметр постійного струму. У якості джерел живлення можна використати джерело живлення УТЛЕ.01-02 (два нерегульованих канали по 12 В). У якості вольтметра можливо використати поширені мультиметри типу М890. Зовнішній вигляд панелі показано на рис. 16.3.

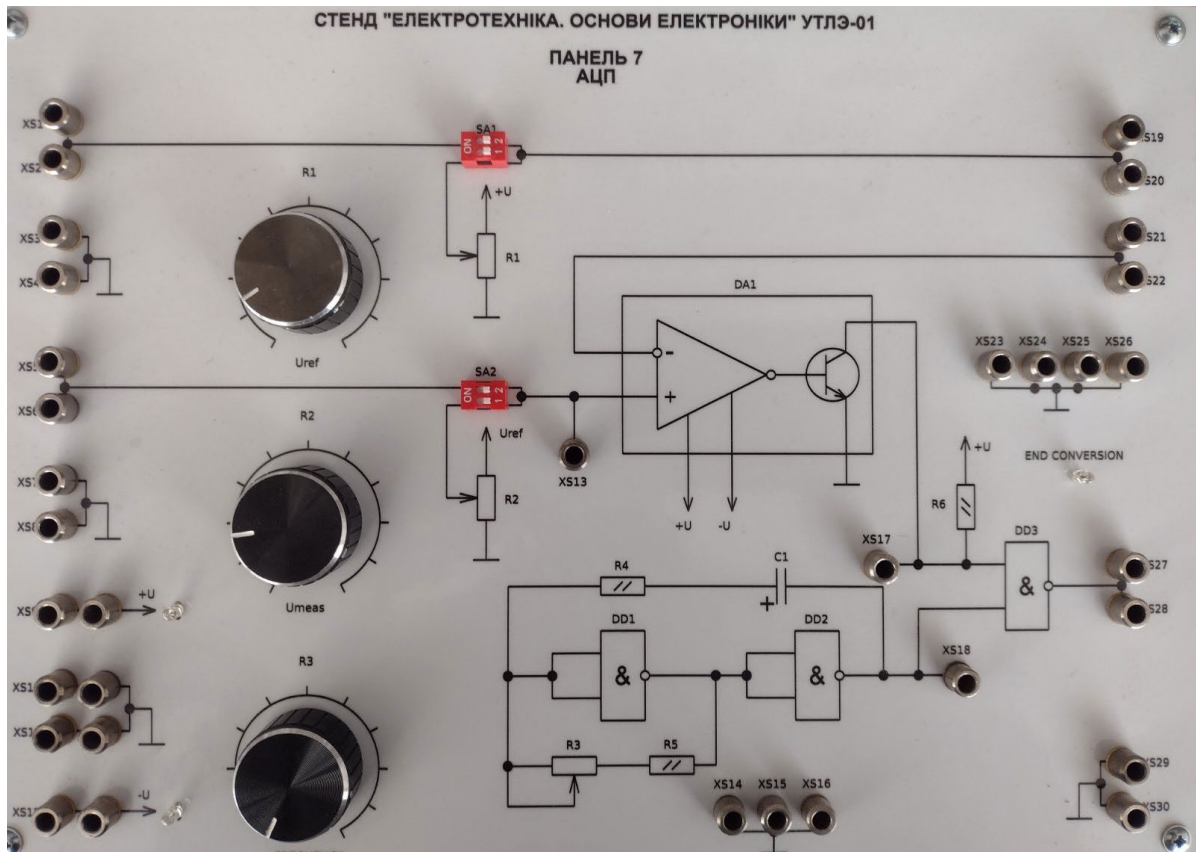


Рис. 16.3. Зовнішній вигляд панелі 7 ЦАП.

Схема з'єднань панелей ЦАП та АЦП для проведення досліджень показана на рис. 16.4.

За допомогою перемикача *SA1* панелі 7 вибираємо джерело опорної напруги, яке виробляється з напруги живлення панелі. Опорну напругу можна змінювати за допомогою змінного резистора *R1*.

За допомогою перемикача *SA2* вибираємо напругу для перетворення, яка виробляється з опорної напруги. Таким чином, напруга для перетворення ніколи не перевищить опорну напругу. Напругу для перетворення можна змінювати за допомогою змінного резистора *R2*. За допомогою змінного резистора *R3* можна змінювати частоту тактових імпульсів, необхідних для лічильника (панель 6). По закінченню перетворення аналогової напруги в цифровий код засвітиться світлодіод «END CONVERSION», а на світлодіодах панелі 6 буде відображений цифровий код. Код залишається незмінним, оскільки на елементі *DD3* перетворення блокується проходження тактових імпульсів до лічильника (панель 6). Для запуску нового перетворення необхідно натиснути на кнопку «RESET» на панелі 6.

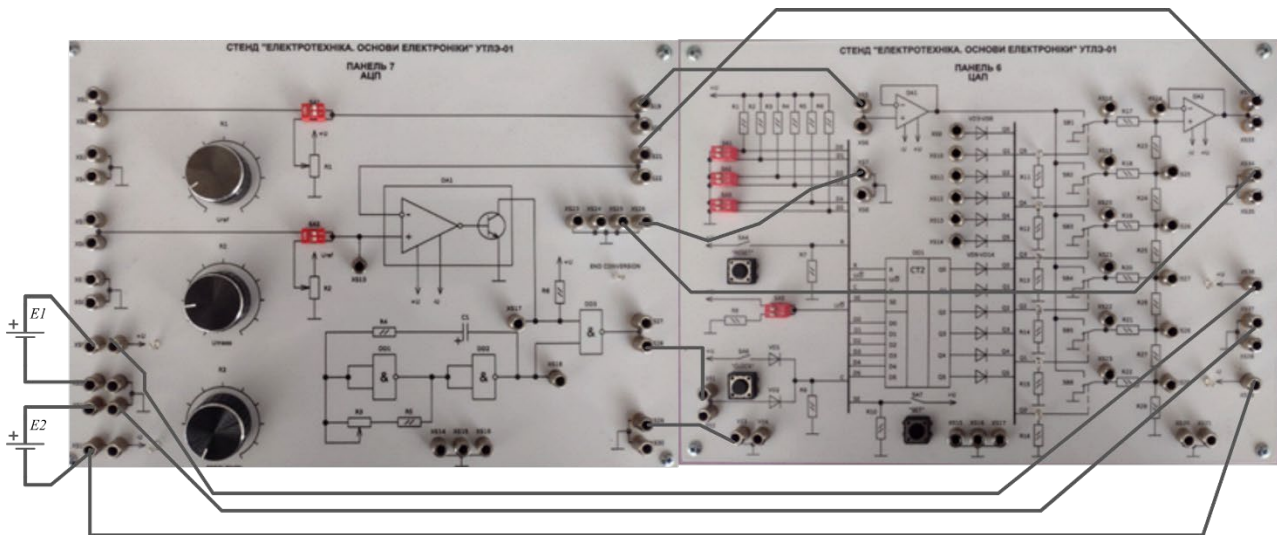


Рис. 16.4. Схема з'єднань панелей ЦАП та АЦП для проведення досліджень.

Панель 7 також дозволяє використовувати в якості опорної напруги стороннє джерело живлення, а в якості сигналу для перетворення дозволяє використовувати сторонню напругу.

Джерела живлення панелі підключаються до клем $X9-X12$ (рис. 16.4).

Опорна напруга регулюється за допомогою резистора $R1$ (U_{ref}), при необхідності можна підключити зовнішнє джерело до клем $X51-X54$. Вибір джерела опорної напруги здійснюється мікроперемикачем $SA1$.

Вимірювальна напруга регулюється за допомогою резистора $R2$ (U_{meas}). При необхідності можна підключити зовнішнє джерело до клем $X5-X8$. Вибір джерела вимірювальної напруги здійснюється мікроперемикачем $SA2$.

Частота перетворення змінюється за допомогою резистора $R3$ (FREQUENCY).

Увага! Не допускається встановлювати опорну напругу та вимірювальну напругу більшими, ніж $U_{ж}-2B$ (де $U_{ж}$ напруга живлення панелі).

Порядок виконання роботи

1. За допомогою з'єднувальних проводів під'єднайте всі додаткові прилади, необхідні для проведення дослідження, до панелі (див рис. 16.4).
2. Мікроперемикачами $SA1$ та $SA2$ виберіть режим роботи з внутрішнім джерелом опорної напруги та вимірювальної напруги.
3. На панелі ЦАП увімкніть лічильник в режим сумування (прямий напрям).

4. Увімкніть джерела живлення. За допомогою резистора $R1$ встановіть опорну напругу.
5. Встановіть вимірювальну напругу за допомогою регулятора $R2$.
6. Натисніть кнопку «RESET» на панелі ЦАП та відслідковуйте перебіг значень. По завершенню перетворення (коли сигнал з ЦАП буде більшим за вимірювальний сигнал), генерація тактового сигналу припиниться і засвітиться світлодіод «END CONVERSION».
7. Для повторного відліку необхідно натиснути кнопку «RESET» на панелі ЦАП або збільшити вимірювальну напругу.

Контрольні запитання

1. Поясніть принцип дії АЦП.
2. Поясніть принцип дії ЦАП.
3. Де використовують АЦП?
4. Який сигнал називається аналоговим?
5. Який сигнал називається цифровим?
6. З яких пристроїв складається АЦП?
7. Намалюйте функціональну схему АЦП.
8. Для чого в структурній схемі АЦП потрібен реверсний лічильник?

Лабораторна робота № 17

Дослідження мікросхем логічних елементів та мікросхем для керування семисегментним цифро-буквеним індикатором

Мета роботи: Ознайомитися з принципами роботи та основними характеристиками мікросхем логічних елементів, вивчити їх функціональні можливості та способи використання у цифрових схемах; дослідити роботу мікросхем-декодерів і драйверів для керування семисегментними цифро-буквеними індикаторами,

сформувати практичні навички побудови та аналізу схем індикації.

Прилади і матеріали

1. Панель ESPE-2 (Devise II).
2. Джерело живлення (5 В).
3. З'єднувальні проводи.

Теоретичні відомості

Для апаратної реалізації булевих функцій використовується набір логічних елементів, які виготовляються у вигляді інтегральних мікросхем (ІМС). Розрізняють спеціалізовані ІМС, виготовлені методами інтегральної технології спеціально для отримання певної логічної залежності. Спеціалізовані ІМС мають високу надійність та не потребують ніяких паяних з'єднань. Проте розробка подібних мікросхем економічно виправдана лише при великому обсязі випуску. Прикладом може бути масовий випуск спеціалізованих великих інтегральних схем (ВІС) для електронних годинників, мікрокалькуляторів і т. ін.

Крім спеціалізованих ВІС у сучасній електроніці використовується універсальний набір логічних елементів у вигляді ІМС, які забезпечують реалізацію простих логічних функцій. До цього набору можна віднести інвертор, кон'юнктор, диз'юнктор, повторювач, І-НЕ, АБО-НЕ, виключне АБО, і т. ін.

Логічний елемент НЕ (інвертор). Логічний елемент НЕ реалізовує логічну функцію

$$Y = \overline{X}$$

На рис. 17.1 показане умовне схематичне позначення інвертора (рис. 17.1, а) та його принципова електрична схема (рис. 17.1, б).

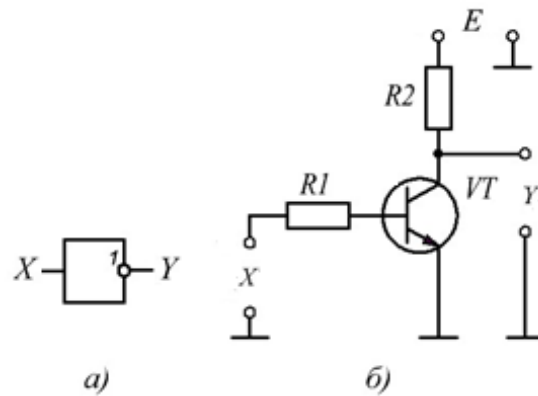


Рис. 17.1. Логічний елемент НЕ: а) умовне схематичне позначення; б) принципова електрична схема.

Логічний елемент І (кон'юнктор). Логічний елемент І реалізовує логічну функцію

$$Y = X_1 \wedge X_2 = X_1 \cdot X_2.$$

На рис. 17.2 показані умовне схематичне позначення кон'юнктора (рис. 17.2, а), принципова схема (рис. 17.2, б) та таблиця істинності (табл. 17.1).

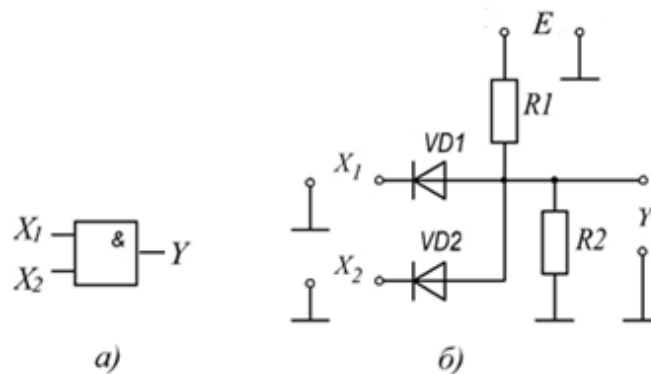


Рис. 17.2. Логічний елемент І: а) позначення на електричних схемах; б) принципова електрична схема.

Таблиця 17.1. Таблиця істинності кон'юнктора.

X_1	X_2	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Логічний елемент АБО (Диз'юнктор). Диз'юнктор реалізує логічну функцію

$$Y = X_1 \vee X_2 = X_1 + X_2$$

Нижче показані позначення на електричних схемах диз'юнктора (рис. 17.3, а), принципова схема (рис. 17.3, б) та таблиця істинності (табл. 17.2).

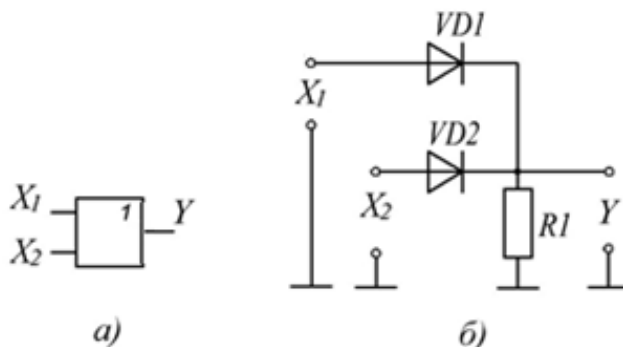


Рис. 17.3. Логічний елемент АБО: а) умовне схематичне позначення; б) принципова електрична схема.

Таблиця 17.2. Таблиця істинності диз'юнктора.

X_1	X_2	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Логічний елемент І-НЕ. Елемент І-НЕ реалізовує логічну функцію

$$Y = \overline{X_1 \wedge X_2} = \overline{X_1 \cdot X_2}$$

Нижче показані позначення елемента І-НЕ (рис. 17.4, а), функціональна схема (рис. 17.4, б) і таблиця істинності (табл. 17.3).

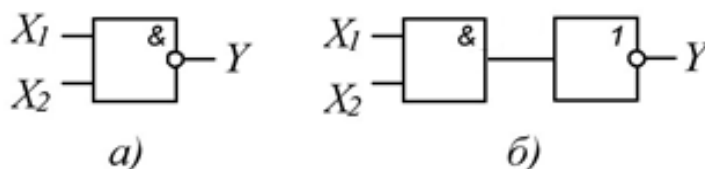


Рис. 17.4. Логічний елемент І-НЕ: а) умовне схематичне позначення; б) функціональна схема.

Таблиця 17.3. Таблиця істинності
логічного елемента І-НЕ.

X_1	X_2	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Логічний елемент АБО-НЕ. Логічний елемент АБО-НЕ реалізує логічну функцію

$$Y = \overline{X_1 \vee X_2} = \overline{X_1 + X_2}$$

На рис. 17.5 показані його позначення на електричних схемах (рис. 17.5, а), функціональна схема (рис. 17.5, б) і таблиця істинності (табл. 17.4).

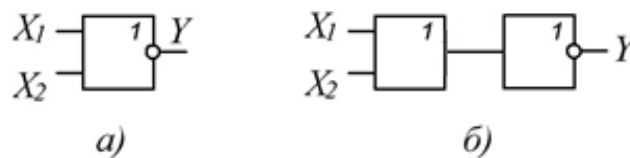


Рис. 17.5. Логічний елемент АБО-НЕ: а) позначення на електричних схемах; б) функціональна схема.

Таблиця 17.4. Таблиця істинності
логічного елемента АБО-НЕ.

X_1	X_2	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Виключне АБО. Логічний елемент «Виключне АБО» реалізує логічну функцію

$$Y = X_1 \oplus X_2 = X_1 \overline{X_2} + \overline{X_1} X_2$$

Нижче показані його позначення на електричних схемах (рис. 17.6) і таблиця істинності (табл. 17.5).

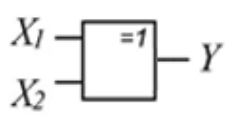


Рис. 17.6. Позначення логічного елемента «Виключне АБО» на електричних схемах.

Таблиця 17.5. Таблиця істинності логічного елемента Виключне АБО.

X_1	X_2	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Мікросхема SN7402. Мікросхема SN7402 є зарубіжними аналогом вітчизняних мікросхем К155ЛЕ1 та КМ155ЛЕ1. Мікросхема SN7402 представляє собою чотири логічних елементи 2АБО-НЕ (рис. 17.7).

Електрична схема одного елемента 2АБО-НЕ мікросхеми SN7402 показана на рис. 17.8.

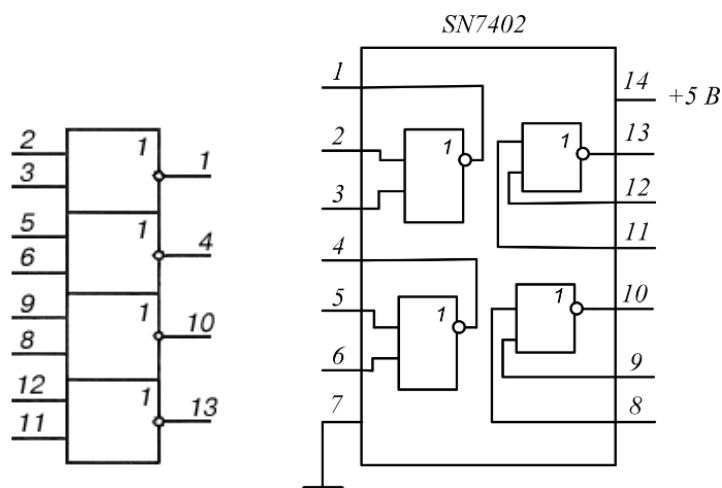


Рис. 17.7. Нумерація ніжок мікросхеми SN7402 та її структурна схема.

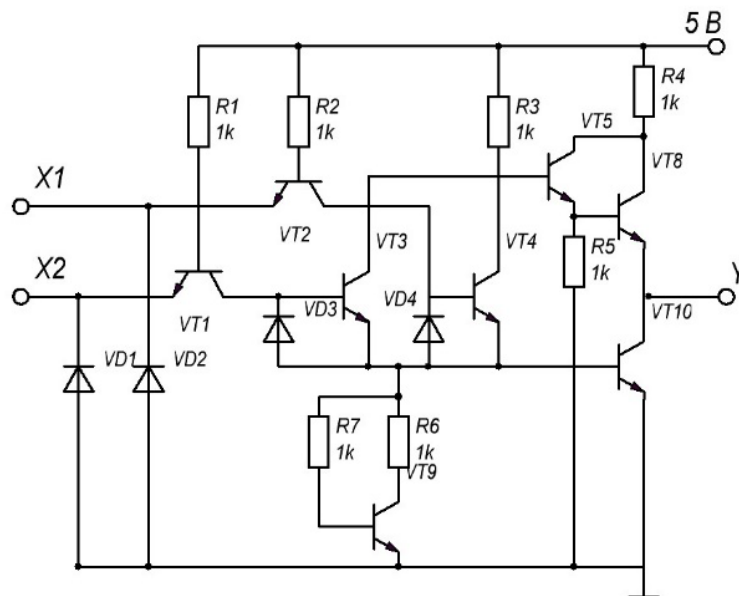


Рис. 17.8. Електрична схема елемента 2АБО-НЕ мікросхеми SN7402.

Мікросхема SN7400. У функціональній структурі мікросхеми SN7400 міститься чотири незалежних один від одного логічних елементи 2І-НЕ. (загальний вивід – 7, вивід 14 – позитивний полюс живлення).

Мікросхема SN7400 є зарубіжним аналогом мікросхеми К155ЛА3.

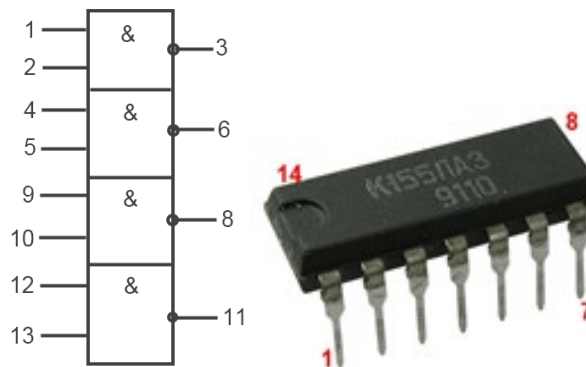


Рис. 17.9. Структурна схема та зовнішній вигляд мікросхеми SN7400.

Мікросхема КМ155ІЕ6. Зарубіжними аналогами мікросхеми КМ155ІЕ6 є мікросхеми SN74192N, SN74192J. Мікросхема представляє собою двійково-десятковий прямий та реверсивний лічильник. Містить 268 інтегральних елементів. Корпус КМ155ІЕ6 типу 201.16-6. Імпульсні тактові входи для рахунку на збільшення Cu (вивід 5) і на зменшення Cd (вивід 4) окремі. Стан лічильника

змінюється по позитивних перепадах тактових імпульсів від низького рівня до високого на кожному з цих тактових входів.

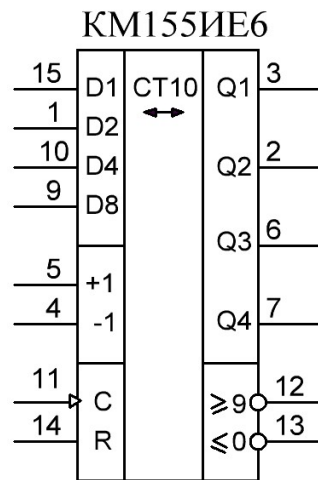


Рис. 17.10. Умовне позначення мікросхеми KM155IE6 та призначення її ніжок: D1, D2, D4, D8 – інформаційні входи; Q1, Q2, Q3, Q4 – виходи першого, другого, третього та четвертого розрядів; -1 - вхід "зворотний рахунок"; +1 - вхід "прямий рахунок"; C - вхід попереднім записом; R - вхід установки "0"; ≥ 9 - вихід "пряме перенесення"; ≤ 0 - вихід "зворотне перенесення".

Мікросхема MDS101 (KP514ИД2). Мікросхеми MDS101 (KP514ИД2) призначені для управління напівпровідниковими семисегментними цифро-буквеними індикаторами, які використовуються в електронній апаратурі. MDS101 – мікросхема-дешифратор двійково-десятькового коду для 7-сегментного світлодіодного індикатора із загальним анодом.

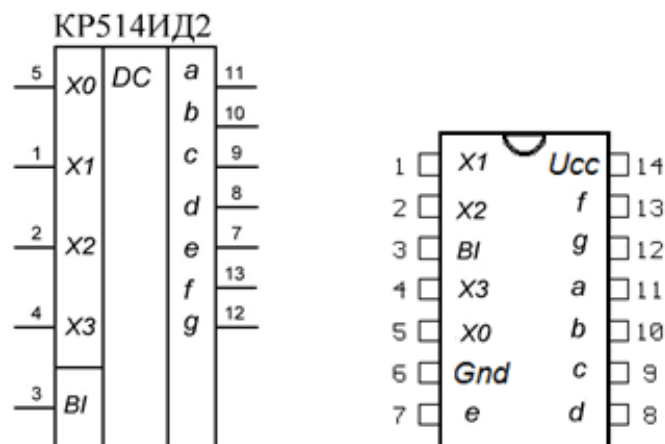


Рис. 17.11. Умовне позначення мікросхеми MDS101 (KP514ИД2) та призначення її ніжок: X0, X1, X2, X3 – інформаційні входи; BI - вхід гашення; a, b, c, d, e, f, g –

виходи, що підключаються до сегментних індикаторів; U_{cc} – живлення +5 В; Gnd – спільний.

Таблиця 17.6. Таблиця істинності мікросхеми MDS101 (KP514ИД2)

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	c
1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	e
0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	u
1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	c -
0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	t

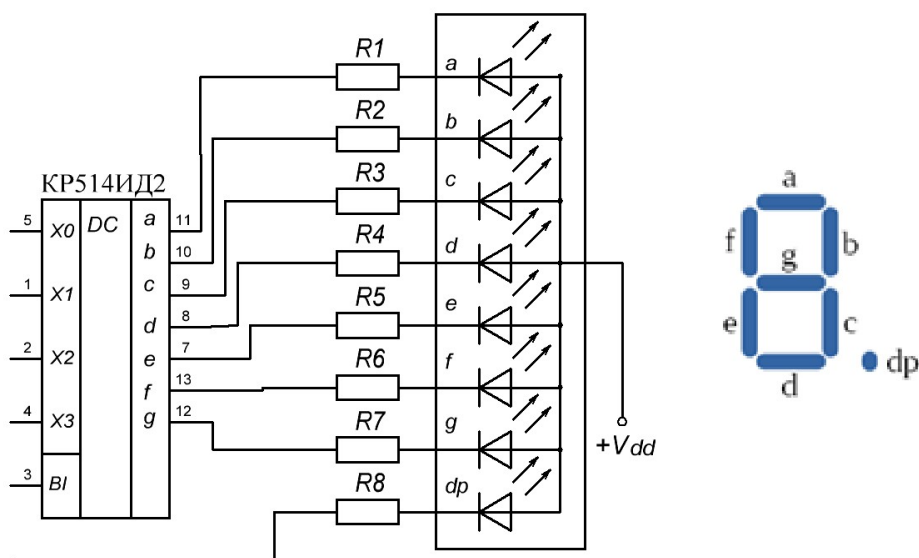


Рис. 17.12. Схема підключення семисегментного індикатора до мікросхеми MDS101 (KP514ИД2) зі спільним анодом.

Порядок виконання роботи

1. Дослідити роботу мікросхеми SN7402. За результатами проведених досліджень побудувати таблицю істинності логічного елемента АБО-НЕ.

2. Дослідити роботу мікросхеми SN7400. За результатами проведених досліджень побудувати таблицю істинності логічного елемента І-НЕ.
3. Дослідити роботу мікросхеми КМ155ІЕ6 та MDS101 (КР514ИД2). Дослідити залежність показів семисегментного цифро-буквеного індикатора від двійкового коду на входах та виходах мікросхем. За результатами проведених досліджень побудувати таблиці істинності.
4. На основі проведених досліджень зробити висновки.

Контрольні питання

1. Умовне схематичне позначення та таблиця істинності логічного елемента НЕ.
2. Умовне схематичне позначення та таблиця істинності логічного елемента І.
3. Умовне схематичне позначення та таблиця істинності логічного елемента АБО.
4. Умовне схематичне позначення та таблиця істинності логічного елемента «Виключне АБО».
5. Умовне схематичне позначення та таблиця істинності логічного елемента «АБО-НЕ»
6. Умовне схематичне позначення та таблиця істинності логічного елемента «І-НЕ»
7. Охарактеризуйте мікросхеми SN7402 та SN7400.
8. Для чого призначений прямий та реверсивний двійково-десятковий лічильник.
9. Як на електронних схемах позначають мікросхему MDS101 - дешифратор двійково-десятьового коду.
10. Поясніть принцип дії мікросхеми MDS101 - дешифратора двійково-десятьового коду.
11. Що являє собою напівпровідниковий семисегментний індикатор?

Лабораторна робота № 18

Дослідження тригерів

Мета роботи: Дослідити роботу та вивчити принцип дії тригерів різного типу (*RS*-тригер, *D*-тригер, *T*-тригер, *JK*-тригер).

Прилади і матеріали

1. Стенд «Електротехніка. Основи електроніки» УТЛЄ-01. Панель 8.2 Тригери.
2. Блок живлення 10-12 В.
3. З'єднувальні проводи.

Теоретичні відомості

Цифрові пристрої, що обробляють інформаційні сигнали, подані у двійковій формі, поділяються на дві групи: комбінаційні (без пам'яті) та послідовнісні (із пам'яттю). Усі комбінаційні цифрові пристрої можна охарактеризувати тим, що стан їх виходів визначається комбінацією сигналів на вході у даний момент часу та не залежить від значень цих сигналів у попередні моменти часу. Послідовнісні цифрові пристрої мають здатність запам'ятовувати попередню інформацію і в разі зміни інформації на входах для визначення сигналів на виходах необхідно знати стан, у якому пристрій був до цього. Особливістю послідовнісних пристроїв є наявність у них кіл зворотних зв'язків з виходів на входи.

Тригером називається послідовнісний пристрій, який має два стійкі стани рівноваги, зміна яких відбувається стрибком під дією сигналів на входах. Тригери використовуються при розробці формувачів імпульсів; у подільниках частоти; в лічильниках, регістрах, у пристроях збереження інформації та ін. У найбільш загальному випадку структурну схему тригера можна зобразити так, як показано на рис. 18.1. У схемі можна виділити пристрій керування та елемент пам'яті. Розрізняють такі основні входи та виходи тригера (рис. 18.1) $A_1, \dots, A_n$ – інформаційні входи; S , R – установлювальні входи; C – вхід синхронізації або

тактовний вхід; R^* , S^* – входи елемента пам'яті; V – підготовчий вхід; Q , $\bar{Q}$ – виходи (виходи Q та $\bar{Q}$ є взаємоінверсними).

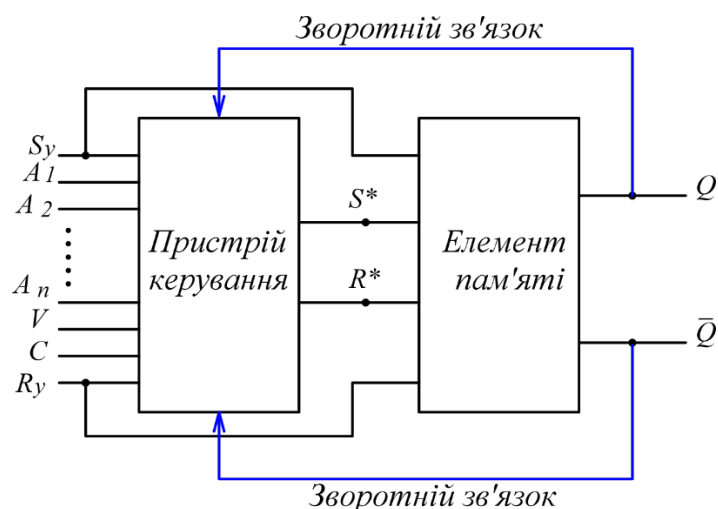


Рис. 18.1. Структурна схема тригера. [2]

Позначення і призначення входів тригерів представлені в табл. 18.1. Структурна схема тригера є комбінаційним цифровим пристроєм, який перетворює вхідну інформацію в комбінацію сигналів, під впливом яких елемент пам'яті може прийняти один з двох можливих станів. Міняючи схему керування та її зв'язки з елементом пам'яті, отримують різні типи тригерів, які будуть мати різне призначення. У найпростіших типах тригерів схема керування може бути відсутньою, відповідно, вхідні сигнали будуть подаватись на входи елемента пам'яті.

Таблиця 18.1. Позначення і призначення входів тригерних пристроїв.

Позначення входів	Призначення входів
Інформаційні входи	
S (set – встановлення)	Встановлення тригера в одиничний стан
R (reset – скидання)	Встановлення тригера в нульовий стан
T (toggle – релаксатор)	Лічильний вхід тригера
J (jerk – включення)	Встановлення JK -тригера в одиничний стан
K (kill – відключення)	Встановлення JK -тригера в нульовий стан

D (delay – затримка)	Встановлення тригера в одиничний або нульовий стан
Керуючі входи	
V (valve – клапан)	Керуючий вхід для дозволу приймання інформаційних або тактових сигналів
C (clock – годинник)	Тактовий вхід для дозволу запису інформації в тригер
Входи встановлення	
S_y	Вхід для встановлення тригера в одиничний стан
R_y	Вхід для встановлення тригера в нульовий стан

За способом організації логічних зв'язків тригери поділяють на RS - тригери (тригери з окремим встановленням станів «0» і «1»); T - тригери – (тригери з лічильним входом (лічильні тригери)); D - тригери (тригери затримки) (універсальні тригери з керованим прийманням інформації по одному входу); JK - тригери (універсальні тригери з окремим встановленням «0» і «1») та ін.

Асинхронний RS -тригер

RS -тригер - це запам'ятовувальний пристрій, у якому інформаційні входи для переведення тригера у нульовий стан «0» (R вхід) та в одиничний стан «1» (S вхід) є розділеними. Перемикання RS -тригера в наступний стан залежить і від значень вхідних інформаційних сигналів у даний момент часу, і від попереднього стану тригера. У такому випадку тригером керує інформація з інформаційних входів та інформація про попередній стан, яка надходить на входи з виходу тригера.

Функцію переходів тригера задають рівняннями, які виражають залежність стану тригера в $(n+1)$ такті Q_{n+1} від стану тригера в n такті Q_n та від вхідних сигналів. Також функцію переходів тригера можна описати таблицею. Роботу асинхронного RS -тригера можна описати рівнянням:

$$Q_{n+1} = S_n + \overline{R_n} \cdot Q_n$$

Функціонування асинхронного RS -тригера можна описати таблицею переходів (табл. 14.2). У таблиці: R_n , S_n , – значення змінних на n такті на

інформаційних входах, Q_n – значення на виході на n -му такті тригера; Q_{n+1} – стан тригера на $(n+1)$ такті після перемикання; X – заборонені комбінації сигналів.

Таблиця 18.2. Таблиця переходів (станів) асинхронного RS -тригера.

R_n	S_n	Q_n	Q_{n+1}
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	X
1	1	1	X

На рис. 18.2 зображена схема асинхронного RS -тригера в базисі АБО-НЕ, його часові діаграми роботи та умовне схематичне позначення.

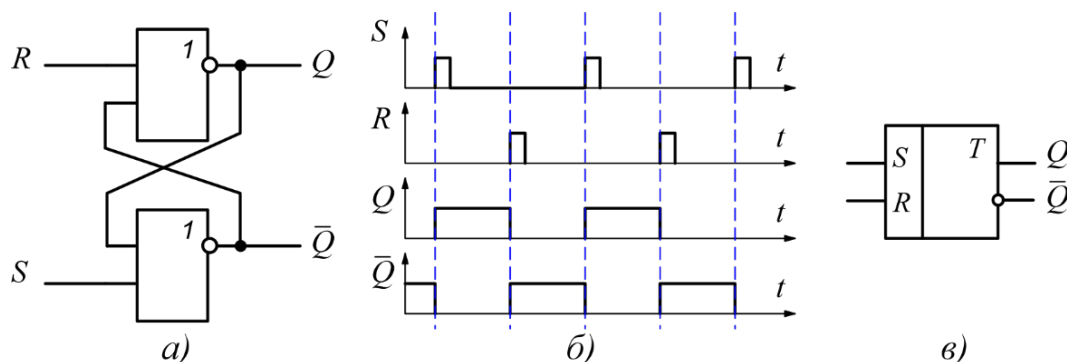


Рис. 18.2. а) схема асинхронного RS -тригера в базисі АБО-НЕ, б) часові діаграми роботи RS -тригера; в) умовне схематичне позначення асинхронного RS -тригера.

На рис. 18.3, а зображено RS -тригер, побудований у базисі І-НЕ, його умовне схематичне позначення (б), таблицю переходів (г) та часові діаграми роботи (в). Для даного тригера характерне інверсне керування. Тому RS -тригер у базисі І-НЕ називають тригером з інверсним керуванням. Для даного тригера заборонена одночасна подача на входи R і S нулів $\bar{S} + \bar{R} = 0$. Після забороненої комбінації вхідних сигналів стан, у який перейде тригер, буде залежати від того, котрий із вхідних сигналів був довшим по тривалості. Цим обумовлено один із основних

недоліків даних тригерів. Також важливим недоліком асинхронних тригерів є їх низька завадостійкість.

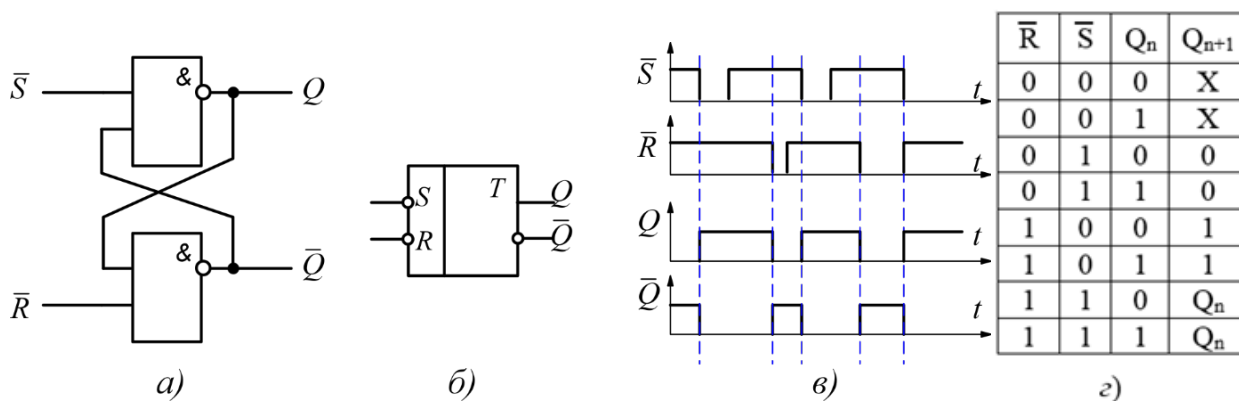


Рис. 18.3. а) схема RS -тригера в базисі І-НЕ, б) умовне схематичне позначення RS -тригера, в) часові діаграми роботи RS -тригера, г) таблиця переходів RS -тригера.

Синхронний RS -тригер

У синхронних тригерах зміна стану тригера відбувається під дією інформаційних сигналів лише при наявності тактового (синхронізуючого) сигналу.

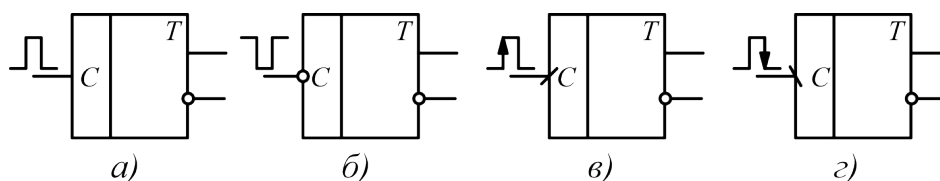


Рис. 18.4. Умовні позначення статичних та динамічних входів керування тригерів синхронного RS -тригера.

Усі синхронні тригери можна поділити на тригери з динамічним керуванням, статичним керуванням та двоступеневі тригери. На рис. 18.4 зображено умовні позначення статичних та динамічних входів керування тригерів синхронного RS -тригера. У тригерах, в яких використовується статичне керування, запис інформації з інформаційних входів відбувається впродовж усієї тривалості тактових (синхронізуючих) сигналів. Тактові сигнали у тригерах зі статичним керуванням можуть приймати 1 або 0, відповідно, тригери називаються тригерами з прямим чи тригерами з інверсним керуванням. Позначення статичних входів представлено на рис. 18.4, а та рис. 18.4, б. У тригерах з динамічним керуванням запис інформації відбувається тільки під час дії фронтів тактових сигналів або в моменти зрізів

тактових сигналів. Позначення динамічних входів тригерів представлено на рис. 18.4, в та рис. 18.4, з.

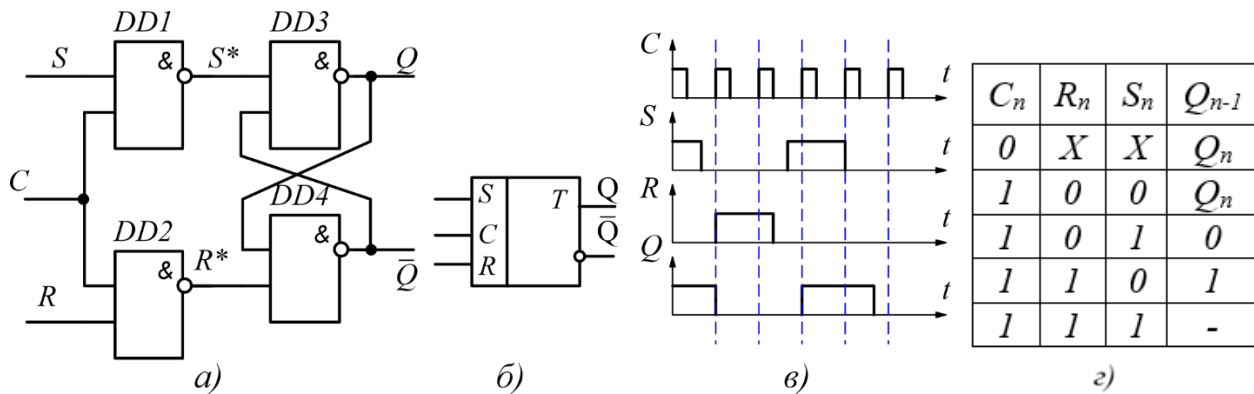


Рис. 18.5. Синхронний RS-тригер з статичним керуванням виконаний на елементах І-НЕ.

Синхронні RS-тригери отримують з асинхронних шляхом підключення до входів схеми керування. На рис. 18.5, а зображена схема синхронного RS-тригера зі статичним керуванням. Елементи DD1 і DD2 утворюють схему керування, а DD3 і DD4 утворюють елемент пам'яті. Елемент пам'яті в даному випадку являє собою асинхронний RS-тригер. У даному тригері R і S – інформаційні входи, а C – тактовий (синхронізуючий) вхід. Інформаційні входи з'єднані з входом синхронізації операцією І, відповідно, сигнали з входів R і S будуть передаватись у пам'ять лише при $C=1$. Інформаційні входи R^* і S^* керують асинхронним RS тригером на елементах DD3 і DD4, який перемикається сигналами нульового рівня. Оскільки в елементах DD1 і DD2 виконується інверсія, то для перемикання тригера потрібні вхідні сигнали логічної одиниці. Таблиця переходів синхронного RS-тригера наведена на рис. 18.5, д, часові діаграми роботи зображені на рис. 18.5, в. Як видно з таблиці переходів, комбінація $CRS=1$ синхронного тригера в базисі І-НЕ є забороненою. Це пояснюється тим, що у випадку $CRS=1$ на входах R^* і S^* виникнуть заборонені для асинхронного RS- тригера нульові рівні.

Функція, яку реалізовує синхронний RS- тригер, має вигляд:

$$Q_{n+1} = C_n S_n + \overline{C_n R_n} \cdot Q_n$$

З цієї функції випливає, що у випадку, коли $C_n=0$, то $Q_{n+1}=Q_n$, тобто тригер зберігає попередню інформацію, а у випадку, коли $C_n=1$, то $Q_{n+1}=S_n + \bar{R}_n \cdot Q_n$ – працює як асинхронний тригер.

D-тригери

Таблиця 18.3. Таблиця істинності D-тригера.

C_{n+1}	D_n	Q_n	Q_{n+1}	
0	0	0	0	Q_n
0	0	1	1	
0	1	0	0	
0	1	1	1	
1	0	0	0	D_n
1	0	1	0	
1	1	0	1	
1	1	1	1	

D-тригер – це тригер, який має лише один інформаційний вхід D та один вхід синхронізації C . При подачі тактового імпульсу стан прямого виходу D-тригера на $(n+1)$ такті зберігає стан інформаційного входу, який був на ньому на n такті, тобто буде виконуватись співвідношення $Q_{n+1} = C_n \cdot D_n$. Це означає, що поданий на вхід сигнал затримується на один такт. Відповідно до цього, D-тригери називають тригерами затримки. Робота D-тригера описується таблицею переходів (табл.18.3) або спрощеною таблицею (табл.18.4).

Таблиця 18.4. Спрощена таблиця істинності D-тригера.

C	Q_{n+1}
0	Q_n
1	D_n

Одноступеневий D-тригер можна отримати на основі синхронного RS-тригера. Для цього потрібно сигнал зі входу S одночасно подавати через інвертор на вхід R (рис. 18.6, а). Саме завдяки інвертору стає неможливим заборонена комбінація сигналів на входах R і S ($S \cdot R=1$).

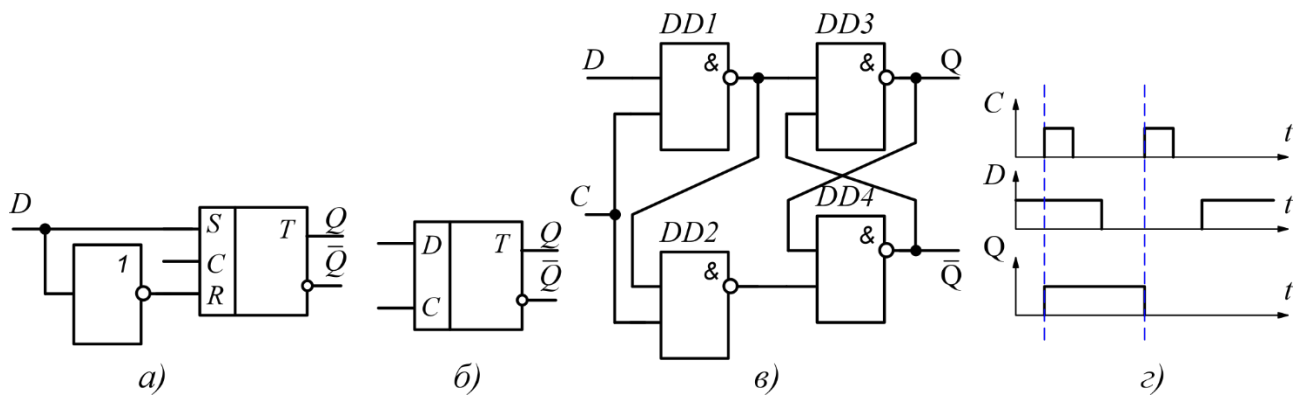


Рис. 18.6. Одноступеневий D -тригер на основі синхронного RS -тригера.

Схема D -тригера показана на рис. 18.6, в. На рис. 18.6, г наведені часові діаграми, а на рис. 14.6, б умовне зображення D -тригера.

Т-тригер

T -тригер (лічильний тригер) має один інформаційний вхід T . Стан T -тригера змінюється на протилежний після надходження кожного сигналу на T вхід. T -тригери можуть бути асинхронними та синхронними. Це єдиний тип тригера, стан якого в даний момент часу визначається не сигналами на входах, а станом його в попередньому такті. Таблиця переходів T -тригера подана в табл. 18.5. Відповідно до таблиці, отримаємо рівняння:

$$Q_{n+1} = \overline{T}_n \cdot Q_n + T_n \cdot \overline{Q}_n$$

Таблиця 18.5. Таблиця істинності T -тригера.

T_n	Q_n	Q_{n+1}
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Перемикання тригера відбувається за рахунок спільної дії сигналів на T -вході та обох виходах. Логічна схема одноступеневого асинхронного тригера представлена на рис. 18.7, а. Сигнали з виходів елементів $DD1$ і $DD2$ затримуються лініями затримки (ЛЗ) на час, протягом якого діє сигнал на T -вході. Умовне схематичне позначення T -тригера та діаграми роботи зображені на рис. 18.7, б і рис. 18.7, в.

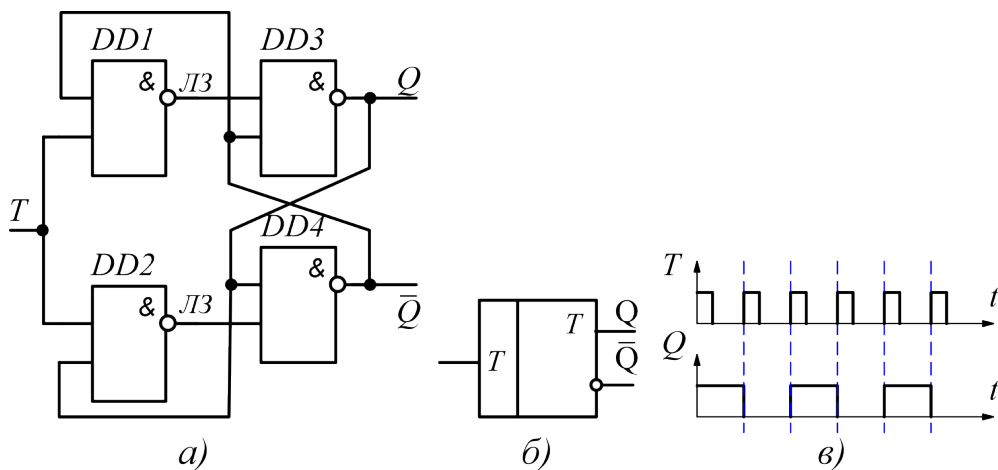


Рис. 18.7. Одноступеневий асинхронний T -тригер.

JK -тригери

Особливістю JK -тригерів є те, що вони не мають невизначених станів. JK -тригери можуть бути асинхронними та синхронними. Рівняння JK -тригера, яке описує його роботу, має вигляд:

$$Q_{n+1} = J_n \cdot \overline{Q_n} + \overline{K_n} \cdot Q_n$$

Відповідно до цього рівняння, повна і спрощена таблиці переходів JK -тригера (повна та спрощена) представлені в табл. 18.6:

Таблиця 18.6. Повна і спрощена таблиці переходів JK -тригера.

K_n	J_n	Q_n	Q_{n+1}
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	0

K_n	J_n	Q_{n+1}
0	0	Q_n
0	1	1
1	0	0
1	1	$\overline{Q_n}$

На рис. 18.8 представлена логічна схема (а), умовне схематичне позначення (б) і часові діаграми роботи (в) одноступеневого JK -тригера.

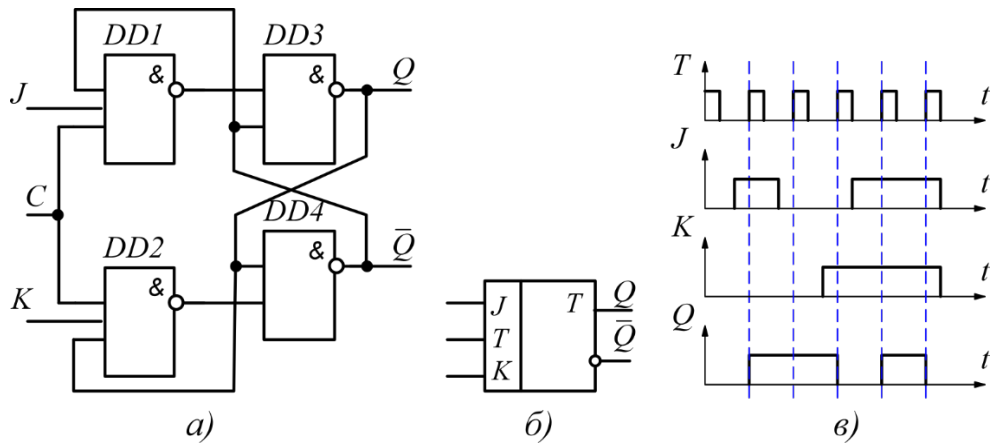


Рис. 18.8. Одноступеневий JK -тригер: а) схема, б) умовне позначення, в) часові діаграми.

Тригери з динамічним керуванням

У таких тригерах запис інформації відбувається під час фронту чи спаду тактового імпульсу, це суттєво підвищує завадостійкість тригерів. Тригери з динамічним керуванням будуються за двоступеневими схемами, які ще називають *MS-тригерами* (англ. Master-Slave). До складу двоступеневих тригерів входять два синхронні RS -тригери і додатковий елемент НЕ (рис. 18.9, а).

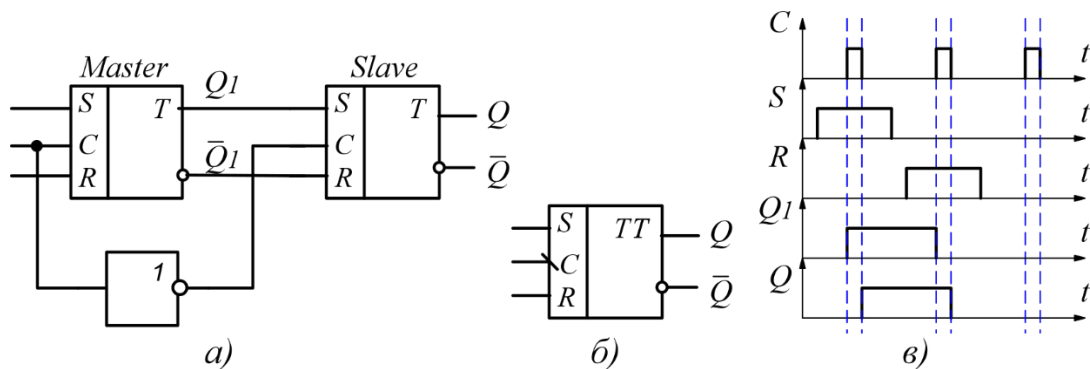


Рис. 18.9. Схема, часові діаграми роботи та умовне схематичне позначення двоступеневого тригера.

Інформація, що подається на інформаційний S -вхід тригера, записується у M -тригер (момент t_1 на рис. 18.9, б) переднім фронтом тактового імпульсу. Стан веденого (S) тригера залишається незмінним, це обумовлюється тим, що на його тактовий вхід через елемент НЕ подається логічний нуль. Після завершення запису інформації у M -тригер та зміни тактового імпульсу з одиниці на нуль здійснюється запис інформації у S -тригер (момент t_2 на рис. 18.9, б). Тобто у M -тригер інформація з S і R входів записується в момент надходження тактового імпульсу, тобто за його

переднім фронтом, а інформація з виходів M -тригера (Q_1 і $\bar{Q}_1$) записується S -тригером по завершенню тактового імпульсу (за його зрізом). Дана синхронізація називається динамічною.

Позначення двоступеневого RS -тригера з динамічним входом C та перемикання зрізом імпульсу зображено на рис. 18.9, в.

Двоступеневий D -тригер

Двоступеневий D -тригер утворюється на основі двоступеневого RS -тригера, для цього між S і R входами потрібно ввімкнути елемент НЕ так, як це зображено на рис. 18.10, а. Умовне схематичне зображення такого тригера зображено на рис. 18.10, б.

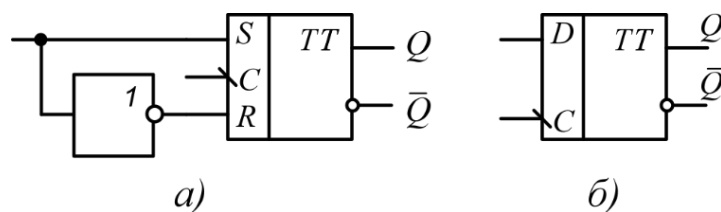


Рис. 18.10. Двоступеневий D -тригер (а) та його схематичне позначення (б).

З'єднавши вхід двоступеневого D -тригера з інверсним виходом Q (рис. 18.11, а), його можна перетворити на лічильний T -тригер.

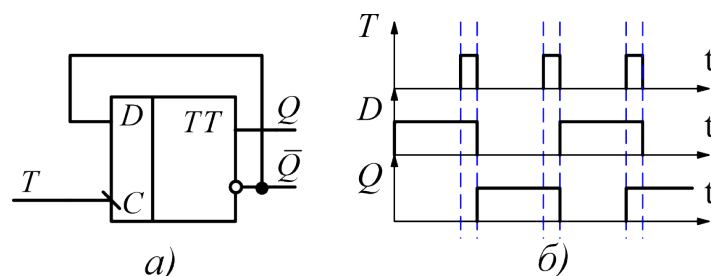


Рис. 18.11. Лічильний T -тригер (а) та його часові діаграми роботи (б).

Оскільки $D = \bar{Q}$, то в даній схемі кожен перехід з 1 на 0 на вході C буде обумовлювати перехід тригера у протилежний стан – $Q_{n+1} = D_n$ (рис. 18.11, б)

Кращі можливості має двоступеневий JK -тригер (рис. 18.12). Схema доповнена двома елементами 2І. На входах елементів 2І реалізований перехресний зворотний зв'язок з виходів, тому один із елементів 2І завжди буде закритий для проходження одного із інформаційних сигналів з входів J або K .

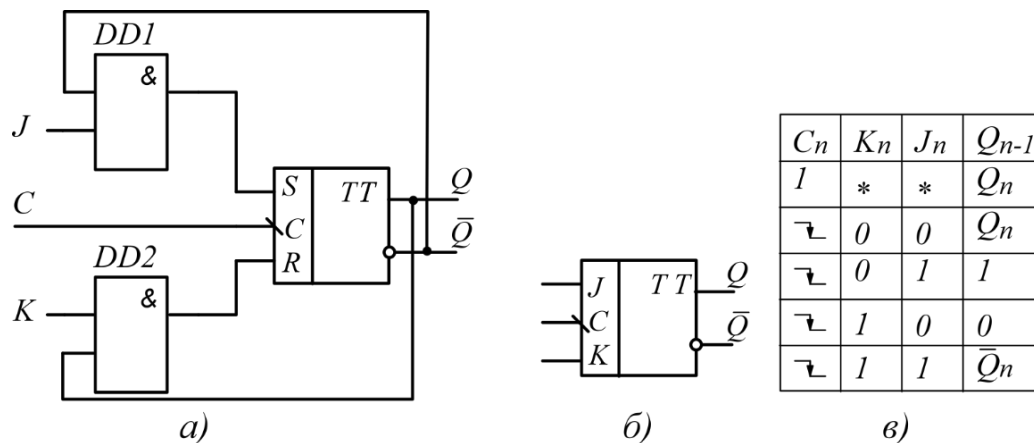


Рис. 18.12. Двоступеневий JK -тригер (а), його схематичне позначення (б) та таблиця переходів (в).

Саме це обумовлює той факт, що на входи двоступеневого JK -тригера можна подавати одночасно дві логічні одиниці. Якщо на тактовому вході C подана «1», то при будь-яких сигналах на входах J і K стан тригера не змінюється. У випадку, коли на C є дозвіл для запису інформації, то сигнали на входах $J=1$, $K=0$ переводять JK -тригер в одиничний стан, а сигнали на входах $J=0$, $K=1$ – переводять у нульовий стан, незалежно від стану в попередній момент часу. Для випадку, коли $J=K=0$, має місце збереження інформації з попереднього такту. Коли $J=K=1$, то під час надходження імпульсу до C стан JK -тригера змінюється стан на протилежний, аналогічно, як в T -тригері.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись зі стендом для дослідження тригерів у різних режимах роботи (рис. 18.9). Панель дозволяє проводити дослідження роботи тригерів різного типу (RS -тригер, D -тригер, T -тригер, JK -тригер). Вибір типу тригера здійснюється за допомогою перемикачів $SA4$ та $SA5$. Кнопка $SB1$ призначена для зміни логічного рівня на вході схеми. Стани сигналів на входах тригерів змінюють за допомогою вимикачів $SA1$ - $SA3$.

2. За допомогою перемикачів $SA4$ та $SA5$ перевести панель в режим для дослідження RS -тригер.

3. Дослідити RS -тригер, за результатами досліджень побудувати таблицю переходів RS -тригера.

4. За допомогою перемикачів *SA4* та *SA5* перевести панель в режим для дослідження *RSC*-тригера.
5. Дослідити *RSC*-тригер, за результатами досліджень побудувати таблицю переходів *RSC*-тригера.
6. За допомогою перемикачів *SA4* та *SA5* перевести панель в режим для дослідження *2RSC*-тригер.
7. Дослідити *2RSC*-тригер, за результатами досліджень побудувати таблицю переходів *2RSC*-тригера.
8. За допомогою перемикачів *SA4* та *SA5* панель перевести в режим для дослідження *JK*-тригера.
9. Дослідити *JK*-тригер, за результатами досліджень побудувати таблицю переходів *JK* -тригера.

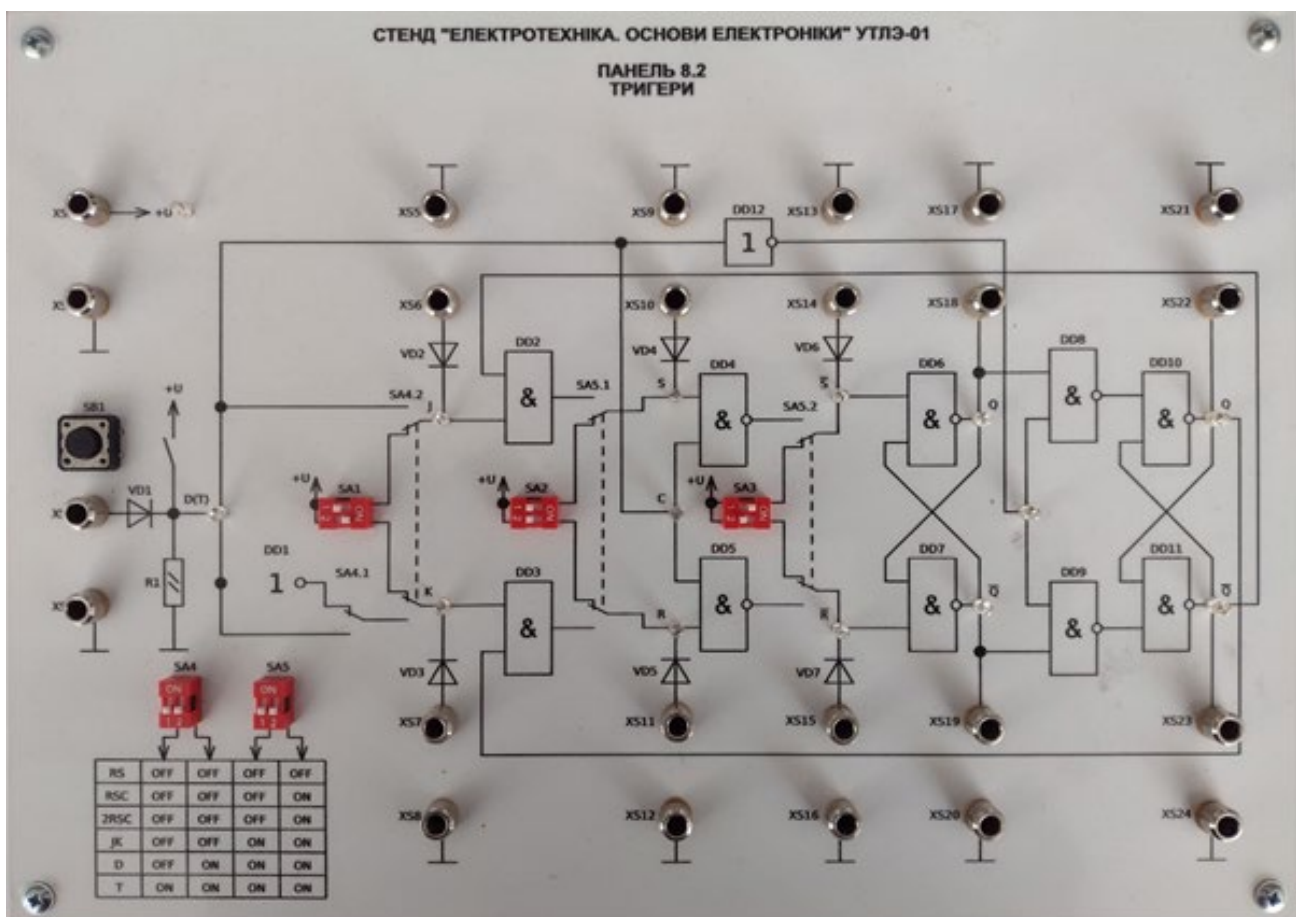


Рис. 18.9. Стенд «Електротехніка. Основи електроніки» УТЛС-01. Панель 8.2 Тригери.

10. За допомогою перемикачів *SA4* та *SA5* панель перевести в режим для дослідження *D*-тригера.

11. Дослідити D -тригер, за результатами досліджень побудувати таблицю переходів D -тригера.
12. За допомогою перемикачів SA4 та SA5 перевести панель в режим для дослідження T -тригера.
13. Дослідити T -тригер, за результатами досліджень побудувати таблицю переходів T -тригера.
14. За результатами проведених досліджень зробити висновки.

Контрольні запитання

1. За якими ознаками цифрові пристрої поділяють на комбінаційні та послідовні?
2. Які пристрої називаються тригерами?
3. У яких пристроях використовуються тригери?
4. Зобразіть структурну схему тригера.
5. Які входи і виходи має тригер, для чого вони призначенні?
6. Відтворіть таблицю істинності та схему асинхронного RS -тригера в базисі АБО-НЕ.
7. Яку заборонену комбінацію вхідних сигналів має асинхронний RS -тригер побудований в базисі АБО-НЕ?
8. Які тригери називаються синхронними?
9. Які переваги має синхронний тригер в порівнянні з асинхронним?
10. Зобразіть схему і поясніть принцип дії синхронного RS -тригера побудованого в базисі І-НЕ.
11. Зобразіть схему та умовне схематичне позначення D -тригера.
12. Який тригер називається T - тригером? Зобразіть його схему і поясніть принцип дії.
11. Що таке JK - тригер? Наведіть таблицю істинності асинхронного JK -тригера та його схему.
12. Зобразіть умовне схематичне позначення та таблицю переходів синхронного JK - тригера.

Лабораторна робота № 19

Дослідження принципу роботи та застосувань цифрового компаратора у схемах порівняння двійкових чисел

Мета роботи: Ознайомитись з будовою та принципом роботи цифрового компаратора 74НС85, набути практичні навички підключення та дослідження його роботи у схемах порівняння двійкових чисел, а також зробити аналіз можливостей його використання у цифрових системах.

Прилади і матеріали

1. Цифрова мікросхема 74НС85.
2. Резистори.
3. Світлодіоди (9 шт.)
4. DIP – перемикач на 8 груп контактів.
5. Макетна плата.
6. З'єднувальні проводи.
7. Джерело живлення (9 В).

Теоретичні відомості

Цифровий компаратор — це електронний пристрій, який порівнює два двійкових числа та формує сигнали на виході, що відображають результат порівняння: більше, менше або рівно.

Компаратори широко використовуються у цифрових схемах для прийняття рішень, арифметичних операцій, керування інформацією та її обробки. Цифровий компаратор можна побудувати з базових логічних елементів (рис. 19.1). Цифрові компаратори можуть мати різну розрядність. Найпоширенішими в цифровій електроніці є чотирьохрозрядні компаратори. Вони порівнюють два двійкових числа, які складаються з 4 біт кожне. У випадку, коли потрібно збільшити розрядність компаратора, їх об'єднують за спеціальними схемами.

Компаратор має два входи (A і B) для подачі сигналів. Пристрій порівнює числа в двійковій системі числення по розрядах. Починається порівняння з

найстаршого розряду (старшого біта). На виході цифрового компаратора формуються сигнали порівняння (рис. 19.1): якщо $A > B$, то активний вихід «більше», якщо $A < B$, то активний вихід «менше», якщо $A = B$, то активний вихід «рівно».

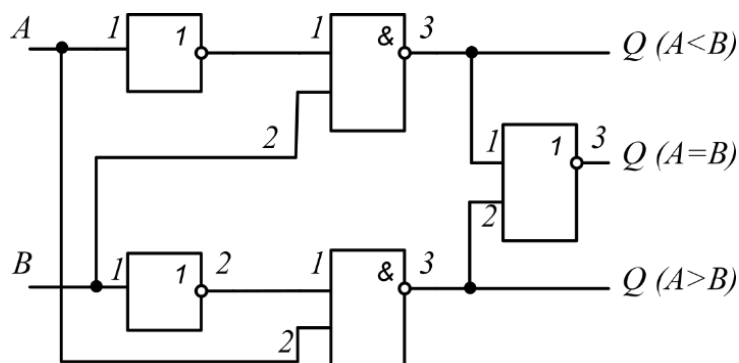


Рис. 19.1. Однорозрядний цифровий компаратор.

У сучасній електроніці компаратори застосовуються в арифметико-логічних пристроях для порівняння чисел. Також в цифрових пристроях, які працюють з великими потоками даних та потрібно виявляти моменти часу, коли на вхід надходять однакові дані.

У даній лабораторній роботі використовується мікросхема 74HC85. Це 4-розрядний швидкодіючий цифровий компаратор, який належить до серії HC (High-speed CMOS). Він призначений для порівняння двох двійкових чисел по 4 біти кожне. На основі порівняння формується три логічні виходи: « $A > B$ », « $A < B$ » та « $A = B$ ». На рис. 19.2 зображено умовне схематичне позначення мікросхеми 74HC85.

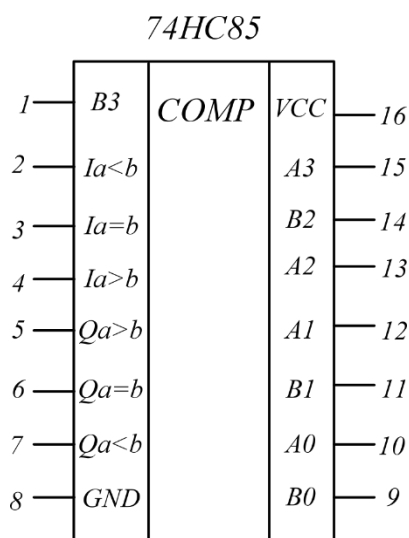


Рис. 19.2 Умовне схематичне позначення мікросхеми 74HC85.

Входами мікросхеми 74НС85 є контакти 10 ($A0$), 12 ($A1$), 13 ($A2$), 15 ($A3$), призначені для подачі чотирьох розрядів числа А, контакти 9 ($B0$), 11 ($B1$), 14 ($B2$), 1 ($B3$), призначені для подачі числа В. Ці дві групи контактів називають інформаційними. На них надходять числа, що будуть порівнюватись між собою.

Компаратор 74НС85 має три вихідні контакти: 5 ($Q_{A>B}$) (логічна «1» на цьому сповіщає, що число А більше за В), 6 ($Q_{A=B}$) (логічна «1» на ньому сповіщає, що число А дорівнює В), 7 ($Q_{A<B}$) (логічна «1» на ньому сповіщає, що число А менше за В). У даній мікросхемі є три каскадні входи (2, 3, 4). Вони призначені для каскадного об'єднання декількох компараторів, для порівняння чисел, що мають більше 4-х розрядів. До контакту 8 подається мінус джерела живлення, а до контакту 16 - плюс. Максимальна напруга живлення становить 7В.

Принцип дії цифрового мікросхеми 74НС85 представлений у табл. 19.1.

Таблиця 19.1. Таблиця істинності компаратора 74НС85.

Вхідні сигнали				Вихідні сигнали		
$A3, B3$	$A2, B2$	$A1, B1$	$A0, B0$	$Q (A>B)$	$Q (A<B)$	$Q (A=B)$
$A3>B3$	X	X	X	1	0	0
$A3<B3$	X	X	X	0	1	0
$A3=B3$	$A2>B2$	X	X	1	0	0
$A3=B3$	$A2<B2$	X	X	0	1	0
$A3=B3$	$A2=B2$	$A1>B1$	X	1	0	0
$A3=B3$	$A2=B2$	$A1<B1$	X	0	1	0
$A3=B3$	$A2=B2$	$A1=B1$	$A0>B0$	1	0	0
$A3=B3$	$A2=B2$	$A1=B1$	$A0<B0$	0	1	0
$A3=B3$	$A2=B2$	$A1=B1$	$A0=B0$	0	0	1

X - неважливо який рівень сигналу.

Практичним завданням, в даній лабораторній роботі, буде знайомство з принципом роботи мікросхеми-компаратора (рис. 19.3).

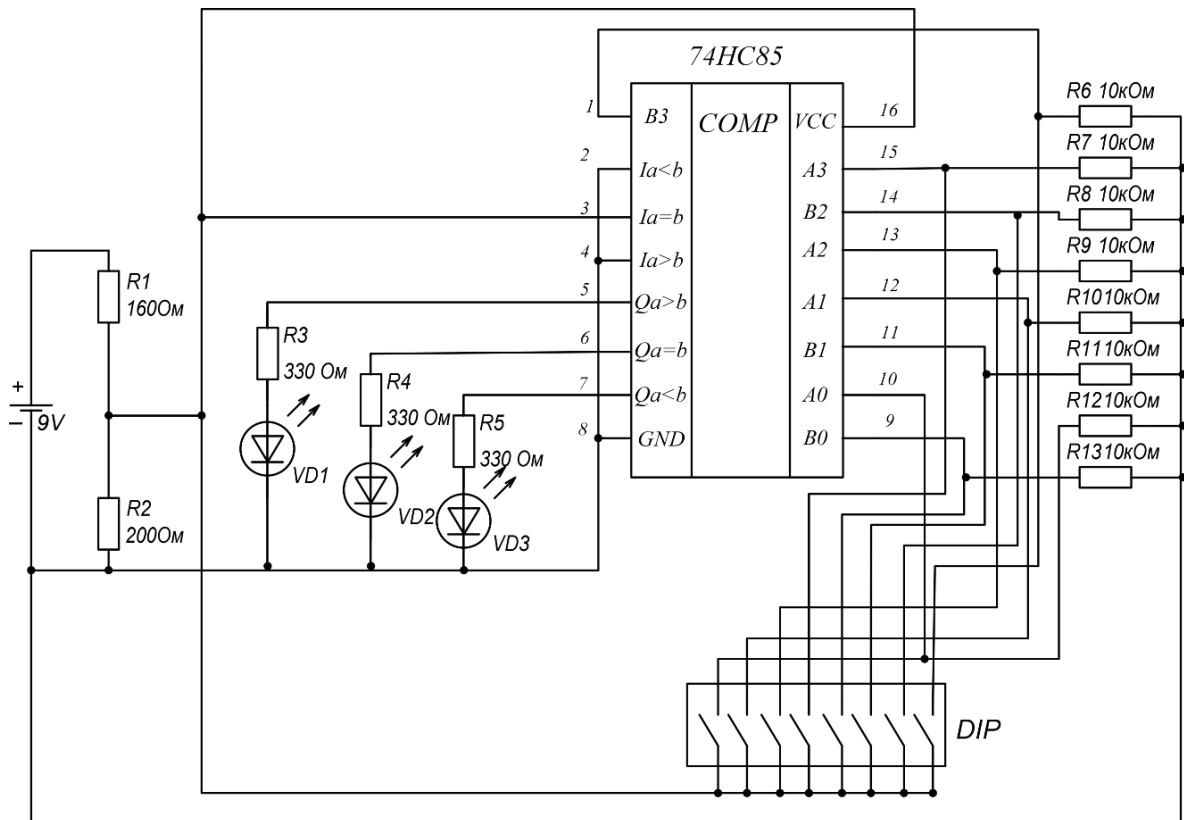


Рис. 19.3. Схема цифрового чотирьохрозрядного компаратора.

Напруга живлення подається через дільник напруги на резисторах $R1$, $R2$. Вхідний двійковий сигнал задається за допомогою DIP -перемикача. У DIP -перемикачі тумблери 1-4 ($A0$ - $A3$) призначені для задачі першого числа, тумблери 5-8 ($B0$ - $B3$) - для другого числа.

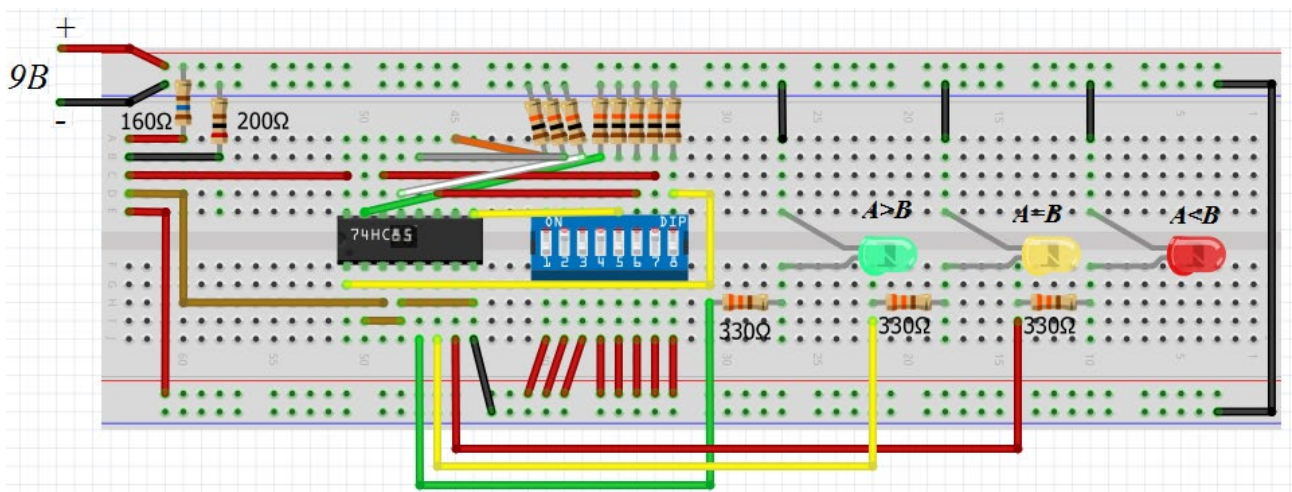


Рис. 19.4. Схема цифрового чотирьохрозрядного компаратора, змонтована на макетній платі.

Для використання компаратора 74HC85 каскадні входи 2 та 4 необхідно підключити до мінуса джерела живлення, вхід 3 до середньої точки дільника

напруги. Зелений світлодіод підключено до виходу $Q_{A>B}$, жовтий - до $Q_{A=B}$, червоний - до $Q_{A<B}$.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати базову схему порівняння двох 4-розрядних двійкових чисел за допомогою 74НС85 (рис. 19.3 та рис. 19.4).
2. Підключити живлення, кнопкові перемикачі (або тумблери) для задання двійкових чисел та світлодіоди для індикації результатів порівняння.
3. Подати на входи мікросхеми різні комбінації двійкових чисел.
4. Зафіксувати результати індикації виходів ($A>B$, $A<B$, $A=B$).
5. Результати досліджень записати у таблицю.
6. За результатами проведених досліджень зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Що таке цифровий компаратор і яке його основне призначення?
2. Які логічні стани формуються на виходах компаратора при порівнянні двійкових чисел?
3. Яку розрядність має мікросхема 74НС85 і які в неї основні входи та виходи?
4. Що означають виходи $A>B$, $A<B$ та $A=B$ у компараторі 74НС85?
5. Як працює вхід каскадування у мікросхемі 74НС85?
6. Як можна реалізувати порівняння 8- або 16-розрядних чисел за допомогою кількох компараторів 74НС85?
7. У чому полягає різниця між порівнянням чисел «по розрядам» та «у цілому»?
8. Як формується сигнал « $A=B$ », якщо на входи подати два однакових числа?
9. У яких цифрових пристроях застосовуються компаратори (приклад практичного використання)?
10. Які переваги використання апаратних цифрових компараторів перед програмною реалізацією порівняння чисел у мікроконтролерах?

Лабораторна робота № 20

Дослідження принципу дії підсилювача звуку на мікросхемі LM386

Мета роботи: Ознайомитися з принципом дії підсилювача звукових сигналів на основі інтегральної мікросхеми LM386, дослідити його робочі характеристики, перевірити вплив зовнішніх елементів на коефіцієнт підсилення та якість відтворення сигналу, а також закріпити практичні навички побудови й аналізу підсилювальних схем.

Прилади і матеріали

1. Аналогова мікросхема LM386.
2. Резистор (10 Ом, 0,25 Вт)
3. Змінний резистор (10 кОм, 0,5 Вт)
4. Конденсатори керамічні (10 нФ та 47 нФ)
5. Конденсатор електrolітичний (220 мкФ)
6. Динамік.
7. Макетна плата.
8. Акустичний дріт.
9. З'єднувальні проводи.
10. Блок живлення (9 В)

Теоретичні відомості

Підсилювач – це електронний пристрій, призначений для збільшення потужності, напруги або струму електричного сигналу без зміни його форми та основних характеристик.

Підсилювач звуку – це електронний пристрій, призначений для збільшення амплітуди звукових сигналів з метою забезпечення необхідної гучності та потужності для відтворення через акустичні системи.

Основні функції підсилювачів звуку:

1. Підсилення сигналу – перетворення слабого електричного сигналу з джерела (мікрофона, програвача, радіоприймача) у потужніший.

2. Збереження форми сигналу – якісне підсилення без значних спотворень.
3. Забезпечення навантаження – формування достатньої потужності для живлення гучномовців.

Основні параметри підсилювачів:

1. Коефіцієнт підсилення (K_u) – це відношення вихідної напруги (або потужності) до вхідної.
2. Частотний діапазон – це діапазон частот, які підсилювач відтворює без значних втрат та спотворень.
3. Коефіцієнт нелінійних спотворень – характеризує відхилення сигналу на виході від ідеальної форми.
4. Коефіцієнт корисної дії – співвідношення між корисною вихідною потужністю та споживаною від джерела живлення.
5. Рівень шуму – власні шуми підсилювача, які можуть погіршувати якість звуку.

Класифікація підсилювачів:

1. За призначенням підсилювачі поділяють на:
 - 1.1. Попередні (працюють із слабкими сигналами, наприклад з мікрофона).
 - 1.2. Потужні (живлять акустичні системи).
2. За схемотехнікою:
 - 2.1. На дискретних транзисторах.
 - 2.2. На інтегральних мікросхемах (наприклад LM386).
3. За режимом роботи (класом) підсилювачі поділяють на:
 - 3.1. Клас А – висока якість, але низький ККД.
 - 3.2. Клас В та АВ – компроміс між якістю та ефективністю.
 - 3.3. Клас D – імпульсні підсилювачі з високим ККД (до 90%).

До основних особливостей підсилювачів звуку належить те, що:

1. Вони мають працювати в широкому частотному діапазоні (20 Гц – 20 кГц), що відповідає чутності людини.
2. Необхідно мінімізувати спотворення, щоб звук залишався природним.
3. Для побутових і мобільних пристроїв важлива енергоефективність та компактність.

4. Для професійної техніки (студії, концерти) важливі висока точність передачі сигналу та велика вихідна потужність.

Операційний підсилювач (ОП) – це високочутливий електронний підсилювач постійного струму з дуже великим коефіцієнтом підсилення, який має два входи (інверсний і неінверсний) та один вихід. Основні застосування операційних підсилювачів: побудова підсилювачів напруги та струму; фільтри низьких, високих і смугових частот; генератори сигналів; компаратори; інтегратори та диференціатори в аналогових обчисленнях; аналогові обчислювальні схеми.

Окрім багатьох інших галузей, операційні підсилювачі (ОП) використовуються у схемах підсилення звуку. У такому виконанні, як запропоновано в даній лабораторній роботі або в складніших схемах, ОП застосовуються в музичних програвачах для відтворення звуку з мікрофона чи музичних інструментів. Схема підсилювача на мікросхемі LM386 зображена на рис. 20.1.

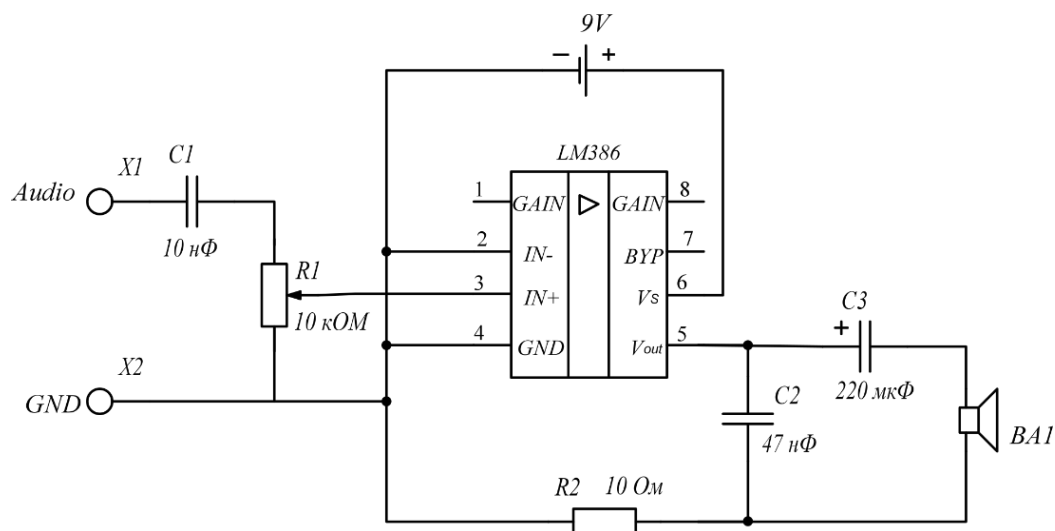


Рис. 20.1. Схема підсилювача звуку на мікросхемі LM386.

Схема, представлена на рис. 20.1, призначена для підсилення звуку, що надходить з будь-якого музичного пристрою, який має аудіовихід.

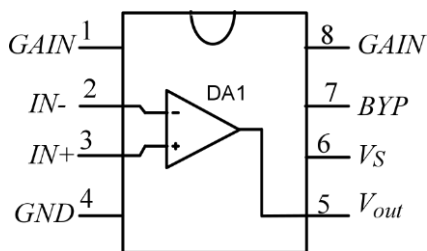


Рис. 20.2. Умовне схематичне позначення мікросхеми LM386.

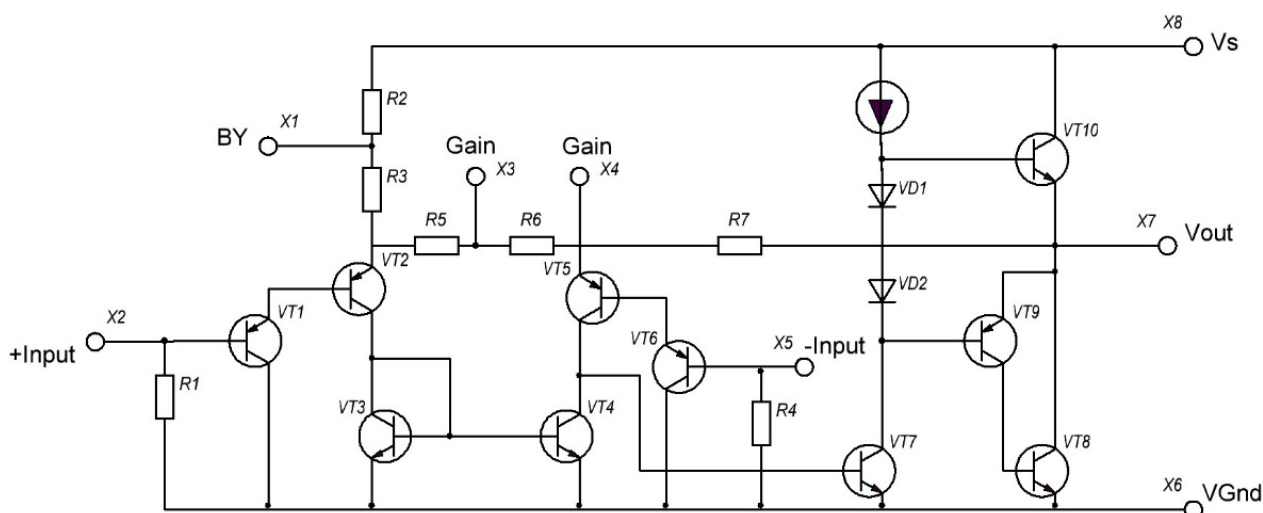


Рис. 20.3. Внутрішня будова мікросхеми LM386.

Мікросхема LM386 відрізняється від аналогічних своєю внутрішньою будовою та додатковими контактами, такими як GAIN, BYPASS. Мікросхема LM386 є спеціалізованою мікросхемою для підсилення звуку. Коефіцієнт підсилення регулюється за допомогою контактів 1 та 8 (GAIN). Між ними можна встановлювати резистор або конденсатор, або обидва компоненти. Через специфіку мікросхеми LM386 вона позначена на схемі у вигляді мікросхеми, а не окремого операційного підсилювача у формі трикутника з контактами. У такому вигляді, як на рис. 20.1, зручніше читати схему.

Схема, що наведена на рис. 20.1, це стандартна схема підключення LM386 і вона наводиться серед інших в технічній документації мікросхеми. Коефіцієнт підсилення сигналу в даному випадку дорівнює 20. Якщо між контактами 1 та 8 увімкнути електролітичний конденсатор ємністю 10 мкФ, то коефіцієнт підсилення збільшиться в 10 разів і дорівнюватиме 200.

Мікросхема LM386 всередині має лише 1 операційний підсилювач, однак завдяки особливій будові за допомогою невеликої кількості додаткових компонентів (резисторів та конденсаторів) можливо дуже ретельно налаштувати схему так, щоб відтворений з програвача на динаміки звук мав необхідні характеристики. Так, наприклад, змінюючи опір резистора R1, можна регулювати гучність звуку.

Порядок виконання роботи

1. Складіть схему підсилювача звуку на макетній платі відповідно до рис. 20.1.

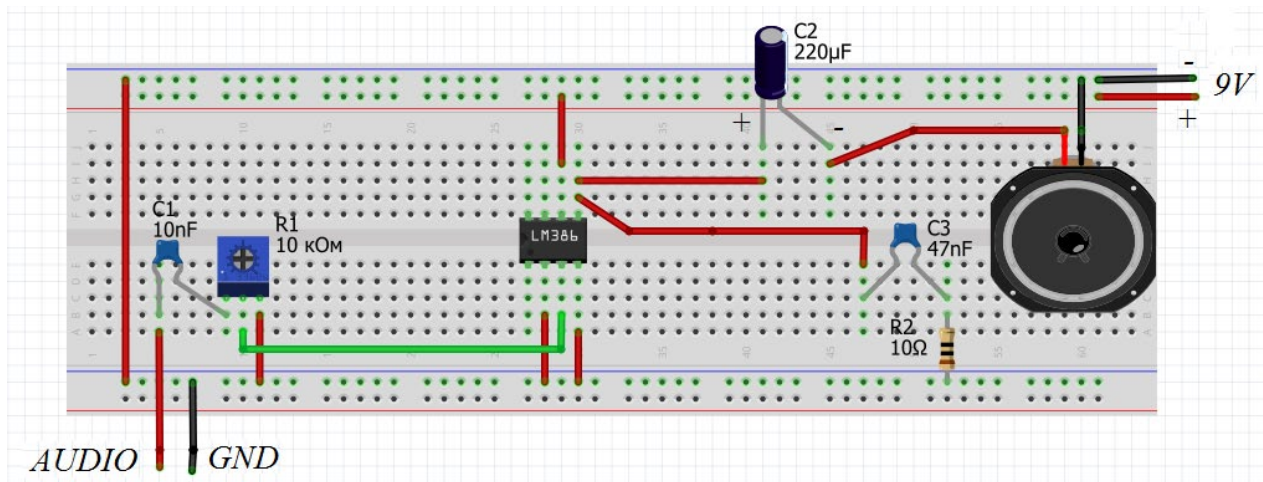


Рис. 20.4. Схема підсилювача звуку, змонтована на макетній платі.

2. При встановленні мікросхеми LM386 у макетну плату, користуйтеся рис. 22.5. Нумерація контактів мікросхеми збільшується проти годинникової стрілки і починається від місця, що позначене так званим маркером. Даний маркер позначає контакт 1 мікросхеми. На рис. 20.1 словами *AUDIO* та *GND* позначені місця підключення програвача. На рис. 20.4 вони так само позначені.

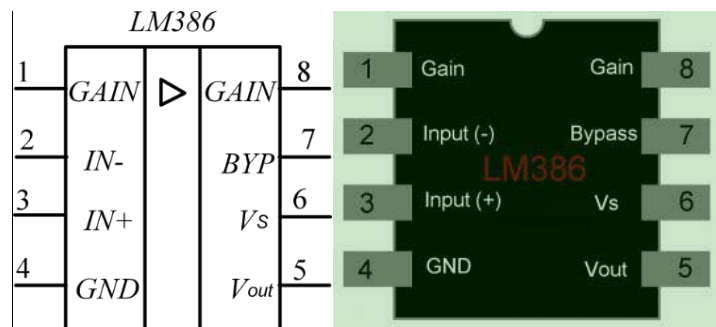


Рис. 20.5. Розташування контактів мікросхеми LM386.

3. Щоб підключити будь-який програвач музики (телефон, планшет, плеєр, комп'ютер), потрібно вставити в нього кабель з роз'ємом (акустичний дріт).

4. Також слід зазначити, що контакти живлення даної мікросхеми називаються *Vs* (6) та *GND* (4). На LM386 можна подавати живлення до 12 В. У нашому випадку до схеми підключено джерело живлення на 9 В. Її контакт «+» з'єднаний з *Vs*, а «-» з *GND*.

Конденсатор $C1$ фільтрує постійну складову вхідного сигналу для того, щоб відсікати шуми, що можуть погіршити звучання, а конденсатори $C2$, $C3$ коректують сигнал на виході. Змінний резистор $R1$ регулює гучність звуку. Динамік $BA1$ відтворює мелодію, що програватиметься на телефоні чи плеєрі.

5. Підключіть аудіодріт до телефону, плеєра або комп'ютера, увімкніть радіо або ж будь-яку мелодію. Регулюйте гучність за допомогою змінного резистора.

6. За результатами проведених досліджень зробіть висновки.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення підсилювача електричних сигналів.
2. Дайте визначення операційного підсилювача.
3. Перерахуйте основні функції підсилювача звуку.
4. Які параметри підсилювачів ви знаєте?
5. Як класифікують підсилювачі?
6. Для чого призначена мікросхема LM386?
7. Для чого призначений резистор та змінний резистор у схемі підсилювача звуку на мікросхемі LM386?
8. Для чого призначені конденсатори у схемі підсилювача звуку на мікросхемі LM386?
9. Поясніть принцип дії досліджуваного в роботі підсилювача звуку.
10. Зобразіть умовне схематичне позначення мікросхеми LM386.

Лабораторна робота № 21

Дослідження мультивібратора на мікросхемі LM324

Мета роботи: Ознайомитися з принципом дії мультивібратора, реалізованого на операційному підсилювачі LM324, дослідити режими його роботи, отримати на практиці періодичні коливання, визначити залежність частоти та тривалості імпульсів від параметрів зовнішніх елементів, а також закріпити навички побудови та аналізу генераторних схем.

Прилади і матеріали

1. Аналогова мікросхема LM324.
2. Резистор (10 кОм, 1 кОм, 360 Ом).
3. Змінний резистор (10 кОм).
4. Конденсатор електролітичний (10 мкФ).
5. Світлодіоди (червоний, зелений).
6. Осцилограф.
7. Частотомір.
8. Макетна плата.
9. З'єднувальні проводи.
10. Блок живлення (9 В).

Теоретичні відомості

Мультивібратор – це електронний генераторний пристрій, який формує періодичні електричні коливання прямокутної форми.

Основні особливості мультивібратора:

1. Побудований, як правило, на транзисторах або операційних підсилювачах (наприклад, на мікросхемі LM324).
2. Використовує позитивний зворотний зв'язок для самозбудження.
3. Формує імпульси з певною частотою та тривалістю, які задаються параметрами резисторів і конденсаторів.

Усі мультивібратори можна поділити на такі види:

1. Астабільний (незмінний) – генерує безперервні імпульси без зовнішнього сигналу (самозбуджуваний генератор).

2. Моностабільний (одновібратор) – має один сталий стан, переходить у несталий лише після запуску імпульсом, формуючи один вихідний імпульс.

3. Бістабільний (тригер) – має два сталих стани, перемикається між ними під дією зовнішніх сигналів.

Застосовуються мультивібратори при розробці генераторів прямокутних імпульсів, таймерів та формувачів затримок, дільників частоти, у схемах керування в цифровій техніці, імпульсних генераторів для звукових і світлових сигналізаторів.

На рис. 21.1 представлено схему мультивібратора на транзисторах. У даному мультивібраторі за рахунок постійної перезарядки конденсаторів $C1$ та $C2$ перемикаються по черзі обидва світлодіоди. Частота перемикань залежить від ємностей конденсаторів та опорів резисторів, з яких складається схема. Напряга, яку генерує мультивібратор, зображена на рис. 21.2.

Використовуючи операційний підсилювач для створення мультивібратора, можна досягти кращих характеристик вихідного сигнал (рис. 22.2):

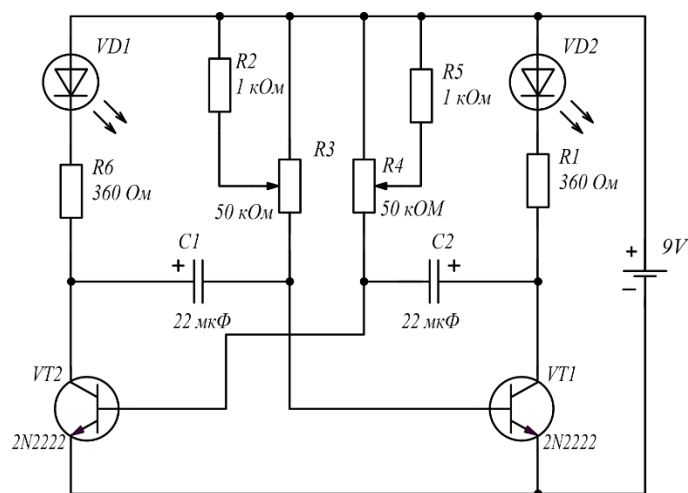


Рис. 21.1. Мультивібратор на транзисторах.

У даній лабораторній роботі досліджується мультивібратор на мікросхемі LM324.

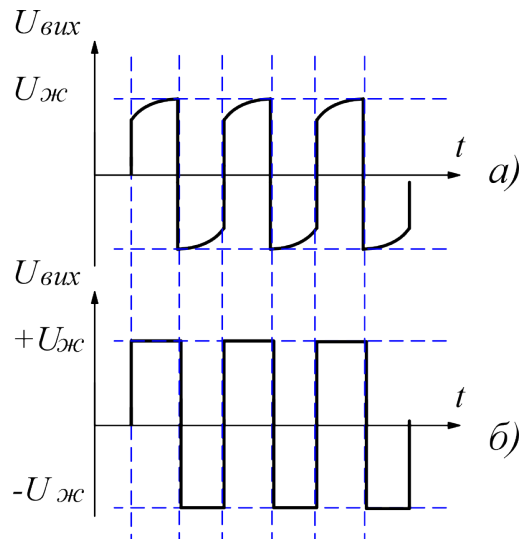


Рис. 21.2. Порівняння вихідного сигналу мультівібратора: а) напруга на транзисторі; б) напруга на операційному підсилювачі.

У порівнянні з мультівібратором на транзисторах, операційний підсилювач забезпечує рівні фронти вихідних імпульсів, не згладжує та не завалює їх завдяки великому коефіцієнту підсилення та мінімальному впливу на вхідний сигнал. На рис. 21.3 зображено схему мультівібратора на ОП LM324:

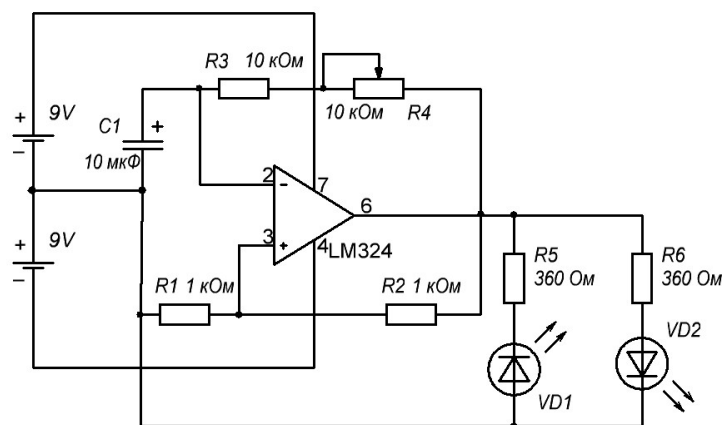


Рис. 21.3. Схема мультівібратора на ОП LM324.

Принцип роботи даної схеми дуже простий. Це генератор прямокутних імпульсів, що побудований на тригері Шмітта і RC колі, що задає частоту перемикання виходу генератора. Тригер Шмітта складається з операційного підсилювача $DA1.1$ та резисторів $R1$ і $R2$, а RC коло побудоване на резисторах $R3$, $R4$ і конденсаторі $C1$.

У початковий момент часу конденсатор $C1$ повністю розряджений (напруга на ньому дорівнює 0 В), а на виході операційного підсилювача напруга дорівнює +9 В. Напруга з виходу ОП прикладена до RC кола, тому конденсатор $C1$ поступово почне заряджатись до значення порогової напруги, яку задають резистори $R1$, $R2$. Порогова напруга в даній схемі розраховується за формулою:

$$U_{\text{порог}} = U_{\text{вих}} \times \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 9 \text{ В} \times \frac{1 \text{ кОм}}{2 \text{ кОм}} = 4,5 \text{ В}$$

По мірі того, як конденсатор заряджається, напруга на інвертуючому вході ОП зростає. Як тільки конденсатор зарядиться до 4,5 В, напруга на інвертуючому вході зрівняється з напругою на прямому вході, вихід схеми переключиться з +9 В на -9 В. При цьому напруга на прямому вході ОП стане рівною -4,5 В.

До RC кола вже буде прикладена напруга -9 В, що обумовить процес розряджання конденсатора та зниження напруги на ньому до $U_{\text{порог}} = -4,5 \text{ В}$. Як тільки конденсатор зрівняється з цим значенням, вихід ОП знову переключиться на +9 В (рис. 21.4). Цей процес перезарядки конденсатора буде продовжуватись до тих пір, поки на схему подається живлення.

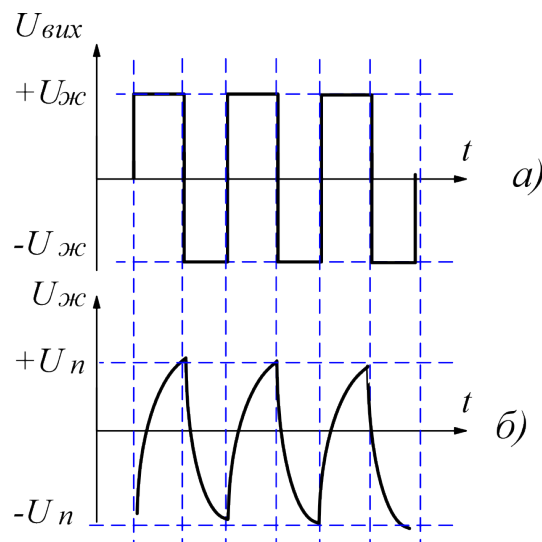


Рис. 21.4. а) сигнал на виході ОП при підключенні за схемою на рис. 22.3, б) напруга на конденсаторі.

Світлодіоди *HL1*, *HL2* ввімкнені у зворотних один до одного напрямках для позначення моментів перемикання виходу на протилежні рівні напруги. Червоний світлодіод світитиметься, коли на виході ОП буде +9 В, а зелений при -9 В.

Порядок виконання роботи

1. Змонтуйте на макетній платі мультивібратор (рис. 21.5) відповідно до схеми, зображеної на рис. 21.3.

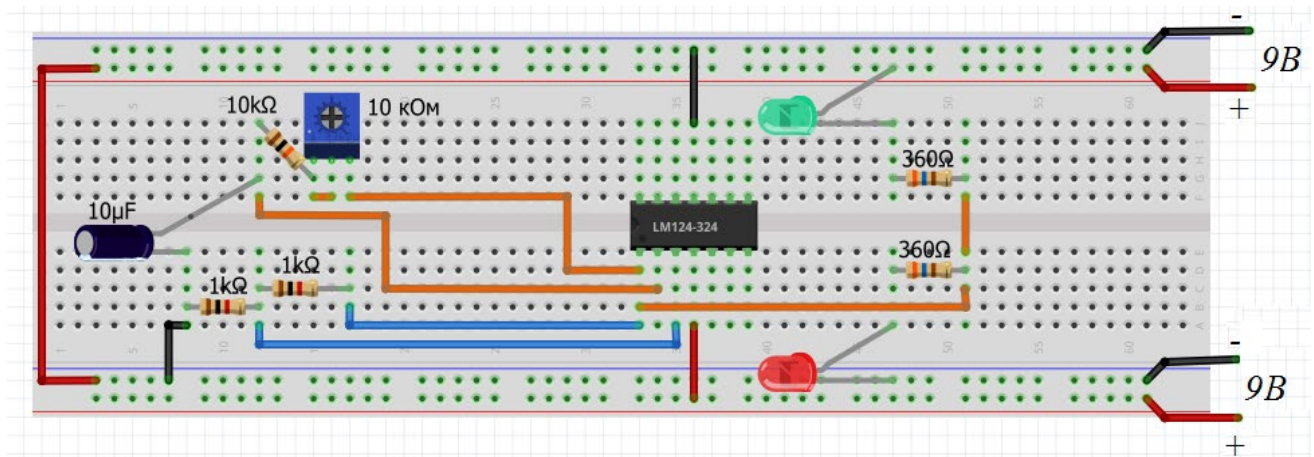


Рис. 21.5. Мультивібратор на ОП.

2. Коли схема зібрана, за допомогою викрутки обертайте регулятор змінного резистора та спостерігайте за зміною швидкості перемикання світлодіодів. Варто зауважити, що на швидкість перемикання світлодіодів впливають всі резистори, присутні в даній схемі, а також конденсатор.

3. Замість одного із світлодіодів під'єднайте осцилограф та дослідіть форму сигналів, яку генерує мультивібратор.

4. Використовуючи частотомір, дослідіть залежність частоти сигналу від кута повороту регулятора змінного резистора.

5. За результатами проведених досліджень зробіть висновки.

Контрольні запитання

1. Що таке мультивібратор і які існують його основні типи?
2. Які функціональні можливості мікросхеми LM324?
3. Яка різниця між астабільним, моностабільним та бістабільним мультивібратором?
4. Яку роль відіграють резистори та конденсатори в роботі мультивібратора?

5. Як формується період коливань у мультивібраторі на LM324?
6. Як впливають значення RC-ланцюга на частоту та тривалість імпульсів?
7. Яким чином можна змінити скважність прямокутних імпульсів?
8. Які параметри вихідного сигналу досліджуються під час роботи мультивібратора?
9. Які переваги використання LM324 порівняно з іншими операційними підсилювачами для побудови мультивібратора?
10. Де в електроніці та техніці застосовуються мультивібратори?

Лабораторна робота № 22

Дослідження фотореле та його використання у приладах автоматичного управління

Мета роботи: Дослідити принцип дії та характеристики електромагнітного реле та фотореле, ознайомитися з їх схемними рішеннями, визначити особливості роботи фотореле в різних режимах освітленості та вивчити можливості застосування фотореле у приладах і системах автоматичного управління.

Прилади і матеріали

1. Електромагнітне реле (12 В, 6 контактів).
2. Фоторезистор (LDR07).
3. Резистор (360 Ом).
4. Змінний резистор (10 кОм).
5. Світлодіод
6. Біполярний транзистор (2N2222)
7. Макетна плата.
8. З'єднувальні проводи.
9. Джерело живлення (9 В).

Теоретичні відомості

Електромагнітне реле – це електричний комутаційний пристрій, принцип дії якого ґрунтується на використанні електромагнітного поля для замикання або розмикання електричних контактів.

До будови електромагнітного реле входять такі основні елементи: обмотка (через неї протікає струм, створюючи магнітне поле); осердя з магнітопроводу (підсилює магнітне поле); якір (притягується до осердя під дією магнітного поля); пружина (повертає якір у початкове положення після знеструмлення котушки); контакти (здійснюють комутацію електричного кола).

Принцип дії електромагнітного реле полягає в тому, що коли на обмотку подається струм, у ній створюється магнітне поле, яке притягує якір. При цьому контакти замикаються (або розмикаються) і відбувається керування іншим електричним колом. Після зникнення струму пружина повертає якір у вихідне положення.

Електромагнітні реле застосовуються у схемах автоматичного управління; для захисту електрообладнання; у реле часу, сигналізації, пускачах двигунів; у системах телекомунікації та побутових приладах

Фотореле – це автоматичний комутаційний пристрій, який керує вмиканням і вимиканням електричного кола залежно від рівня освітленості. До будови фотореле входять:

1. Світлочутливий елемент (фоторезистор, фотодіод чи фототранзистор) – змінює свій опір або струм залежно від освітлення.
2. Підсилювальний каскад (зазвичай на транзисторах або операційних підсилювачах) – обробляє сигнал від світлочутливого елемента.
3. Виконавчий елемент (електромагнітне реле, симістор тощо) – комутує електричне навантаження.

Принцип дії фотореле полягає в тому, що коли рівень освітленості змінюється, змінюється опір світлочутливого елемента. Це призводить до спрацювання підсилювальної схеми, яка керує виконавчим елементом. У результаті навантаження (наприклад, лампа, вуличне освітлення, вентилятор) автоматично вмикається або вимикається залежно від освітленості.

Використовують фотореле в системах автоматичного увімкнення вуличного й дворового освітлення у темний час доби; у системах сигналізації та охорони; в автоматичності побутових і промислових приладів; для економії електроенергії за рахунок автоматичного керування освітленням.

Для експериментальної роботи з електромагнітним реле розглянемо його основні контакти: 2 вхідні контакти (під'єднані до котушки індуктивності) - на них подається керуючий вхідний сигнал (напруга); нормально розімкнутий контакт *NO* (*normally open*); нормально замкнутий контакт *NC* (*normally connect*); загальний контакт *COM* (*common*) - при подачі/відключенні напруги до вхідних контактів, загальний контакт перемикається між контактами *NO* та *NC*.

За відсутності напруги на вході контакт *COM* з'єднаний із контактом *NC*. При подачі на вхідні контакти напруги *COM* перемикається на інший контакт (*NO*), таким чином змінюючи підключення різних частин кола.

У практичній частині Експерименту № 9 Ви налаштуєте власну схему із використанням фотореле для увімкнення та вимикання світлодіода в залежності від наявності чи відсутності освітлення в приміщенні.

На рис. 22.1 представлена схема із використанням фотореле:

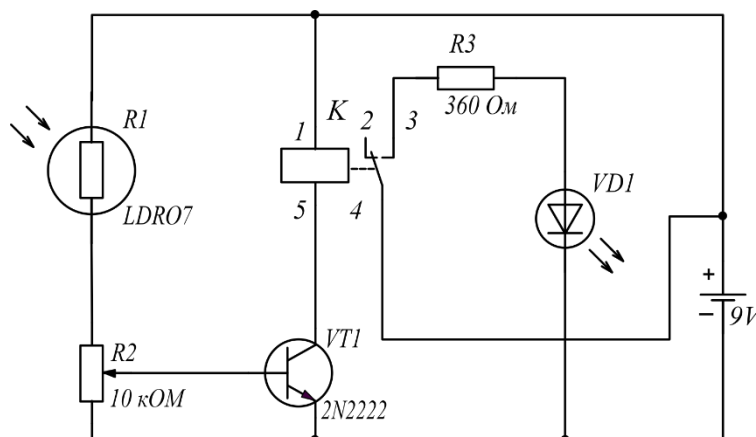


Рис. 22.1. Схема ввімкнення фотореле.

На даній схемі електромагнітне реле позначено як *K1*, а цифрами від 1 до 5 пронумеровані його контакти: 1, 5 - вхідні контакти, що підключені до котушки (вхід реле); 4 - загальний контакт (*COM*); 2 - контакт *NC* (на нього замкнутий контакт *COM*, коли до вхідних контактів не підведено напругу); 3 - контакт *NO* (на нього замикається контакт *COM*, коли до входу реле підводиться напруга).

Чутливим фотоелементом у даній схемі є фоторезистор $R1$, він відповідає за перетворення світла в електричний струм та передачу його в коло. Змінний резистор $R2$ налаштовує чутливість всієї схеми до рівня освітленості. Біполярний NPN транзистор виконує роль підсилювача сигналу, що поступає від фоторезистора до реле $K1$. Загальний контакт COM позначається на схемі як $K1.1$. Він підключений до плюса джерела живлення і за наявності керуючого сигналу на вході реле перемикається на гілку з резистором $R3$, вмикаючи світлодіод $HL1$.

При потраплянні світла на фоторезистор його опір зменшується, тим самим збільшуючи струм в електричному колі, який формує напругу на базі транзистора. У результаті транзистор $VT1$ відкривається і між його колектором та емітером починає протікати струм. Завдяки цьому на входних контактах реле, що під'єднані до котушки, з'являється напруга, а по самій котушці протікає струм. Це призводить до замикання загального контакту реле COM із нормально розімкнутим контактом NO (з'єднаним із резистором $R3$). Коли контакти реле (COM та NO) замкнуться, червоний світлодіод засвітиться.

Порядок виконання роботи

1. На макетній платі складіть електричне коло, схема якого зображена на рис. 22.1. Розміщення елементів представлено на рис. 22.2:

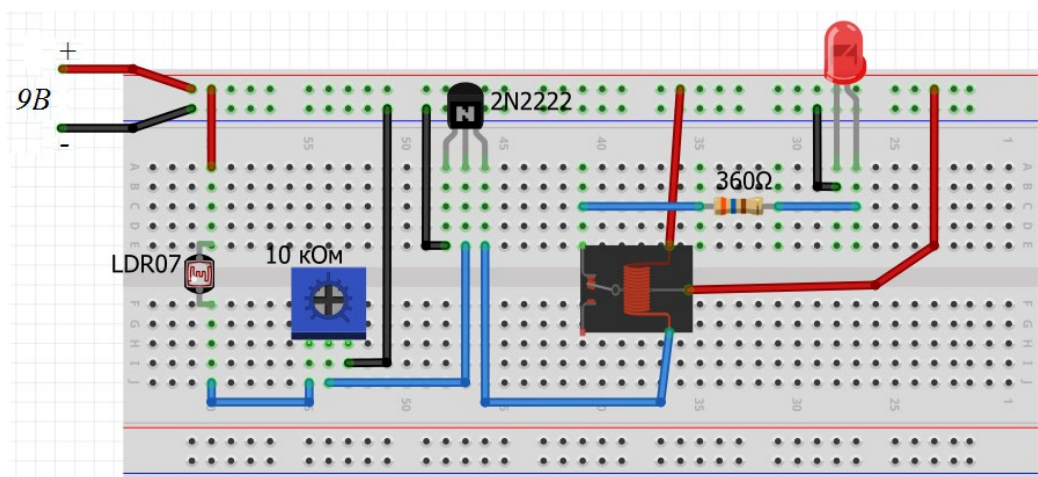


Рис. 22.2. Увімкнення світлодіода за допомогою фотореле.

2. Електромагнітне реле встановлюйте стороною із 4-ма контактами ближче до джерела живлення (див. рис. 22.2 та рис. 22.3).

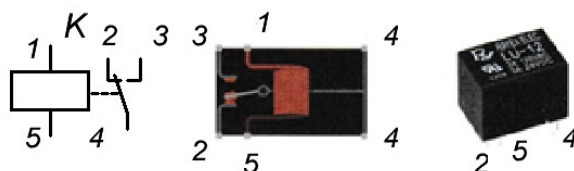


Рис. 22.3. Розташування контактів реле на схематичному позначенні та на реальному корпусі.

3. У початковому стані, якщо в приміщенні присутнє освітлення, червоний світлодіод світиться. Затуліть фоторезистор долонею.

4. Поясніть фізичні процеси, які відбулись в електронній схемі. Зробіть висновки.

Контрольні запитання

1. Що таке фотореле та який його принцип дії?
2. Які світлочутливі елементи застосовуються у фотореле?
3. Як змінюється опір фоторезистора при зміні освітленості?
4. Яка роль підсилювального каскаду у фотореле?
5. Для чого у фотореле використовується виконавчий елемент (реле або симістор)?
6. Які параметри освітленості впливають на спрацювання фотореле?
7. У яких приладах і системах автоматичного управління застосовується фотореле?
8. У чому полягають переваги використання фотореле в автоматизації освітлення?
9. Які фактори впливають на точність і стабільність роботи фотореле?
10. Чим відрізняється робота фотореле від роботи звичайного електромагнітного реле?

Лабораторна робота № 23

Вивчення принципу дії регістра 74НС574 та його застосувань у цифрових схемах

Мета роботи: Вивчити принцип дії та функціональні можливості регістра 74НС574; дослідити процеси запису, збереження та виведення даних; ознайомитися з особливостями використання регістра у цифрових пристроях для організації зберігання та передачі інформації.

Прилади і матеріали

1. Цифрова мікросхема 74НС574.
2. Резистори.
3. Світлодіоди (8 шт.)
4. DIP – перемикач на 8 груп контактів.
5. Кнопка.
6. Макетна плата.
7. З'єднувальні проводи.
8. Джерело живлення (9 В).

Теоретичні відомості

Регістр – це електронний цифровий пристрій, призначений для тимчасового зберігання та перетворення інформації. Він складається з групи тригерів, які з'єднані між собою таким чином, щоб забезпечувати послідовний або паралельний запис та зчитування даних. В електронних пристроях регістри використовують для тимчасового зберігання даних у мікропроцесорних системах, організації обміну інформацією між мікросхемами, буферизації шин даних, реалізації зсувних операцій та арифметичних перетворень, формування затримок у сигнальних лініях.

До основних функцій регістрів відносять зберігання даних, передачу інформації (паралельна або послідовна передача інформації між вузлами цифрової системи), перетворення даних (прикладом може бути перетворення паралельного коду в послідовний та навпаки), буферизацію сигналів.

За принципом дії розрізняють такі типи регістрів:

1. Регістр паралельного завантаження (усі біти інформації записуються одночасно). Паралельний регістр можна створити, використовуючи *RS*- або *D*-тригери (рис. 23.1). Кількість тригерів, які використовуються в регістрі, рівна кількості розрядів двійкового числа, які необхідно занести до регістру.

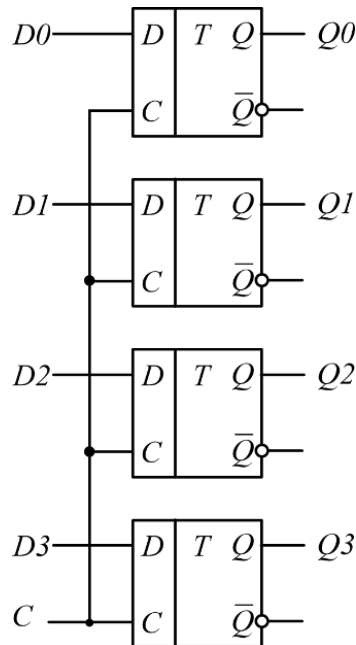


Рис. 23.1. Чотирьохрозрядний паралельний регістр на D-тригерах.

Регістри паралельного типу одночасно приймають всі розряди двійкового числа та одночасно видають всі розряди двійкового числа на вихід.

2. Регістр послідовного завантаження, або регістри зсуву (мають один вихід, дані вводяться і виводяться по одному біту за такт). Регістри зсуву мають один вхід, через який біти числа передаються розряд за розрядом. Регістри послідовного завантаження здатні зсувати біти вліво або вправо в залежності від керуючого сигналу. Приклад послідовного регістра, побудованого на D-тригерах, зображено на рис. 23.2.

Проміжок часу, за який завантажуються один біт інформації у регістр, прийнято називати тактом. Відповідно, кількість тактів, які необхідні для завантаження даних в такий регістр, залежить від розрядності регістру.

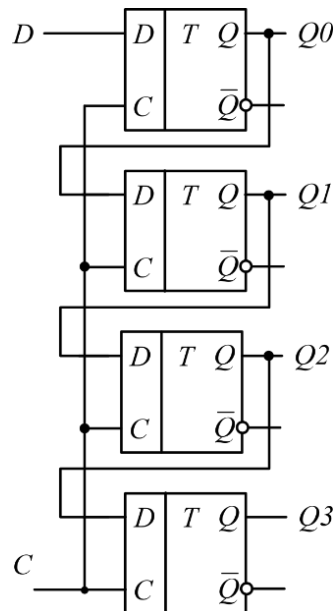


Рис. 23.2. Послідовний регістр, побудований на D -тригерах.

3. Регістр із паралельним входом і послідовним виходом, або *PISO*-регістр (використовується для передачі даних послідовним каналом).

4. Регістр із послідовним входом і паралельним виходом, або *SIPO*-регістри (застосовується для розширення кількості вихідних ліній).

5. Універсальні регістри (можуть працювати як в послідовному, так і в паралельному режимах).

Мікросхема 74НС574 – це восьмирозрядний регістр на D -тригерах з паралельним завантаженням. Вона часто використовується як вихідний буфер регістрів у мікропроцесорних системах, де потрібне кероване зберігання та передавання даних.

Основні параметри мікросхеми 74НС574:

- Кількість розрядів: 8.
- Тип використовуваних тригерів: D -тригери з тактовим керуванням.
- Інтерфейс: паралельний ввід та паралельний вивід.
- Додаткові функції: можливість відключення виходів.

На рис. 23.3 зображено умовне схематичне позначення мікросхеми 74НС574. Даний регістр має 8 входів ($D0-D7$) та 8 виходів ($Q0-Q7$) і два входи керування – OE та CP . Інверсний вхід OE призначений для дозволу або заборони зчитування числа. Вхід CP – синхронізуючий.

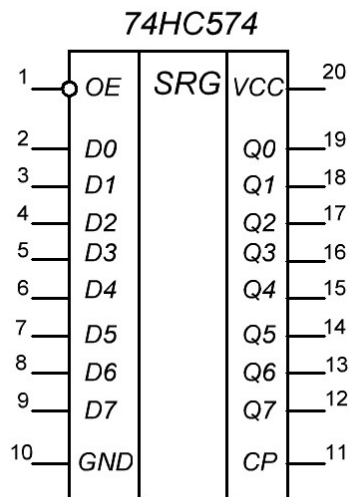


Рис. 23.3. Умовне схематичне позначення паралельного регістра 74HC574.

Якщо на вхід *OE* подати високий рівень напруги (логічна «1»), то зчитування числа з регістра відбуватися не буде. У такому випадку його виходи перейдуть у високоімпедансний стан, тобто будуть вимкнені. Якщо одночасно з цим змінювати сигнали на вході та подати синхронізуючий імпульс, то вони завантажаться у регістр.

Коли на вхід *OE* подати низький рівень напруги (логічний «0»), то збережений двійковий код відобразиться на виходах мікросхеми. Для передачі збережених в регістрі даних на виходи не обов'язково подавати синхронізуючий імпульс на вхід *CP*. Тобто регістр 74HC574 має синхронний вхід для запису інформації та асинхронний вихід для зчитування даних.

На рис. 23.4 зображено схему підключення регістру 74HC574 для збереження та видачі даних. У схемі, зображеній на рис. 23.4, двійковий код на вхід регістру подається за допомогою *DIP*-перемикача. Входи *Q0-Q7* підключені до перемикачів №1-№8. Виходи мікросхеми 74HC574 підключені до світлодіодів *HL1-HL8*. Вхід *OE* підключений до мінуса джерела живлення (логічного нуля). Синхронізуючий імпульс на вхід *CP* подається за допомогою кнопки *SA2*. Зростаючий фронт синхронізуючого імпульсу формується замиканням кнопки *SA2*.

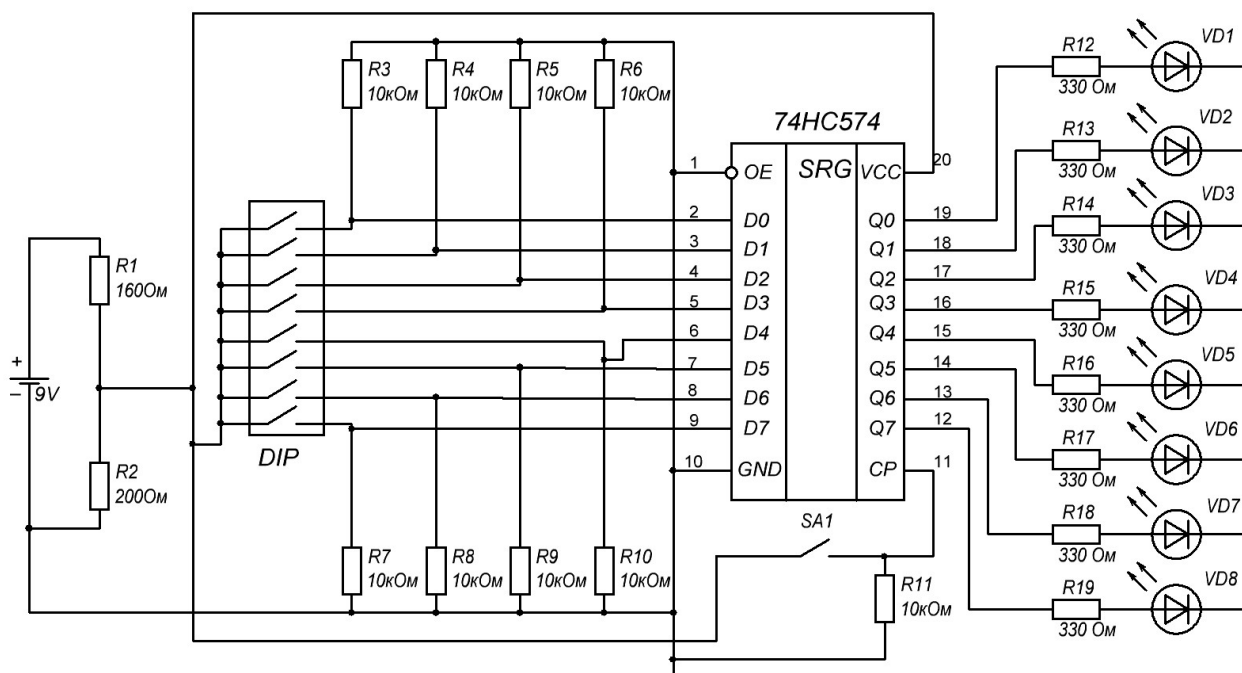


Рис. 23.4. Схема підключення мікросхеми 74HC574.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему (рис. 23.4) на макетній платі.

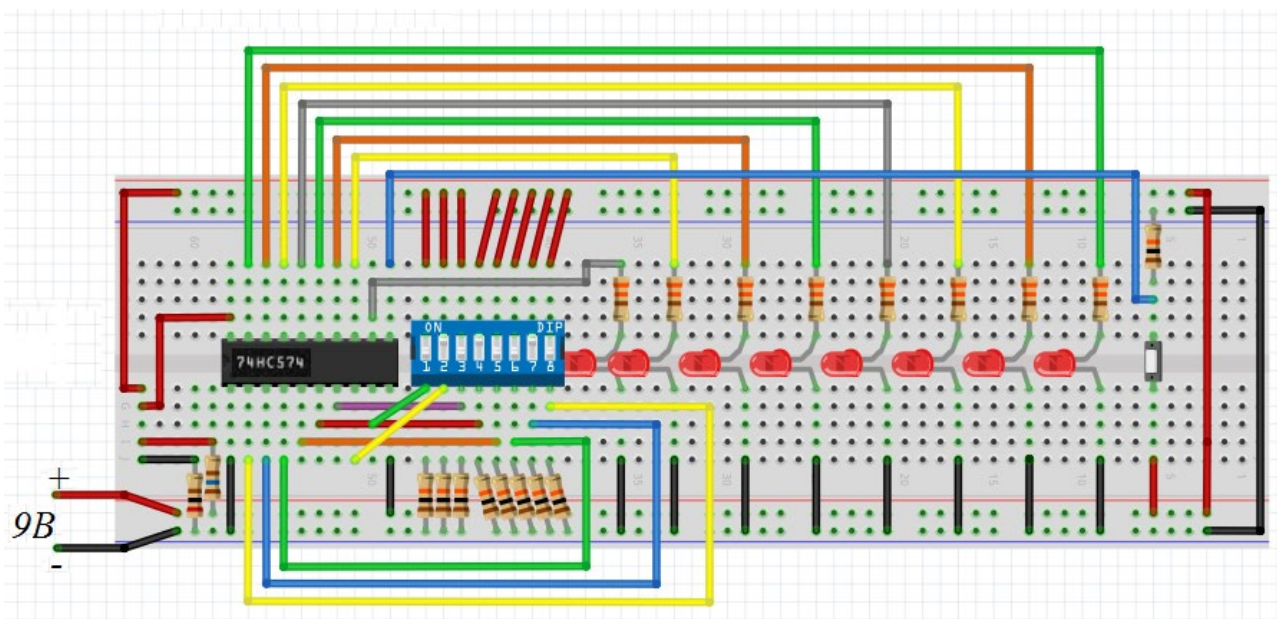


Рис. 23.5. Схема підключення мікросхеми 74HC574 зібрана на макетній платі

2. Підключити джерело живлення, кнопку для подачі тактових імпульсів (або генератор), перемикачі для подачі інформаційних сигналів та індикатори (світлодіоди) для контролю вихідних сигналів.

3. Подати різні комбінації двійкових кодів на входи $D0-D7$ та зафіксувати їх у регістрі тактовим імпульсом.
4. Спостерігати зміну станів виходів $Q0-Q7$ та записати результати у зошит.
5. Дослідити вплив входу OE : увімкнути/вимкнути виходи та проаналізувати роботу регістра у режимі високого імпедансу.
6. За результатами проведених досліджень зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Що таке регістр та які його основні функції?
2. Які існують типи регістрів за способом завантаження та виведення даних?
3. З яких елементів найчастіше будуються регістри?
4. Яке призначення мікросхеми 74НС574 та скільки розрядів вона має?
5. Яку роль виконує вхід CP у регістрі 74НС574?
6. Для чого використовується вхід OE (Output Enable) та як він впливає на вихідні сигнали?
7. Що означає «тристабільний вихід» і в яких випадках це використовується?
8. Які рівні сигналів на входах $D0-D7$ відображаються на виходах $Q0-Q7$ після тактування?
9. Де застосовуються регістри 74НС574 у мікропроцесорних і мікроконтролерних системах?
10. У чому полягає відмінність між буферизацією сигналів та їх зберіганням у регістрі?

Лабораторна робота № 24

Програмування та дослідження мікроконтролера ATmega328P для керування символьним LCD-дисплеєм

Мета роботи: Ознайомитися з принципами програмування мікроконтролера ATmega328P для взаємодії з символьним LCD-дисплеєм, навчитися підключати дисплей до мікроконтролера та відображати на ньому інформацію від різних датчиків (температури, вологості, освітленості тощо), а також дослідити можливості використання мікроконтролера для розробки інформаційно-вимірювальних та керуючих систем.

Прилади і матеріали

1. Комп'ютер.
2. Arduino Uno KIT набір Mega Pack.

Теоретичні відомості

Мікроконтролер – це інтегральна мікросхема, яка містить у собі центральний процесор (CPU), постійну пам'ять (ROM/Flash), оперативну пам'ять (RAM), а також вбудовані периферійні модулі (таймери, АЦП, інтерфейси UART, SPI, I²C тощо) для взаємодії із зовнішніми пристроями. На відміну від мікропроцесора, мікроконтролер є повноцінною мініатюрною системою на одному кристалі, здатною виконувати керування пристроями в режимі реального часу.

Мікроконтролер ATmega328P – це 8-бітний мікроконтролер компанії Microchip (раніше Atmel), який широко застосовується в освітніх, аматорських і професійних проектах, зокрема у відомій платформі Arduino Uno.

Основні характеристики мікроконтролера ATmega328P:

- Архітектура: 8-бітна AVR RISC.
- Тактова частота: до 20 МГц.
- Програмна пам'ять (Flash): 32 КБ (з них 0,5 КБ зайнято завантажувачем у Arduino).
- Оперативна пам'ять (SRAM): 2 КБ.

- EEPROM: 1 КБ.
- Входи/виходи: 23 лінії введення/виведення.
- Аналогові входи: 6 каналів АЦП (10-бітний).
- Таймери: 3 (два 8-бітні та один 16-бітний).
- Периферія: UART, SPI, I²C, ШІМ-виходи.
- Живлення: 1,8–5,5 В.
- Корпуси: DIP-28, TQFP-32, QFN-32.

Мікроконтролери ATmega328P застосовуються у платах Arduino (Uno, Nano, Pro Mini), в автоматизованих системах керування, роботах та сенсорних пристроях, вимірювальні системи та побутова електроніка.

Arduino Uno – це одна з найпопулярніших і найбільш розповсюджених мікроконтролерних плат сімейства Arduino, призначена для створення прототипів електронних пристроїв, навчання та розробки проєктів у сфері автоматики, робототехніки та «розумних» систем.

Основні характеристики Arduino Uno:

- Мікроконтролер: ATmega328P.
- Робоча напруга: 5 В.
- Вхідна напруга (рекомендована): 7–12 В (можлива – 6–20 В).
- Цифрові входи/виходи: 14 (6 із них можуть працювати як ШІМ-виходи).
- Аналогові входи: 6 (з роздільною здатністю 10 біт).
- Тактова частота: 16 МГц.
- Пам'ять: 32 КБ Flash (2 КБ зайнято завантажувачем), 2 КБ SRAM, 1 КБ EEPROM.
- Інтерфейси: UART, I²C, SPI.
- Роз'єм USB-B для підключення до комп'ютера та програмування.
- Живлення: від USB або зовнішнього джерела (адаптер, батарея)

До основних особливостей Arduino Uno відносять те, що вона проста у використанні завдяки середовищу розробки Arduino IDE, де програми пишуться на спрощеній мові (на основі C/C++), є можливість підключення «шилдів» (допоміжних плат розширення) для додавання функціоналу – Wi-Fi, GSM,

керування двигунами, дисплеями тощо, її можна використовувати як у навчальних цілях, так і для створення професійних прототипів.

Arduino Uno застосовується в освітніх проєктах (основи електроніки та програмування), робототехніці, системах «розумного будинку», автоматизації та керуванні пристроями, інтернеті речей (IoT).

Мікроконтролери ATmega328P, вбудовані в плати Arduino UNO R3, вже мають завантажувач (bootloader). Це дозволяє завантажувати в мікроконтролер нові програми без використання зовнішнього програматора.

На рис. 24.1 зображено зовнішній вигляд плати Arduino UNO R3, та вказано основні призначення виводів.

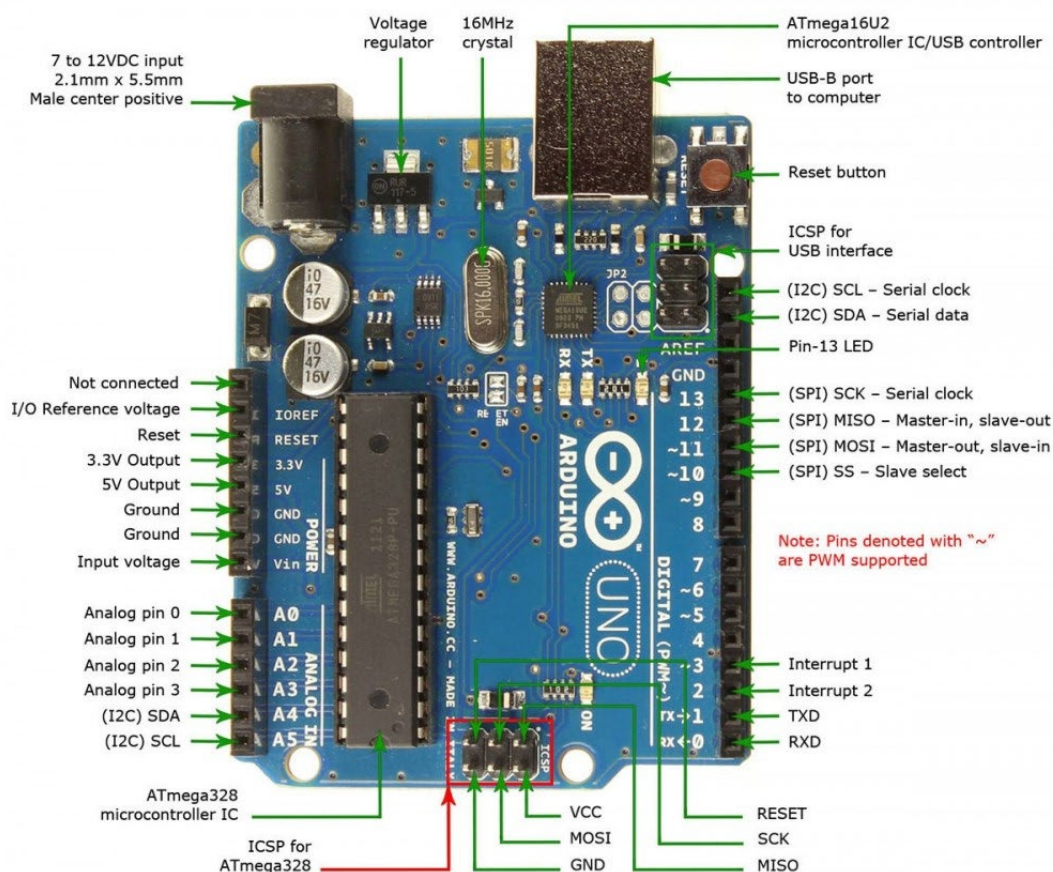


Рис. 24.1. Призначення виводів та основні елементи плати Arduino Uno R3. [24]

Розглянемо коротко виводи на Arduino Uno R3. Всі виводи на платі Arduino Uno R3 можна поділити на чотири групи: живлення, цифрові, аналогові, спеціальні.

До виводів живлення відносяться:

1. *VIN* – вхід живлення для плати, якщо використовується зовнішнє джерело живлення (7–12 В). На платі є стабілізатор, який перетворює дану напругу у напругу 5 В для живлення мікроконтролера та периферії.

2. *5 V* – стабілізоване живлення на 5 В від USB або від стабілізатора (через *VIN*). Цей вивід можна використовувати для живлення зовнішніх датчиків, модулів та інших елементів електроніки.

3. *3.3 V* – стабілізоване живлення на 3,3 В від вбудованого регулятора (максимальний струм 50 мА). Використовується для живлення зовнішніх датчиків, модулів та інших елементів електроніки, які працюють при напрузі 3,3 В.

4. *GND* (Ground) – спільний вивід для всіх схем. Призначений для підключення «мінуса» усіх зовнішніх пристроїв.

5. *RESET* – вхід для перезавантаження мікроконтролера ATmega328P. Якщо приєднати вивід до «0» (землі), плата виконає скидання програми.

6. *IOREF* – вивід, що показує робочу напругу логіки (на Arduino Uno – 5 В). Використовується модулями-«шилдами» для автоматичної адаптації.

До цифрових входів/виходів належать:

1. *D0 (RX)* – прийом даних по UART (послідовний порт). Використовується при програмуванні та обміні даними з комп'ютером.

2. *D1 (TX)* – передача даних по UART.

3. *D2, D3* – підтримка зовнішніх переривань *INT0* та *INT1* (можна реагувати на зміну сигналу).

4. *D3, D5, D6, D9, D10, D11* – виходи ШІМ, позначені символом ~ на платі. Використовуються для керування яскравістю світлодіодів, швидкістю двигунів тощо.

5. *D10 (SS), D11 (MOSI), D12 (MISO), D13 (SCK)* – виводи інтерфейсу SPI для високошвидкісного обміну з датчиками і модулями.

6. *D13* – підключений до вбудованого світлодіода «L» на платі.

До аналогових входів належать:

1. *A0 – A5* – стандартні аналогові входи.

2. *A4 (SDA)* – лінія даних інтерфейсу I²C.

3. *A5 (SCL)* – лінія тактових імпульсів інтерфейсу I²C.

Аналогові входи під'єднані до 10-бітного АЦП.

Спеціальні виводи:

1. *AREF* (Analog Reference) – використовується для підключення зовнішньої опорної напруги до АЦП.

2. *IOREF* –показує напругу логіки (на Uno – 5 В). Корисний для шилдів.

Порядок виконання роботи

1. Підготовка обладнання.

1.1. Підключіть мікроконтролер ATmega328P (плата Arduino Uno R3 або еквівалент).

1.2. Підготуйте символьний *LCD*-дисплей (16×2 або 20×4).

1.3. Підготуйте датчики (температури, вологості, освітленості) та провідники для підключення.

2. Підключення пристроїв до мікроконтролера.

2.1. З'єднайте *LCD*-дисплей з контактами мікроконтролера згідно зі схемою (живлення, *GND*, сигнали *RS*, *E*, *D4–D7* для 4-бітного режиму);

2.2. Підключіть датчики до аналогових або цифрових входів ATmega328P;

2.3. Перевірте правильність підключень і надійність контактів.

3. Підготовка середовища програмування.

3.1. відкрийте Arduino IDE.

3.2. встановіть необхідні бібліотеки для *LCD*-дисплея (наприклад, LiquidCrystal.h) та для датчиків.

3.3. виберіть відповідну плату та порт у налаштуваннях IDE.

4. Написання програми (скетчу).

4.1. Ініціалізуйте *LCD*-дисплей.

4.2. Ініціалізуйте датчики та необхідні змінні.

4.3. Організуйте зчитування даних з датчиків у циклі `loop()`.

4.4. Виведіть отримані значення на *LCD*-дисплей у зручному форматі.

4.5. Додайте затримки при необхідності для стабільного відображення.

5. Завантаження та тестування програми.

5.1. Завантажте скетч у мікроконтролер.

5.2. Перевірте відображення даних на дисплеї.

5.3. Змініть умови навколишнього середовища (температура, освітленість) і спостерігайте за оновленням показників на дисплеї.

6. Дослідження роботи системи.

6.1. Перевірте коректність показів для різних датчиків.

6.2. Виміряйте точність та швидкодію відображення.

6.3. Визначте можливості та обмеження мікроконтролера та дисплея.

7. За результатами проведених досліджень зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Що таке мікроконтролер і чим він відрізняється від мікропроцесора?

2. Назвіть основні компоненти мікроконтролера ATmega328P.

3. Які типи пам'яті присутні у мікроконтролері ATmega328P і для чого вони використовуються?

4. Які інтерфейси ATmega328P дозволяють підключати зовнішні пристрої та датчики?

5. Що таке символьний *LCD*-дисплей і які сигнали він використовує для взаємодії з мікроконтролером?

6. Як підключити датчики (температури, вологості, освітленості) до ATmega328P для зчитування даних?

7. Який принцип роботи АЦП у мікроконтролері ATmega328P?

8. Як відображати отримані показники датчиків на *LCD*-дисплеї за допомогою програми?

9. Які основні команди та бібліотеки використовуються для керування *LCD*-дисплеєм у середовищі Arduino IDE?

10. Які практичні переваги використання мікроконтролера ATmega328P для створення інформаційно-вимірювальних систем?

ДОДАТКИ

А. Перелік графічних позначень елементів електронних схем

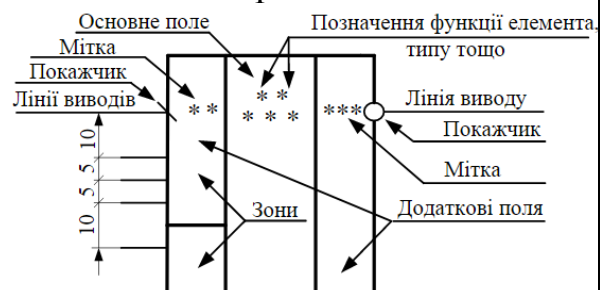
Умовне схематичне позначення елемента	Назва елемента
	Контакт розбірного та нерозбірного з'єднань
	З'єднувачі: штир та гніздо
	З'єднання з загальним дротом (корпусом)
	Заземлення.
	Вузол електричного кола
	Гучномовець, динамік
	Резистор
	Реостат
	Змінний резистор
	Фоторезистор
	Вимикач однополюсний
	Вимикач двополюсний
	Кнопка
	DIP перемикач на 8 груп контактів
	Гальванічний елемент, батарея
	Батарея елементів
	Джерело змінної напруги
	Електромагнітне реле
	Котушка індуктивності

	Котушка індуктивності з магнітопроводом
	Електролітичний конденсатор
	Конденсатор
	Конденсатор змінної ємності, варикап
	Загальне позначення діода
	Варикап
	Світлодіод
	Фотодіод
	Тунельний діод
	Стабілітрон
	Діодний міст
	Біполярний транзистор структури <i>p-n-p</i>
	Біполярний транзистор структури <i>n-p-n</i>
	Польовий транзистор з індуктованим каналом <i>n</i> -типу
	Польовий транзистор з індуктованим каналом <i>p</i> -типу

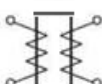
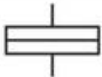
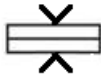
	МНД-транзистор з вбудованим каналом <i>n</i> -типу
	МНД-транзистор з вбудованим каналом <i>p</i> -типу
	МНД-транзистор з індукованим каналом <i>n</i> -типу
	МНД-транзистор з індукованим каналом <i>p</i> -типу
	Тиристор з керуванням по аноду
	Тиристор з керуванням по катоду
	Диністор
	Симетричний диністор
	Симістор (Симетричний триністор)
	Лампа розжарювання
	Трансформатор з феромагнітним осердям
	Датчик Холла
	Генератор
	Осцилограф
	Частотомір

	Операційний підсилювач
	Діодний оптрон
	Транзисторний оптрон
	Тиристорний оптрон
	Сонячний елемент
	Логічний елемент І
	Логічний елемент АБО
	Логічний елемент Не
	Логічний елемент І-НЕ
	Логічний елемент АБО-НЕ
	Виключне АБО
	Асинхронний <i>RS</i> -тригер
	Синхронний <i>RS</i> -тригер
	<i>D</i> -тригер

Умовне схематичне позначення мікросхеми



Б. Написи і позначення на шкалах електровимірювальних приладів

Умовне позначення		Назва
Звичайний вимірювальний механізм	Логометричний вимірювальний механізм	
Тип вимірювального механізму		
		Магнітоелектричний з рухомою рамкою
		Магнітоелектричний з рухомим магнітом
		Електромагнітний прилад
		Індукційний прилад
		Електродинамічний прилад
		Феродинамічний прилад
		Електромагнітний поляризаційний прилад
		Електростатичний прилад
		Вібраційний прилад
		Тепловий прилад
		Біметалевий прилад
		Магнітоелектричний прилад з випрямленням
		Магнітоелектричний прилад з електронним перетворенням (електронний прилад)
		Термоелектрична система з не ізольованою термопарою
		Термоелектрична система з ізольованою термопарою

		Магнітоелектричний прилад з ізольованими та неізольованими термопарами
Тип вимірюваних величин		
—	Постійний струм.	
~	Змінний однофазний струм.	
≈	Постійний та змінний струм.	
≍	Трьохфазний струм.	
≋	Змінний трифазний струм з асиметричним навантаженням	
Додаткові позначення		
⊥	Прилад застосовувати при вертикальному розміщенні шкали	
└	Прилад застосовувати при горизонтальному розміщенні шкали	
∠60°	Прилад застосовувати при розміщенні шкали під кутом 60 градусів	
1,5  (1,5)	Клас точності приладу, наприклад, 1,5.	
 2 кВ 	Випробна напруга ізоляції 2 кВ.	
	Прилад для випробовування ізоляції не підлягає.	
	Прилад захищений від зовнішнього електричного поля.	
	Прилад захищений від зовнішнього магнітного поля.	
	Коректор	
	Увага! Дивитись інструкцію до приладу.	
	Небезпека доторкання до приладу.	
ast	Астатичний захист приладу від зовнішніх магнітних полів	

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ТА РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Демків Т. М., Конопельник О. І., Шопа Я. І. Основи теорії похибок фізичних величин. Методичні матеріали для загального фізичного практикуму. Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2008. 20 с. URL: <https://physics.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/pohybky.pdf> (дата звернення: 25.08.2025)
2. Спінул Л. Ю., Святненко В. А. Основи цифрової електроніки. Курс лекцій. Київ : КІП ім. І. Сікорського, 2022. 118 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/94c9bca4-d680-472b-83d3-96e1676f8a0a/content> (дата звернення: 25.08.2025)
3. Новосад О. В. Електроніка : електронний курс. [Електрон. ресурс]. URL: <https://moodle.vnu.edu.ua/course/view.php?id=1602> (дата звернення: 25.08.2025)
4. Новосад О. В. Електрика і магнетизм : конспект лекцій у 2 ч. - Ч. 1. Електростатика. Постійний електричний струм. Луцьк : Волин. нац. ун-т ім. Лесі Українки, 2024. 114 с. URL: https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/24836/1/lect_p1.pdf (дата звернення 25.08.2025)
5. Новосад О. В. Електрика і магнетизм : конспект лекцій у 2 ч. - Ч. 2. Електромагнетизм. Електромагнітні коливання і хвилі. Луцьк : Волин. нац. ун-т ім. Лесі Українки, 114 с. URL: https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/27832/1/lect_p2.pdf (дата звернення 25.08.2025)
6. Новосад О. В. Елементна база напівпровідникової електроніки: лабораторний практикум. Луцьк : Волин. нац. ун-т ім. Лесі Українки, 2024. 84 с. URL: https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/24837/1/lab_pract.pdf (дата звернення 25.08.2025)
7. Кевшин А. Г., Новосад О. В. Основи електроніки : методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт. Луцьк : Волин. нац. ун-т ім. Лесі Українки, 2025. 69 с. URL:

https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/27377/1/Electronics_2025.pdf (дата звернення 25.08.2025)

8. Кевшин А. Г., Новосад О. В., Федосов С. А. Електроніка: задачі. Луцьк : Вежа-Друк, 2020. 48 с. URL:

https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/19584/1/Electronika_Zadathi.pdf (дата звернення: 25.08.2025).

9. Новосад О. В., Федосов С. А., Кевшин А. Г. Лабораторний практикум з електрики і магнетизму : навч. посіб. Луцьк : Волин. нац. ун-т ім. Лесі Українки, 2023. 165 с. URL:

https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/23304/1/laborat_prakt.pdf (дата звернення 25.08.2025)

10. Bartlett J. A. Practical Introduction to Schematics, Circuits, and Electronics. [Електрон. ресурс]. URL: <https://mrce.in/ebooks/Electronics%20for%20Beginners.pdf> (дата звернення: 25.08.2025)

11. Eggleston D. L. Basic Electronics for Scientists and Engineers. [Електрон. ресурс]. URL: <https://cis.rmuti.ac.th/electricrail/wp-content/uploads/2020/08/BasicElectronicsforScientistsandEngineers-2.pdf> (дата звернення: 25.08.2025)

12. Anil K. Maini, Digital Electronics. Principles, Devices and Applications. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd. 2007. 741 p. URL: <https://www.shahucollegelatur.org.in/Department/Studymaterial/sci/it/BCA/FY/digielec.pdf> (дата звернення: 25.08.2025).

13. Paul Horowitz, Winfield Hill. The Art of Electronics. Cambridge: Cambridge University Press. 2015. 1255 p.

14. Infobooks. 25+ Electronics Books for Free! URL: <https://www.infobooks.org/free-pdf-books/physics/electronics/#-basic-electronics-books-> (дата звернення: 25.08.2025).

15. Співак В. М., Гуржій А. М., Нельга А. Т., Ітякін О. С. Загальна електротехніка і основи електроніки : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря

Сікорського, 2020. 266 с. URL: https://vpusp.vn.ua/wp-content/uploads/2023/01/pick_elektrotehnika_ta_osnovi_elektroniki_gurzhiy.pdf (дата звернення: 25.08.2025)

16. Дудка Т. О., Горбенко А. А. Електронні пристрої : підручник. Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2023. 340 с.

17. Осадчук О. В., Звягін О.С. Теорія електричних кіл і сигналів. Частина 1 : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2015. 153 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2024/Zvyagin_P1_2015_156.pdf (дата звернення 20.08.2025)

18. Кобяков О. М., Бражник І. Є. Теорія електричних кіл та сигналів. Основи розрахунку електричних кіл : конспект лекцій. Суми : Сумський державний університет, 2016. 168 с. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/2fd6fff4-1abc-4f40-b413-2747ab7038d7/content> (дата звернення 20.08.2025)

19. Ткачов В. В., Проценко С. М., Козар М. В., Шевченко В. І. Мікропроцесорна техніка : підруч. - 2-ге вид., допов. і перероб. Дніпро : НТУ «ДП», 2022. 230 с. URL: <https://ir.nmu.org.ua/server/api/core/bitstreams/6f4c95bf-c395-461a-b50d-4fd2d65b93d4/content> (дата звернення: 25.08.2025)

20. Сіделєв М. І., Запальський В. М., Беліков О. Є. Програмування спеціалізованих мікроконтролерних та вбудованих комп'ютерних систем для засобів автоматизації : навч. посіб. Миколаїв : ЧНУ ім. Петра Могили, 2023. 96 с. URL: <https://dspace.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/714/1/Сіделєв%20М.%20І.%20Програмування%20спеціалізованих.pdf> (дата звернення: 25.08.2025)

21. Каганюк О. К., Поліщук М. М., Здолбіцька Н. В., Бортник К. Я. Комп'ютерна електроніка : навч. посіб. Луцьк : Луцький НТУ, 2020. 224 с. URL: https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2021-01/КЕ_%20Посібник%20%281%29.pdf (дата звернення: 25.08.2025)

22. Новацький А.О. Комп'ютерна електроніка: підручник для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології», спеціалізації «Інтегровані інформаційні системи». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 468 с.
23. Минайленко Р.М., Коноплицька-Слободенюк О.К., Гермак В.С. Комп'ютерна схемотехніка: навч. посіб. Кропивницький: Видавець Лисенко В. Ф., 2022. 153 с. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/275429c5-531b-465e-adc9-5d0da56a4bc0/content> (дата звернення: 25.08.2025).
24. Самборський І.І., Шолохов С.М., Юрченко О.В., Ніколаєнко Б.А. *Основи цифрової обробки сигналів: навчальний посібник*. Київ: ІСЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 171 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/0b3a7e67-c9f3-43a5-907e-bb7db0037705/content> (дата звернення 20.08.2025)
25. Проценко І. Ю., Олеховський Л. В. Технологія одержання і фізичні властивості плівкових матеріалів та основи мікроелектроніки (практикуми) : навч. посіб. Суми : СумДУ, 2020. 231 с. URL: https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/77600/1/Protsenko_Tekhnolohiia.pdf (дата звернення: 25.08.2025)
26. Бондаренко І.М., Бородин О.В., Карнаушенко В.П., Васильєв Ю.С. Прилади та пристрої інтегральної електроніки. Частина 1: навч. посібник для студентів ЗВО. Харків: ХНУРЕ, 2020. 228 с. URL: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/478a8ac3-0b01-4678-96e0-5255ae439784/content> (дата звернення: 25.08.2025)
27. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: теорія і практикум: Навч. посіб. 3-е вид. К. : Каравела, 2004. 432 с.
28. Міліх В. І., Шавьолкін О. О. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : підручник для студ. вузів. 2-ге вид. К. : Каравела, 2008. 687 с.
29. Бойко В. І., Гуржій А. М., Жуйков В. Я. Основи схемотехніки електронних систем: Підручник. К. : Вища шк., 2012. 527с.

30. Жуйков В. Я., Бойко В. І., Зорі А. А., Співак В. М. Схемотехніка електронних систем: Підручник в двох томах. К : Аверс, 2002. 772 с.
31. Малинівський С. М. Загальна електротехніка та основи електроніки. Львів : Ви-во Львівської політехніки, 2001. 596 с.
32. Сенько В. І. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник для студентів вищ. закл. освіти у 4-х т. – Т.2: Аналогові та імпульсні пристрої. К. : ТОВ «Видавництво Обереги», 2000. 510 с.
33. Бабич М. П., Жуков І. А. Комп'ютерна схемотехніка: Навчальний посібник. К. : МК-Прес, 2004. 412 с.
34. Рибалко М. П., Есауленко В. О., Костенко В. І. Теоретичні основи електротехніки: Лінійні електричні кола: підручник. Донецьк : Новий світ, 2003. 513 с.
35. ARDUINO STORE <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3> (дата звернення 25.08.2025)

Навчальне електронне видання

Новосад Олексій Володимирович

Лабораторний практикум з електроніки

Навчальний посібник

Друкується в авторській редакції

Один електронний оптичний диск (CD-ROM). Об'єм даних 6,76 Мб.
Тираж 300 прим. Зам. 153. Видавець і виготовлювач – Вежа-Друк,
(м. Луцьк, вул. Шопена, 12, тел. +38 066 936 25 49).

E-mail: vezhaprint@gmail.comvez

Свідоцтво Держ. комітету телебачення та радіомовлення України
ДК № 4607 від 30.08.2013 р

ВЕЖА-ДРУК

ISBN 978-966-940-706-1



9 789669 407061 >