

Національний центр «Мала академія наук України»
Лабораторія «МАНЛаб»

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ

Навчальний посібник

Київ 2025

Рецензенти:

Могильний Сергій Борисович – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехнічних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Прокопець Петро Григорович – методист відділень фізики, астрономії та технічних наук КОПНЗ «Буковинська Мала академія наук учнівської молоді».

*Рекомендовано Вченою радою
Національного центру «Мала академія наук України»
(протокол №1 від 13.02.2025)*

Атамась А.І.

Основи електроніки : Навчальний посібник / А.І. Атамась. – Київ : Національний центр «Мала академія наук України», 2025. – 345 с.

ISBN 978-617-7945-89-4

Навчальний посібник призначено для опанування основ електроніки у позашкільній освіті. Видання адресовано педагогам та учням Малої академії наук України, вчителям та учням закладів загальної, середньої освіти і старшої школи, студентам закладів вищої освіти.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ЕЛЕКТРОНІКА ЯК ГАЛУЗЬ НАУКИ Й ТЕХНІКИ. АТОМ І МАТЕРІЯ. ЕЛЕКТРИЧНІ СИГНАЛИ.....	8
1.1. Електроніка як галузь науки й техніки.....	8
1.2. Тверде тіло. Енергетичні рівні. Провідники, діелектрики, напівпровідники.....	9
1.3. Явища електронної емісії та іонізації.....	17
1.4. Електричні коливання. Перетворення сигналів.....	19
1.5. Випромінювання і хвилі.....	23
<i>Практична робота 1. Робота з лабораторним обладнанням.....</i>	<i>25</i>
<i>Практична робота 2. Робота з вимірювальним програмним забезпеченням.....</i>	<i>30</i>
<i>Практична робота 3. Моделювання мікрофону.....</i>	<i>32</i>
<i>Практична робота 4. Моделювання динаміку.....</i>	<i>34</i>
Завдання для самостійної роботи.....	37
РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА. ПАСИВНІ ЕЛЕКТРОННІ КОМПОНЕНТИ. ОПІР.....	38
2.1. Електричні кола. Основні відомості.....	38
2.2. Резистор як елемент електричного кола.....	41
2.3. Конденсатор як елемент електричного кола.....	46
2.4. Котушка індуктивності як елемент електричного кола.....	51
2.5. Повний опір.....	54
<i>Лабораторна робота 1. Перевірка правил Кірхгофа.....</i>	<i>58</i>
<i>Лабораторна робота 2. Дослідження коливального контуру.....</i>	<i>59</i>
<i>Дослідницька робота. Визначення енергії, яку віддає гальванічний елемент живлення у зовнішнє коло, залежно від опору навантаження.....</i>	<i>63</i>
Завдання для самостійної роботи.....	69
РОЗДІЛ 3. ДІОДИ.....	71
3.1. Різновиди діодів.....	71
3.2. Напівпровідниковий діод.....	72
3.3. Площинні та точкові діоди.....	76
<i>Практична робота. Моделювання газорозрядного діоду.....</i>	<i>85</i>
<i>Лабораторна робота 1. Дослідження електричного кола з напівпровідниковим діодом.....</i>	<i>88</i>
<i>Лабораторна робота 2. Дослідження електричного кола з напівпровідниковим діодом за допомогою моделювального комп'ютерного середовища.....</i>	<i>90</i>
<i>Дослідницька робота. Дослідження питання оптимізації світлодіодного освітлення.....</i>	<i>94</i>
Завдання для самостійної роботи.....	97
РОЗДІЛ 4. ТРАНЗИСТОРИ Й ТРІОДИ.....	98

4.1. Основні властивості й види транзисторів. Вакуумний триод.....	98
4.2. Біполярні транзистори.....	99
4.3. Польові транзистори.....	102
4.4. Фототранзистори.....	104
4.5. Вакуумний триод.....	106
<i>Лабораторна робота 1. Дослідження транзистора</i>	108
<i>Лабораторна робота 2. Дослідження транзистора у моделювальному комп'ютерному середовищі</i>	110
<i>Практична робота 1. Індикатор електростатичного заряду</i>	112
<i>Практична робота 2 Електронний електрометр</i>	115
Завдання для самостійної роботи.....	120
РОЗДІЛ 5. РОЗДІЛ 5. НАПІВПРОВІДНИКОВІ РЕЗИСТОРИ, ТИРИСТОРИ ТА МІКРОСХЕМИ	122
5.1. Напівпровідникові резистори.....	122
5.2. Тиристори.....	127
5.3. Інтегральні мікросхеми.....	133
<i>Лабораторна робота. Дослідження фоторезистора</i>	140
Завдання для самостійної роботи.....	142
РОЗДІЛ 6. ВИПРЯМЛЯЧІ ЗМІННОГО СТРУМУ	145
6.1. Однопівперіодний та двопівперіодні випрямлячі.....	145
6.2. Пульсації випрямлячів та електричні фільтри.....	148
6.3. Стабілізатори напруги й струму.....	153
6.4. Помножувачі напруги.....	157
<i>Лабораторна робота 1. Дослідження мостового випрямляча у моделювальному комп'ютерному середовищі</i>	160
<i>Лабораторна робота 2. Дослідження помножувача напруги</i>	164
Завдання для самостійної роботи.....	166
РОЗДІЛ 7. ПІДСИЛЮВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ	168
7.1. Підсилювачі та їх класифікація.....	168
7.2. Підсилювальні каскади.....	170
7.3. Режим (клас) роботи підсилювачів.....	173
7.4. Операційні підсилювачі.....	175
7.5. Вузькосмугові підсилювачі.....	180
<i>Лабораторна робота. Моделювання та дослідження підсилювача</i>	182
<i>Практична робота. Моделювання підсилювача</i>	185
Завдання для самостійної роботи.....	188
РОЗДІЛ 8. ГЕНЕРАТОРИ. ЗВОРОТНИЙ ЗВ'ЯЗОК	190
8.1. Автоколивальні системи.....	190
8.2. Найпростіший генератор синусоїдального сигналу.....	192
8.3. Блокінг-генератор.....	194
8.4. Структурна схема генераторів електричних коливань.....	195
<i>Лабораторна робота. Моделювання та дослідження</i>	

генератору синусоїдального сигналу.....	199
Практична робота 1. Викрадач Джоулів.....	202
Практична робота 2. Бездротова передача електроенергії.....	207
Практична робота 3. Електромагнітний маятник.....	211
Практична робота 4. Магнітна левітація.....	217
Завдання для самостійної роботи.....	225
РОЗДІЛ 9. РАДІОЗВ'ЯЗОК. МОДУЛЯЦІЯ Й	
ДЕТЕКТУВАННЯ.....	226
9.1. Модуляція та її види.....	226
9.2. Реалізація амплітудної та частотної модуляції.....	228
9.3. Детектування радіосигналів.....	230
Практична робота 1. FM-передавач.....	233
Практична робота 2. FM-приймач.....	236
Практична робота 3. Реєстратор грози.....	240
Завдання для самостійної роботи.....	244
РОЗДІЛ 10. ЦИФРОВА ТЕХНІКА.....	245
10.1. Системи числення.....	245
10.2. Логічні елементи та операції. Схемна реалізація логічних елементів.....	246
10.3. Тригери.....	251
10.4. Регістри.....	255
10.5. Цифрові лічильники імпульсів.....	259
10.6. Шифратори й дешифратори.....	260
10.7. Запам'ятовуючі пристрої.....	263
10.8. Аналого-цифровий перетворювач і цифро-аналоговий перетворювач.....	264
10.9. Мікропроцесори та мікроконтролери.....	266
Лабораторна робота 1. RS-тригер на логічних елементах.....	268
Лабораторна робота 2. Двійковий лічильник.....	271
Лабораторна робота 3. Дешифратор.....	274
Лабораторна робота 4. Метеостанція на Arduino з датчиком DHT11.....	278
Лабораторна робота 5. Цифровий вимірювальний комплекс на Arduino Nano 33 BLE Sense.....	285
Лабораторна робота 6. Цифровий вимірювальний комплекс на Arduino Nano 33 BLE Sense (Варіант 2).....	290
Лабораторна робота 7. Перевірка закону Біо-Савара-Лапласа.....	292
Лабораторна робота 8. Визначення ємності та енергії зарядженого конденсатора.....	297
Завдання для самостійної роботи.....	302
РОЗДІЛ 11. ХЕМОТРОНІКА ТА БІОЕЛЕКТРОНІКА.....	303
11.1. Провідність іонних розчинів. Хемотроніка.....	303
11.2. Провідність й електронні властивості живих тканин. Біоелектроніка.....	307

<i>Лабораторна робота. Дослідження суперконденсатору та побудовання його еквівалентної схеми.....</i>	309
<i>Практична робота 1. Вимірювання напруженості змінного електричного поля промислової частоти.....</i>	310
<i>Практична робота 2. Вимірювання змінного потенціалу, наведеного на тілі людини електричним полем промислової частоти.....</i>	314
<i>Дослідницька робота. Експериментальна перевірка закону Фарадея...</i>	318
<i>Завдання для самостійної роботи.....</i>	321
ЛІТЕРАТУРА.....	321
СПИСОК ІЛЮСТРАЦІЙ.....	322
ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК.....	341
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК.....	341

ВСТУП

Електроніка відіграє дуже важливу роль у сучасній науці й техніці. Вона в значній мірі визначає досконалість технічних засобів обчислювальної та вимірювальної техніки, систем керування, передачі й обробки інформації та автоматики. Сьогодні важко знайти галузь людської діяльності, в якій не застосовувалася б електроніка. Завдяки її досягненням стало можливим створення комп'ютерів, засобів зв'язку, сучасної побутової техніки, а також сучасних зручних та точних вимірювальних приладів та комплексів, завдяки яким набувають розвитку інші науки, зокрема фізика, хімія, біологія, медицина, і які активно застосовуються у навчальному процесі.

В процесі проектування та створення різноманітних електронних пристроїв та систем важливо не лише знати основні характеристики електронних компонентів та їх конструкцію, а й глибоко розуміти фізичні принципи їх роботи. Знання основ електроніки може значним чином покращити результати роботи, пов'язаної з використанням тих чи інших електронних пристроїв і приладів.

Даний навчальний посібник призначено для опанування основ електроніки у позашкільній освіті а також під час самостійного навчання. Посібник складається з 11 тематичних розділів, в яких в доступній формі викладена основна інформація з основ електроніки, а також таких суміжних галузей знань як хемотроніка та біоелектроніка.

Кожний розділ має теоретичну та практичну частину. У теоретичній частині кожного розділу викладені відповідні фізичні основи з необхідними ілюстраціями та прикладами. Практична частина кожного розділу містить лабораторні, практичні, а також дослідницькі роботи, які автор рекомендує виконати для закріплення знань перш ніж перейти до наступного розділу.

Курс, закладений в основу навчального посібника передбачає поміж іншого навчання навичкам роботи з вимірювальним та моделюючим комп'ютерним середовищем, що може бути використаним учнями для виконання лабораторних, практичних і дослідницьких робіт, а викладачами – для здійснення навчальних демонстрацій. Передбачено навчання навичкам програмування пристроїв на основі мікроконтролерів, результатом якого є створення цифрового вимірювального комплексу на базі новітньої платформи Arduino nano 33 ble sense, що є потужним інструментом для проведення цікавих навчальних дослідів, у тому числі під в інших галузях знань.

Значна кількість рекомендованих лабораторних, практичних та дослідницьких робіт не потребує для виконання застосування складного наукового обладнання.

РОЗДІЛ 1.

ЕЛЕКТРОНІКА ЯК ГАЛУЗЬ НАУКИ Й ТЕХНІКИ. АТОМ І МАТЕРІЯ. ЕЛЕКТРИЧНІ СИГНАЛИ.

1.1. Електроніка як галузь науки й техніки

Електроніка – це галузь науки й техніки, що займається використанням явищ, пов'язаних з рухом заряджених часток у вакуумі, газах і твердих тілах. Електроніка займається вивченням фізичних процесів, розробкою конструкцій і технологією виготовлення електронних приладів (ламп, діодів, транзисторів, інтегральних мікросхем, тощо), а також пристроїв, в яких ці прилади застосовуються.

Електроніка наразі застосовується практично в усіх галузях народного господарства. Завдяки її досягненням стало можливим створення комп'ютерів, засобів зв'язку, а також сучасних зручних та точних вимірювальних приладів та комплексів, завдяки яким набувають розвитку інші науки, зокрема фізика, хімія, біологія, медицина, і які активно застосовуються у навчальному процесі.

Електронні пристрої дозволяють здійснювати автоматизацію різноманітних технологічних процесів та процесів контролю якості продукції на підприємствах багатьох галузей народного господарства, що в свою чергу підвищує продуктивність виробництва та покращує якість продукції або послуг, умови та безпеку праці. Також електронні пристрої активно застосовуються на сучасних транспортних засобах для керування робочими процесами двигунів внутрішнього згоряння та інших систем. Так завдяки наявності електронних блоків керування сучасні двигуни мають високі показники паливної економічності та екологічності а транспортні засоби в цілому – високі показники безпеки. Поява сучасних побутових приладів (автоматичних пральних машин, мікрохвильових печей мультиварок, телевізорів та ін.) також стала можливою завдяки досягненням електроніки.

Електроніка є відносно молодого галуззю науки й техніки, теоретичні основи якої були закладені у другій половині 19 – на початку 20 ст. Наведемо найбільш важливі історичні дати розвитку електроніки:

- 1865 рік – Дж. Максвел розробляє теорію електромагнітних хвиль;
- 1883 рік – Т. Едісон відкрив явище термоелектронної емісії;
- 1886 рік – Г. Герц відкрив електромагнітні хвилі, а ще через рік – явище фотоелектронної емісії;
- 1897 рік – відкриття електрону Дж. Томсоном та винайдення електронно-променевої трубки К. Брауном;
- 1904 рік – Дж. Флемінг створив вакуумний діод;
- 1906 рік – винайдення тріоду Л. де Форестом;
- 1948 рік – У. Шоклі, У. Братейн та Дж. Бардін винайшли транзистор.

Як було зазначено вище, електроніка займається використанням явищ, пов'язаних з рухом заряджених часток у вакуумі, газах і твердих тілах. Рух заряджених часток у наведених середовищах буває тепловим, який має хаотичний характер і упорядкованим. Упорядкований спрямований рух

заряджених часток називається електричним струмом. Електричний струм, що виникає під дією електричного поля називається струмом провідності. Буває ще конвекційний струм, коли рух зарядів відбувається разом з тілом, на якому вони знаходяться, і струм поляризації що має місце внаслідок зміщення зв'язаних електричних зарядів, наприклад у діелектриках, під дією зовнішнього електричного поля. Струми поляризації в діелектриках є короткочасними.

Силою струму називається величина, що відповідає кількості заряду у Кл, що протікає за одиницю часу через поперечний переріз провідного тіла або середовища. Сила струму вимірюється у Амперах (А). $1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/с}$.

Сила струму залежить від прикладеної до провідного тіла або середовища напруги та кількості вільних носіїв заряду. Основним законом, що визначає залежність між струмом і напругою є закон Ома:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (1.1)$$

де I – сила струму, А;

U – напруга, прикладена до ділянки провідного тіла, В;

R – електричний опір ділянки провідного тіла, або середовища, Ом.

Електричний опір залежить від властивостей речовини або середовища, їхніх лінійних розмірів, а також може залежати від деяких зовнішніх факторів, наприклад температура, освітленість, тощо. Величиною, зворотною до електричного опору є електрична провідність G , що вимірюється в Сіменсах (См). $1 \text{ См} = 1/1 \text{ Ом}$.

Основною величиною, що характеризує провідні властивості речовини або середовища є питомий електричний опір. Питомий електричний опір ρ вимірюється у Ом·м.

Електричний опір однорідного провідного тіла, або середовища довжиною l , м, і площею поперечного перерізу S , м², може бути обчисленим за формулою:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}. \quad (1.2)$$

На практиці досить часто використовується величина, зворотна питомому електричному опору – питома електрична провідність σ , (См/м).

Отже, ми пригадали основні положення, необхідні нам для подальшого вивчення явищ, пов'язаних з рухом заряджених часток у твердих тілах, вакуумі та газах.

1.2. Тверде тіло. Енергетичні рівні. Провідники, діелектрики, напівпровідники.

Перш ніж говорити про тверді тіла та їх енергетичні рівні, пригадаємо будову атома. Відомо, що атом складається з ядра, що має додатний заряд та відносно велику вагу при малих розмірах, та електронів, що обертаються навколо ядра по певним орбітам та мають від'ємний електричний заряд (рис.

1.1). Додатний заряд ядра та від'ємний заряд електронів знаходяться в рівновазі, тому ізольований атом у нормальному стані є електрично нейтральним. Кількість, а відповідно й загальний заряд електронів у атомі визначається атомним числом елементу. Орбіти, по яких обертаються електрони, або оболонки, точно визначені і жоден електрон не може обертатися у просторі між ними. Електронні оболонки атому позначаються послідовно, починаючи від ядра буквами К, L, M, N... Оболонка К може вміщувати не більше двох електронів, L – не більше 8, M – не більше 18 і т. д. На кожній наступній оболонці можуть знаходитися електрони лише за умови, що попередні оболонки заповнені. Остання, зовнішня оболонка атому називається валентною і вона може бути не заповненою електронами. Електрони валентної оболонки називаються відповідно валентними. Валентна оболонка визначає хімічні властивості елементу. Ядро і оболонки, повністю заповнені електронами, утворюють сталу частину атому що не піддається змінам у хімічних процесах, при зміні температури й протіканні струму. З кожною оболонкою пов'язана певна енергія електронів, що обертаються по ній. Що далі знаходиться оболонка від ядра, тим більша енергія її електронів. Найбільшу енергію мають валентні електрони.

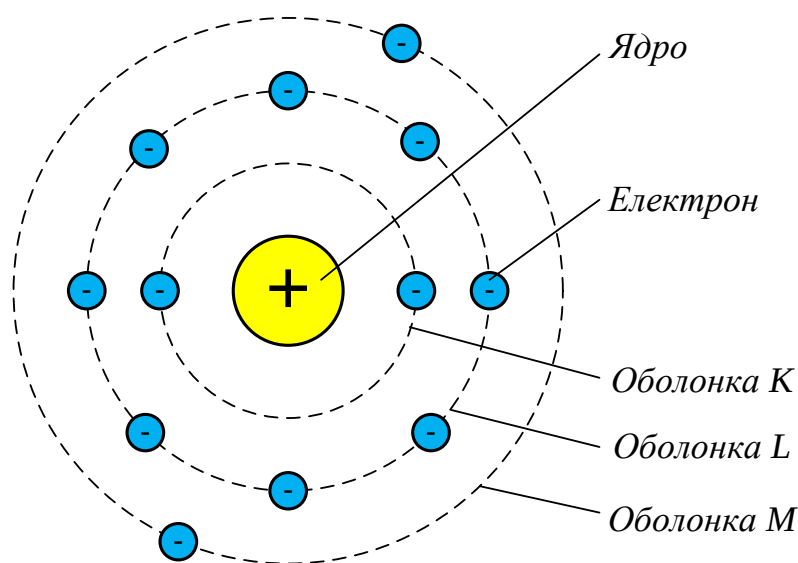


Рис. 1.1. Схема будови атому

Якщо до електронів ззовні підвести енергію (температура, випромінювання), то можна викликати їх переходи на оболонки з більш високими енергетичними рівнями. Атом з електронами, що знаходяться на більш високих енергетичних рівнях називається збудженим. Такий стан є нестабільним і електрон, повертаючись на нижчий енергетичний рівень віддасть отриману енергію у вигляді кванту випромінювання. Певна доза отриманої ззовні енергії може зробити електрон незалежним від сил притягання ядра. Атом, позбавлений електрона називається додатним іоном. Процес утворення іонів називається іонізацією, а зворотній процес з'єднання додатного іона з атомом – рекомбінацією.

Енергетичні властивості атому зручно представляти у вигляді діаграми його енергетичних рівнів, що називається також зонною моделлю атома (рис. 1.2). Для кожної оболонки на цій діаграмі вказується значення енергії електронів, що знаходяться на цій оболонці у еВ (електрон-Вольт, $1 \text{ eV} = 1,602\,176\,565\,(35) \times 10^{-19} \text{ Дж}$). 1 еВ відповідає роботі електрону при здоланні різниці потенціалів у 1 В. Діаграма енергетичних рівнів відображає закони квантової механіки, з яких витікає, що кожний енергетичний рівень може бути зайнятим певною кількістю електронів. Оболонка К містить один енергетичний рівень, оболонка L – два (s – внутрішній, для заповнення якого треба 2 електрони, p – зовнішній, для заповнення якого треба 6 електронів), M – три рівня (s, p, d) т. д. Представлена на рисунку 2 діаграма відноситься лише до одиничного ізольованого атому. Якщо атом знаходиться близько до інших атомів, наприклад у твердому тілі, то діаграма енергетичних рівнів змінюється.

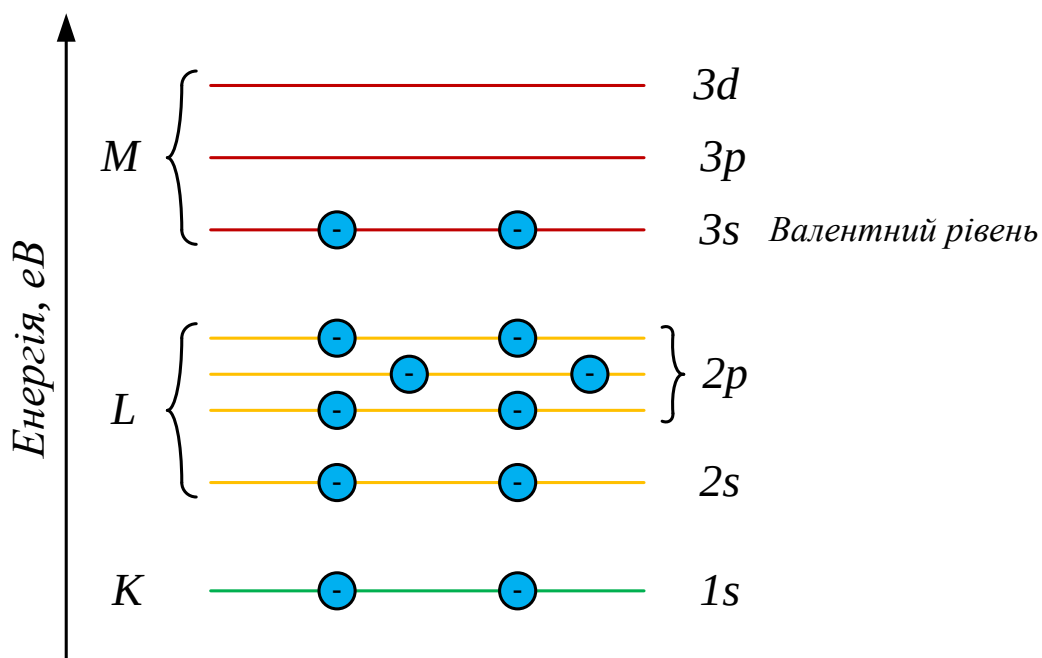
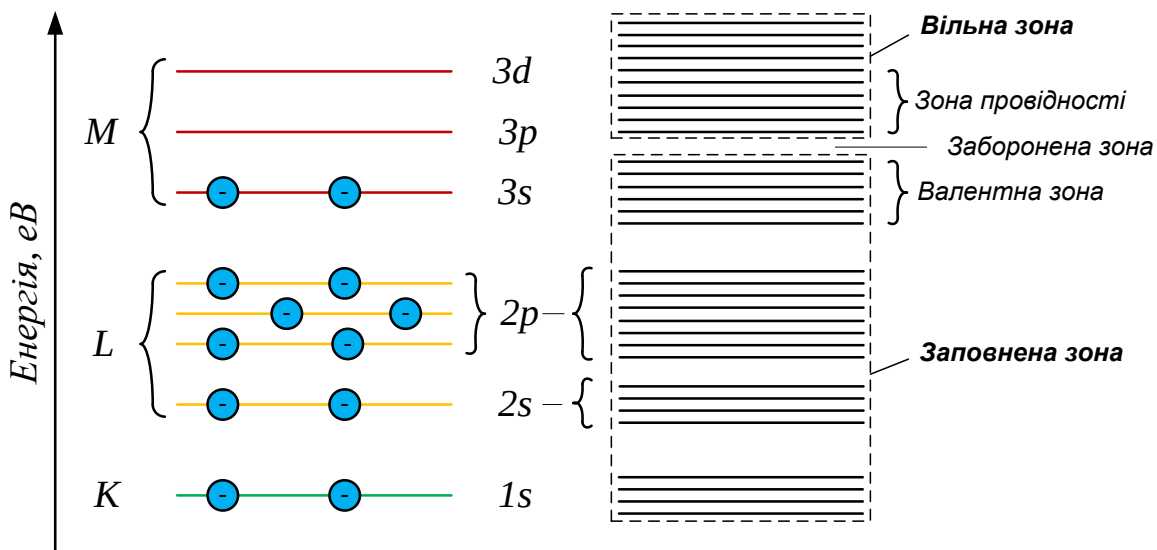


Рис. 1.2. Зонна модель атому

Тверде тіло – це сукупність нерухомих атомів або молекул, що утворюють певну впорядковану структуру. Електрони атомів твердого тіла, з одного боку, пов’язані з атомними ядрами, а з іншого боку, внаслідок їх малої маси можуть пересуватися під впливом як своєї, так і сторонньої енергії.

У твердому тілі атоми взаємодіють між собою. Найменшу залежність від інших атомів мають електрони, розташовані ближче до ядра. Зв’язок атомів у твердому тілі та їх взаємодія викликають розщеплення енергетичних рівнів і виникнення багатьох нових рівнів, розташованих один близько до одного в межах даного енергетичного шару. Вони утворюють енергетичні зони (рис. 1.3).



1212

Рис. 1.3. Розщеплення енергетичних рівнів у твердому тілі

Всі енергетичні рівні, що зайняті електронами утворюють **заповнену зону**, верхня частина якої називається *валентною зоною*. Друга енергетична зона називається **вільною зоною**. Вона відповідає тим рівням енергії, за яких електрон може не лише відірватися від атома, а й покинути межі твердого тіла. Нижня частина вільної зони називається *зоною провідності*. Електрони зони провідності можуть вільно переміщуватися під впливом електричного поля, утворюючи електричний струм.

Електрон для переходу з заповненої зони до вільної повинен витратити енергію ΔW (власну, або отриману зовні) для подолання так званої *забороненої зони*, що являє собою різницю між енергетичними рівнями зони провідності та валентної зони. Чим менша ця зона, тим електрону з валентної зони легше перейти до зони провідності. Якщо заборонена зона певного матеріалу занадто широка, то такий перехід електронів стає неможливим і такий матеріал не проводить електричний струм. Залежно від ширини забороненої зони розрізняють три види матеріалів: діелектрики, напівпровідники та провідники. На рис. 1.4 представлені діаграми енергетичних рівнів, або зонні моделі цих матеріалів.

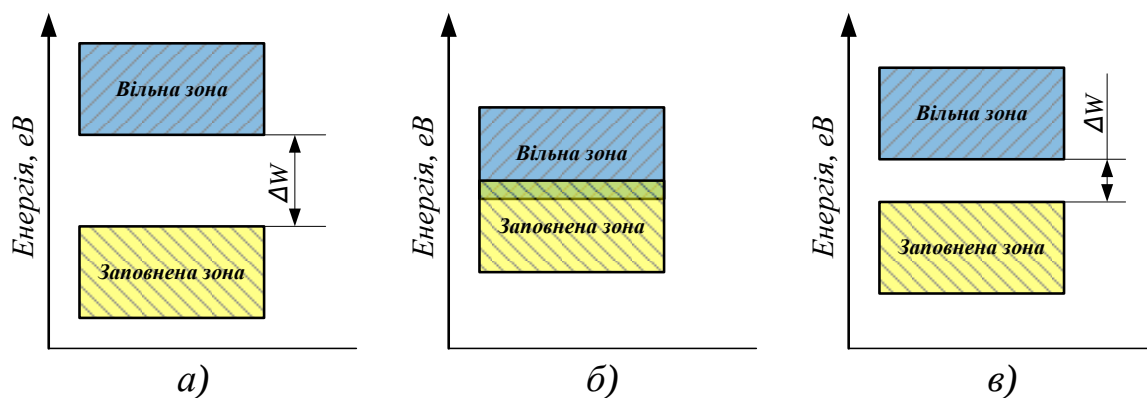


Рис. 1.4. Зонні моделі: діелектрика а), провідника б) та напівпровідника в).

У діелектриків (рис. 1.4 а) заборонна зона занадто широка ($\Delta W > 2$ еВ), тому навіть значні зовнішні енергетичні впливи не спроможні перевести помітну кількість електронів у вільну зону. Провідність у діелектриків практично відсутня.

Діелектрики широко застосовуються в електроніці. Вони використовуються в якості ізоляційних матеріалів для покриття проводів і слугують основними матеріалами для виготовлення конденсаторів.

Діелектрики характеризуються діелектричною проникністю, діелектричними втратами, електричною міцністю, теплостійкістю та гігроскопічністю.

У провідників (рис. 1.4 б) заповнена та вільна зони перекриваються і заборонена зона відсутня взагалі. Валентні електрони провідників фактично перебувають у вільній зоні і істотна зміна їхньої кількості є практично неможливою. В зв'язку з цим провідність провідників є менш чутливою до зовнішніх факторів. Вільні електрони утворюють всередині провідника так званий електронний газ, який може вільно переміщуватися під дією зовнішнього електричного поля. Провідність провідників зменшується з підвищенням температури через інтенсифікацію хаотичного теплового руху електронів, що утворили електронний газ. Гарними провідниками електричного струму є такі метали як мідь, срібло й золото.

У напівпровідників (рис. 1.4 в) заборонна зона значно вужча порівняно із діелектриками (зазвичай $\Delta W < 2$ еВ), тому їхня електропровідність дуже чутлива до зовнішніх факторів (тепло, світло, електричне поле тощо). При певному, відносно невеликому енергетичному збудженні (тепловому, або під дією електричного поля) деякі електрони з валентної зони можуть переходити до зони провідності. При цьому у валентній зоні з'являються вакантні рівні. Атом, у якого електрон перейшов до зони провідності перетворюється на додатний іон. Відсутній електрон такого атому може перейти від сусіднього атому, котрий в свою чергу перетвориться на додатний іон. В результаті переходів електронів від атомів до додатних іонів відбувається процес переміщення у кристалі місця, позбавленого електрону. Ззовні цей процес сприймається як переміщення додатного електричного заряду, який отримав назву «**дірка**». Електричний струм у напівпровіднику відбувається внаслідок руху від'ємно заряджених електронів у зоні провідності і додатно заряджених дірок у валентній зоні. При цьому електронний і дірковий струм дорівнюють один одному, оскільки при звільненні одного електрону виникає одна дірка. Процес утворення пари «електрон – дірка» називається **генерацією зарядів**, а електронно-діркова провідність – **власною провідністю** напівпровідника.

Провідність напівпровідників зростає з підвищенням температури, оскільки при цьому електрони отримують теплову енергію, внаслідок чого інтенсифікується їх звільнення і, відповідно генерація зарядів. При дуже низьких температурах напівпровідники поведуться так само, як діелектрики.

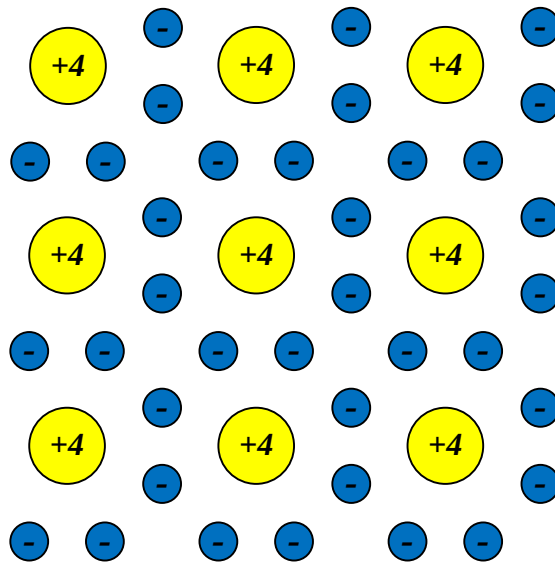


Рис. 1.5. Плоска модель напівпровідника

На рис. 1.5 показана спрощена плоска модель структури власного напівпровідника, на прикладі елементу 4-ї валентної групи (германію, або кремнію) з якої видно, що вона має певну симетрію. Так будь який атом напівпровідника має на зовнішній оболонці чотири власних електрони і пов'язаний з чотирма електронами сусідніх атомів. Аналогічну структуру може мати й діелектрик, наприклад алмаз, з тією лише різницею, що у напівпровіднику деякі електрони можуть при кімнатній температурі переходити з валентної зони до зони провідності.

На рис. 1.6 показано процес звільнення електрону й утворення дірки, тобто процес генерації зарядів у власному напівпровіднику.

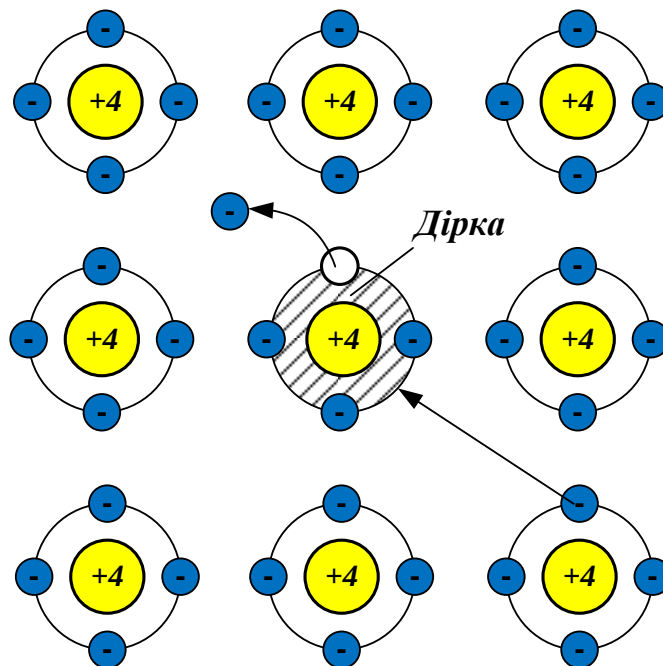


Рис. 1.6. Процес генерації зарядів

Наявність домішок у напівпровіднику порушує його кристалічну структуру і значно змінює як значення так і характер його провідності. Напівпровідники, до яких з метою зміни їх властивостей уведено домішки називаються **невласними**. Для зміни провідних властивостей напівпровідників до них можуть вводитися два види домішок: донорні та акцепторні.

Донорні домішки сприяють збільшенню кількості у напівпровіднику електронів. Напівпровідник, кристалічна структура якого порушена шляхом введення донорної домішки називається напівпровідником ***n*-типу**. В якості донорних домішок застосовують елементи, що мають на зовнішній оболонці на один валентний електрон більше, ніж основний напівпровідник. Для кремнію або германію донорними домішками можуть бути елементи 5-ї валентної групи, наприклад фосфор або миш'як.

На рис. 1.7 показана плоска модель структури напівпровідника *n*-типу – кремнію з донорною домішкою фосфора.

При введенні донорної домішки у напівпровідник чотири валентні електрони даної речовини утворюють зв'язки з атомами напівпровідника, а п'ятий, надлишковий, звільняється, стає основним носієм заряду і може приймати участь у перенесенні струму. Атоми домішки при цьому перетворюються на нерухомі додатні іони, які на відміну від дірок, що виникають при власній провідності, не приймають участь у перенесенні струму.

У напівпровідника *n*-типу маються також дірки (рис. 1.7), що утворюються в результаті генерації зарядів при власній провідності, яку ніхто не відмінює. Але їх утворюється значно менше, ніж вільних електронів, що виникають за рахунок введення домішок.

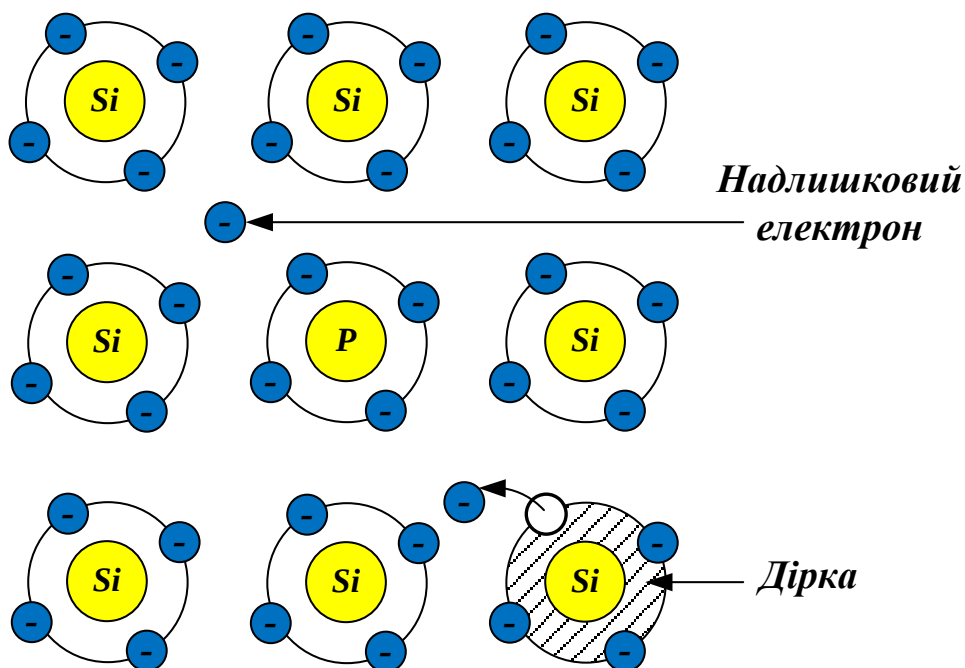


Рис. 1.7. Плоска модель структури напівпровідника *n*-типу

Дірки, що існують у напівпровіднику *n*-типу є для нього неосновними носіями заряду, а звільнені від атомів домішки електрони – основними.

Акцепторні домішки навпаки сприяють збільшенню кількості у напівпровіднику дірок. Напівпровідник, кристалічна структура якого порушена шляхом введення акцепторної домішки називається напівпровідником *p*-типу. В якості акцепторних домішок застосовують елементи, що мають на зовнішній оболонці на один валентний електрон менше, ніж основний напівпровідник. Для кремнію або германію акцепторними домішками можуть бути елементи 3-ї валентної групи, наприклад індій, або бор.

На рис. 1.8 показана плоска модель структури напівпровідника *n*-типу – кремнію з акцепторною домішкою бору.

Введення акцепторної домішки до напівпровідника спричинить утворення зв'язків між атомами даної речовини та атомами напівпровідника, а один зв'язок виявиться вільним і на його місці утвориться дірка. Це місце може бути заповненим електроном від сусіднього атому напівпровідника. В результаті атом домішки стане нерухомим від'ємним іоном, а дірка може переміщуватися далі і приймати участь в перенесенні струму.

Очевидно, що у напівпровідника *p*-типу маються також електрони (рис. 1.8), що утворюються в результаті генерації зарядів при власній провідності, але їх утворюється значно менше, ніж дірок, що виникають за рахунок введення домішок.

Таким чином для напівпровідника *p*-типу дірки є основними носіями заряду, а електрони, що утворюються в результаті власної провідності – неосновними.

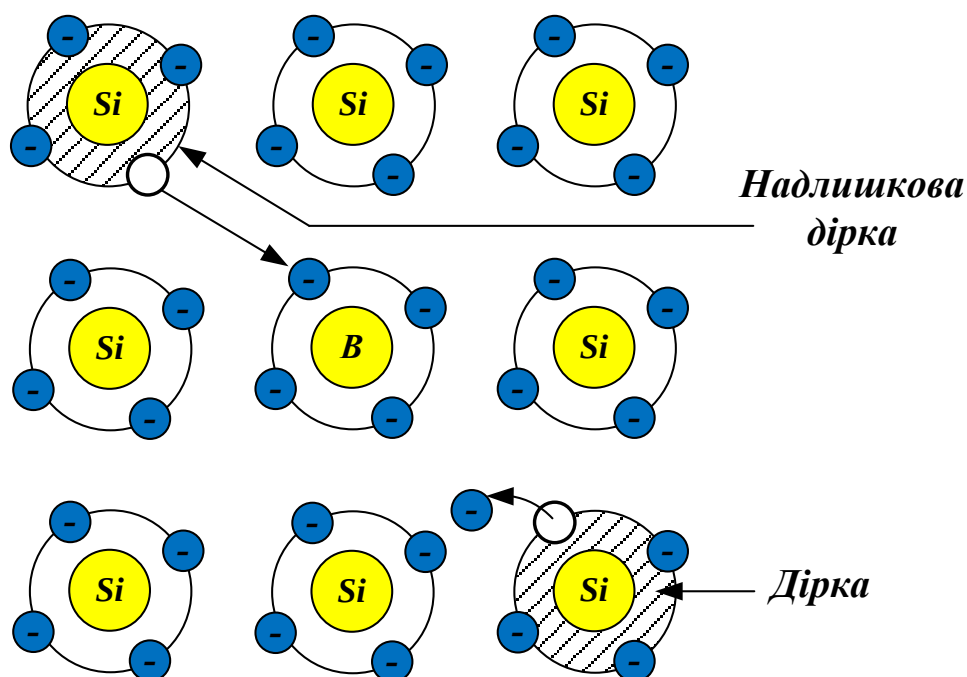


Рис. 1.8. Плоска модель структури напівпровідника *p*-типу

Штучне введення домішок до напівпровідників з метою зміни його провідних властивостей називається **легуванням** напівпровідника. Навіть невелика наявність домішок у напівпровіднику (до 10 атомів на 10^6 атомів напівпровідника) здатна наблизити його провідність до провідності металів.

Власні напівпровідники не є гарними провідниками електричного струму як метали і не можуть бути віднесеними до діелектриків, які мають гарні ізоляційні властивості. Через це такі речовини тривалий час не привертали уваги науковців та інженерів. Одним з перших розпочав систематичні дослідження властивостей напівпровідників видатний фізик українського походження Абрам Федорович Іоффе.

Напівпровідники виявилися не просто «поганими провідниками», а особливим класом кристалічних речовин з багатьма чудовими властивостями, що відрізняють їх як від провідників, так і від діелектриків. Як вже було зазначено, питомий опір напівпровідників зменшується зі зростанням температури, на відміну від металів. Крім того він зменшується при освітленні напівпровідника. Але самою особливою властивістю напівпровідників виявилася властивість одnobічної провідності контакту двох невласних напівпровідників з різними типами провідності. Ця властивість використовується для створення різноманітних напівпровідникових приладів – діодів, транзисторів, тиристорів, інтегральних мікросхем, які слугують основною матеріальною базою сучасної електроніки, і про які мова піде в наступних розділах.

1.3. Явища електронної емісії та іонізації. У провідників а також в меншій мірі у напівпровідників енергії електронів можуть бути настільки підвищеними, що вони вийдуть за межі матеріалу. Явище виходу електронів з матеріалу називається **електронною емісією**, а енергія, яка при цьому витрачається електроном – роботою виходу електрону.

Залежно від того, в який спосіб електрони отримують енергію, на те щоб покинути межі матеріалу, розрізняють наступні види електронної емісії:

- термоелектронна, що виникає при нагріванні матеріалу;
- фотоелектронна, що виникає під впливом електромагнітного опромінювання поверхні матеріалу, наприклад опромінення світлом;
- вторинна електронна емісія, що виникає як наслідок бомбардування поверхні матеріалу потоком електронів або іонів, які рухаються з великою швидкістю;
- автоелектронна, або електростатична, що виникає за допомогою сильного електричного поля поблизу поверхні матеріалу, спрямованого на відрив електронів.

Емісія електронів досить широко використовується в електроніці. Так термоелектронна емісія використовується у електронних лампах (вакуумні діоди, тріоди, тощо) для отримання електронів, що утворюють струм між електродами лампи. Вторинна електронна емісія має місце під час лавинної іонізації газу у газорозрядних електронних приладах.

Іонізацією називається процес розділення атому, або частки, на електрон і додатний іон. Для електроніки актуальною є іонізація газу, що знаходиться в електричному полі. За нормальних умов концентрація іонів у газах невелика. Первинні іони утворюються в газах в основному під дією зовнішнього опромінювання, наприклад ультрафіолетовим світлом, або природним радіаційним випромінюванням.

Якщо газ розмістити між двома електродами і прикласти до них певну напругу, тобто розмістити газ у електричному полі, (рис. 1.9) то починається рух електронів до додатного електрода (аноду) і рух іонів до від'ємного електрода (катода). Під час руху до відповідних електродів електрони й іони прискорюються, а їх кінетична енергія зростає. Якщо електрони мають достатню кінетичну енергію за рахунок розгону в електричному полі, то в результаті їх зіткнень з ще нейтральними атомами газу, утворюються додатні іони і нові електрони, які при своєму русі можуть знову прискорюватися до необхідних енергій і утворювати додатні іони й електрони. Додатні іони, які розганяються в електричному полі до достатніх енергій і доходять до катода, можуть вибивати з нього електрони, тобто викликати вторинну електронну емісію. Також додатні іони можуть зіштовхуватися з нейтральними молекулами, переводячи їх у збуджений стан. Перехід молекул у нормальний стан супроводжується випусканням фотону, який спричиняє фотоіонізацію молекули газу. Така іонізація газу називається лавинною, а процес, проходження струму через газ, при якому вона спостерігається, отримав назву самостійного газового розряду.

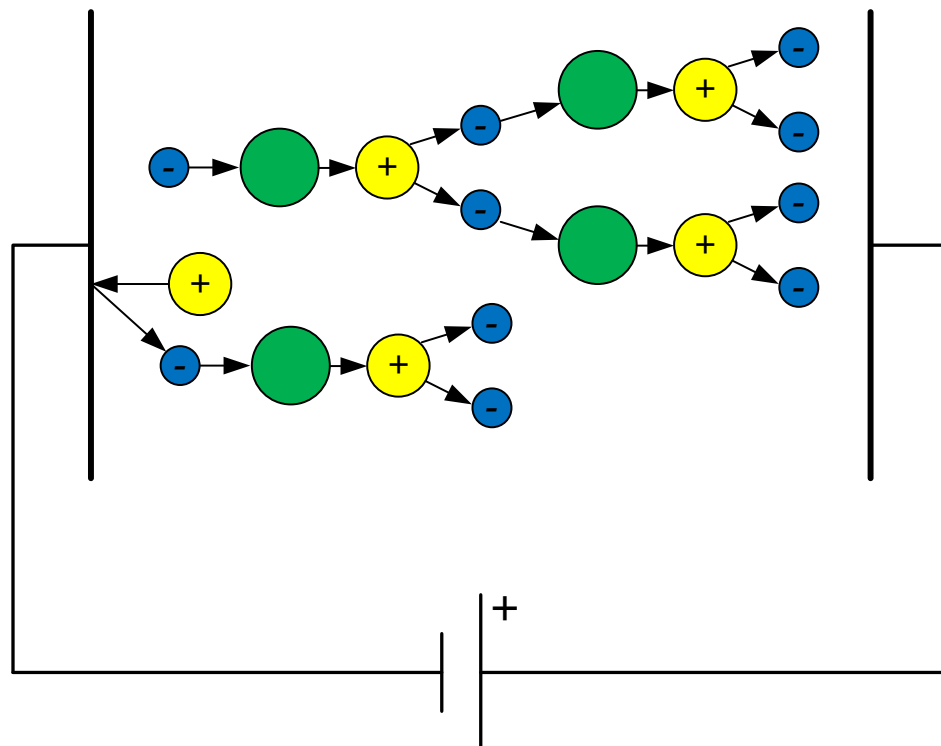


Рис. 1.9. Лавинна іонізація газу

Процес іонізації характеризується різким збільшенням числа носіїв заряду (електронів й іонів), в результаті чого провідність між електродами різко зростає. Одночасно з процесом іонізації в більшій чи меншій мірі відбувається зворотній процес, що називається деіонізацією, або рекомбінацією і який полягає у з'єднанні іонів з електронами.

Іонізація газу супроводжується його світінням. Колір цього світіння залежить від виду газу, яскравість – від напруженості електричного поля.

Іонізація газу та самостійний газовий розряд застосовуються у газорозрядних електронних приладах (газорозрядних діодах, тиратронах, тощо).

1.4. Електричні коливання. Перетворення сигналів.

В електроніці, як і в електротехніці застосовуються постійний і змінний електричні струми.

Постійний електричний струм в електроніці застосовується в основному для живлення електронних пристроїв.

Основною задачею електронних пристроїв є перенесення та перетворення певної інформації. Інформація передається у вигляді сигналів звуку, зображення, зміни деяких фізичних величин, які в електронних пристроях перетворюються в електричні сигнали, і навпаки.

Передача інформації за допомогою електричних сигналів має суттєві переваги. По перше для цього не потрібні пристрої з рухомими елементами. По друге швидкість передачі електричних сигналів наближена до максимально можливої швидкості світла. По третє електричні сигнали легко піддаються перетворенню, обробці та порівнянню за допомогою електронних пристроїв. І по четверте електричні сигнали можуть передаватися на далекі відстані. Якщо дві людини можуть комфортно спілкуватися між собою за допомогою власного мовного та слухового апарату на відстані максимум декілька метрів, інакше доведеться напружувати голосові зв'язки, то за допомогою телефону, дія якого полягає у передачі та перетворенні електричних сигналів, вони можуть спілкуватися, знаходячись на значно більших відстанях.

В загальному випадку електричні сигнали являють собою певні електричні коливання і є змінними. Відповідно і передаватися вони можуть у вигляді змінних струмів.

Електричні коливання можуть бути регулярним (наприклад синусоїдальними, трикутними, або більш складними), або нерегулярним (наприклад звук людської мови, або музики, перетворений у сигнал змінного струму). Сигнал постійного струму можна вважати лише окремим, граничним випадком змінного.

Велике значення в електроніці мають струми, які різко змінюються за відносно короткий проміжок часу. Це імпульсні електричні коливання.

Розглянемо перетворення сигналів на прикладі перетворення звуку на електричний сигнал і навпаки. Для цього застосовуються електроакустичні перетворювачі – мікрофони й динаміки.

Мікрофоном називається електроакустичний прилад, що перетворює акустичні коливання на електричний струм. В загальному випадку можна сказати, що перетворення енергії звуку, що надходить до мікрофону відбувається на принципі використання пружинної мембрани, що коливається під впливом енергії звукових хвиль, і яка викликає зміну струму, що протікає в ланцюгу мікрофону в такт з діючими на цю мембрану хвилями.

За принципом дії мікрофонів можна виділити декілька основних їх типів.

Найстарші, *вугільні мікрофони* (рис. 1.10) використовують властивість вугільного порошку змінювати опір залежно від сили стиску порошку мембраною, що коливається під дією звукового тиску.

У *п'єзоелектричних мікрофонах* використовується п'єзоелектричний ефект, сутність якого полягає у виникненні електричних зарядів на поверхні кристалів деяких речовин (наприклад кристалах сегнетової солі) при їх деформації під дією тиску (в тому числі звукового), величина яких пропорційна деформувальній силі.

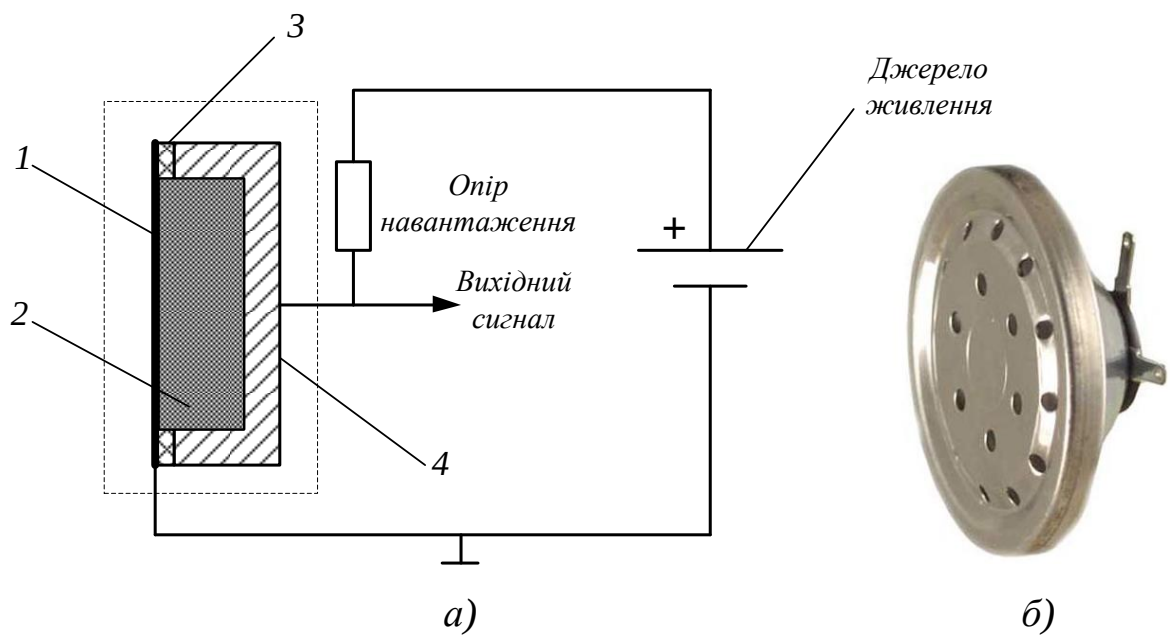


Рис. 1.10. Схема (а) та зовнішній вигляд (б) вугільного мікрофону:
1 – мембрана, 2 – вугільний порошок, 3 – ізоляція, 4 – корпус.

Мікрофони *магнітоелектричного типу* перетворюють акустичну енергію в електричну, використовуючи явище електромагнітної індукції. Конструктивно такі мікрофони виконуються або з рухомою котушкою (динамічні мікрофони) або з рухомою стрічкою (стрічкові мікрофони). На рис. 1.11 зображено будову динамічного мікрофона.

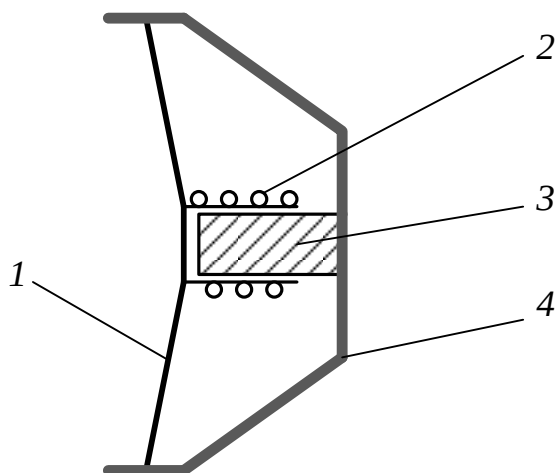


Рис. 1.11. Будова динамічного мікрофону: 1 – мембрана, 2 – котушка, 3 – постійний магніт, 4 – корпус.

Конденсаторні, або електростатичні мікрофони використовують залежність ємності конденсатора від переміщень його рухомої пластини під дією звукових коливань (рис. 1.12). Мембрана виступає рухомою пластиною конденсатора, утвореного нею та нерухомим електродом. Різновидом конденсаторних мікрофонів є *електретні* мікрофони. Їхній принцип дії заснований на здатності деяких діелектричних матеріалів (електретів) зберігати поверхневу неоднорідність розподілу заряду протягом тривалого часу. Ці матеріали використовуються як діелектричне заповнення конденсатора, що дозволяє формувати поляризувальну напругу без підключення до зовнішніх джерел енергії.

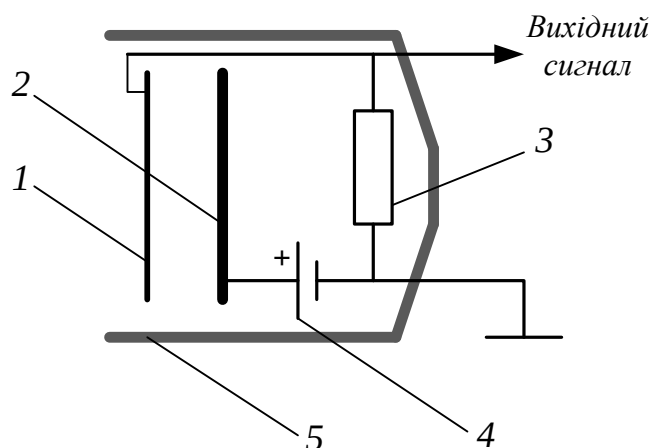


Рис. 1.12. Будова конденсаторного мікрофону: 1 – мембрана, 2 – нерухомий електрод, 3 – резистор, 4 – джерело живлення, 5 – корпус.

Найбільш розповсюдженими на сьогоднішній день є динамічні, конденсаторні та електретні мікрофони.

Динамік (електродинамічний гучномовець) – це електроакустичний пристрій, в якому перетворення електричного сигналу в звук відбувається

завдяки переміщенню котушки зі струмом в магнітному полі постійного магніту (рідше – електромагніту) з наступним перетворенням отриманих механічних коливань в коливання навколишнього повітря за допомогою дифузора.

Будова промислового динаміку представлена на рис. 1.13.

Електричний сигнал звукової частоти (аудіосигнал) подається на котушку 1, яка жорстко зв'язана з мембраною 2 і дифузором 3 і може вільно переміщуватися вздовж осі постійного магніту 4. При проходженні через котушку змінного струму звукової частоти, вона під дією сили Ампера переміщується вздовж осі магніту. Ці коливання звукової частоти передаються дифузору, який випромінює звук в оточуюче середовище. Мембрана призначена для кріплення котушки і отвору дифузору до корпусу динаміку. У багатьох сучасних моделях динаміків дифузор і мембрана об'єднані в один конструктивний елемент.

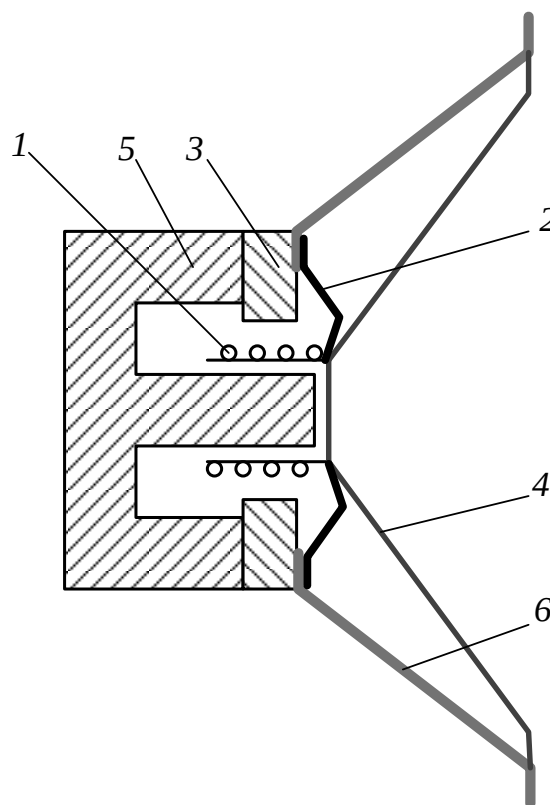


Рис. 1.13 – Будова промислового динаміку: 1 – котушка, 2 – мембрана, 3 – постійний магніт, 4 – дифузор, 5 – магнітне осердя, 6 – корпус.

Кожна модель динаміку характеризується амплітудно-частотною характеристикою, яка являє собою графік залежності гучності звуку, зазвичай у дБ, від частоти звукового сигналу. Чим менше змінюється гучність звуку залежно від частоти, тим якіснішим є динамік.

В електроніці застосовується безліч різноманітних перетворювачів сигналів. Так, наприклад, в телебаченні застосовуються перетворювачі сигналу зображення у електричний сигнал і навпаки, основою яких є оптоелектронні, а також електронно-променеві прилади.

1.5. Випромінювання і хвилі.

Звук, перетворення якого на електричні коливання ми розглянули, являє собою розповсюдження механічних коливань у твердому, рідкому, або газоподібному середовищі у вигляді пружних хвиль. Під час розповсюдження звуку відбувається передача енергії. Процес передачі енергії у вигляді хвиль або часток через простір або матеріальне середовище називається **випромінюванням**. Таким чином можна сказати, що звук являє собою акустичне випромінювання, з яким пов'язані акустичні хвилі. Усі хвилі, як ми знаємо характеризуються частотою і довжиною.

Довжина хвилі λ (м) пов'язана з частотою f (Гц) наступним співвідношенням:

$$\lambda = \frac{v}{f}, \quad (1.3)$$

де v – швидкість розповсюдження хвиль, м/с.

Так частота звукових хвиль, які може відчувати людина знаходиться в межах від 16 до 20000 Гц. Довжина цих хвиль у повітрі знаходиться в межах приблизно від 21 м до 1,7 см. У різних середовищах звук розповсюджується з різною швидкістю. У повітрі ця швидкість дорівнює 331 м/с, а у воді – 1403 м/с. Отже у воді довжина акустичної хвилі тієї ж частоти буде більшою ніж у повітрі.

Під час перетворення тих чи інших інформаційних сигналів у електричні коливання відбувається перетворення того чи іншого виду енергії на електричну енергію. Так мікрофон перетворює енергію акустичних хвиль на енергію електричних коливань звукової частоти. Енергія електричних коливань може передаватися не лише у вигляді змінного струму у проводах, а й у вигляді електромагнітного випромінювання у оточуючому просторі. **Електромагнітне випромінювання** – це процес розповсюдження у просторі електричної енергії у вигляді взаємопов'язаних коливань електричного і магнітного полів, які утворюють електромагнітне поле. Пов'язані з цим випромінюванням хвилі називаються електромагнітними хвилями. Вони переносять енергію у просторі на відстань і розповсюджуються зі швидкістю, близькою, до швидкості світла. Електромагнітні хвилі також характеризуються частотою і довжиною хвилі.

Електромагнітні хвилі відомі і достатньо вивчені в діапазоні від 0 до 10^{23} Гц. Електромагнітне випромінювання прийнято розділяти за частотними діапазонами (таблиця 1.1). Між діапазонами немає чітких переходів, іноді вони перекриваються, а межі між ними є умовними. Швидкість поширення електромагнітного випромінювання у вакуумі стала, тому його частота жорстко пов'язана з довжиною хвилі у вакуумі.

Для перетворення електромагнітного випромінювання радіодіапазону на електричні сигнали і навпаки застосовуються антени, які є невід'ємними частинами передавачів та приймачів. Для перетворення випромінювання оптичного діапазону використовуються різноманітні фотоперетворювачі.

Таблиця 1.1. Діапазони електромагнітного випромінювання

Діапазон		Частота	Довжина хвилі
Радіодіапазон	Наддовгі хвилі	до 30 кГц	понад 10 км
	Довгі хвилі	30...300 кГц	10...1 км
	Середні хвилі	300 кГц...3 МГц	1 км...100 м
	Короткі хвилі	3...30 МГц	100...10 м
	Ультракороткі хвилі	30 МГц...300 ГГц	10 м...1 мм
Оптичний діапазон	Інфрачервоне випромінювання	300 ГГц...400 ТГц	1 мм...780 нм
	Видиме випромінювання	400 ТГц...750 ТГц	780...380 нм
	Ультрафіолетове випромінювання	750 ТГц... $3 \cdot 10^{16}$ Гц	380 нм...10 нм
Рентгенівське випромінювання		$3 \cdot 10^{16}$ Гц... $6 \cdot 10^{19}$ Гц	10 нм...5 пм
Гамма випромінювання		понад $6 \cdot 10^{19}$ Гц	до 5 пм

За допомогою електромагнітного випромінювання радіодіапазону можливо передавати інформацію без проводів, на відміну від звичайних електричних сигналів.

Таким чином ми розглянули основні фізичні явища та процеси, на яких базується електроніка. Перш ніж перейти до наступного розділу і продовжити вивчення електроніки, для закріплення знань, пропонується виконати декілька практичних робіт.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 1.

РОБОТА З ЛАБОРАТОРНИМ ОБЛАДНАННЯМ

Мета: Ознайомитися та оволодіти навичками роботи з основними вимірювальними приладами та обладнанням, що застосовуються в лабораторії електроніки.

Матеріали та обладнання: мультиметр, осцилограф, генератор сигналів, макетна плата, з'єднувальні проводи під макетну плату.

ХІД РОБОТИ

1. Вивчити загальні правила безпеки та роботи з обладнанням.

Загальні правила безпеки:

1) Підключати до електричних схем можна лише ті джерела живлення, які вказані в переліку обладнання. Категорично забороняється вставляти з'єднувальні дроти та електронні компоненти до мережі 220 В.

2) Не з'єднувати між собою контакти джерел живлення.

3) Не залишати зібрані на макетній платі схеми з підключеними до неї джерелами живлення без нагляду.

4) Не використовувати під час виконання робіт електронні компоненти, що мають візуальні пошкодження.

5) Дотримуватися полярності підключення електронних компонентів, які цього потребують (електролітичні конденсатори, світлодіоди, гальванічні елементи, тощо).

6) Використані гальванічні елементи здавати на утилізацію у спеціальні пункти прийому. Забороняється викидати їх до загального смітника.

7) У разі виявлення нагрівання електронних компонентів схеми, зібраної на макетній платі, негайно відключити від неї джерело живлення та перевірити правильність з'єднань. Якщо з'єднання здійснені правильно, замінити електронний компонент на новий, або більш потужний.

8) Уникати потрапляння на макетну плату та електричні контакти будь-яких рідин.

9) Зберігати чистоту та порядок на робочому місці.

10) Перш ніж приступати до будь-якої лабораторної, практичної, або дослідницької роботи уважно прочитати весь її опис.

11) Перш ніж використовувати в роботі те чи інше обладнання уважно прочитати правила роботи з ним у технічній документації.

2. Ознайомитися з наявними в лабораторії моделями мультиметрів.

2.1. Уважно прочитати інструкції з експлуатації мультиметрів.



Рис. 1.14. Загальний вигляд мультиметру:

1 – рідкокристалічний дисплей, 2 – кнопка увімкнення/вимкнення, 3 – входні термінали, 4 – поворотний перемикач функцій та діапазонів, 5 – кнопка фіксації показників, 6 – щупи.

Правила роботи з мультиметром:

1) Підключити щупи мультиметра до входних терміналів. Термінал «СОМ» є загальним, і до нього зазвичай підключають чорний щуп. Другий щуп підключають до одного з трьох інших терміналів, залежно від того, який параметр треба вимірювати. Для вимірювання напруги та опору другий щуп підключається до терміналу «VΩ», а мультиметр підключається до електричного ланцюга паралельно. Для вимірювання сили струму до 200 мА, другий щуп підключається до терміналу «mA», від 0,2 до 20 А – до терміналу «A», а мультиметр підключається до електричного ланцюга послідовно.

2) За допомогою поворотного перемикача обрати величину, яка підлягає вимірюванню, та її очікуваний діапазон.

3) Увімкнути живлення та здійснити вимірювання.

2.2. Відпрацювати налаштування мультиметрів на вимірювання напруги, електричного струму та опору.

2.3. Здійснити вимірювання за допомогою мультиметру напруги гальванічного елемента та опору резистора.

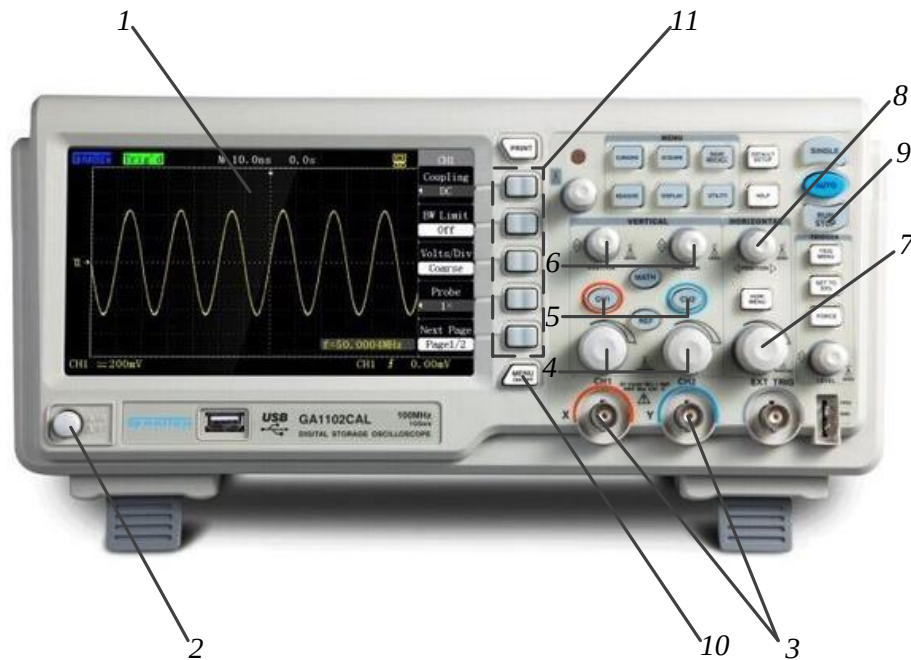
2.4. Розрахувати орієнтовне значення сили струму, що потече у простому електричному колі з гальванічного елемента та резистору.

2.5. З урахуванням результату розрахунку здійснити налаштування мультиметру та виміряти фактичне значення сили струму.

2.6. Порівняти розрахункове та фактичне значення сили струму та дійти висновків, як і чому вони відрізняються.

3. Ознайомитися з наявними в лабораторії моделями осцилографів.

3.1. Уважно прочитати інструкції з експлуатації осцилографів.



*Рис. 1.15. Сучасний цифровий двоканальний осцилограф:
1 – дисплей, 2 – кнопка увімкнення/вимкнення, 3 – входні термінали 1-го та 2-го каналів, 4 – регулятори масштабу вертикальної розгортки 1-го та 2-го каналів, 5 – кнопки увімкнення/вимкнення каналів, 6 – регулятори вертикального зміщення, 7 – регулятор масштабу горизонтальної розгортки, 8 – регулятор горизонтального зміщення, 9 – кнопка запам'ятовування, 10 – кнопка виклику меню, 11 – кнопки налаштування в меню.*

Правила роботи з осцилографом:

1) Осцилограф має бути встановленим на рівній горизонтальній поверхні, а простір навколо нього не має містити зайвих предметів.

2) Перед початком роботи з осцилографом необхідно уважно ознайомитися з інструкцією з експлуатації, детально вивчити призначення кожної кнопки та регулятора, розібратися з кожним пунктом меню.

3) Для живлення осцилографа дозволяється використовувати лише розетку, оснащену контактом заземлення.

4) Перед початком вимірювань слід проаналізувати очікувані параметри сигналу (частота, рівні постійної та змінної складових напруги) та з урахуванням цього здійснити налаштування осцилографа.

5) Під час під'єднання щупів осцилографа до контрольних точок схеми, слід уникати безпосереднього контакту пальців з її елементами.

3.2. Відпрацювати налаштування осцилографа для вимірювань сигналів з заданими параметрами.

4. Ознайомитися з наявними в лабораторії моделями генераторів сигналів.

4.1. Уважно прочитати інструкції з експлуатації генераторів сигналів.



Рис. 1.16 – Сучасний генератор сигналів: 1 – дисплей, 2 – кнопка увімкнення/вимкнення, 3 – вихідні термінали 1-го та 2-го каналів, 4 – кнопки обрання форми вихідного сигналу, 5 – кнопки обрання параметру сигналу для налаштування, 6 – регулятор величини обраного параметру, 7 – кнопка вибору каналу для налаштування, 8 – кнопки увімкнення/вимкнення виходів каналів.

Правила роботи з генератором сигналів:

1) Генератор сигналів має бути встановленим на рівній горизонтальній поверхні, а простір навколо нього не має містити зайвих предметів.

2) Перед початком роботи з генератором необхідно уважно ознайомитися з інструкцією з експлуатації, детально вивчити призначення кожної кнопки та регулятора, розібратися з кожним пунктом меню.

3) Для живлення приладу дозволяється використовувати лише розетку, оснащену контактом заземлення.

4) Після увімкнення генератору перед початком роботи слід зачекати 3...5 хв.

5) Під час налаштування генератору обирають канал для налаштування, форму вихідного сигналу, налаштовують параметри вихідного сигналу (частота, амплітуда, фаза, тощо), і лише після цього вмикають вихід каналу.

6) Під час роботи слід уникати короткого замикання на виході кожного каналу.

7) Електричне навантаження на виходи генератора в жодному випадку, навіть на короткі проміжки часу не має перевищувати допустимих меж.

8) Під час роботи з обома каналами генератора, слід уникати прямого контакту між їхніми сигнальними жилами.

4.2. Відпрацювати налаштування генератору для формування сигналів з заданими параметрами.

4.3. Налаштувати генератор сигналів на формування сигналу з заданими викладачем параметрами.

4.4. Налаштувати осцилограф для вимірювання цього сигналу.

4.5. З'єднати вихід генератору сигналів з входом осцилографа та увімкнути вихід відповідного каналу генератору. Якщо налаштування та з'єднання виконані правильно, на осцилографі має відтворюватися діаграма заданого сигналу.

5. Ознайомитися з наявними в лабораторії моделями макетних плат для монтажу без застосування пайки.

5.1. Уважно ознайомитися з документацією на макетні плати.

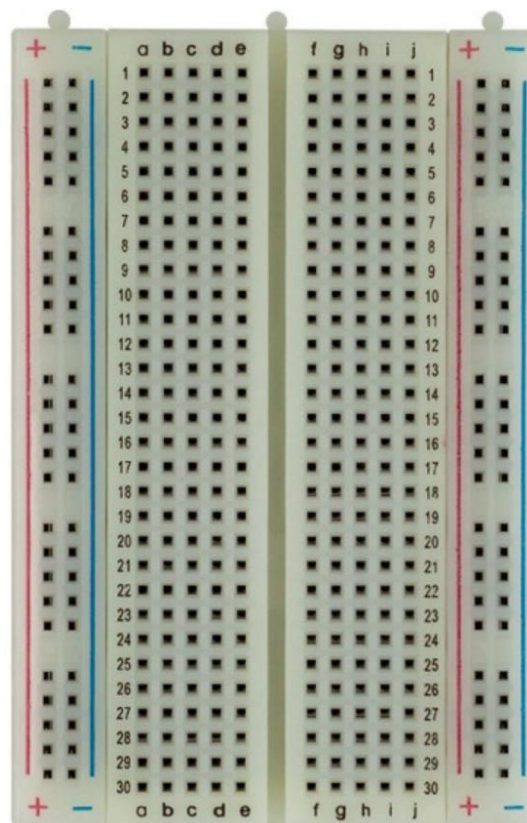


Рис. 1.17 Двосекційна макетна плата: 1...30 – ряди з'єднаних між собою контактів для монтажу компонентів, «+» та «-» – ряди з'єднаних між собою контактів для підключення джерела живлення.

Правила роботи з макетною платою:

- 1) Полюси джерела живлення підключаються лише до окремих рядів контактів макетної плати для уникнення короткого замикання.
- 2) Різні виводи одного електронного компонента підключаються до різних рядів макетної плати.
- 3) Для з'єднання рядів макетної плати між собою використовуються спеціальні дроти з контактами на обох кінцях, або перемички з монолітного мідного дроту.
- 4) Під час складання схеми на макетній платі слід уникати непотрібних електричних контактів.

5.2. Скласти та занотувати електричні схеми макетних плат, наявних в лабораторії.

6. Зробити висновки.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 2.

РОБОТА З ВИМІРЮВАЛЬНИМ ПРОГРАМНИМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ

Мета: Ознайомитися та оволодіти навичками роботи з програмним забезпеченням для формування й вимірювання електричних сигналів.

Матеріали та обладнання: персональний комп'ютер (ПК), смартфон, аудіо кабель AUX Jack 3.5.

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися та встановити на ПК програму «Scope».
- 1.1. Відкрити браузер та перейти за посиланням: https://zeitnitz.eu/scope_en. Ознайомитися з інформацією на даній сторінці.
- 1.2. Завантажити на ПК архів для встановлення програми.
- 1.3. Здійснити встановлення програми на ПК.
- 1.4. Після встановлення зайти в меню Пуск – Всі програми – Scope та відкрити інструкцію з користування програмою (рис. 1.18).

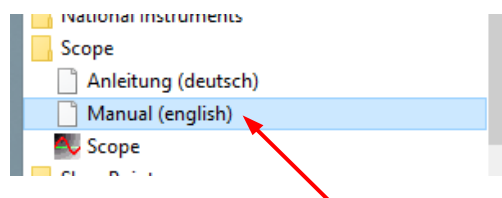


Рис. 1.18 – Відкриття інструкції з користування програмою Scope

- 1.5. Уважно ознайомитися з інструкцією.
- 1.6. Відкрити програму Scope (рис. 1.19) та ознайомитися зі всіма її вкладниками та інструментами.

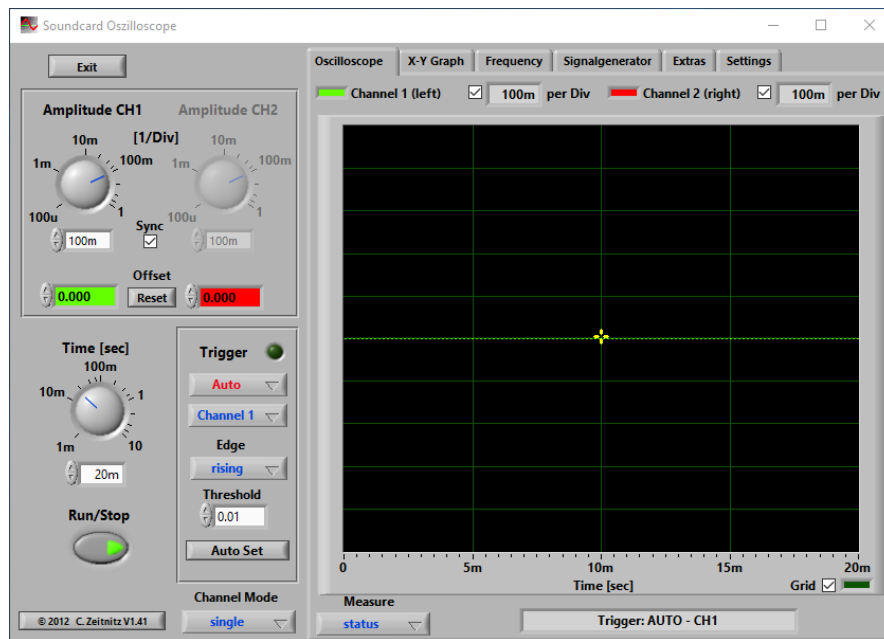


Рис. 1.19 – Вікно програми Scope

1.7. Закрити програму.

2. Встановити на смартфон застосунок Sound Generator (рис. 1.20).

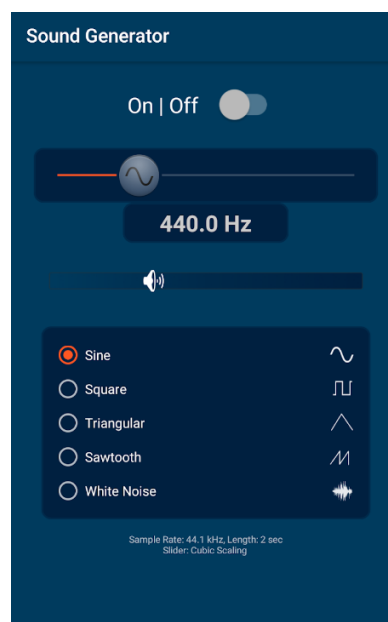


Рис. 1.20. Вікно мобільного застосунку Sound Generator

3. За допомогою кабелю AUX Jack 3.5 з'єднати аудіо вихід смартфона з входом звукової карти ПК.

4. Відкрити на ПК програму Scope, а на смартфоні – застосунок Sound Generator.

5. Налаштувати застосунок на смартфоні на генерацію синусоїдального сигналу заданої частоти, а програму на ПК на вимірювання цього сигналу.

6. Натиснути на за стосунку «Оп». Якщо налаштування та підключення здійснені вірно, у вікні програми Score має з'явитися осцилограма заданого сигналу.

7. Дійти висновків щодо можливостей вимірювального програмного забезпечення. Порівняти їх з можливостями звичайних осцилографа та генератора сигналів.

8. Зробити висновки.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 3 **МОДЕЛЮВАННЯ МІКРОФОНА**

Мета: Виготовити і випробувати прототип вугільного мікрофону.

Матеріали та обладнання: сірникова коробка, графітові олівці, канцелярський ніж, шило, з'єднувальні провідники з затисками типу «крокодил», елемент живлення «Крона», або інше джерело струму 5...9 В, навушники.

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися з будовою та принципом роботи моделі вугільного мікрофону.

1.1 Будова моделі вугільного мікрофону.

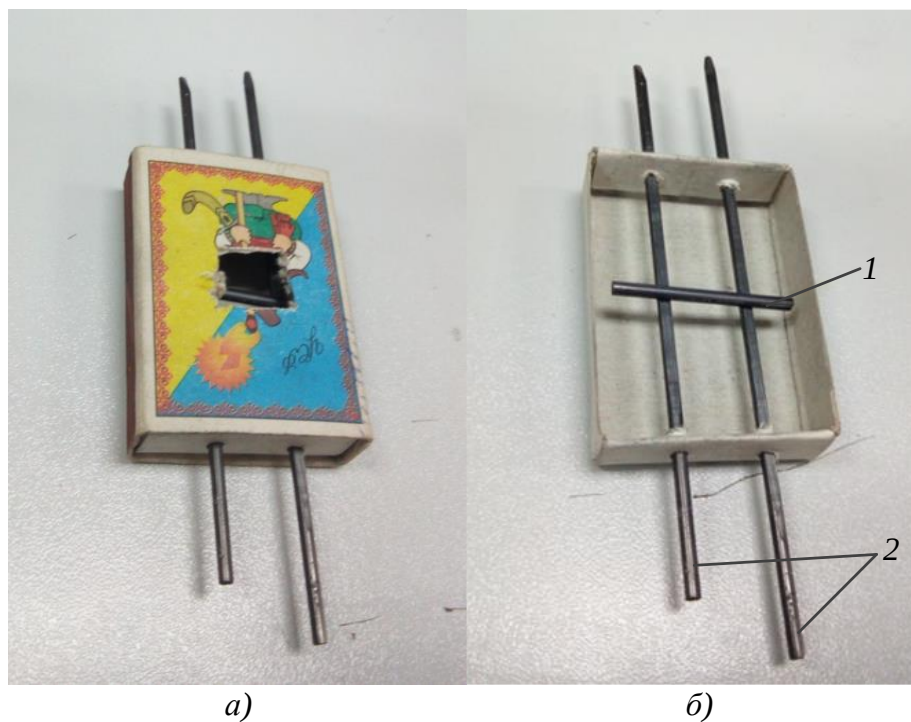


Рис. 1.21. Зовнішній вигляд (а), та внутрішня будова (б) моделі вугільного мікрофону: 1 – чутливий графітовий стрижень, 2 – контактні графітові стрижні.

1.2. Принцип роботи моделі вугільного мікрофону: акустичні коливання певної частоти діють на чутливий стрижень, в результаті чого він вібрує з тією ж частотою. При вібрації чутливого стрижня опір між ним і контактними стрижнями змінюється в такт зі звуковими вібраціями.

2. Ознайомитися зі схемою підключення моделі вугільного мікрофону до навушників.

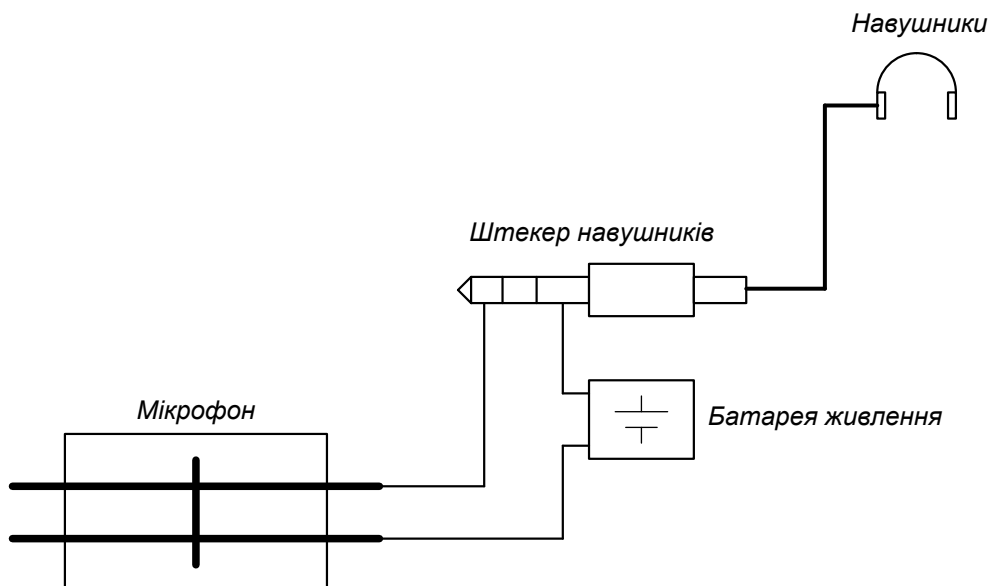


Рис. 1.22. Схема підключення моделі вугільного мікрофону до навушників

**Полярність підключення батареї не має значення.*

3. Виготовити корпус моделі вугільного мікрофону.

3.1. Дістати з порожньої сірникової коробки внутрішню частину і за допомогою шила зробити отвори для контактних стрижнів. Відстань між отворами близько 15 мм, діаметр отворів – не більше 2 мм.

3.2. У кришці сірникової коробки за допомогою канцелярського ножу прорізати невеликий отвір (приблизно 1×1 см), або зробити декілька дрібних отворів за допомогою шила.

4. Виготовити чутливий та контактний стрижні.

4.1. За допомогою канцелярського ножа розділити навпіл два графітових олівця та витягти з них графітові стрижні. Підготувати два відрізки графітових стрижнів довжиною 6...9 см та один довжиною близько 3 см.

4.2. На стрижнях за допомогою канцелярського ножу зробити плоскі площадки.

5. Складання моделі мікрофону.

5.1. Вставити контактні стрижні у отвори, розвернути їх плоскими площадками вгору. та покласти на них чутливий стрижень плоскою площадкою вниз.

5.2. Одіти на корпус моделі мікрофону кришку отвором до гори.

6. Підключити модель мікрофону до навушників та провести випробування.

6.1. З'єднати мікрофон з навушниками і батареєю у відповідності до схеми на рис. 1.22.

6.2. Одіти навушники і постукати твердим предметом по столу біля мікрофону. У одному з навушників має відтворюватися звук.

6.3. Піднести до мікрофону джерело звуку, наприклад смартфон з увімкненою музикою, одіти навушники та відійти на максимально можливу відстань. У одному з навушників повинен відтворюватися звук.

7. Дійти висновків щодо принципу роботи і якості створеної моделі вугільного мікрофону.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 4

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКА

Мета: Виготовлення і випробування моделі динаміку.

Матеріали та обладнання: 2 компакт диски, 2 циліндричні неодимові магніти діаметром 10...13 мм і товщиною 2...3 мм, штекер jack 3.5, провід емальований діаметром 0,2...0,3 мм, ізоляційна стрічка, пластикова склянка, суперклей, циліндричне тіло діаметром 17...19 мм, ПК, паяльник, каніфоль, паяльний флюс, припій.

ХІД РОБОТИ

1. Виготовлення підставки динаміку.

1.1. На отвір компакт-диску наклеїти хрест навхрест по два шари ізоляційної стрічки.

1.2. З обох сторін від ізоляційної стрічки по центру отвору компакт-диску встановіть неодимові магніти, так щоб вони притягнулися один до другого (рис. 1.23).

2. Виготовлення котушки.

2.1. На циліндричне тіло намотати 100...150 витків емальованого дроту, залишивши приблизно по 15 см проводу з обох кінців.

2.2. Акуратно зняти намотану котушку і зафіксувати її за допомогою того ж проводу, намотавши декілька його витків навколо основної намотки.

2.3. Зачистити кінці проводу котушки від емалі.



а)

б)

Рис. 1.23. Підставка динаміку, вигляд зверху а) та знизу б).

2.4. Включити паяльник та дати йому нагрітись до робочої температури.

2.5. Змастити кінці проводу котушки та контакти штекера (або його виводи) паяльним флюсом.

2.6. Занурити жало паяльника у каніфоль, після чого піднести його до припою і ретельно облудити.

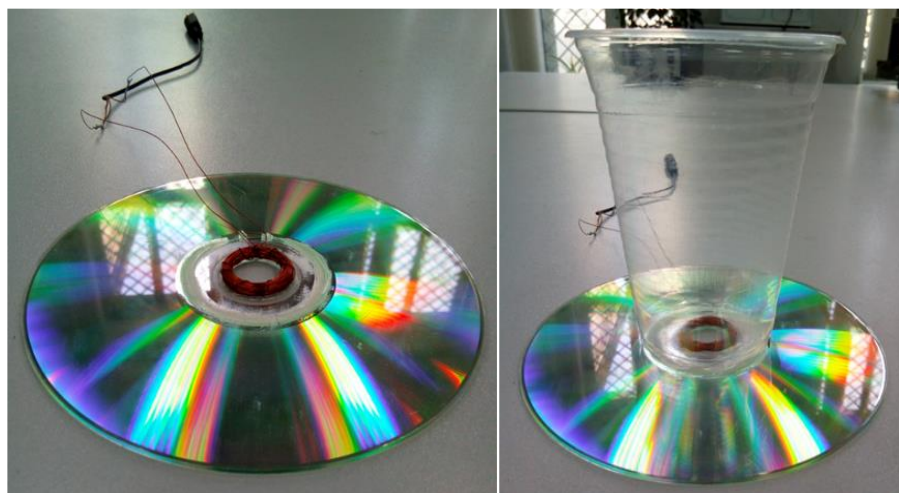
2.7. Облудити кінці проводу котушки та контакти штекера.

2.8. Механічно з'єднати кінці проводу котушки з контактами штекера та змастити з'єднання паяльним флюсом.

2.9. Додатково облудити жало паяльника та пропаяти обидва з'єднання.

3. Складання верхньої частини динаміку.

3.1. Приклеїти котушку до другого компакт диску, якій в даній моделі є мембраною, так щоб центр котушки співпадав з центром отвору компакт-диску (рис. 1.24 а).



а)

б)

Рис. 1.24. Котушка, з'єднана з мембраною а) та верхня частина динаміку в зборі б).

3.2. Вирізати в дні пластикової склянки, яка в даній моделі відіграє роль дифузору, отвір діаметром на 3...4 мм більший за діаметр котушки та приклеїти її до мембрани зі сторони котушки, так щоб центр її дна співпадав з центром котушки і отвору компакт-диску (рис. 1.24 б).

4. Встановити отриману конструкцію з котушки мембрани та дифузору на корпус з магнітом так, щоб магніт трохи увійшов до котушки (рис. 1.25).

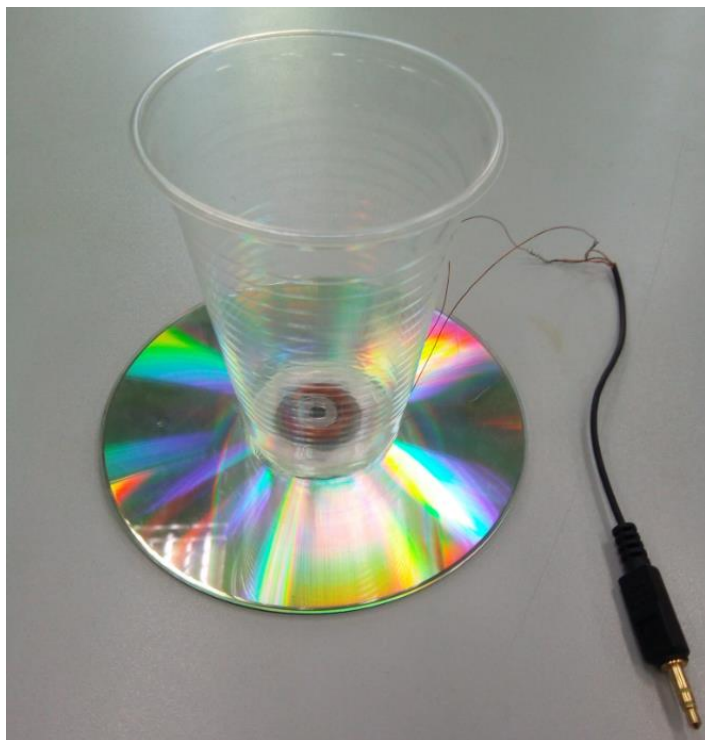


Рис. 1.25. – Загальний вигляд моделі динаміку

5. Випробування моделі динаміку.

5.1. Підключити штекер динаміку до виходу звукової карти ПК

5.2. Увімкнути на ПК музику і налаштувати гучність так, щоб її було чути у динаміку. Гучність такої моделі динаміку зазвичай невисока, тому гучність на ПК треба налаштовувати близькою до максимальної.

5.3. Встановити на смартфон застосунок для вимірювання гучності звуку, наприклад Sound Meter.

5.4. На ПК відкрити програму Score і налаштувати її на режим генератору сигналу синусоїдальної форми частотою 100 Гц.

5.5. Запустити на смартфоні застосунок Sound Meter і запустити на ПК у програмі Score генерацію звукового сигналу.

5.6. Піднести смартфон мікрофоном до динаміку та здійснити вимірювання рівню звуку. Результати вимірювань зафіксувати у зошиті

5.7. При постійному налаштуванні гучності на ПК змінювати частоту генератору з кроком 200...500 Гц, вимірюючи щоразу рівень звуку динаміка. Частоту звуку і результати вимірювань гучності звуку фіксувати у зошиті. Вимірювання проводити доти, доки динамік відтворюватиме звук.

- 5.8. За отриманими результатами побудувати АЧХ моделі динаміку.
- 5.9. Повторити кроки 5.4 – 5.8 замінивши модель динаміку на аудіо колонки.
6. Порівняти АЧХ моделі динаміку з АЧХ аудіо колонок.
7. Порівняти АЧХ моделі динаміків з АЧХ інших динаміків за технічною документацією.
8. Дійти висновків щодо конструктивних особливостей та характеристик створеної моделі динаміку.

ЗАВДАННЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

1. Ким, і в якому році було відкрите явище термоелектронної емісії? Скільки років пройшло від відкриття явища термоелектронної емісії до створення вакуумного діоду?
2. Під час грозового дощу, його краплі переносять електричний заряд з хмари на Землю. Чи можна назвати це явище електричним струмом?
3. Металевий дріт діаметром 1 мм і довжиною 10 м при температурі 20 °С має електричний опір 1,1 Ом та вагу близько 70 г. Визначте питомий опір та питому провідність металу, з якого зроблений дріт. З використанням довідникових даних спробуйте ідентифікувати метал, з якого зроблений дріт.
4. Скориставшись таблицею Менделєєва виписіть можливі донорні та акцепторні домішки для германію.
5. Яке явище має місце під час світіння неонові лампи у індикаторі фази?
6. Який вид електронної емісії має місце при газовому розряді?
7. Який параметр змінюється в такт зі звуковим сигналом у вугільного мікрофону? А у динамічного?
8. Чи можна замінити мікрофон динаміком?
9. З динаміку радіоприймача надійшло повідомлення «Українське радіо можна слухати, налаштувавши ваш приймач на частоту 657, 873, 1278, або 1404 кГц». Яку довжину мають відповідні хвилі? До якого діапазону частот вони відносяться?

РОЗДІЛ 2. ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА. ПАСИВНІ ЕЛЕКТРОННІ КОМПОНЕНТИ. ОПІР.

2.1. Електричні кола. Основні відомості. Електричним колом називається сукупність сполучених між собою за допомогою проводів електронних компонентів, джерел живлення, перемикачів та інших елементів, через які може проходити електричний струм.

Як вже згадувалося в попередньому розділі, основним законом, що визначає залежність між струмом і напругою на ділянці електричного кола є закон Ома (1.1).

Елементи електричних кіл можна розділити на дві групи: активні й пасивні. Активними називають такі елементи, які можуть контролювати струм у електричному колі. Так діод, включений до електричного кола не буде проводити струм, поки напруга на ньому не перевищить значення прямого її падіння. Транзистори, вакуумні тріоди та тиристори контролюють електричний струм у колі у відповідності до керуючого сигналу, що до них надходить. Вони можуть збільшувати потужність сигналу за рахунок зовнішнього джерела енергії. Пасивні елементи не можуть збільшувати потужність сигналу. До них відносяться резистори, конденсатори, котушки індуктивності, трансформатори, тощо.

Джерела живлення слугують для отримання електричної енергії. Отримання електричної енергії зазвичай відбувається шляхом перетворення на неї інших видів енергії – механічної, хімічної, теплової, променевої, тощо. При перетворенні будь-якого виду енергії в електричну в джерелі живлення відбувається розподіл додатних та від’ємних зарядів і утворюється електрорушійна сила (ЕРС).

Споживачі електричної енергії слугують для перетворення електричної енергії в інші види енергії: механічну, теплову, світлову, хімічну.

В електронних пристроях можуть протікати три енергетичні процеси.

1. В елементах, що мають активний опір, відбувається перетворення електричної енергії в теплову.

2. У конденсаторах при заряді відбувається накопичення енергії у вигляді енергії електричного поля між обкладинками, а при розряді – зворотне перетворення енергії.

3. В індуктивних елементах електрична енергія перетворюється в енергію магнітного поля і навпаки.

Елементи кола, що мають тільки один параметр, називають ідеальними. Реальні елементи електричних кіл характеризуються декількома параметрами. Так реальна котушка характеризується індуктивністю і опором проводу, яким вона намотана, а реальне джерело живлення характеризується ЕРС і внутрішнім опором $R_{вн}$.

На рис. 2.1 зображено просте електричне коло, що має джерело живлення і споживач електричної енергії у вигляді опору навантаження R_n .

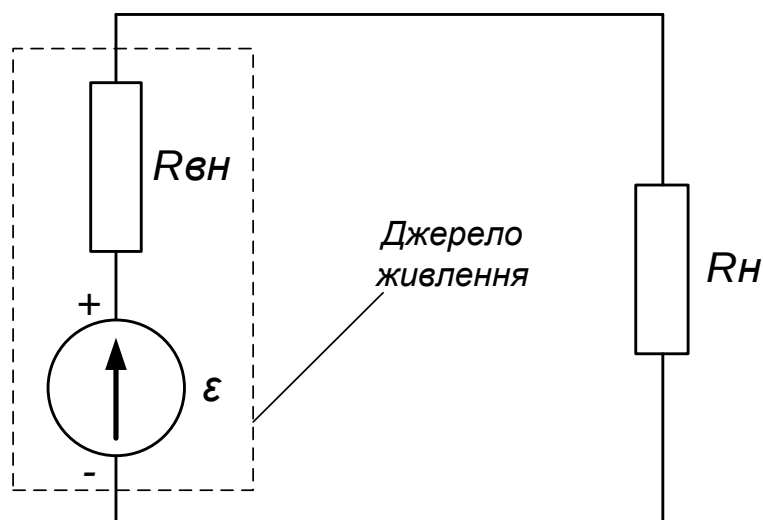


Рис. 2.1. Просте електричне коло

Відповідно до закону Ома, сила струму в даному колі є відношенням ЕРС до повного опору кола, тобто суми опору навантаження і внутрішнього опору джерела живлення:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{\text{н}} + R_{\text{вн}}}. \quad (2.1)$$

Для розрахунку струмів у складних розгалужених електричних колах застосовують Правила Кірхгофа, які витікають із закону Ома.

Правила Кірхгофа є основоположними в електротехніці та можуть застосовуватися в електроніці. Їх також називають законами Кірхгофа.

Перше правило Кірхгофа. В кожному вузлі електричного кола алгебраїчна сума значень сил струмів, що сходяться у даному вузлі, дорівнює нулю, або, алгебраїчна сума сил струмів, що входять у вузол електричного кола, дорівнює алгебраїчній сумі вихідних з вузла значень сил струмів.

Перше правило встановлює зв'язок між сумою струмів, спрямованих до вузла електричного з'єднання (додатні струми), і сумою струмів, спрямованих від вузла (від'ємні струми). Згідно з цим законом алгебраїчна сума струмів, що збігаються в будь-якій точці розгалуження провідників, дорівнює нулю:

$$\Sigma I_k = 0. \quad (2.2)$$

Перше правило Кірхгофа є наслідком закону збереження заряду.

Друге правило Кірхгофа. Для будь-якого замкненого контуру проводів сума електрорушійних сил (ЕРС) дорівнює сумі добутків сил струму на кожній ділянці контуру на опір ділянки, враховуючи внутрішній опір джерел струму.

Математично друге правило Кірхгофа записується так:

$$\Sigma \varepsilon_k = \Sigma I_k \cdot R_k. \quad (2.3)$$

Послідовне застосування правил Кірхгофа до усіх вузлів й контурів у складній електричній схемі дозволяє скласти повну систему лінійних рівнянь для визначення сил струму на кожній із ділянок.

Для розрахунку перш за все малюють електричну схему, та довільним чином позначають стрілками напрями струмів на кожній ділянці. Потім виділяються замкнуті контури й обходяться в одному довільно вибраному напрямку. Якщо стрілка, яка вказує напрям струму направлена проти обходу, то відповідний добуток струму на опір береться зі знаком мінус.

Якщо при обході переходять від від'ємного полюса джерела струму до додатного, то ЕРС записується з додатним знаком, якщо навпаки, то з від'ємним.

В результаті отримують систему рівнянь, розв'язуючи яку визначають сили струму. Якщо сила струму вийшла від'ємною, то це значить, що напрям струму на даній ділянці вгадали неправильно, хоча це не впливає на правильність результату.

Розглянемо застосування правил Кірхгофа на прикладі складного електричного кола, зображеного на рис. 2.2.

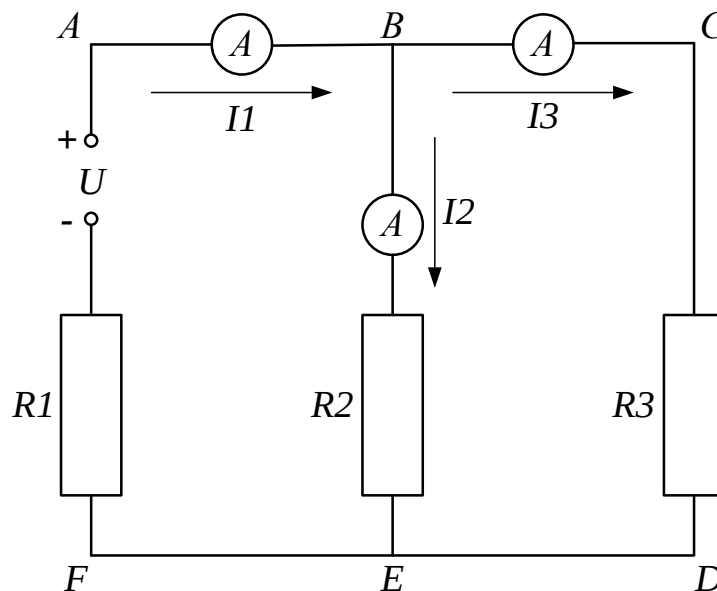


Рис. 2.2. Схема складного електричного кола

Дану схему можна розділити на два контури: $ABEF$ та $ABCDEF$. Схема містить два вузли – B та E . За позитивний приймаємо напрям обходу контуру за годинниковою стрілкою.

Розглянемо вузол B . Струм I_1 входить до нього, тому він буде позитивним. Струми I_2 та I_3 виходять з вузла B , тому вони будуть від'ємними. За першим правилом Кірхгофа запишемо:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0. \quad (2.4)$$

За другим правилом Кірхгофа для контуру $ABEF$ запишемо:

$$I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 = U. \quad (2.5)$$

Для контуру $ABCDEF$ запишемо:

$$I_1 \cdot R_1 + I_3 \cdot R_3 = U. \quad (2.6)$$

Якщо відомі опори R_1 , R_2 , R_3 та напруга U , що дорівнює ЕРС, прикладеній до кола, то рівняння (2.4), (2.5) та (2.6) утворюють систему трьох рівнянь з трьома невідомими, вирішивши яку можна визначити електричні струми в усіх ділянках електричного кола.

Експериментальній перевірці правил Кірхгофа буде присвячено одну з лабораторних робіт даного розділу.

Залежно від виду струму що протікає в електричному колі, бувають електричні кола постійного і змінного струму.

Основними елементами, від яких залежить вид енергетичного процесу, що відбувається у електричному колі є елементи з активним опором (резистори), конденсатори та індуктивні елементи (котушки індуктивності), тобто пасивні компоненти.

Розглянемо більш детально дані елементи, а також їх властивості у електричних колах постійного та змінного струму.

2.2. Резистор як елемент електричного кола. Резистор – це елемент, який вносить до електричного кола постійний або змінний (регульований) активний опір. При протіканні струму через активний опір вся його енергія перетворюється на тепло. Значення активного опору є однаковим як для постійного, так і для змінного струму і не залежить від частоти для змінного струму.



Рис. 2.3. Дротовий резистор постійного опору

Резистори з постійним опором бувають дротовими або плівковими. Дротові резистори (рис. 2.3) виготовляють шляхом намотування дроту з високим опором на керамічні корпуси. Плівкові резистори (рис. 2.4) виготовляють шляхом напилювання відповідних металевих сплавів на керамічні стовпчики або трубки. Резистори характеризуються опором та його допуском та допустимою потужністю розсіювання.

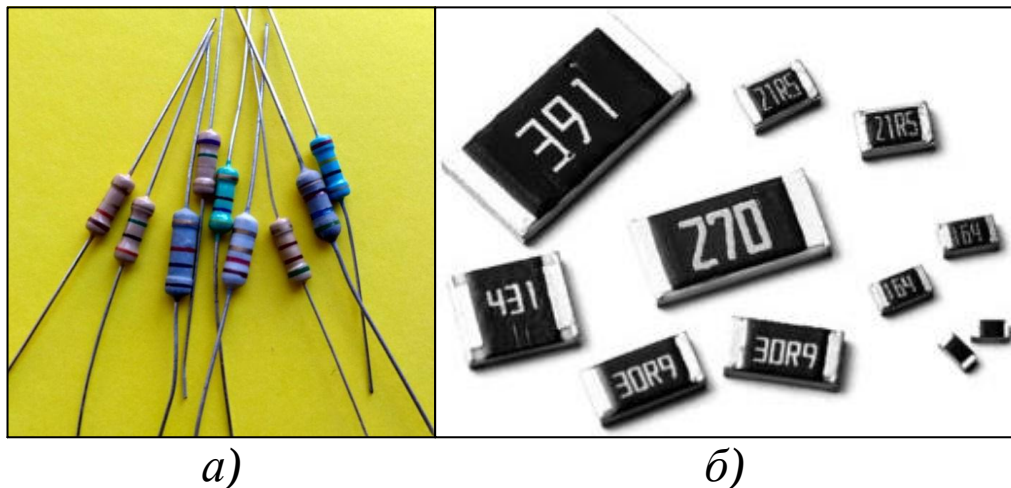


Рис. 2.4. Плівкові резистори: вивідні а), та поверхневого монтажу б).

Окрім основної одиниці вимірювання опору – Ом, часто використовують похідні одиниці – мОм, кОм та МОм.

У серійному виробництві перебувають резистори з допусками на номінальне значення опору $\pm 30\%$, $\pm 20\%$, $\pm 10\%$, $\pm 5\%$. Резистори з меншими значеннями допуску застосовуються рідше і виготовляються в менших обсягах.

Номінальні значення опорів резисторів, що перебувають у серійному виробництві не є довільними. Для кожного допуску існують встановлені стандартами ряди номіналів. Так, наприклад, для допуску $\pm 20\%$ використовується номінальний ряд опорів Е6, відповідно до якого випускають резистори з опорами 1; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8 Ом і опорами, отриманими шляхом помноження цих номіналів на 10^n , де n – ціле число. Для допуску $\pm 10\%$ ряд номінальних опорів вдвічі більший (таблиця 2.1).

Виготовляються також резистори з опором меншим 1 Ом – від 1 до 910 мОм.

Також стандартизованими є номінальні значення максимально допустимої потужності резисторів, пов'язані з допустимою робочою температурою. Максимальна потужність резисторів, що перебувають у серійному виробництві може мати значення: 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10 Вт і більше. Потужність, що виділяється в резисторі з опором R , який працює в тому чи іншому електричному колі зазвичай визначається за струмом I , що протікає в ньому:

$$P = I^2 \cdot R. \quad (2.7)$$

Під час вибору номінальної потужності резистора, за формулою (2.7) визначають фактичну потужність, яка в ньому виділяється і призначають резистор з найближчим більшим значенням потужності з номінального ряду.

Якщо в електричному колі протікає змінний струм, то під час розрахунку беруть його діюче значення I_d . Якщо в колі протікає і постійний

I_{Π} , і змінний струм, то для розрахунку потужності беруть його результуюче значення I_P , що визначається за формулою:

$$I_P = \sqrt{I_{\Pi}^2 + I_D^2}. \quad (2.8)$$

Таблиця 2.1. Основні ряди номіналів

E3 ± 30%	E6 ± 20%	E12 ± 10%	E24 ± 5%
1,0	1,0	1,0	1,0
			1,1
		1,2	1,2
			1,3
	1,5	1,5	1,5
			1,6
		1,8	1,8
			2,0
2,2	2,2	2,2	2,2
			2,4
		2,7	2,7
			3,0
	3,3	3,3	3,3
			3,6
		3,9	3,9
			4,3
4,7	4,7	4,7	4,7
			5,1
		5,6	5,6
			6,2
	6,8	6,8	6,8
			7,5
		8,2	8,2
			9,1

Допустиме значення струму при відомій потужності можна розрахувати за формулою:

$$I = \sqrt{P/R}, \quad (2.9)$$

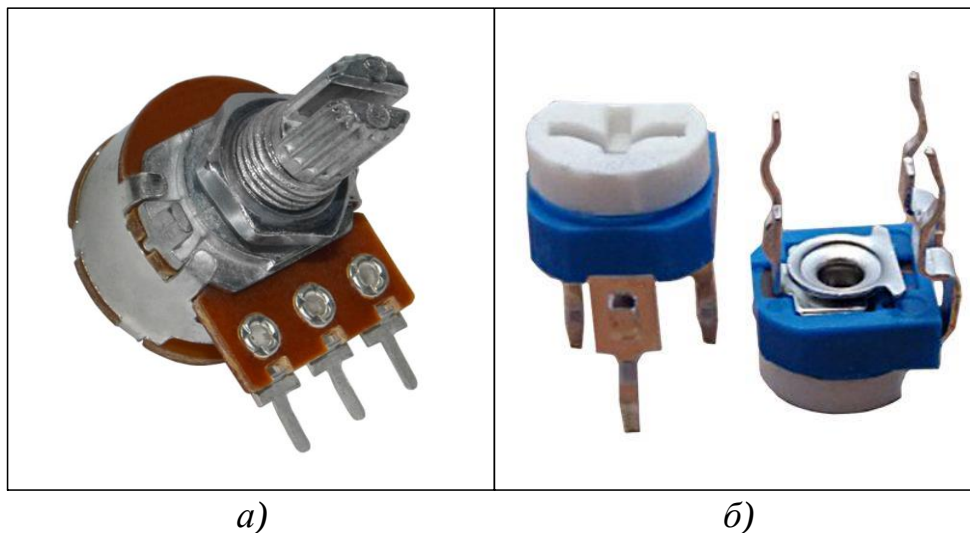
а допустиме значення прикладеної до резистора напруги U , за формулою:

$$U = \sqrt{P \cdot R}. \quad (2.10)$$

Окрім резисторів з постійним опором існують змінні резистори (потенціометри, реостати). Вони забезпечують плавне регулювання опору від його значення, близького до 0 Ом до номінального, шляхом обертання вісі, пов'язаної з движком, що ковзає по поверхні, покритій резистивним шаром. Зміна опору залежно від кута повороту може відбуватися за лінійним, логарифмічним, або експоненціальним законом. Змінні резистори, так само як і постійні можуть бути дротовими (рис. 2.5) та плівковими (рис. 2.6).



Рис. 2.5. Дротовий змінний резистор



*Рис. 2.6. Плівкові змінні резистори:
звичайний а), та підстроювальний б)*

Окрім обертових змінних резисторів бувають також повзункові (рис. 2.7).



Рис. 2.7. Повзунковий змінний резистор

На рис. 2.8 зображено умовні позначення резисторів на електронних схемах.

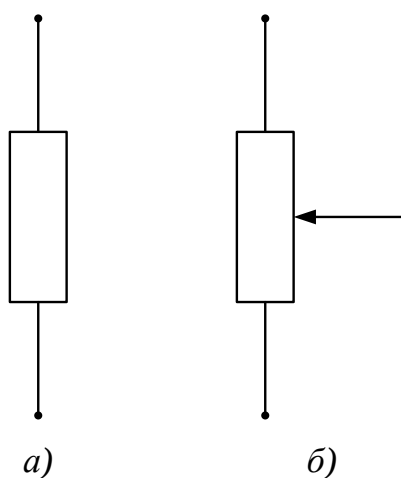


Рис. 2.8. Умовні позначення резисторів на електронних схемах: постійного а), та змінного б)

На рисунку 2.9 пояснюється визначення результуючого опору при послідовному (а) та паралельному (б) з'єднаннях резисторів.

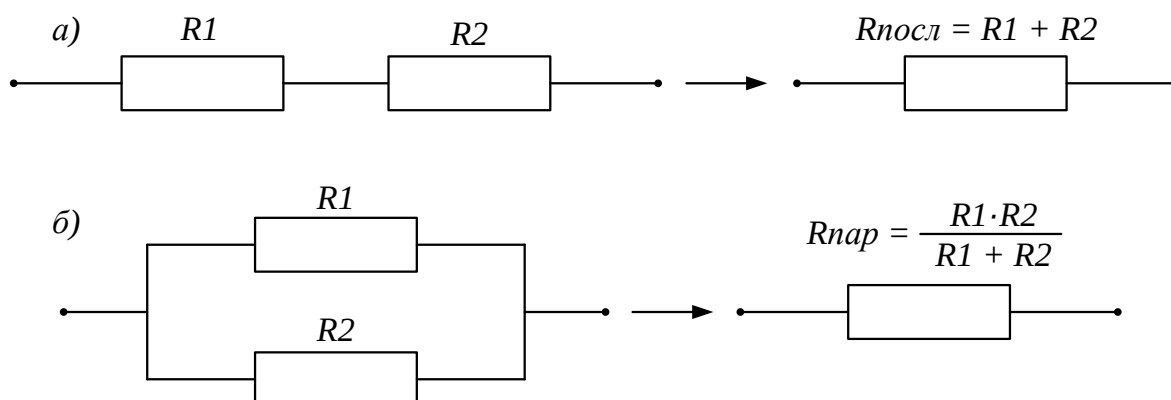


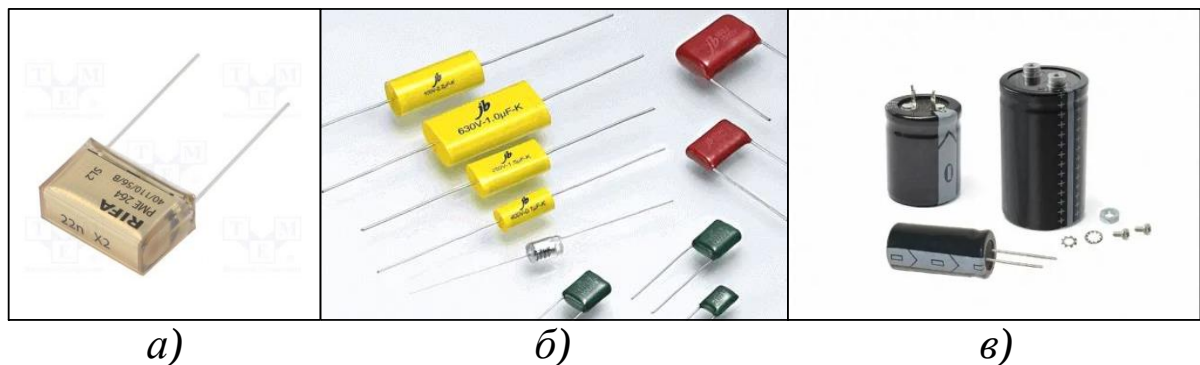
Рис. 2.9. Визначення результуючого опору при послідовному та паралельному з'єднанні резисторів

2.3. Конденсатор як елемент електричного кола. Конденсатор – це елемент, що вносить до електричного кола певну постійну або змінну

(регульовану) електричну ємність. Він складається з двох провідних обкладинок, ізольованих одна від іншої шаром діелектрику. Залежно від конструкції й виду діелектрика бувають конденсатори з повітряним зазором, паперові, плівкові, керамічні та електролітичні. Конденсатори характеризуються в основному наступними параметрами: електрична ємність та її допуск, робоча напруга, діапазон робочих температур та температурний коефіцієнт ємності, втрати та добротність.

У паперових конденсаторах діелектриком слугує папір, просочений парафіном, у плівкових – полімерна плівка. У керамічних конденсаторах в якості діелектрика застосовуються спеціальні керамічні матеріали, зазвичай титанати лужноземельних металів – барію та стронцію, або їх евтектичні суміші з великими значеннями діелектричної проникності. У електролітичних конденсаторах діелектриком слугує тонка окисна плівка, що утворюється на поверхні однієї з обкладинок. Ця обкладинка виготовляється з алюмінію або танталу. Іншою обкладинкою слугує рідкий або твердий (полімерний) електроліт.

У паперових (рис. 2.10 а), плівкових (рис. 2.10 б) та електролітичних конденсаторах (рис. 2.10 в) обкладинки разом з діелектриком зазвичай згортаються у циліндричний або призматичний рулон.



*Рис. 2.10 – Зовнішній вигляд конденсаторів:
паперового а); плівкових б), та електролітичних в).*

На рисунку 2.11 а) показана будова сучасних багатошарових керамічних конденсаторів, а на рисунку 2.11 б) – їх зовнішній вигляд.

Повітряний зазор зазвичай застосовується у повітряних конденсаторах змінної ємності (рис. 2.12).

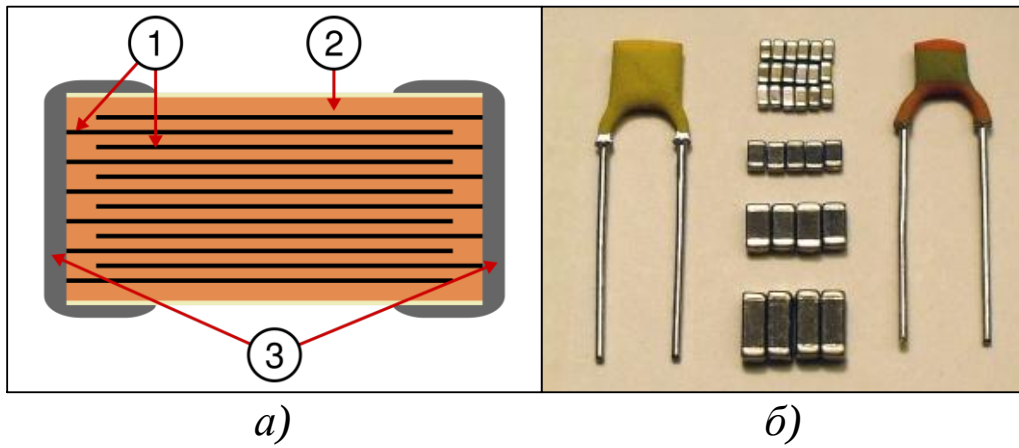


Рис. 2.11. Будова а) та зовнішній вигляд б) керамічних конденсаторів: 1 – обкладинки; 2 – керамічний діелектрик; 3 – контактні електроди.



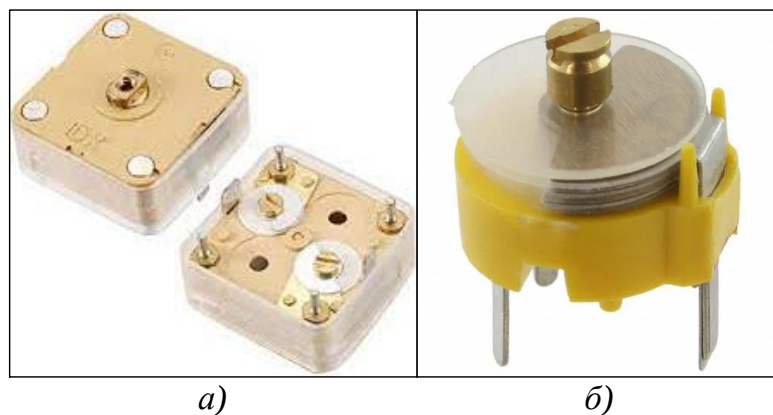
Рис. 2.12. Повітряний конденсатор змінної ємності

Конденсатори змінної ємності бувають також з плівковим полімерним або керамічним діелектриком (рис. 2.13).

Основна одиниця вимірювання ємності конденсаторів – 1 Ф (Фарад). Ємність 1 Ф має такий конденсатор, напруга між обкладинками якого дорівнює 1 В при наданні обкладинкам різнойменних зарядів по 1 Кл, тобто $1\text{Ф} = 1\text{ Кл/В}$. 1 Ф це досить велика ємність, тому на практиці зазвичай застосовуються менші одиниці: 1 пФ, 1 нФ, 1 мкФ, тощо.

Ємність конденсаторів збільшується при збільшенні площини обкладинок і зменшенні відстані між ними. Також вона прямо пропорційна до значення діелектричної проникності матеріалу діелектрика.

При промисловому виготовленні конденсаторів застосовуються ті ж самі допуски та ряди номінальних значень ємності як і опорів для резисторів.



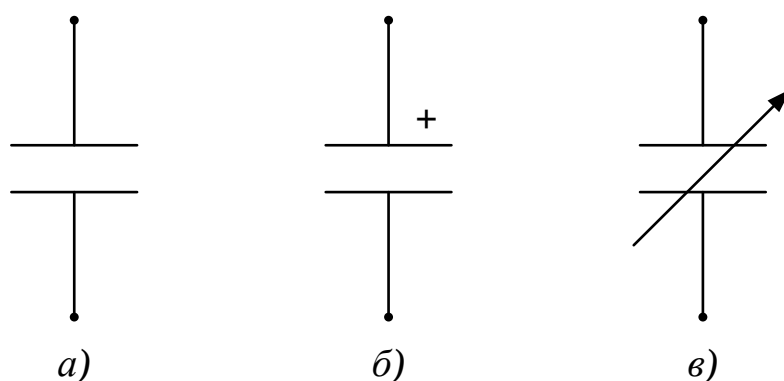
*Рис. 2.13. Конденсатори змінної ємності:
з плівковим полімерним діелектриком а); підстроювальний з
керамічним діелектриком б).*

Конструкція конденсатора обмежує його робочу напругу, оскільки при дуже високій напрузі відбувається пробій діелектрика і конденсатор виходить з ладу.

Діапазон робочих температур конденсатора залежить перш за все від виду діелектрика. Зміна температури для різних діелектриків в різній мірі впливає на їх діелектричну проникність, і як наслідок – на ємність конденсатора. При виборі конденсатора для використання в тих чи інших температурних діапазонах керуються температурним коефіцієнтом ємності, який для різних матеріалів може мати як додатне, так і від’ємне значення.

Окрім ємності конденсатори мають деяку власну індуктивність і активний опір. Наявність активного опору викликає втрати, пов’язані з перетворенням електричної енергії на теплову. Величина, зворотна до діелектричних втрат називається добротністю конденсатора.

На рисунку 2.14 показані умовні позначення конденсаторів на кресленнях електронних схем.



*Рис. 2.14 – Умовні позначення конденсаторів на кресленнях електронних
схем: неполярного а), полярного електролітичного б),
конденсатора змінної ємності в).*

На рисунку 2.15 показано визначення результуючої ємності при послідовному та паралельному з’єднанні конденсаторів.

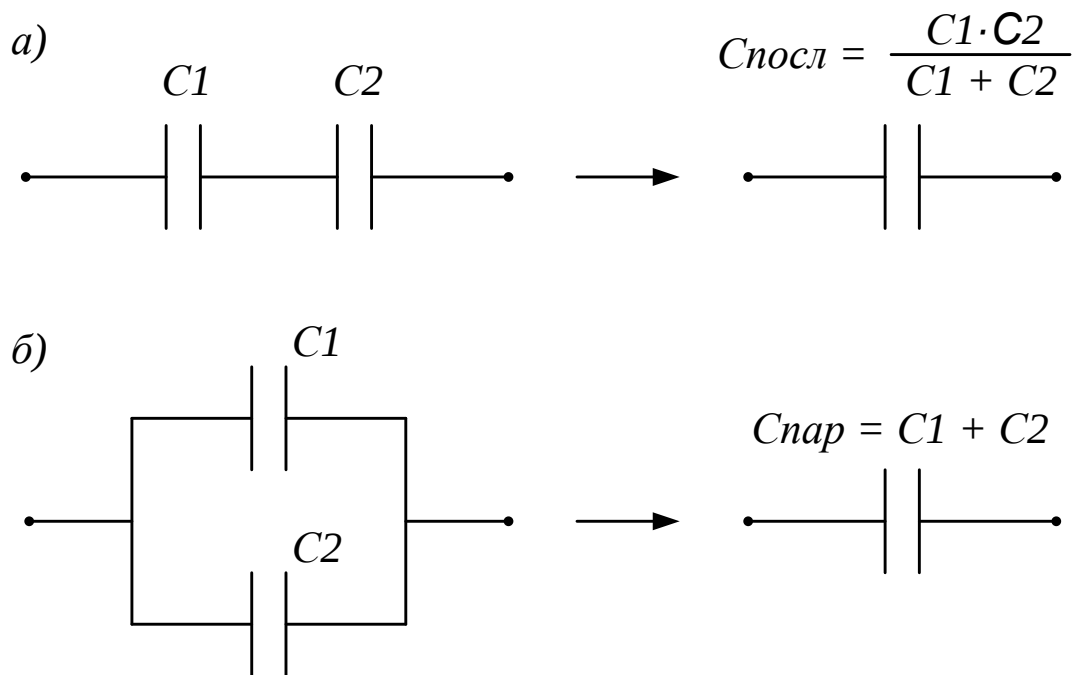


Рис. 2.15. Визначення результуючої ємності конденсаторів при: послідовному а) та паралельному б) з'єднанні конденсаторів

Ідеальний конденсатор без діелектричних втрат для постійного струму має активний опір $R = \infty$. Якщо підключити конденсатор до джерела живлення з певною постійною ЕРС та внутрішнім опором (рис. 2.16), то в даному електричному колі потече струм заряду конденсатора. Цей струм буде змінним. Початкове значення струму заряду буде максимальним і воно дорівнюватиме $I_{\text{зар}} = E/R_{\text{вн}}$. В міру зарядки конденсатора сила струму буде зменшуватися. Початкова напруга на обкладинках конденсатора буде дорівнювати 0 В, а в міру заряду конденсатора вона зростатиме. Коли напруга на обкладинках конденсатора досягне значення ЕРС джерела живлення, струм заряду припиниться.

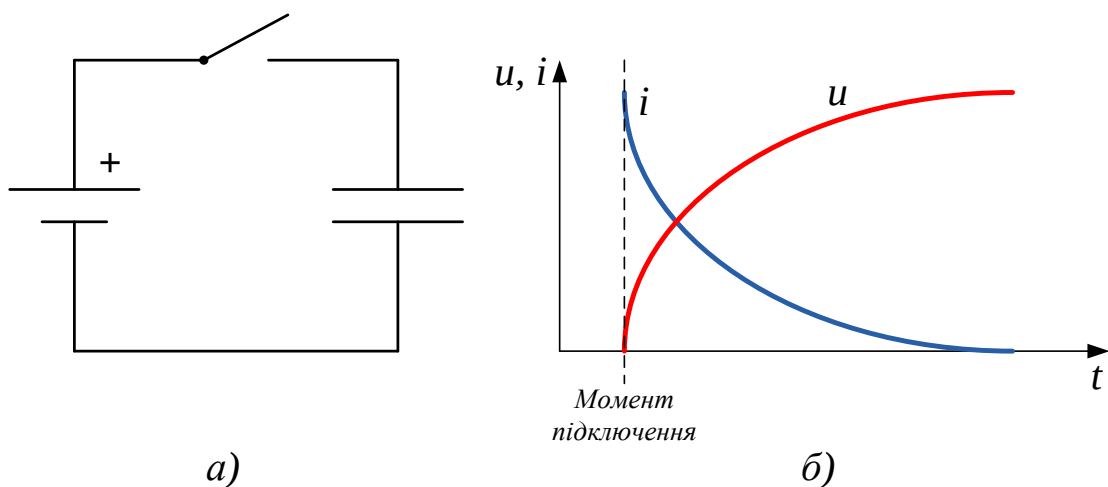


Рис. 2.16. Електричне коло з конденсатором а) та графіки зміни струму й напруги між його обкладинками б).

Таким чином, конденсатор може проводити змінний струм. При цьому струм випереджає напругу. Опір конденсатору є реактивним і називається ємнісним опором X_C . Ємнісний опір конденсатора в електричному колі змінного струму визначається за формулою:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}, \quad (2.11)$$

де ω – кутова частота змінного струму, рад/с. Кутова частота пов'язана зі звичайною f частотою залежністю:

$$\omega = 2\pi \cdot f. \quad (2.12)$$

Таким чином формула для визначення ємнісного опору набуде вигляду:

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}, \quad (2.13)$$

Де f – частота змінного струму, Гц;

C – ємність конденсатора, Ф.

У реактивному опорі, на відміну від активного, не відбувається виділення тепла, а струм, що протікає через нього призводить до накопичення енергії у вигляді електромагнітного поля. Наявність реактивного опору викликає фазовий зсув між струмом і напругою, як це було показано вище на прикладі заряду конденсатора. На рис. 2.17 показано зсув фази між струмом і напругою для конденсатора у колі змінного синусоїдального струму.

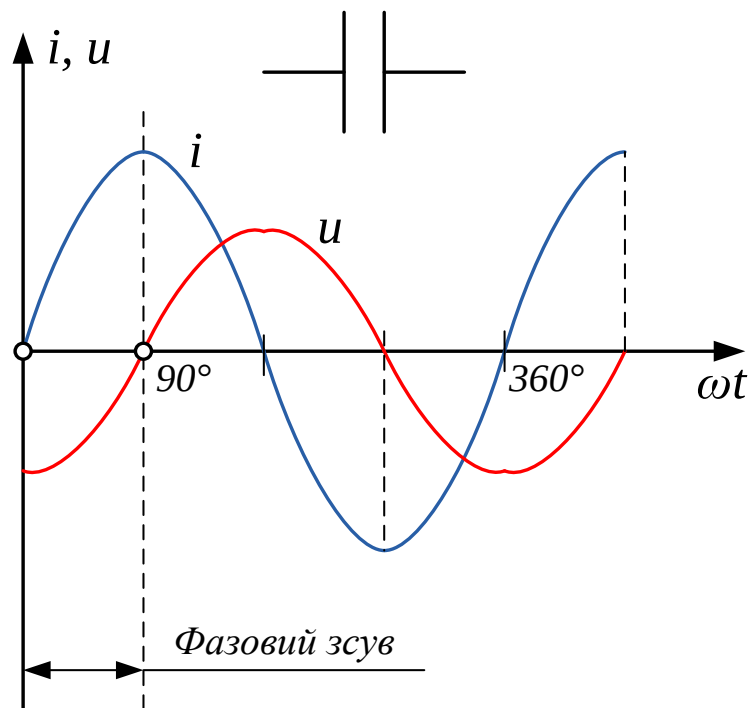


Рис. 2.17. Зсув фази між струмом і напругою на конденсаторі

Як видно з рисунку 2.17 ємнісний опір викликає випередження струму над напругою на 90° .

Із залежності (2.11) витікає, що зі збільшенням частоти реактивний опір конденсатора зменшується.

2.4. Котушка індуктивності як елемент електричного кола.

Котушка індуктивності – це елемент, що вносить до електричного кола певну постійну або змінну (регульовану) індуктивність L . Котушки індуктивності (рис. 2.18) виготовляють шляхом намотування ізольованого (емальованого) дроту на корпус, виготовлений з діелектрика. Намотування котушки може здійснюватися в один або багато шарів. Котушки бувають повітряними або з магнітним осердям. Характеризуються котушки індуктивністю та добротністю.

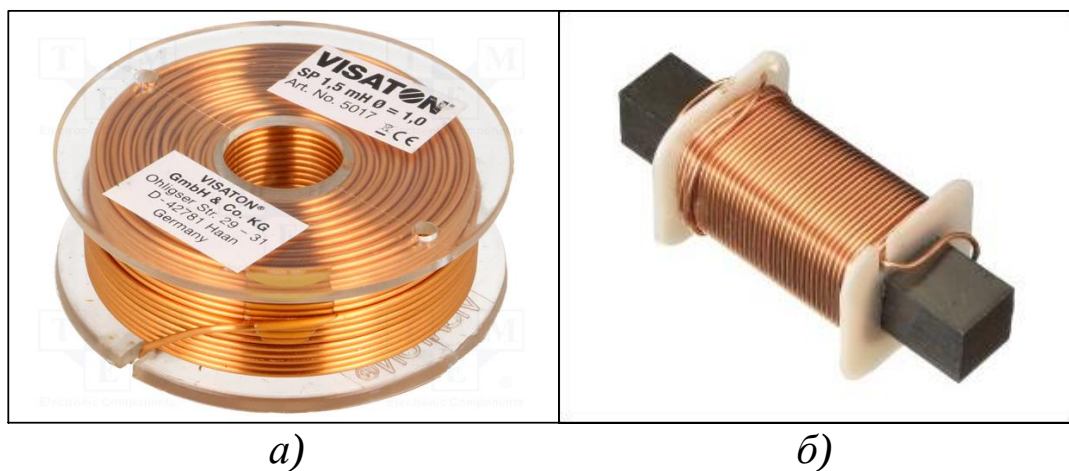


Рис. 2.18. Котушки індуктивності:
повітряна а), з магнітним осердям б).

Намотування котушок на магнітному осерді дозволяє значно збільшити їх індуктивність при одній і тій самій кількості та розмірах витків дроту.

Основною одиницею вимірювання індуктивності є Гн (Генрі). Індуктивність котушки дорівнює 1 Гн, якщо при силі струму у ній в 1 А, магнітний потік через неї дорівнює 1 Вб. Якщо пригадати, що при зміні сили струму у котушці виникає ЕРС самоіндукції, яка перешкоджає цій зміні, можна дати інше визначення одиниці вимірювання індуктивності. Індуктивність котушки дорівнює 1 Гн, якщо при рівномірній зміні сили струму у колі на 1 А за 1 с у ній виникає ЕРС самоіндукції 1 В.

На практиці частіше застосовуються похідні одиниці вимірювання індуктивності – мГн та мкГн.

Індуктивність котушки збільшується при збільшенні кількості витків та їх площі та прямо пропорційна до значення відносної магнітної проникності осердя, на якому намотана.

Існують котушки зі змінною (регульованою) індуктивністю (рис. 2.19). Регулювання індуктивності найчастіше здійснюється шляхом переміщення

осердя відносно намотки, наприклад шляхом вкручування або викручування осердя за допомогою викрутки.

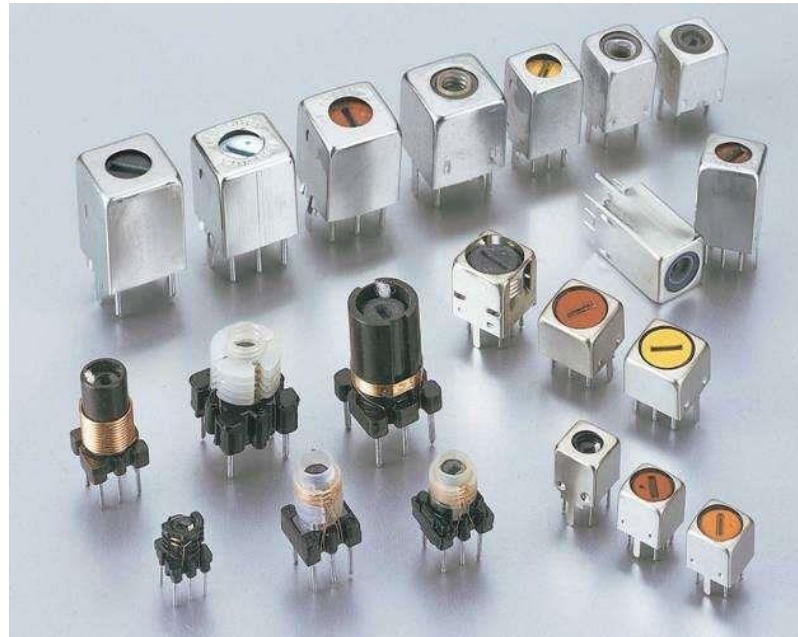


Рис. 2.19. Котушки змінної індуктивності

До індуктивних елементів належать також дроселі й трансформатори. Дросель – це звичайна котушка, намотана зазвичай на магнітному осерді, яка слугує для створення великого опору змінному струму певного діапазону частот. Дроселі використовуються зокрема у фільтрах джерел живлення.

Трансформатор складається щонайменше з двох обмоток, намотаних на одному магнітному осерді. Трансформатори слугують для зниження або підвищення змінної напруги при збереженні потужності.

На рис. 2.20 показані позначення котушок індуктивності на кресленнях електронних схем.

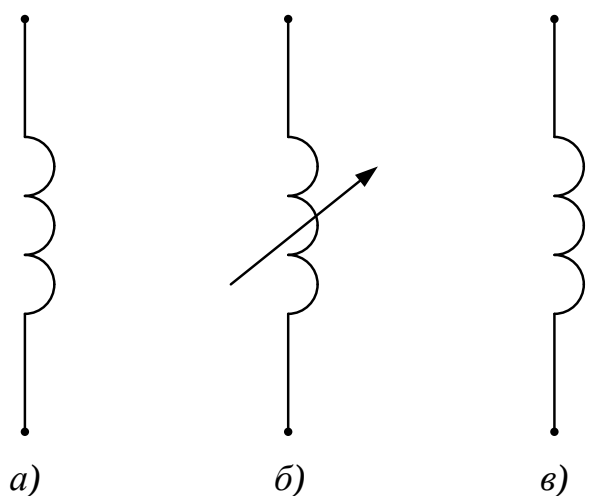


Рис. 2.20. Позначення котушок індуктивності на кресленнях електронних схем: постійної індуктивності а), змінної індуктивності б), котушка з магнітним осердям в).

Окрім індуктивності, котушки мають деяку ємність, що залежить від розподілу намотки і певний активний опір. На рисунку 2.21 показана еквівалентна схема реальної котушки індуктивності.

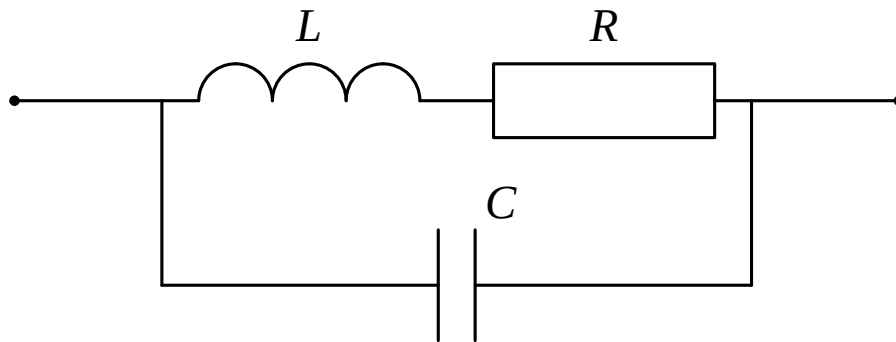


Рис. 2.21. Еквівалентна схема реальної котушки індуктивності

На рисунку 2.22 представлено визначення результуючої індуктивності котушок при їх послідовному та паралельному з'єднанні.

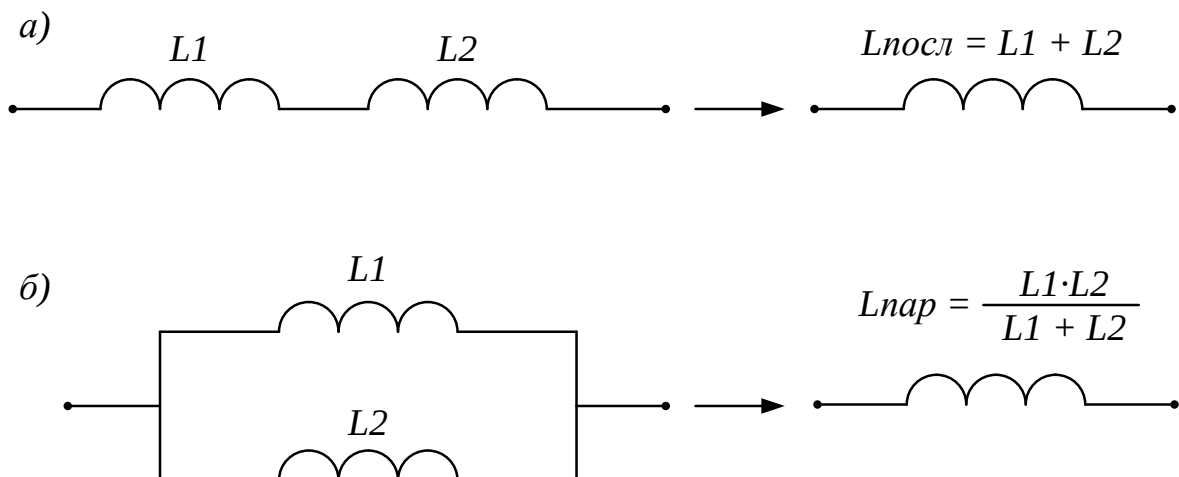


Рис. 2.22. Визначення результуючої індуктивності при послідовному а) та паралельному б) з'єднанні котушок.

Якщо підключити котушку індуктивності до джерела живлення з постійною напругою та певним внутрішнім опором, то напруга на її кінцях одразу набуде значення напруги джерела живлення, а нарощуванню струму у колі котушки буде перешкоджати ЕРС самоіндукції. Струм набуде максимального сталого значення поступово лише через деякий час після підключення котушки до джерела живлення. При цьому напруга на кінцях котушки знизиться до мінімального значення $U = I \cdot R$, де R – активний опір дроту, яким намотана котушка. Отже, для постійного струму опір котушки індуктивності є активним і дорівнює опору дроту R , яким вона намотана. При протіканні змінного струму через котушку індуктивності спостерігається випередження напруги над струмом.

Опір котушки змінному струму є реактивним і називається індуктивним опором X_L , який визначається за формулою:

$$X_L = \omega \cdot L = 2\pi \cdot f \cdot L. \quad (2.14)$$

На рисунку 2.23 показано зсув фази між струмом і напругою для котушки у колі змінного синусоїдального струму.

Як видно з рисунку 2.21 індуктивний опір викликає випередження напруги над струмом на 90° .

Із залежності (2.14) витікає, що зі збільшенням частоти реактивний опір котушки збільшується.

Добротністю котушки індуктивності називається величина, що дорівнює відношенню її індуктивного опору до активного:

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{2\pi \cdot f \cdot L}{R}. \quad (2.15)$$

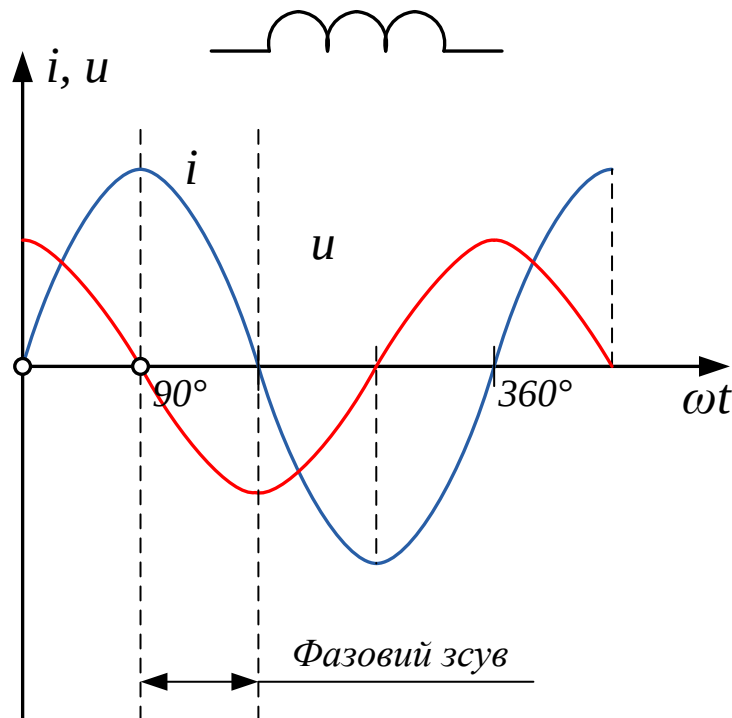


Рис. 2.23. Зсув фаз між струмом і напругою на індуктивності

Добротність котушки залежить від частоти, матеріалу дроту, матеріалу осердя, розмірів та форми.

2.5. Повний опір. Повним, або комплексним опором Z характеризуються електричні кола змінного струму, які містять компоненти як з активним, так і з реактивним опором. В загальному випадку повний опір складається з двох частин: дійсної та уявної. Дійсна частина являє собою активний опір і не залежить від частоти. Уявна частина повного опору являє собою реактивний опір, який залежить від частоти.

Модуль повного опору у колі змінного струму з активним опором R та реактивним X визначається за формулою:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}. \quad (2.16)$$

Повний опір для ділянки кола можна обчислити за формулою, що витікає із закону Ома:

$$Z = \frac{U}{I}, \quad (2.17)$$

де U та I – діючі, або амплітудні значення відповідно змінної напруги та змінного струму на ділянці кола.

Властивість опору конденсаторів та котушок індуктивності змінюватися залежно від частоти змінного струму застосовується для створення електричних фільтрів, які можуть добре пропускати струм у одному діапазоні частот і пригнічувати – у іншому. З електричними фільтрами ми детально познайомимося пізніше.

Електричне коло, яке містить паралельно або послідовно з'єднані конденсатор та котушку індуктивності називається коливальним контуром. Якщо за певної частоти змінного струму реактивний опір конденсатора дорівнює реактивному опору котушки, то спостерігається явище резонансу струмів для паралельного коливного контуру, і резонансу напруг – для послідовного. Повний опір при паралельному резонансі набуває максимального значення, а при послідовному – мінімального.

На рис. 2.24 зображено схему електричного кола, що містить реальний коливальний контур.

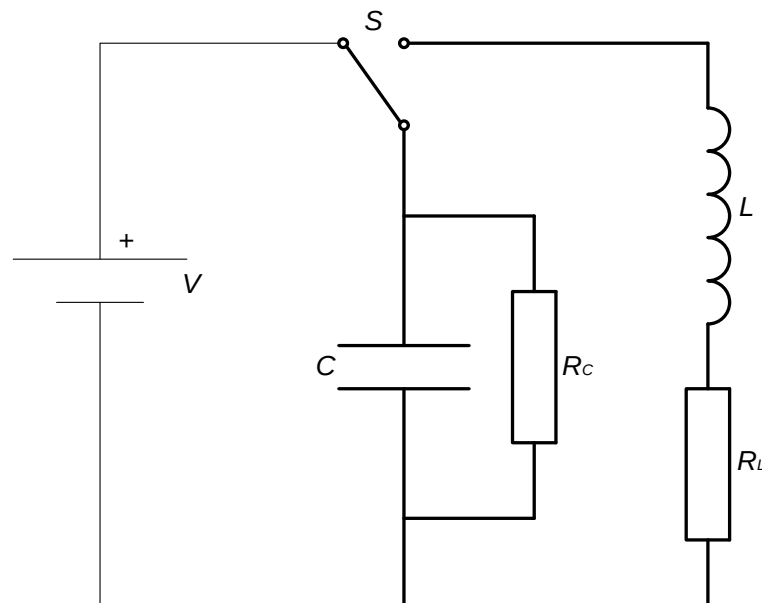


Рис. 2.24. Схема з коливальним контуром

Коливальний контур складається з котушки індуктивності L та конденсатору C . Резистор R_L символізує активний опір дроту, з якого виготовлена котушка, а R_C – активний опір діелектрика, що знаходиться між обкладинками конденсатора.

Коли перемикач S знаходиться у положенні, вказаному на рис. 2.24, конденсатор заряджається від джерела живлення постійного струму V . Після перемикачання перемикача конденсатор почне розряджатися через котушку індуктивності та через неї потече струм розряду конденсатора. Збільшення струму через котушку індуктивності викликає в ній електрорушійну силу, яка діятиме проти струму, перешкоджаючи йому зростати миттєво. Крім того, проходячи через активний опір котушки R_L , струм буде викликати нагрівання цього опору за законом Джоуля-Ленца, призводячи до втрат енергії.

Сила струму в колі буде збільшуватися доти, доки на обкладинках конденсатора залишатиметься заряд. Тоді, коли заряд на обкладинках конденсатора дорівнюватиме нулю, сила струму в колі буде максимальною, і відтоді почне зменшуватися. Зменшення струму в індуктивності призводить до виникнення електрорушійної сили, яка намагатиметься сповільнити це зменшення, тому струм в колі не зменшиться до нуля миттєво, а продовжуватиме протікати, заряджаючи конденсатор уже оберненим зарядом. На обкладинці, зарядженій спочатку додатно, зосереджуватиметься від'ємний заряд, і навпаки. Максимального значення заряд досягне тоді, коли струм через коло спаде до нуля. В цю мить на обкладинках конденсатора утвориться заряд майже рівний початковому, тільки з оберненим знаком. Зменшення заряду зумовлене втратами в активному опорі R_L , що викликають зменшення струму перезарядки. Далі процес повторюється в зворотному напрямку – конденсатор починає розряджатися, викликаючи в колі струм, індуктивність спочатку обмежує швидкість зростання струму, а потім швидкість його зменшення викликає електрорушійну силу, що втримує заряд, і, як наслідок, конденсатор знову заряджається. Таким чином, у коливному контурі виникають електромагнітні коливання.

Якщо втрати струму (на утворення тепла, на випромінювання електромагнітних хвиль, тощо) невеликі, то коливання можуть продовжуватися дуже довго. У ідеальному випадку, коли $R_L = 0$ (ідеальна котушка індуктивності) та $R_C = \infty$ (ідеальний конденсатор) – вічно. В реальних колах активний опір завжди існує, а тому реальні коливання завжди згасають.

Частота коливань, що виникають у коливному контурі називається його власною, або резонансною частотою. Вона визначається за формулою, Гц:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (2.18)$$

де L – індуктивність котушки, Гн;

C – електрична ємність конденсатора, Ф.

Важливою характеристикою коливного контуру є його добротність Q . Ця величина показує, у скільки разів запас енергії коливного контуру більший ніж втрата енергії за один період коливань.

Від добротності коливного контуру залежить кількість вільних коливань, що відбудеться в ньому до повного їхзгасання, і як наслідок – тривалість вільних коливань.

Запас енергії коливного контуру дорівнює енергії зарядженого конденсатора перед початком коливань, Дж:

$$W_C = \frac{C \cdot U^2}{2}, \quad (2.19)$$

де U – напруга на обкладинках конденсатора.

Добротність коливного контуру визначається за формулою:

$$Q = \frac{1}{R_L} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2.20)$$

Коливні контури застосовуються для утворення електричних коливань у генераторах сигналів та для налаштування на ту чи іншу частоту, наприклад у радіоприймачах.

Перш ніж перейти до наступного розділу, пропонується закріпити знання, виконавши декілька лабораторних робіт, а також невелику, але цікаву дослідницьку роботу.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

ПЕРЕВІРКА ПРАВИЛ КІРХГОФА

Мета: Розрахувати напруги та струми складного електричного кола з використанням правил Кірхгофа. Перевірити результати розрахунків експериментально.

Матеріали та обладнання: набірне поле «Школяр», амперметр (3 шт), з'єднувальні провідники, джерело живлення.

ХІД РОБОТИ

1. Підготувати таблицю для занесення результатів розрахунків та вимірювань.

Таблиця 2.2. Результати розрахунків та вимірювань

$U, \text{В}$	$R1, \text{Ом}$	$R2, \text{Ом}$	$R3, \text{Ом}$	Розрахунок			Експеримент		
				$I1, \text{А}$	$I2, \text{А}$	$I3, \text{А}$	$I1, \text{А}$	$I2, \text{А}$	$I3, \text{А}$
5	10	20	39						
8	20	39	10						

2. Підготовка експериментальної установки.

2.1. На набірному полі «Школяр» зібрати електричне коло у відповідності до схеми на рис. 2.2. Опори резисторів: $R1 = 10 \text{ Ом}$, $R2 = 20 \text{ Ом}$, $R3 = 39 \text{ Ом}$.

2.2. Підключити амперметри до зібраного кола.

2.3. Підключити джерело живлення до зібраного кола (рис. 2.25).

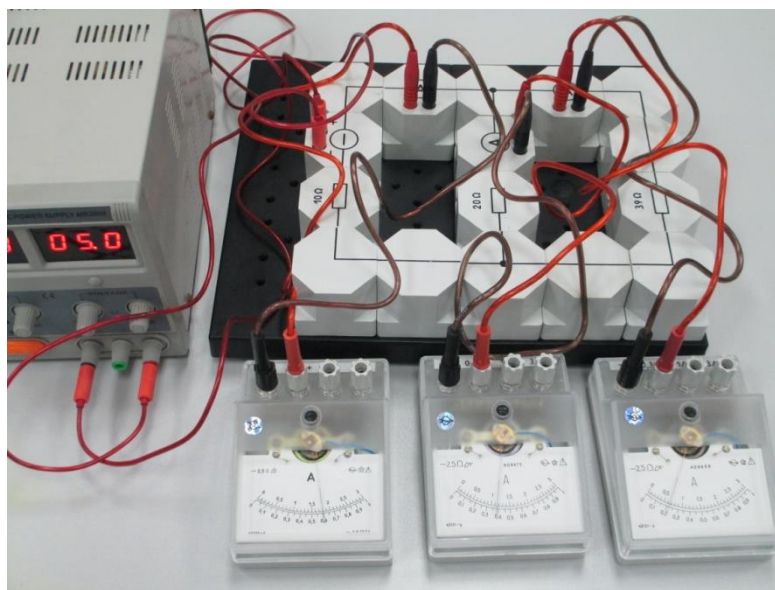


Рис. 2.25. Електричне коло для перевірки правил Кірхгофа

3. Розрахунок струмів у колі.

3.1. Скласти за формулами (2.4), (2.5) та (2.6) систему рівнянь, прийнявши напругу джерела живлення 5 В, а опори резисторів за вказаними номіналами з урахуванням внутрішнього опору амперметрів, який складає 3 Ом. Тобто до кожного номіналу резистора додати по 3 Ом.

3.2. Вирішити отриману систему рівнянь та записати отримані значення струмів до таблиці результатів (графа «Розрахунок»).

4. Проведення вимірювань.

4.1. Увімкнути джерело живлення та виставити напругу 5 В.

4.2. Зафіксувати показання амперметрів та записати їх до таблиці результатів (графа «Експеримент»).

4.3. Вимкнути джерело живлення, поміняти місцями резистори та виконати попередні кроки для значення напруги 8 В. Результати розрахунків та вимірювань занести до таблиці результатів.

5. Аналіз даних.

5.1. Порівняти розрахункові значення сил струму на кожній ділянці зі значеннями, отриманими експериментально.

5.2. Зробити висновки у відповідності до мети роботи.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2

ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛИВАЛЬНОГО КОНТУРУ

Мета: Змоделювати та дослідити коливальний контур у моделюючому комп'ютерному середовищі. Набути первинних навичок роботи з моделюючим комп'ютерним середовищем.

Матеріали та обладнання: ПК з програмою Multisim 11.0.

В даній лабораторній роботі пропонується розрахувати резонансну частоту та добротність трьох коливальних контурів з різними індуктивностями, ємностями, активними опорами та напругами живлення; змоделювати ці контури за допомогою програми Multisim 11.0 та порівняти результати теоретичних розрахунків з результатами отриманими шляхом моделювання.

ХІД РОБОТИ

1. Підготувати таблицю для занесення результатів розрахунків та моделювання.

2. Розрахунки параметрів контурів.

2.1. Розрахувати резонансну частоту f_0 та добротність Q коливальних контурів за таблицею вихідних даних, скориставшись формулами (2.18) та (2.20). Результати розрахунків записати до таблиці результатів.

2.2. За формулою (2.19) розрахувати запас енергії коливальних контурів.

Таблиця 2.3. Результати розрахунків та моделювання

Номер контуру	1	2	3
Результати розрахунків			
Частота f_0 , Гц			
Добротність Q			
Запас енергії W_C , Дж			
Результати моделювання			
Проміжок часу t , с			
Кількість коливань n			
Частота f_0 , Гц			
Кількість коливань m			
Рівень сигналу U_m , В			
Залишкова енергія W_m , Дж			
Енергія на 1 коливання W_1 , Дж			
Добротність Q			

Таблиця 2.4. Вихідні дані

Номер контуру	1	2	3
Індуктивність L , Гн	1	0,2	1
Ємність C , мкФ	1	1	0,1
Опір R_L , Ом	50	20	200
Опір R_C , Ом	10^9	10^9	10^9
Напруга U , В	12	10	15

3. Моделювання коливальних контурів.

3.1. Запустити програму Multisim 11.0.

3.2. Зайти в меню «Place» («Вставити») – «Component» («Компонент»).

3.3. У вікні, що з'явилося обрати розділ «Basic» та сімейство «Capacitor» (конденсатор).

3.4. Обрати конденсатор ємністю 1 μ (1 мкФ = 10^{-6} Ф), натиснути ОК та поставити його у довільне місце робочого поля програми.

3.5. Обрати сімейство «Inductor» (котушка індуктивності).

3.6. Обрати котушку індуктивністю 1Н (1 Гн), натиснути ОК та поставити її поряд з конденсатором.

3.7. Обрати сімейство «Resistor» (резистор, активний опір).

3.8. Обрати резистор опором 50 Ω (Ом), натиснути ОК та поставити його поряд з іншими компонентами.

3.9. Обрати резистор опором 1 Т Ω (1 ТОм = 10^9 Ом).

3.10. Обрати сімейство «Switch» (вимикач, перемикач).

3.11. Обрати перемикач SPDT, натиснути ОК та поставити його поряд з іншими компонентами.

3.12. Обрати розділ «Sources» (джерела).

3.13. Обрати сімейство «Power sources» (джерела живлення).

3.14. Обрати джерело живлення постійного струму DC_Power, натиснути ОК та встановити його поряд з іншими компонентами.

3.15. Обрати «Ground» (заземлення), натиснути ОК та встановити його поряд з іншими компонентами.

3.16. Закрити вікно добору компонентів.

3.17. Виділити всі компоненти крім джерела живлення, заземлення та перемикача, клацнути правою кнопкою миші та обрати команду «90 за годинниковою». Виділені компоненти перевернуться на 90° за годинниковою стрілкою.

3.18. Перемикач повернути на 90° проти годинникової стрілки.

3.19. Розставити компоненти на полі програми у порядку, що відповідає рис. 2.24. Заземлення встановити внизу.

3.20. Клацнути лівою кнопкою миші на нижньому кінці котушки індуктивності, протягнути від нього з'єднання до верхнього кінця резистора R1 (R_L). В такий спосіб здійснюється електричне з'єднання двох компонентів.

3.21. З'єднати усі компоненти відповідно до схеми на рис. 2.24. Якщо необхідно до одного виводу певного компонента підвести більше одного електричного з'єднання, користуватися командою «Вставити» – «Точку з'єднання». Після встановлення точки з'єднання компоненти з'єднуються за пп. 3.20.

3.22. Обрати у правому вертикальному меню осцилограф та встановити його з правого боку від схеми.

3.23. З'єднати канал «А» осцилографа з котушкою індуктивності паралельно. На рисунку 2.26 зображений варіант отриманої схеми.

3.24. Встановити перемикач у положення, що відповідає зарядці конденсатора. Перемикання перемикача здійснюється клацанням на ньому лівою кнопкою миші.

3.25. Відкрити вікно осцилографа подвійним клацанням лівої кнопки миші та встановити його в зручному місці поля програми.

3.26. Натиснути кнопку «Пуск» . Почалося моделювання роботи схеми. Відбувається заряд конденсатора, до коливного контуру надходить запас енергії.

3.27. Перемикнути перемикач у друге положення. На екрані осцилографа має з'явитися сигнал, що відповідає згасаючим коливанням у контурі.

3.28. Через декілька секунд натиснути кнопку «Стоп» поряд з кнопкою «Пуск».

3.29. На екрані осцилографа знайти ділянку з записаним сигналом коливань.

3.30. Встановити на екрані осцилографа зручні для роботи масштаби часу та рівня сигналу.

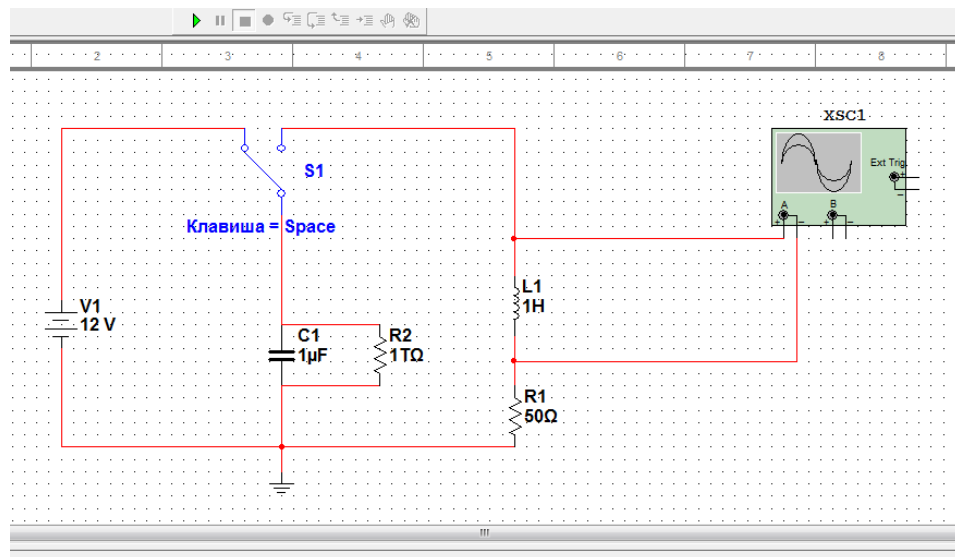


Рис. 2.26. Приклад побудованої схеми

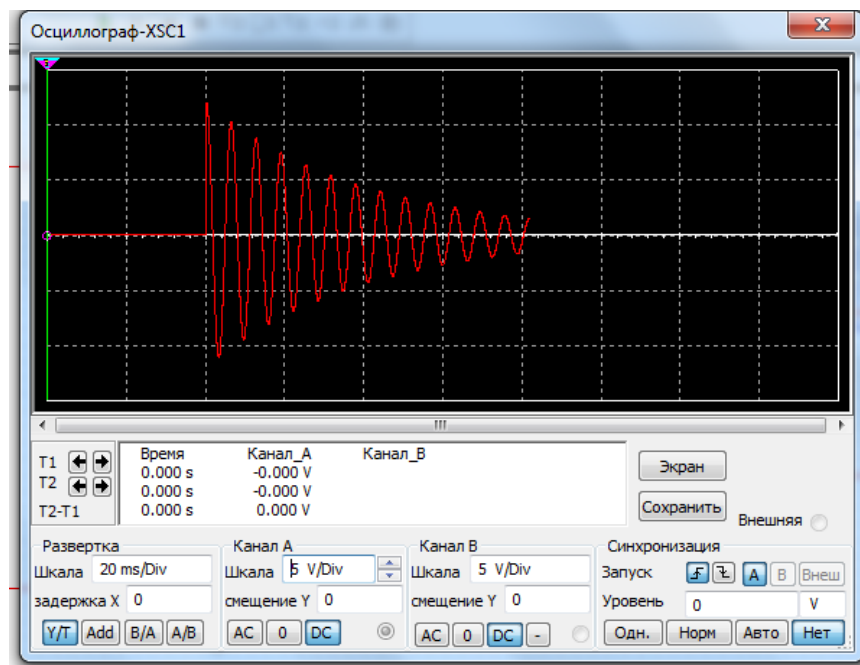


Рис. 2.27. Приклад зареєстрованого осцилографом сигналу коливань

3.31. Обрати на отриманому графіку сигналу деякий проміжок часу, що відповідає не менш як 10 коливанням.

3.32. Якомога точніше визначити проміжок часу та кількість коливань, що відбулися протягом цього проміжку часу. Результати записати до таблиці результатів.

3.33. Відрахувати 4...8 коливань (m) від початку та визначити за графіком сигналу рівень напруги, що відповідає m -му коливанню. Результат записати до таблиці результатів.

3.34. Закрити вікно осцилографа.

3.35. Змінити номінали компонентів на схемі відповідно до таблиці вихідних даних. Для зміни номіналу необхідно подвійним клацанням лівою

кнопкою миші на компоненті відкрити вікно з його характеристиками та в ньому обрати компонент з необхідним номіналом, або ввести необхідний номінал з клавіатури.

3.36. Виконати пп. 3.24...3.35 для усіх коливальних контурів за таблицею вихідних даних. Результати вимірювань заносити до таблиці результатів.

4. Обробка результатів моделювання.

4.1. За результатами моделювання розрахувати резонансну частоту коливальних контурів за формулою:

$$f_0 = \frac{n}{t}. \quad (2.21)$$

4.2. Розрахувати енергію, що залишилася через m коливань за формулою, Дж:

$$W_m = \frac{C \cdot U_m^2}{2}, \quad (2.22)$$

4.3. Розрахувати, енергію, витрачену на одне коливання, Дж:

$$W_1 = \frac{W_C - W_m}{m}. \quad (2.23)$$

4.4. Розрахувати добротність контурів за результатами моделювання за формулою, Дж:

$$Q = \frac{W_C}{W_1}. \quad (2.24)$$

5. Дійти висновків щодо різниці між результатами розрахунків та результатами моделювання.

ДОСЛІДНИЦЬКА РОБОТА **ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ, ЯКУ ВІДДАЄ ГАЛЬВАНІЧНИЙ ЕЛЕМЕНТ** **ЖИВЛЕННЯ У ЗОВНІШНЄ КОЛО, ЗАЛЕЖНО ВІД ОПОРУ** **НАВАНТАЖЕННЯ**

Мета: З'ясувати питання впливу опору навантаження гальванічного елементу на кількість корисної енергії, яку він може віддати протягом всього терміну служби. Набути первинних навичок проведення наукових досліджень.

Матеріали та обладнання: однакові гальванічні елементи живлення (не менше 2); міліамперметри, вольтметри, або мультиметри; резистори з різними номіналами, бажано 10...20 Ом та 150...250 Ом, з'єднувальні провідники, годинник, набірне поле «Школяр» (не обов'язково).

ХІД РОБОТИ

1. Теоретичне дослідження.

1.1. Проаналізувати основні показники, якими характеризується гальванічний елемент:

- ЕРС ε , яка дорівнює напрузі розімкненого кола елемента, В;
- Електрична ємність q – це кількість електрики (заряду), яку елемент віддає під час розрядки, вимірюється зазвичай у А·год, або мА·год;
- Енергоємність E – це кількість електричної енергії, яка міститься у елементі, вимірюється зазвичай у Вт·год. Для ідеального гальванічного елемента, ЕРС якого не змінюється до кінця розряду, енергоємність може бути визначена за формулою:

$$E = q \cdot \varepsilon; \quad (2.25)$$

- Внутрішній (власний) опір елемента, Ом.

1.2. Проаналізувати роботу гальванічного елемента у найпростішому електричному колі (рис. 2.28).

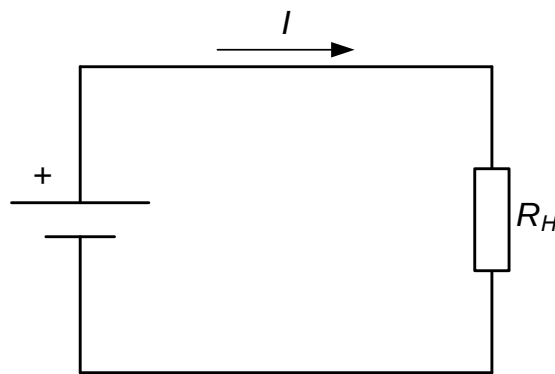


Рис. 2.28. Електричне коло з гальванічним елементом

Припустимо, що гальванічний елемент є ідеальним, тобто його ЕРС має сталі значення аж до повного розряду, а внутрішній опір $R_{\text{вн}}$ відсутній, або нехтовно малий порівняно з опором навантаження R_H .

Електрична потужність гальванічного елемента, яку він віддає у зовнішнє електричне коло визначається за формулою:

$$P = U \cdot I, \quad (2.26)$$

де U – напруга а опорі навантаження В;

I – електричний струм у колі, А.

Напруга на опорі навантаження для ідеального гальванічного елемента дорівнює його ЕРС, тоді:

$$P = \varepsilon \cdot I. \quad (2.27)$$

Електричний струм у колі визначається за формулою:

$$I = \frac{U}{R_H} = \frac{\varepsilon}{R_H}. \quad (2.28)$$

З формул (2.27) та (2.28) випливає, що потужність ідеального гальванічного елемента, як і ЕРС, буде сталою аж до його повного розряду.

Кількість енергії, яку віддасть у зовнішнє коло гальванічний елемент, у такому випадку можна визначити як добуток потужності та часу, за який гальванічний елемент повністю розрядиться:

$$E_{\text{зовн}} = P \cdot t_p, \quad (2.29)$$

де t_p – проміжок часу, протягом якого гальванічний елемент повністю розрядиться, год.

На рис. 2.29 представлена залежність потужності ідеального гальванічного елемента від часу.

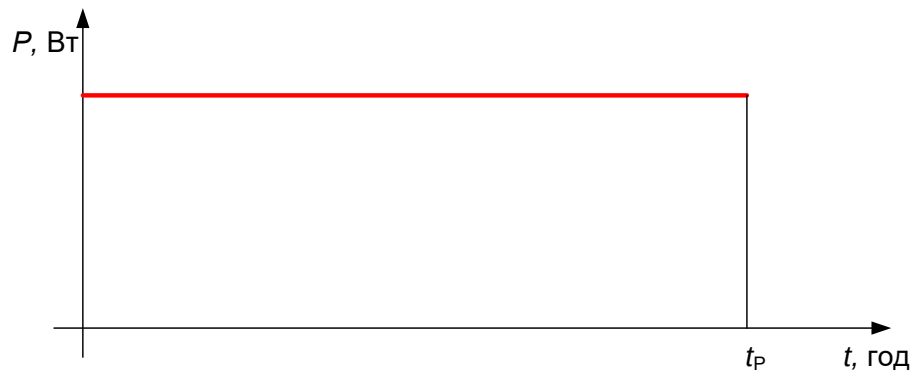


Рис. 2.29. Залежність потужності від часу для ідеального гальванічного елемента.

З рис. 2.29 та формули (2.29) витікає, що кількість енергії, відданої у зовнішнє коло гальванічним елементом, дорівнює площі під графіком залежності потужності від часу з початку розряду до часу t_p , за який він повністю розрядиться.

Реальний гальванічний елемент відрізняється від ідеального наявністю відчутного внутрішнього опору та тим, що по мірі розряду його ЕРС буде знижуватися. Наприклад для гальванічного елемента з номінальною напругою 1,5 В, його ЕРС на початку становить 1,6...1,65 В, а по мірі розряду вона знижується до 0,8...0,9 В. Вважається, що при досягненні таких значень ЕРС енергія гальванічного елемента практично повністю вичерпана.

Електричний струм у колі з реальним гальванічним елементом визначається за формулою:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_H + R_{Bh}}. \quad (2.30)$$

Напруга на опорі навантаження може бути визначена за формулою:

$$U_H = I \cdot R_H \quad (2.31)$$

Потужність на опорі навантаження може бути визначена за формулою:

$$P_H = U_H \cdot I = I^2 \cdot R_H, \quad (2.32)$$

а потужність на внутрішньому опорі гальванічного елемента:

$$P_{B_H} = I^2 \cdot R_{B_H}. \quad (2.33)$$

Потужність на внутрішньому опорі гальванічного елемента під час його роботи буде реалізовуватися у вигляді теплових втрат.

Отже реальний гальванічний елемент працюватиме з певним ККД, який можна визначити за формулою:

$$\eta = \frac{P_H}{P_H + P_{B_H}}. \quad (2.34)$$

На рисунку 2.30 представлена приблизна залежність потужності від часу для реального гальванічного елемента.

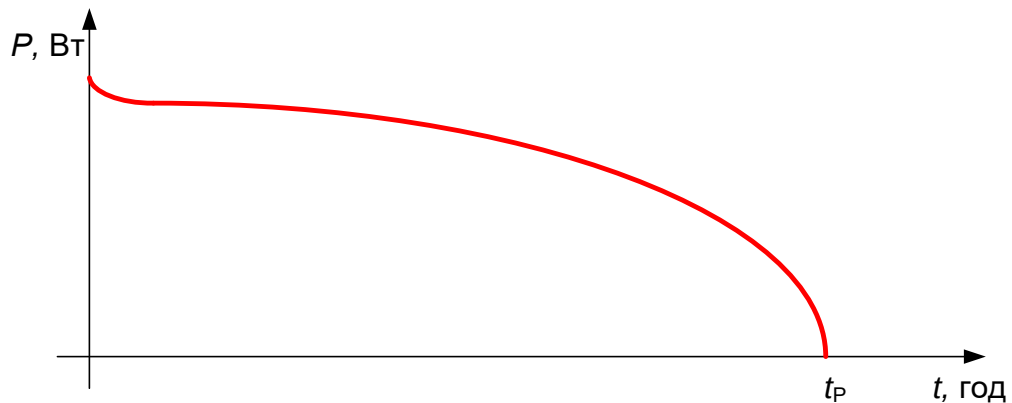


Рис. 2.30 – Приблизна залежність потужності від часу для реального гальванічного елемента.

Для того щоб визначити кількість енергії, відданої у зовнішнє коло, реальним гальванічним елементом необхідно визначити площу під графіком залежності потужності від часу.

Якщо відоме математичне рівняння даної залежності, то кількість енергії визначається як її інтеграл за часом у межах від початку розряду до часу його закінчення t_p .

1.3. Задатися показниками уявного гальванічного елемента. Наприклад, гальванічний елемент з напругою розімкненого кола 1,6 В, електричною ємністю 2 А·год, та внутрішнім опором 2 Ом.

1.4. Для простого електричного кола з уявним гальванічним елементом (рис. 2.28) розрахувати струм за формулою (2.30), корисну потужність P_H (що виділяється на опорі навантаження) та потужність втрат $P_{Вн}$ (що виділяється на внутрішньому опорі елементу) за формулами (2.32) та (2.33) для двох значень опору навантаження, які відрізняються між собою у 10 разів, наприклад 20 та 200 Ом.

1.5. Розрахувати коефіцієнт корисної дії (ККД) гальванічного елемента для обох випадків за формулою (2.34).

1.6. Приймаючи, що ЕРС уявного гальванічного елемента є сталою до кінця його розряду, розрахувати час розряду для обох випадків за формулою:

$$t_p = \frac{q}{I}. \quad (2.35)$$

1.7. Розрахувати для обох випадків кількість енергії, яку віддасть гальванічний елемент у зовнішнє коло за формулою:

$$E_{зовн} = P_H \cdot t. \quad (2.36)$$

1.8. Дійти висновків за результатами теоретичного дослідження відповідно до мети роботи.

2. Проведення експерименту.

2.1. Скласти 2 електричних кола з гальванічними елементами та опорами навантаження 10...20 та 150...250 Ом. При використанні сольових гальванічних елементів опори навантаження краще брати більшими, а при використанні лужних – можна меншими.

2.2. Підключити міліамперметр, або мультиметр у режимі вимірювання струму, послідовно з резистором.



Рис. 2.31. Варіант побудови експерименту

2.3. Підключити вольтметр, або мультиметр у режимі вимірювання напруги до гальванічного елемента (рис. 2.31).

2.4. Підготувати таблицю для занесення результатів вимірювань.

Таблиця 2.5. Форма таблиці результатів

Дата	Поточний час, год.хв	Час розряду, год	Струм I , мА	Напруга U , В	Потужність, мВт
Опір навантаження, Ом _____					
...					
Опір навантаження, Ом _____					
...					

2.5. Зафіксувати дату та поточний час, замкнути кола та зафіксувати значення напруги та сили струму. Дані заносити до таблиці результатів.

2.6. Фіксувати дату, поточний час, значення напруги та струму через деякі проміжки часу. На початку експерименту, в перші 2...3 год, проміжки часу мають бути 10...30 хв, далі поступово можна збільшити їх до декількох годин. **Протягом усього експерименту електричне коло має бути замкненим.**

2.7. При досягненні напруги 0,7 В на одному з гальванічних елементів, розімкнути відповідне електричне коло та продовжити вимірювання параметрів кола з другим гальванічним елементом.

2.7. При досягненні напруги 0,7 В на другому гальванічному елементі, розімкнути друге електричне коло та завершити експеримент.

3. Аналіз отриманих результатів.

3.1. За даними реєстрації дати та поточного часу визначити для кожного рядка час розряду від початку експерименту та занести його значення до таблиці результатів.

3.2. Для кожного рядка визначити потужність гальванічного елемента за формулою (2.25).

3.3. Побудувати графік залежності потужності гальванічного елемента від часу.

3.4. Визначити кількість енергії, відданої гальванічним елементом у зовнішнє коло, шляхом якомога точнішого визначення площі під отриманим графіком (у мВт·год). Площу визначати шляхом розбивання фігури під графіком на прості дрібні геометричні фігури (прямокутники, трикутники, трапеції, тощо).

3.5. Порівняти отримані за різних опорів навантаження значення енергії, яку віддали у зовнішнє коло гальванічні елементи.

3.6. Дійти висновків за результатами досліджень у відповідності до мети роботи.

3.7. Сформулювати рекомендації з практичного застосування результатів досліджень.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

1. Розрахуйте діапазон зміни опору схеми, зображеної на рис. 2.32.

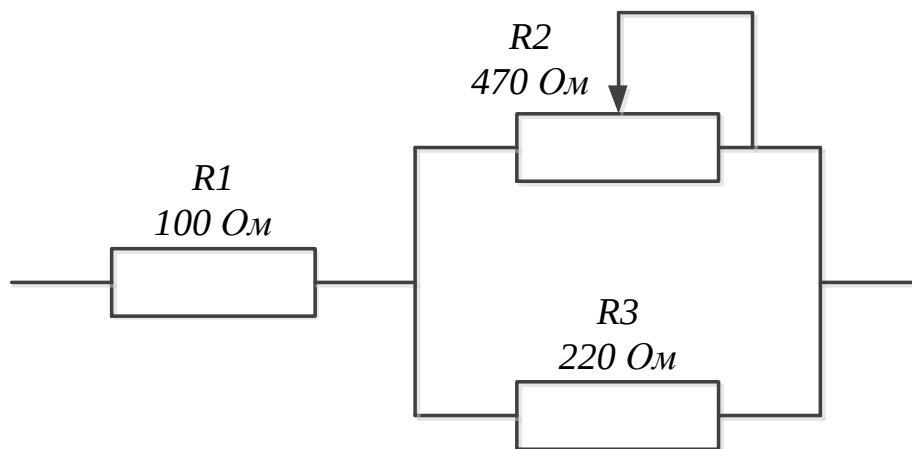


Рис. 2.32. Схема з комбінованим з'єднанням резисторів

2. За результатами розрахунків виявилось, що для правильної роботи електронної схеми необхідний резистор з опором 1,4 кОм. В наявності є резистори опором 2; 2,2; 3,3; 4,3; 4,7 кОм. Підберіть комбінацію резисторів, яка забезпечила б необхідне значення опору з найменшим відхиленням.

3. На рис. 2.33 зображено схему дільника напруги, яка широко застосовується у електронних пристроях. Розрахуйте вихідну напругу дільника напруги.

Спроектуйте регульований дільник напруги для отримання її значень в межах 1...3 В при вхідній напрузі $U_{BX} = 5\text{В}$.

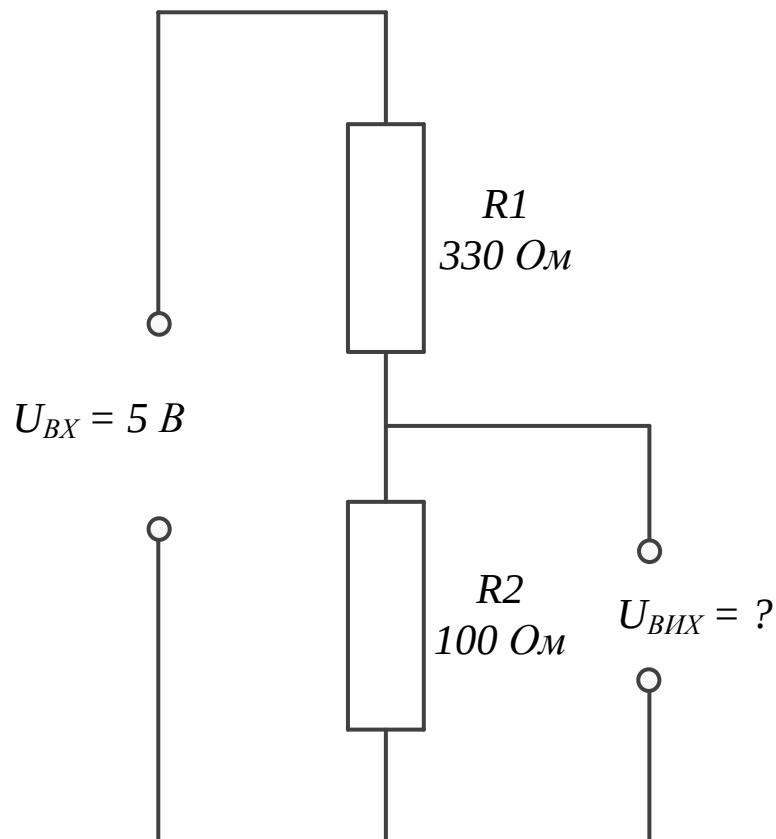


Рис. 2.33. Схема дільника напруги

4. Є два конденсатори: постійної ємності 15 пФ , та змінної – $10\dots60\text{ пФ}$. Розрахуйте діапазон зміни результуючої ємності при паралельному та послідовному з'єднанні конденсаторів.

5. Побудуйте графік залежності реактивного опору котушки індуктивності 20 мГн від частоти звукового діапазону ($20\dots20000\text{ Гц}$).

6. Котушка індуктивності має індуктивність 33 мГн , а дріт, яким вона намотана, має опір $300\ \Omega$. Розрахуйте повний опір котушки при частоті змінної напруги 1 кГц .

7. Розрахуйте значення індуктивності котушки коливного контуру для резонансної частоти 1 кГц , якщо ємність конденсатора дорівнює 1 мкФ .

РОЗДІЛ 3. ДІОДИ

3.1. Різновиди діодів. Діодом називається електронний прилад з двома електродами, що пропускає електричний струм лише у одному напрямі. Застосовуються діоди в радіотехніці, електроніці та електротехніці здебільшого для випрямлення змінного струму та детектування сигналів.

За принципом дії діоди можуть бути електровакуумними, газорозрядними та напівпровідниковими.

Електровакуумний діод (рис. 3.1) являє собою вакуумну двохелектродну електронну лампу. У електровакуумного діода катод нагрівається до температур, при яких виникає термоелектронна емісія. Розжарювання катода може відбуватися шляхом безпосереднього пропускання через нього струму від окремого джерела живлення (рис. 3.1 а), або використанням окремої спіралі розжарювання (рис. 3.1 б).

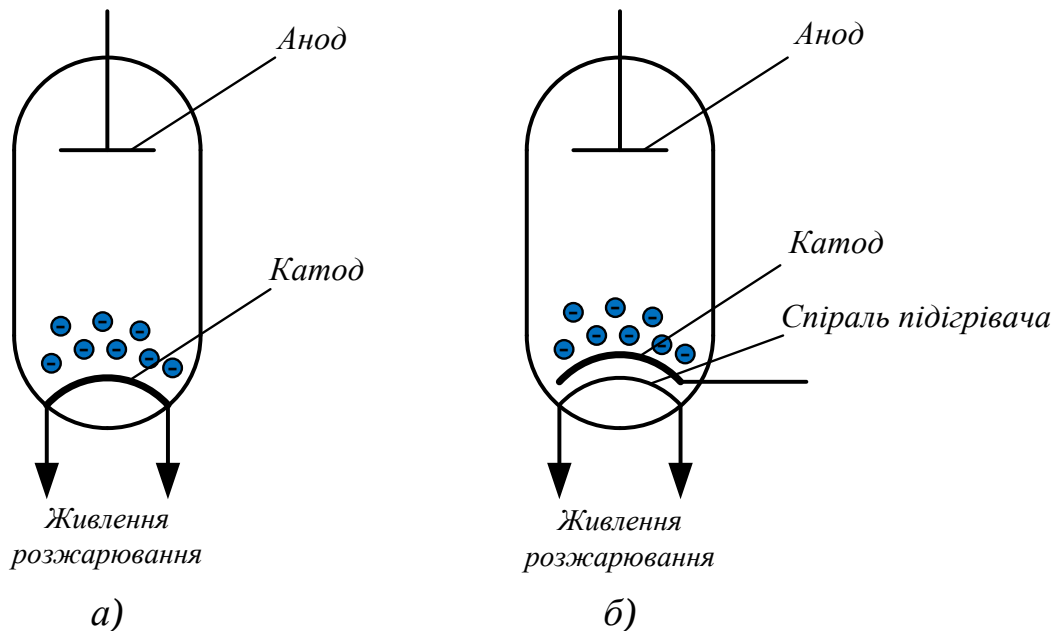


Рис. 3.1. Електровакуумний діод: а – з катодом прямого розжарювання; б – з катодом непрямого розжарювання

При подаванні на анод додатної по відношенню до катода напруги (рис. 3.2 а) частина електронів спрямовується до анода, внаслідок чого виникає електричний струм. Якщо до анода прикласти від'ємну по відношенню до катода напругу (рис. 3.2 б), то електрони повертаються до катода. Струм у такому випадку не виникає, оскільки на аноді електронна емісія не відбувається. Таким чином електровакуумний діод проводить електричний струм лише в одному напрямі.

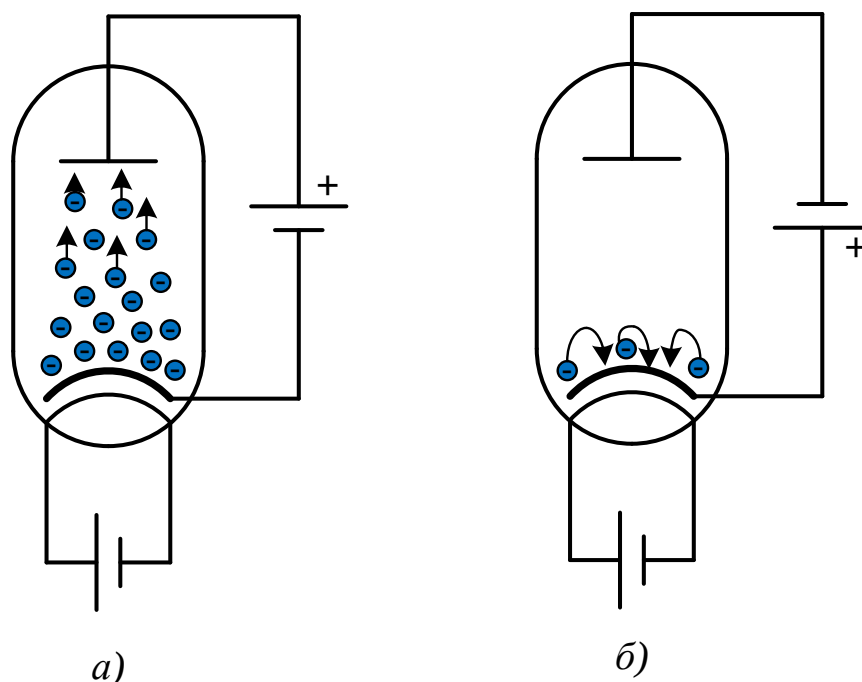


Рис. 3.2. Пояснення щодо односторонньої провідності електровакуумного діода

Газорозрядний діод відрізняється від електровакуумного тим, що його колба наповнена інертним газом а також деякими конструктивними особливостями. При подаванні на анод газорозрядного діода додатної по відношенню до катода напруги електрони, емітовані катодом прискорюються і іонізують газ, в результаті чого між катодом і анодом виникає газовий розряд, плазма якого проводить електричний струм. При подаванні на анод від'ємної по відношенню до катоду напруги, емітовані електрони повертаються до катоду і газовий розряд не виникає, оскільки на аноді електронна емісія не відбувається.

3.2. Напівпровідниковий діод – це напівпровідниковий прилад з одним випрямним електричним переходом і двома зовнішніми виводами. Принцип дії напівпровідникового діода ґрунтується на явищі р-п переходу, що являє собою межу між двома напівпровідниками різного типу провідності. Такий перехідний контакт не можна утворити простим дотиком пластин провідностей типів р і п, тому що він буде забруднений оксидами, повітрям, іншими сполуками. Електронно-дірковий перехід отримують дифузією або вплавленням відповідних домішок у монокристал напівпровідника, а також вирощуванням р-п переходу з розплаву напівпровідника.

Властивості р-п переходу суттєво залежать від його конструкції, методу отримання, співвідношення концентрації донорних та акцепторних домішок.

Розглянемо властивості різкого р-п переходу (тобто такого, в якому тип домішки змінюється не повільно, а різко) з однаковими концентраціями донорних та акцепторних домішок (рис. 3.3).

У напівпровіднику p-типу основними рухомими носіями електричного заряду є електрони, у напівпровіднику r-типу – дірки. Рухомі носії заряду, що знаходяться поблизу р-п переходу, дифундують через перехід і взаємно рекомбінують, унаслідок чого в р-п переході утворюється збіднений вільними носіями заряду подвійний шар просторових зарядів. Ширина його становить десяті частини мікрметра.

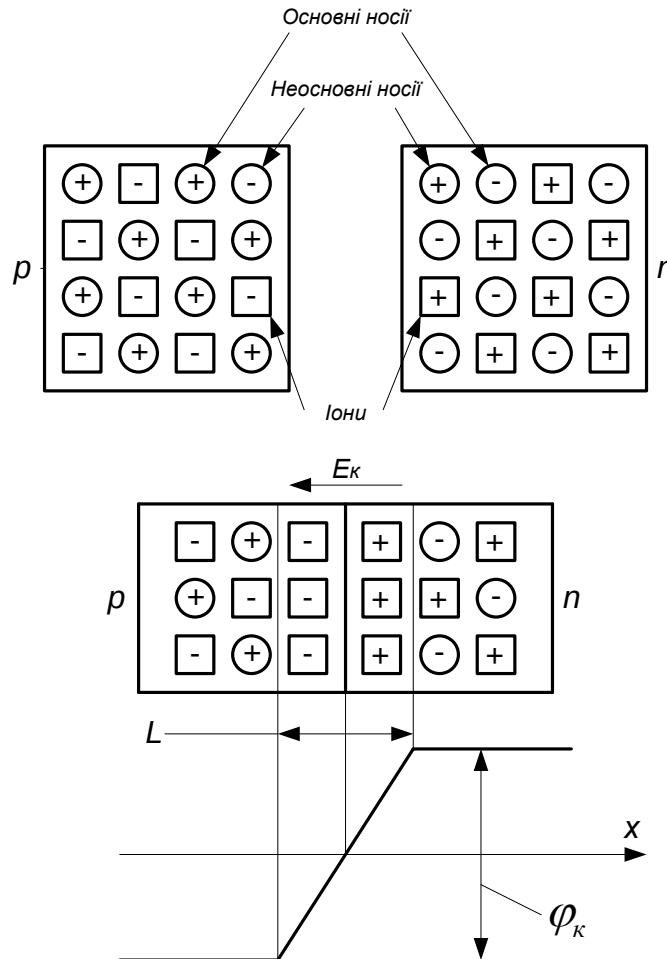


Рис. 3.3. Утворення потенціального бар'єру в електронно-дірковому переході

У напівпровіднику r-типу він утворюється негативними іонами акцепторної домішки, які залишилися після дифузії в n-область і рекомбінації дірок вільних носіїв, а в напівпровіднику n-типу – позитивними іонами донорної домішки. Електричне поле E_k їх просторових зарядів перешкоджає подальшій дифузії, оскільки на р-п переході виникає потенціальний бар'єр φ_k у декілька десятих вольт, що дорівнює контактній різниці потенціалів.

Це поле спрямоване від позитивних іонів-донорів до негативних іонів-акцепторів, воно гальмує рух основних носіїв заряду і прискорює рух неосновних. Тепер будь який електрон, що перейшов з електронної структури в діркову, потрапляє в електричне поле, яке намагається повернути його назад в електронну структуру n-типу. Аналогічно дірки відштовхуються в структуру r-типу. Завдяки наявності збідненого вільними носіями шару завширшки L , електронна провідність р-п переходу зменшується відносно провідності останньої частини напівпровідника, а наявність просторових

зарядів й електричного поля робить його провідність залежною від напрямку зовнішнього електричного поля.

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

Якщо до зрівноваженого електронно-діркового переходу прикласти зовнішнє електричне поле, то через нього проходитиме електричний струм, величина якого залежить від напрямку прикладеного поля (рис. 3.4).

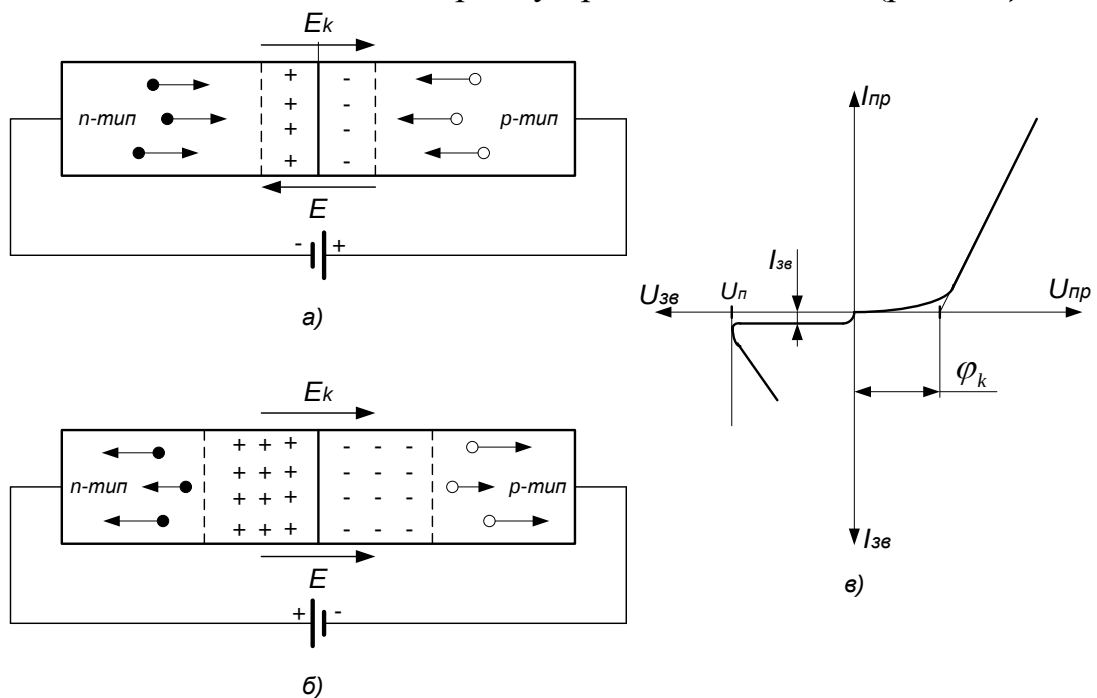


Рис. 3.4. Схематичне зображення прямого (а) та зворотного (б) включення електронно-діркового переходу до зовнішнього джерела живлення та його вольт-амперна характеристика (в)

Під дією електричного поля, спрямованого проти потенціального бар'єра (рис. 3.4 а), останній зменшується, а потім, після досягнення прикладеної до переходу напруги величиною φ_k , зникає. Величину потенційного бар'єру φ_k називають також прямим падінням напруги діода U_{III} . Основні носії електричних зарядів рухаються в напрямку р-п переходу, його ширина і опір спадають. Ті носії, які пройшли через р-п перехід, стають неосновними і рекомбінують з основними носіями напівпровідника, до якого вони дифундували. Поповнення основних носіїв, що рекомбінували, забезпечується із зовнішнього кола: через р-п перехід проходить прямий дифузійний струм. Підвищення зовнішньої напруги призводить до

експоненціального зростання прямого струму, тому що концентрація основних носіїв в обох напівпровідниках досить значна.

Якщо зовнішнє електричне поле збігається з полем потенціального бар'єра (рис. 3.4 б), то із підвищенням його напруженості потенціальний бар'єр збільшується, ширина збідненої вільними носіями зони зростає, опір р-п переходу підвищується. Кількість основних носіїв, здатних подолати дію такого поля, зменшується, струм дифузії основних носіїв спадає. Основні носії під дією зовнішнього поля відтягуються від приконтактних шарів у глибину напівпровідника. Для неосновних носіїв потенціальний бар'єр в р-п переході відсутній, і вони будуть втягуватися полем в р-п перехід. Таке вмикання р-п переходу називається зворотнім. При ньому основний дрейфовий струм, що утворюється неосновними носіями має мале значення, яке практично не залежить від зовнішньої напруги, але істотно залежить від температури.

Таким чином основною властивістю р-п переходу є його переважно одnobічна провідність і нелінійність ВАХ (рис. 3.4 в).

Практично одnobічну провідність р-п переходу покладено в основу побудови напівпровідникових діодів. Різні типи напівпровідникових діодів різняться основним матеріалом, з якого їх виготовлено, технологією виробництва та конструкцією, що зумовлює широку різноманітність їхніх електричних параметрів та умов застосування.

За основним матеріалом найпоширенішими є германієві та кремнієві діоди; за конструкцією – точкові та площинні, за умовами застосування – універсальні, високочастотні, імпульсні, випрямні. Крім того використовують спеціальні діоди, побудовані на параметричних властивостях р-п переходу, явищі електричного пробоя, тунельному ефекті, тощо.

У сучасних електронних приладах здебільшого використовуються напівпровідникові діоди.

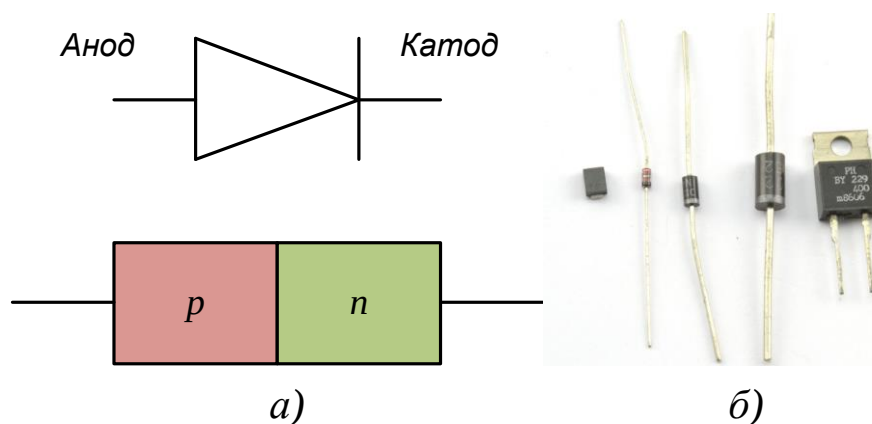


Рис. 3.5. Спрощена структура з загальним умовним позначенням (а) та зовнішній вигляд (б) напівпровідникових діодів

Зовнішній вивід напівпровідникового діода з'єднаний з напівпровідником р-типу називається анодом, а з напівпровідником п-типу – катодом (рис. 3.5)

На рис. 3.6 подано класифікацію основних типів напівпровідникових діодів та їх умовні позначення на кресленнях електронних схем.

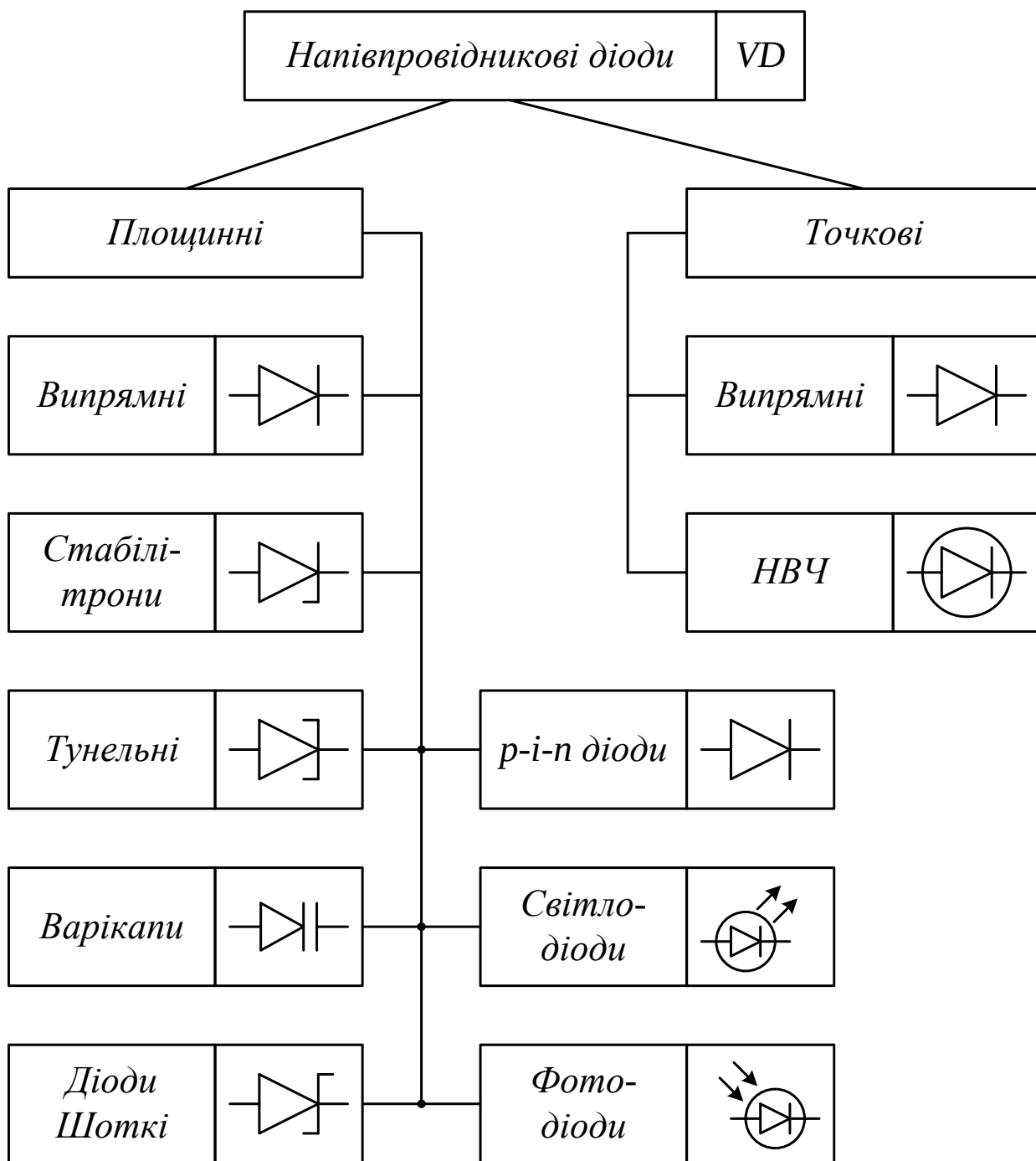


Рис. 3.6. Класифікація напівпровідникових діодів

3.3. Площинні та точкові діоди. Площинними називають напівпровідникові діоди, у яких р-п перехід утворюється двома напівпровідниками з різними типами провідності, або шаром металу з шаром

напівпровідника. Площа переходу залежно від типу діодів може перебувати в межах від сотих часток мм^2 до десятків см^2 . Площинні діоди виготовляються методами сплавлення двох напівпровідників з різними типами провідності, або методами дифузії домішок.

Випрямні діоди призначені для перетворення змінного струму в пульсуючий.

Стабілітроном (діодом Зенера) називається напівпровідниковий діод, що працює при зворотному зміщенні в режимі пробію. До настання пробію через стабілітрон протікають незначні струми витoku, а його опір досить великий. При настанні пробію струм через стабілітрон різко зростає, а опір спадає до величини, що може складати для різних приладів від часток Ома, до сотень Ом. Тому у режимі пробію напруга на стабілітроні підтримується з заданою точністю у широкому діапазоні зворотних струмів. Ця напруга називається напругою стабілізації стабілітрона – $U_{\text{СТ}}$.

Приклад вольт-амперної характеристики (ВАХ) стабілітрона приведено на рис. 3.7. Також на рис. 3.7 вказана полярність підключення стабілітрону для обох гілок ВАХ.

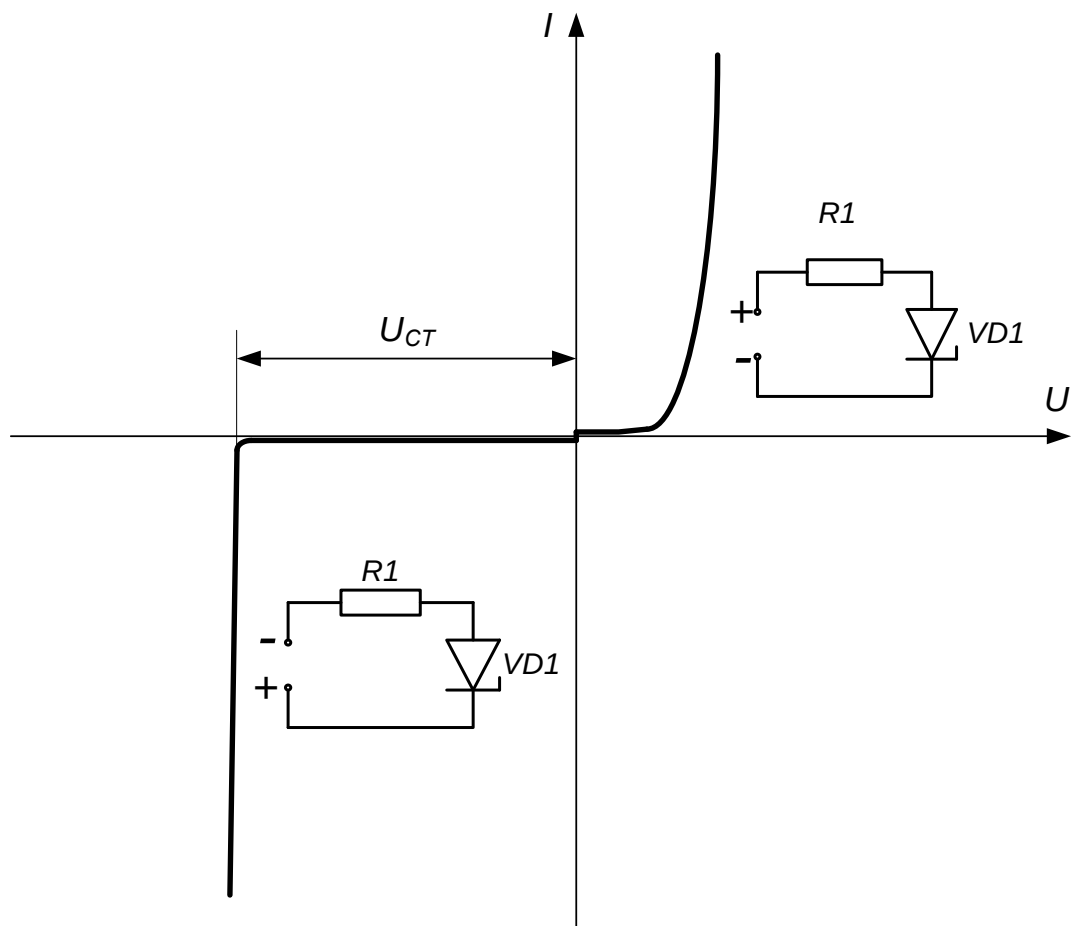


Рис. 3.7. Вольт-амперна характеристика стабілітрона

З рисунку 3.7 видно, що при подачі напруги у прямому напрямку ВАХ стабілітрона ідентична ВАХ звичайного напівпровідникового діода. При

подачі напруги у зворотному напрямі по мірі її збільшення струм спочатку незначний і дорівнює струму витоку, а при досягненні напруги пробою різко зростає. При цьому після настання пробою падіння напруги на стабілітроні практично не змінюється.

Таким чином, стабілітрони – це різновид діодів, що в режимі прямих напруг, проводять струм як звичайні діоди, а при зворотній напрузі – струм різко зростає тільки в області напруг близьких до пробою («зенерівська напруга»). Прилад отримав назву на честь імені його першовідкривача Кларенса Зенера.

Основне призначення стабілітронів – це стабілізація напруги. Серійні стабілітрони виготовляються на напруги від 1,8 до 400 В.

Тунельним діодом називається діод, в якому завдяки використанню високої концентрації домішок виникає дуже вузький бар'єр і спостерігається тунельний механізм перенесення зарядів через р-п перехід. Вольт-амперна характеристика тунельного діода (рис. 3.8) має область від'ємного диференціального опору, в якій додатному приросту напруги відповідає від'ємний приріст струму.

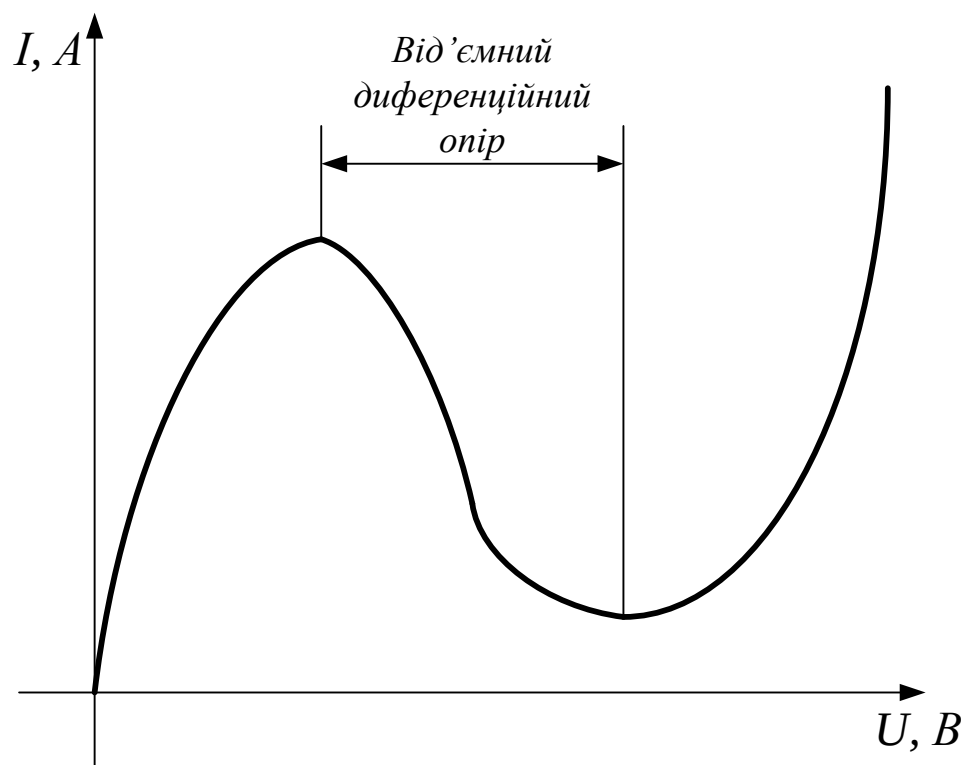


Рис. 3.8. Вольт-амперна характеристика тунельного діода

В тунельному діоді проходження електронів через область бар'єру спостерігається при зворотному зміщенні і навіть при невеликому зміщенні у провідному напрямі, при якому має місце максимум струму. Подальше збільшення напруги викликає таке зменшення електричного поля у бар'єрі що проходження електронів через його область припиняється. Одночасно в міру зростання напруги зростає «нормальний» струм діода, зміщеного у

прямому напрямі. Назва «тунельний» витікає з більш детального розгляду складних явищ у переході, який передбачає, що електрони не можуть пройти над потенційним бар'єром в нормальний спосіб, проходять під бар'єром, ніби через тунель.

Тунельні діоди називають також діодами Єсакі. Вони використовуються в електронних пристроях в якості елементів з від'ємним диференціальним опором, наприклад для генерації високочастотних сигналів.

Варикап, або варакторний діод – це різновид площинного діода з р-п переходом, виготовленим за спеціальною технологією, в якому має місце нелінійна залежність ємності зачищеного переходу від прикладеної до діода зворотної напруги (рис. 3.9). Ємність діода залежить від ширини запираючого шару, який в даному випадку можна трактувати як діелектрик конденсатора. Обкладинками такого конденсатора слугують області напівпровідника, що прилягають до запираючого шару. Зі зростанням зворотної напруги ємність діода зменшується. Для типового варикапа в інтервалі зворотних напруг від десятків вольт до нуля ємність змінюється від 10 до 200 пФ.

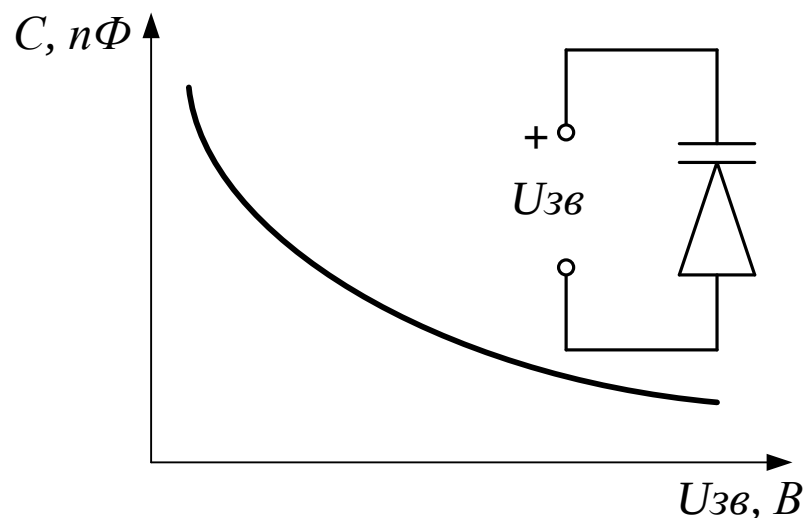


Рис. 3.9. Характеристика зміни ємності варикапу залежно від прикладеної зворотної напруги

Варикапи широко застосовуються як заміна дорогим та не досить зручним конденсаторам змінної ємності для налаштування резонансних контурів у радіоприймачах та передавачах. На рисунку 3.10 показана схема увімкнення варикапу для налаштування коливного контуру на ту чи іншу частоту.

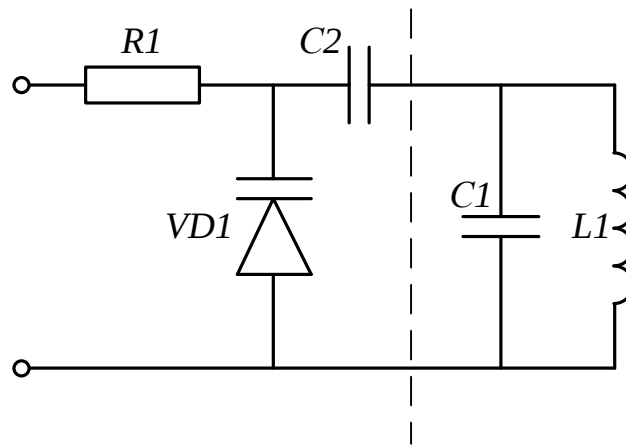


Рис. 3.10. Принцип налаштування резонансного контуру за допомогою варикапу

Керуючий сигнал у вигляді зворотної напруги підводиться до варикапу через резистор R . Зміна ємності діода, що залежить від зміни рівня керуючого сигналу, призводить до зміни результуючої ємності коливного контуру, а відповідно й до зміни його резонансної частоти.

p-i-n діод – це діод, що містить шар власного напівпровідника i між областями p - та n -типу (рис. 3.11).

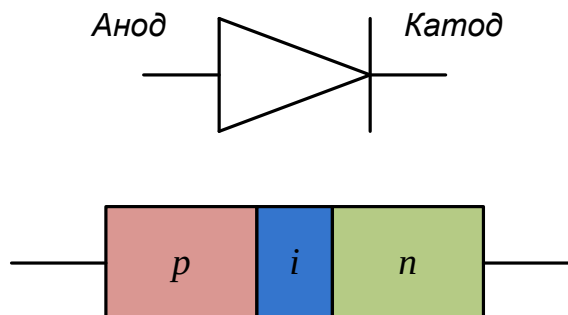


Рис. 3.11. Спрощена структура p - i - n діода

Додатне зміщення напівпровідника p -типу відносно напівпровідника n -типу призводить до переміщення електронів з n -області і одночасно дірок з p -області у власний напівпровідник. Концентрація носіїв заряду у власному напівпровіднику збільшується і опір цієї області зменшується. При зворотному зміщенні через високий опір власного напівпровідника і велику ширину переходу опір діода великий.

p - i - n діоди мають значно більш високу швидкість перемикання порівняно зі звичайними діодами, тому вони широко застосовуються у техніці надвисоких частот.

Діод Шотткі – це площинний напівпровідниковий діод, в якому замість звичайного p - n переходу застосовується перехід метал-напівпровідник (рис. 3.12). Провідність такого діода ґрунтується на

протіканні основних носіїв заряду, якими при використанні напівпровідника p-типу є електрони.

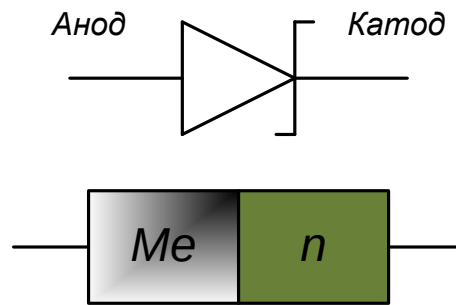


Рис. 3.12. Спрощена структура діода Шотткі

На рисунку 3.13 зображено вольт-амперні характеристики діода Шотткі та «звичайного» кремнієвого площинного діода з p-n переходом.

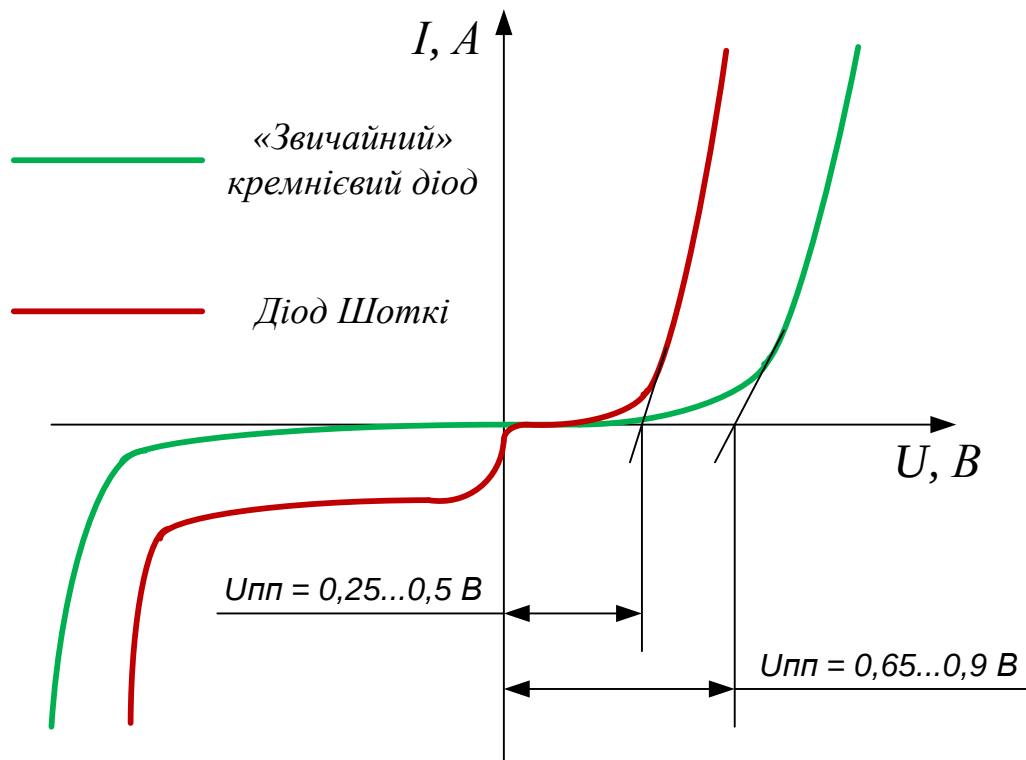


Рис. 3.13. Вольт-амперна характеристика діода Шотткі у порівнянні зі «звичайним» діодом

У порівнянні зі звичайним діодом, діод Шотткі має менше пряме падіння напруги, більший зворотній струм і меншу зворотну пробивну напругу.

Діоди Шотткі мають малу інерційність, що робить їх придатними для роботи в діапазонах високих і надвисоких частот аж до 2000 ГГц. Мала інерційність є наслідком того, що накопичений в переході метал-

напівпровідник заряд дуже малий, порівняно із зарядом, що накопичується у площинному діоді з р-п переходом в режимі провідності.

Світлодіод, або електролюмінесцентний діод – це напівпровідниковий діод, який випромінює світло при пропусканні через нього струму. Інтенсивність світіння залежить від струму, причому ця залежність є лінійною у великому діапазоні змін струму. Напівпровідникові світлодіоди можуть випромінювати інфрачервоне, видиме та ультрафіолетове світло і можуть застосовуватися для індикації, освітлення а також для роботи в складі інших оптоелектронних приладів. Світлодіоди, на відміну від інших джерел світла, відрізняються високою надійністю та тривалим терміном служби, але за умови відсутності значних перепадів напруги живлення.

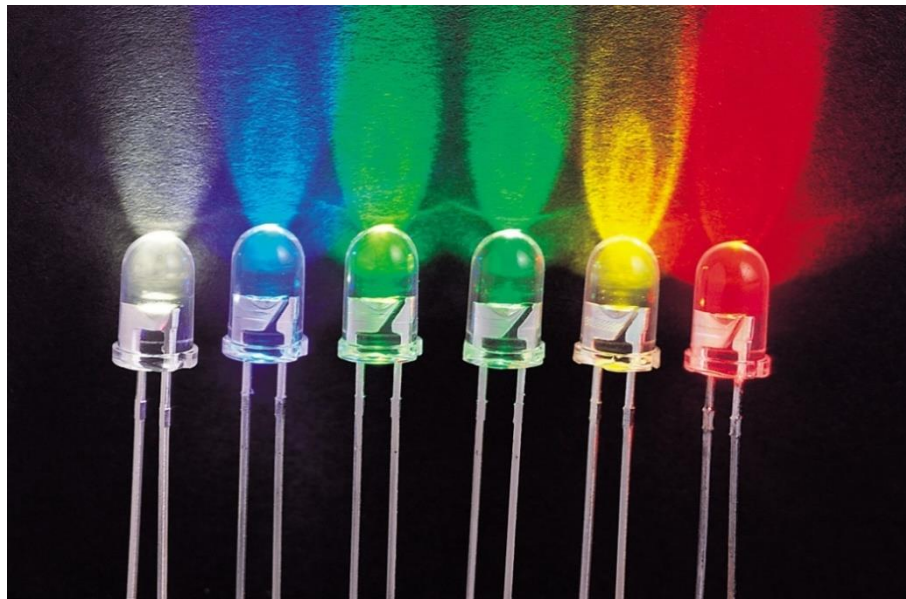


Рис. 3.14. Сучасні світлодіоди

Світлодіоди мають наступні переваги у порівнянні з іншими електричними джерелами світла:

- висока світлова віддача до 146 Лм/Вт, що зумовлює значно менші витрати електроенергії у порівнянні з лампами розжарювання та люмінесцентними лампами;
- висока механічна міцність та вібростійкість;
- довготривалий термін служби – до 100000 год, що при роботі 8 год на добу складає 34 роки;
- кількість циклів увімкнення – вимкнення практично не впливає на ресурс, на відміну від ламп розжарювання та люмінесцентних ламп;
- можливість створення освітлювальних приладів у досить широкому діапазоні спектрів;
- спектральна чистота, що досягається не використанням фільтрів, а принципом дії самого світлодіоду;
- мала інерційність на відміну від ламп розжарювання та люмінесцентних ламп, які після увімкнення ще деякий час виходять на номінальний режим освітлення;

- можливість виготовлення світлодіодів з різними кутами розсіювання світла – від 15° до 180° ;
- низька собівартість індикаторних світлодіодів;
- безпека, зумовлена низькими напругами живлення;
- мала чутливість до низьких температур;
- екологічність, зумовлена відсутністю ртуті, фосфору та ультрафіолетового випромінювання на відміну від люмінесцентних ламп.

Фотодіод – це світлочутливий напівпровідниковий діод, зазвичай з одним р-п переходом, в якому використовується залежність його ВАХ від освітленості.

При потраплянні фотону випромінювання з достатньою енергією на фотодіод, у ньому відбувається внутрішній фотоефект, який полягає у генерації пари носіїв заряду. Дірка рухається до анода, а електрон – до катода, в результаті чого виникає фотострум.

Фотодіоди можуть працювати в двох режимах: генераторному і фотодіодному. В генераторному режимі фотодіоди працюють без зовнішньої напруги, а фотострум, який вони генерують під дією світла використовується напряду для керування тією чи іншою електронною схемою.

При роботі у фотодіодному режимі, під дією світла настає зміна опору діода, і як наслідок зміна струму, що протікає у зовнішньому колі. Для роботи у фотодіодному режимі необхідна зовнішня зворотна напруга, прикладена до діода.

Фотодіоди використовуються у різноманітних електронних пристроях, наприклад у програвачах компакт-дисків, детекторах диму, приймачах для пультів дистанційного керування і у приладах для точного вимірювання інтенсивності світла.



Рис. 3.15. Зовнішній вигляд фотодіодів

Точкові діоди. Точковий діод – це напівпровідниковий діод, в якому замість плоскої конструкції використовується конструкція, яка складається з пластини напівпровідника n або p типу, що утворює один електрод і металевого електрода у вигляді вістря з домішками напівпровідника протилежного типу провідності. Вістря сплавляється з пластиною напівпровідника зазвичай шляхом пропускання короткого імпульсу струму у декілька Ампер. В результаті цього утворюється мікроперехід. Точкові діоди мають менше пряме падіння напруги та більший зворотний струм порівняно зі звичайними площинними діодами. Вони мають малу міжелектродну ємність і можуть використовуватися для випрямлення малих струмів високої та надвисокої частоти.

Точкові діоди мають суттєві недоліки: значний розкид параметрів, невисока механічна міцність, невисокий максимальний струм та неможливість мікромініатюризації. Через це у сучасній електроніці вони практично не використовуються. Для застосувань в області надвисоких частот їх витіснили більш технологічні діоди Шотткі та $p-i-n$ діоди, що виготовляються за площинною технологією.

ПРАКТИЧНА РОБОТА

МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОРОЗРЯДНОГО ДІОДУ

Мета: Виготовити і випробувати модель газорозрядного діоду.

Матеріали та обладнання: свічка, мідний або сталевий дріт діаметром 0,5...1 мм, ізоляційна стрічка, з'єднувальні провідники з затисками типу «крокодил», мультиметр.

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися зі схемою та принципом роботи моделі газорозрядного діоду.

1.1. Схема моделі газорозрядного діоду.

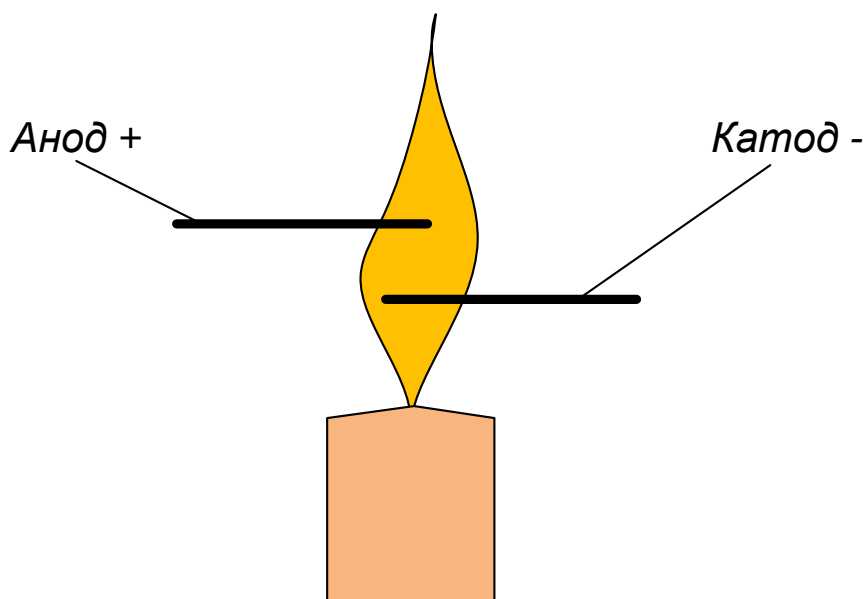


Рис. 3.16. Схема моделі газорозрядного діоду

1.2. Принцип роботи моделі газорозрядного діоду.

Іонізованим провідним середовищем запропонованої моделі виступає полум'я свічки. Два електроди, анод і катод (рис. 3.16), розміщуються у ньому таким чином, щоб катод перебував у більш гарячій області полум'я з температурою, достатньою для термоелектронної емісії, а анод – у менш гарячій, з температурою, недостатньою для термоелектронної емісії.

Свого часу радіоаматорами були проведені дослідження, які довели можливість застосування полум'яного діоду в якості детектора для радіоприймача.

2. Виготовлення моделі.

2.1. З мідного або сталевого дроту виготовити електроди довжиною 8...10 см. Ділянка електродів, яка занурюється у полум'я може бути як прямою, так і спіральною. Приклад виготовлення електродів показаний на рис. 3.17.

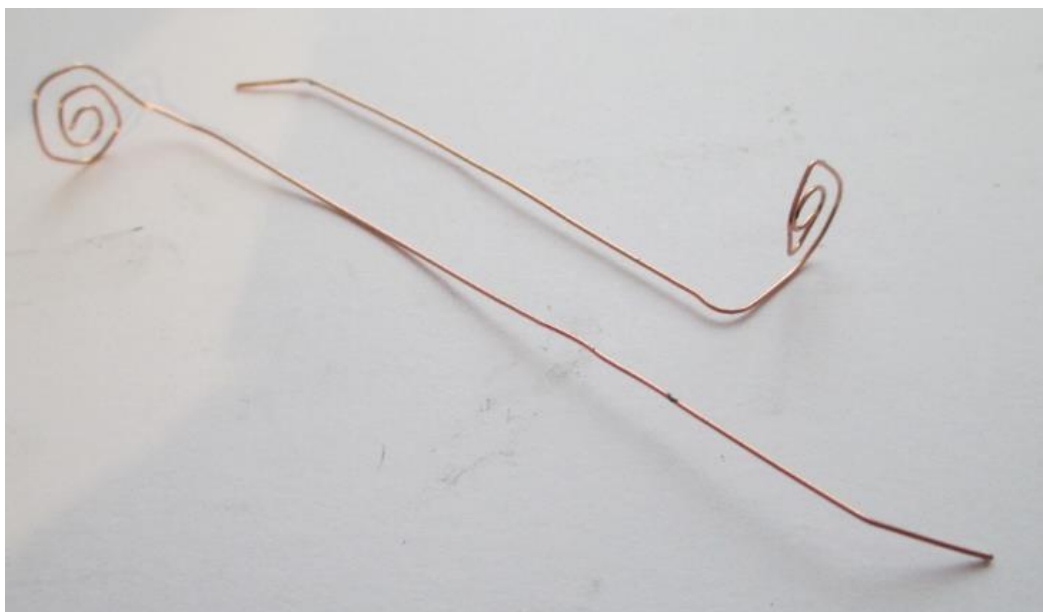


Рис. 3.17. Приклад виготовлення електродів

2.2. За допомогою ізоляційної стрічки прикріпити електроди до свічки як показано на рис. 3.18. За такого закріплення електродів забезпечується можливість регулювання їх положення.

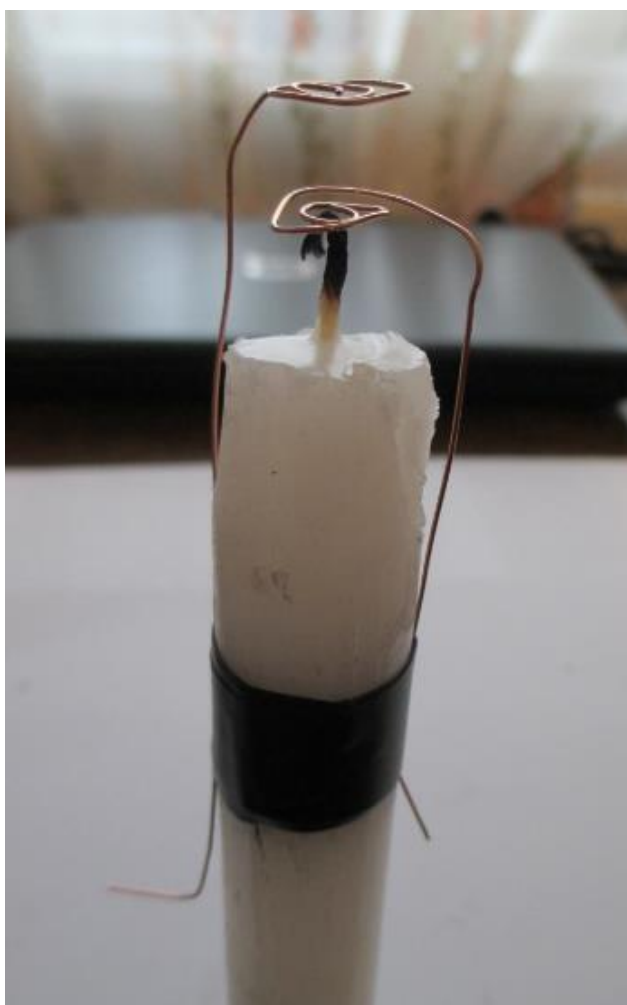


Рис. 3.18. Модель газорозрядного діоду

3. Випробування моделі.

3.1. За допомогою з'єднувальних проводів під'єднати до електродів мультиметр. Нижній електрод (катод) з'єднати з гніздом «COM» мультиметру, а верхній (анод) – з гніздом «VΩ». Мультиметр увімкнути на вимірювання опору на діапазон 20M. При такому підключенні мультиметр буде вимірювати опір у МОм при подачі на анод додатної, а на катод від'ємної напруги (рис. 3.19).



Рис. 3.19. Випробування моделі газорозрядного діода

3.2. Увімкнути мультиметр і запалити свічку.

3.3. Відрегулювати положення електродів у полум'ї таким чином, щоб нижній електрод (катод) розжарювався до червоного кольору, а верхній (анод) – ні.

3.4. Додатково відрегулювати положення електродів так, щоб досягти мінімального опору.

3.5. Змінити полярність підключення електродів до мультиметру на протилежну. Якщо положення електродів налаштоване правильно, то опір при такій полярності підключення має бути значно більшим ніж при початковій полярності.

3.6. Якщо очікуваний результат не досягнуто – змінити полярність підключення мультиметру на початкову і повторити кроки 3.3 – 3.5.

3.7. Взяти будь який напівпровідниковий діод, наприклад 1N4007, і за допомогою мультиметра у тому ж діапазоні виміряти опір при прямій та зворотній полярності підключення.

4. Зробити висновки щодо принципу дії і якості створеної моделі газорозрядного діоду.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1 **ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА З** **НАПІВПРОВІДНИКОВИМ ДІОДОМ**

Мета: дослідити провідні властивості напівпровідникового діода, побудувати вольт-амперну характеристику діода.

Обладнання: мультиметри (2 шт); макетна плата; діод 1N4007; змінний резистор 500 Ом, 0,5 Вт; резистор 10 Ом, 0,5 Вт; батарея «Крона»; тримач батареї «Крона»; з'єднувальні проводи, ПК.

Програмне забезпечення: Excel.

ХІД РОБОТИ

1. Підготувати таблицю для занесення результатів вимірювань (8...10 строк).

Таблиця 3.1. Результати вимірювань

№	U, B	I, A
1		
2		
....		

2. Підготовка до експерименту.

2.1. Скласти на макетній платі вимірювальну схему у відповідності до рис. 3.20.

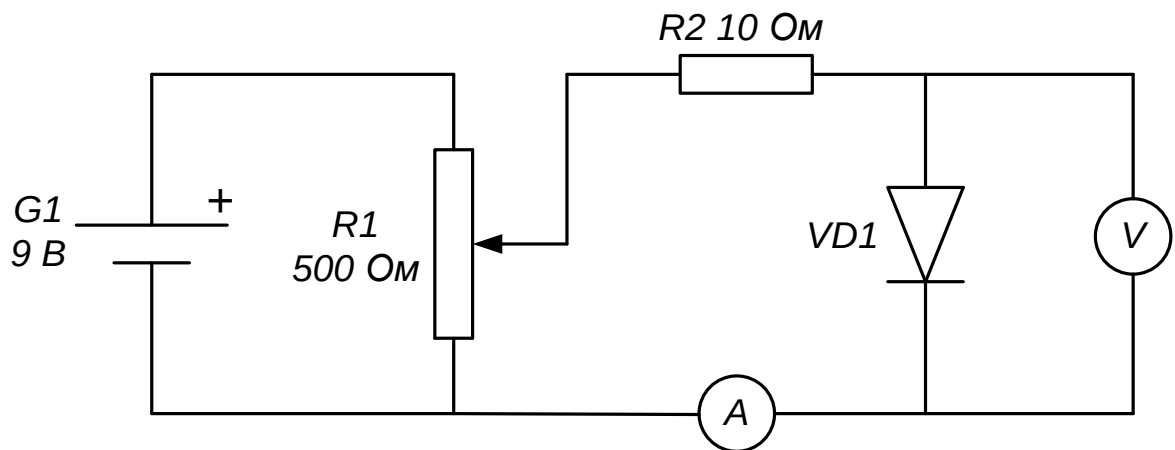


Рис. 3.20. Вимірювальна схема

За допомогою потенціометру $R1$ змінюється напруга, прикладена до резистора $R2$ та досліджуваного діода $VD1$. Напруга на діоді вимірюється за допомогою вольтметра V , а струм, що протікає через діод – за допомогою амперметра A .

2.2. Підключити до схеми мультиметри – один в режимі вимірювання струму, а інший – в режимі вимірювання напруги (рис. 3.21).

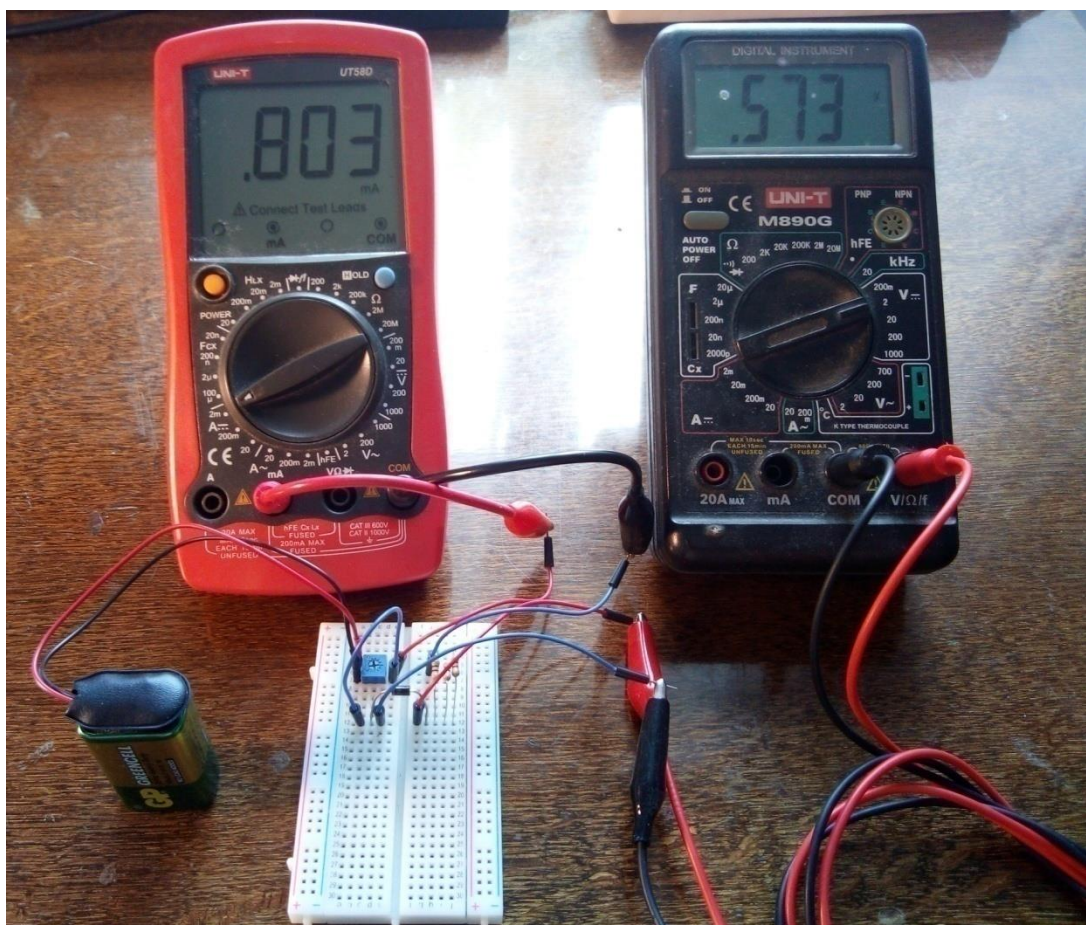


Рис. 3.21. Загальний вигляд обладнання

2.3. Перевести змінний резистор (потенціометр) в одне з крайніх положень.

3. Проведення досліду.

3.1. Підключити до схеми живлення.

3.2. Зафіксувати напругу та силу струму і записати дані до таблиці результатів.

3.3. Змінювати положення змінного резистора і щоразу фіксувати значення сили струму й напруги. Дані заносити до таблиці результатів.

3.4. При досягненні іншого крайнього положення потенціометру закінчити вимірювання.

3.6. Від'єднати від схеми живлення та вимкнути вимірювальні прилади.

4. За допомогою інструментів Excel побудувати ВАХ діода.

5. Зробити висновки за результатами дослідження.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО КОЛА З

НАПІВПРОВІДНИКОВИМ ДІОДОМ ЗА ДОПОМОГОЮ

МОДЕЛЮВАЛЬНОГО КОМП'ЮТЕРНОГО СЕРЕДОВИЩА

Мета: дослідити провідні властивості напівпровідникового діода із застосуванням моделюючого комп'ютерного середовища. Побудувати ВАХ діода.

Матеріали та обладнання: Multisim 11.0.

ХІД РОБОТИ

1. Підготувати таблицю для занесення результатів вимірювань (8...10 строк).

Таблиця 3.2. Результати вимірювань

№	U, B	I, A
1		
2		
....		

2. Створення моделі.

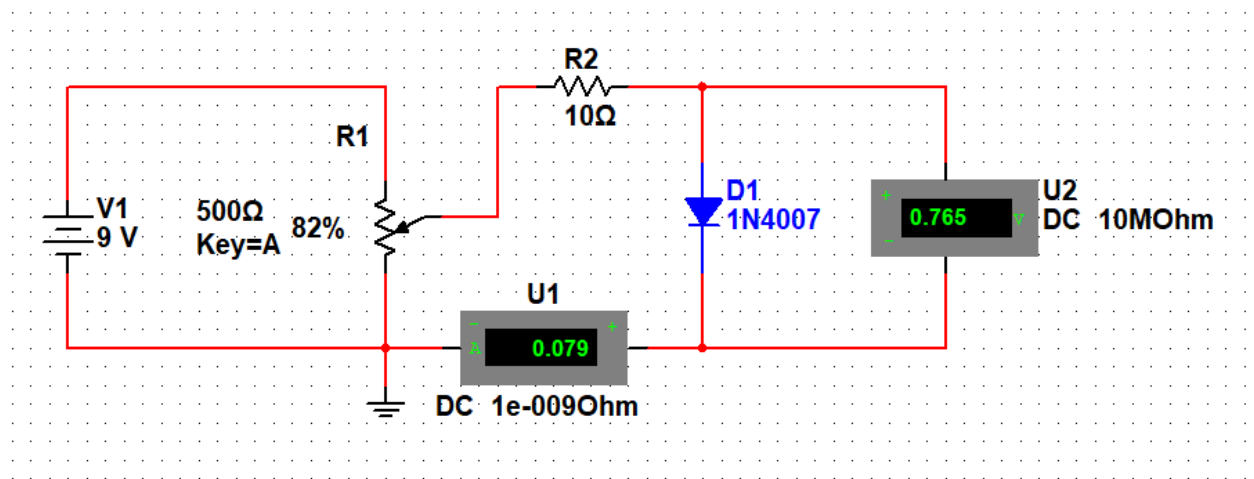


Рис. 3.22. Модель виміральної схеми для дослідження електричного кола з напівпровідниковим діодом

- 2.1. Запустити програму Multisim 11.0.
- 2.2. Зайти в меню «Place» – «Component».
- 2.3. У вікні, що з'явилося обрати розділ «Diodes» та сімейство «DIODE» (діоди).
- 2.4. Обрати діод 1N4007. Натиснути ОК та поставити його у довільне місце робочого поля програми.
- 2.5. Обрати розділ «Basic» (пасивні компоненти) та сімейство «RESISTOR» (резистор, активний опір).
- 2.6. Обрати резистор опором 10 Ом.
- 2.7. Обрати сімейство «POTENTIOMETER» (змінний резистор, потенціометр).
- 2.8. Обрати змінний резистор 500 Ом.
- 2.9. Обрати розділ «Sources» (джерела).
- 2.10. Обрати сімейство «Power sources» (джерела живлення).
- 2.11. Обрати джерело живлення постійного струму DC_Power, натиснути ОК та встановити його поряд з іншими компонентами.
- 2.12. Обрати «Ground» (заземлення), натиснути ОК та встановити його поряд з іншими компонентами.
- 2.13. Обрати розділ «Indicators» (індикатори, вимірвальні прилади) та сімейство «VOLTMETER» (Вольтметр).
- 2.14. Обрати вертикальний вольтметр VOLTMETER_V.
- 2.15. Обрати сімейство «AMMETER» (Амперметр).
- 2.16. Обрати горизонтальний амперметр AMMETER_H.
- 2.17. Закрити вікно добору компонентів.
- 2.18. Виділити діод, клацнути правою кнопкою миші та обрати команду «90 Clockwise». Виділені компоненти перевернуться на 90° за годинниковою стрілкою.
- 2.19. Виділити потенціометр, клацнути правою кнопкою миші та обрати команду «Flip Horizontal». Виділені компоненти розвернуться горизонтально.

2.20. Розставити компоненти на полі програми у порядку, що відповідає рис. 3.22. Заземлення встановити внизу.

2.21. Клацнути лівою кнопкою миші на верхньому виводі джерела живлення і протягнути від нього з'єднання до верхнього кінця змінного резистора R1. В такий спосіб здійснюється електричне з'єднання двох компонентів.

2.22. З'єднати усі компоненти відповідно до схеми на рис. 3.22. Якщо необхідно до одного виводу певного компонента підвести більше одного електричного з'єднання, використовувати команду «Place» – «Junction» (точка з'єднання). Після встановлення точки з'єднання компоненти з'єднуються за пп. 2.21.

2.23. Подвійним клацанням лівою кнопкою миші на джерелі живлення відкрити вікно його параметрів та встановити напругу 9 В.

2.24. Встановити потенціометр у крайнє нижнє положення.

3. Проведення віртуальних вимірювань.

3.1. Натиснути кнопку «Пуск» . Почалося моделювання роботи схеми. Зчитати значення напруги та сили струму з віртуальних вимірювальних приладів та записати їх до таблиці результатів.

3.2. Змінювати положення потенціометру на величину одиничного кроку, який за замовчуванням становить 5% та зчитувати показання віртуальних вольтметра та амперметра. Результати заносити до таблиці.

3.3. При досягненні верхнього положення потенціометру закінчити вимірювання.

3.4. Натиснути кнопку «Стоп» поряд з кнопкою «Пуск».

3.5. Зберегти модель та закрити програму.

3.6. Перенести результати вимірювань до Excel та побудувати ВАХ діода.

4. Швидке отримання ВАХ діоду за допомогою інструменту IV-Analysis.

4.1. Запустити програму Multisim 11.0.

4.2. У правому боці вікна програми обрати інструмент IV-Analysis (характерограф) та відкрити його вікно подвійним клацанням лівою кнопкою миші.

4.3. Обрати діод 1N4007.

4.4. Підключити діод до характерографу (рис. 3.23).

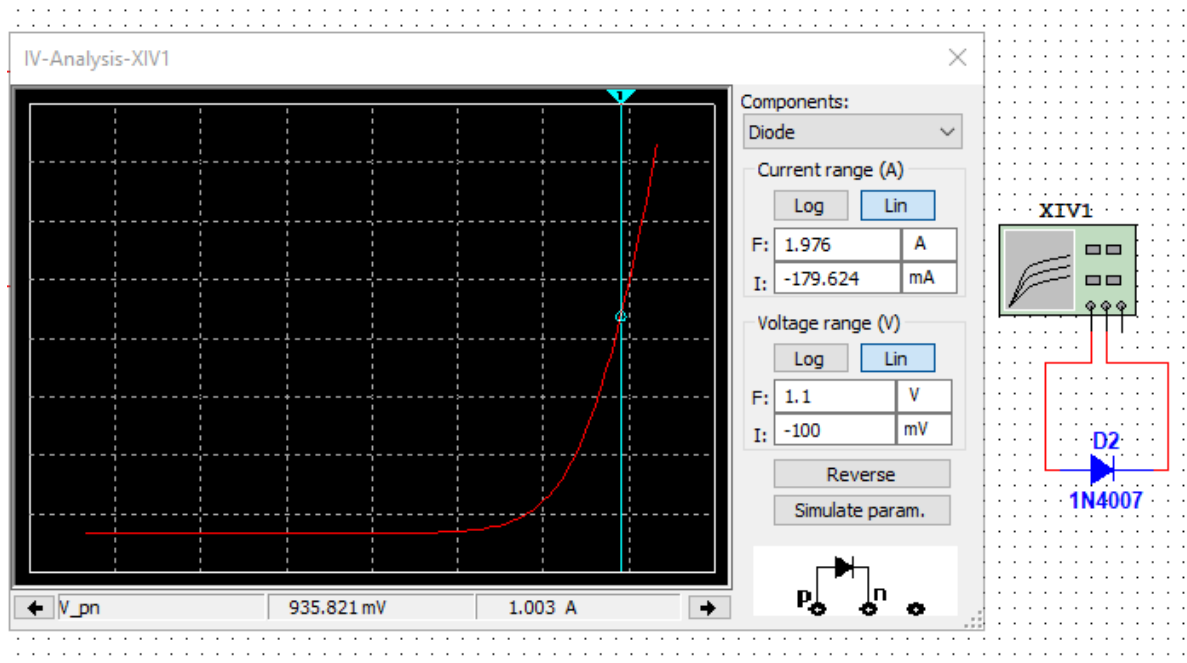


Рис. 3.23. Підключення діода до характерографу

4.5. У вікні характерографу натиснути кнопку «Simulate param.»

4.6. У діалоговому вікні, що з'явилося виставити початкову і кінцеву напруги зняття ВАХ та крок зміни напруги у відповідності до рисунку 3.24. Натиснути ОК.

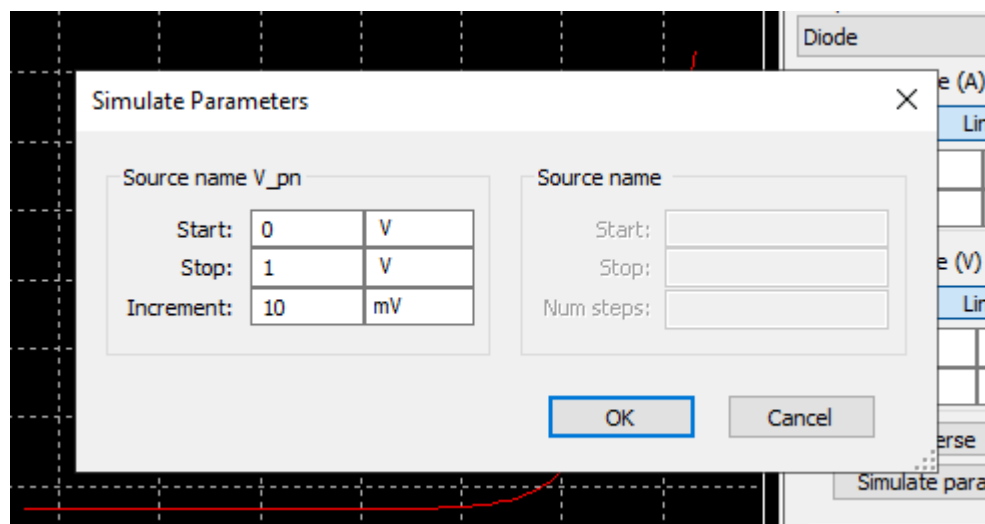


Рис. 3.24. Діалогове вікно характерографу

4.7 Натиснути кнопку «Пуск» . У вікні характерографу має з'явитися ВАХ підключеного до нього діода.

4.8. Натиснути кнопку «Стоп».

4.9. За допомогою інструменту прокрутки характерографу можна зчитати точні значення напруги й струму на ВАХ.

5. Аналіз даних. Помістити ВАХ діода, отримані у лабораторній роботі 1 та лабораторній роботі 2 на одну діаграму у Excel та порівняти їх між собою.

6. Зробити висновки щодо провідних властивостей напівпровідникового діода. Чим вони відрізняються від провідних властивостей звичайного резистора?

ДОСЛІДНИЦЬКА РОБОТА

ДОСЛІДЖЕННЯ ПИТАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ СВІТЛОДІОДНОГО ОСВІТЛЕННЯ

Мета: Визначення напруги та струму світлодіода, за яких його ефективність буде максимальною.

Матеріали та обладнання: набірне поле «Школяр»; цифровий мультиметр UNI-T UT70A – 2 шт.; з'єднувальні провідники; цифровий люксметр ТКА-ПКМ або Mastech MS6610; джерело живлення з плавним регулюванням напруги.

ХІД РОБОТИ

1. Теоретичне дослідження.

1.1. Проаналізувати інформацію щодо світлодіодів, наявну в літературних джерелах та інтернет-ресурсах.

1.2. Проаналізувати технічну документацію на декілька моделей світлодіодів. Особливу увагу приділити їхнім параметрам та характеристикам.

1.3. Ввести показник для оцінки ефективності світлодіодів.

Ефективність світлодіодів можливо оцінювати та порівнювати використанням співвідношення освітленості у Лк, яку вони забезпечують на однаковій відстані до електричної потужності, яку вони споживають, Лк/Вт:

$$\eta = \frac{E}{P_{ел}}, \quad (3.1)$$

де E – освітленість на певній відстані, Лк;

$P_{ел}$ – електрична потужність яку споживає світлодіод, Вт.

Електрична потужність, яку споживає світлодіод може бути визначена як добуток струму світлодіода та напруги, що прикладена до нього, Вт:

$$P_{ел} = I_{св} \cdot U_{св}. \quad (3.2)$$

1.4. Зробити теоретичний прогноз, як буде змінюватися ефективність світлодіода залежно від споживаної потужності.

1.5. Сформулювати гіпотезу у вигляді одного, або декількох речень. Приклад: «Ефективність світлодіода в міру зростання потужності буде спочатку збільшуватися до максимального значення, а потім спадати».

2. Підготувати таблицю для занесення результатів експерименту.

Таблиця 3.3. Результати експерименту

№	U , В	I , А	E , Лк	$P_{ел}$, Вт	η , Лк/Вт
1					
2					
3					
4					
....					

3. Проведення експерименту.

3.1. Скласти на набірному полі «Школяр» схему для дослідження світлодіода у відповідності до рис. 3.25, підключити до неї джерело живлення постійного струму та мультиметри – один на вимірювання струму світлодіода, а інший на вимірювання напруги, що прикладена до нього (рис. 3.26).

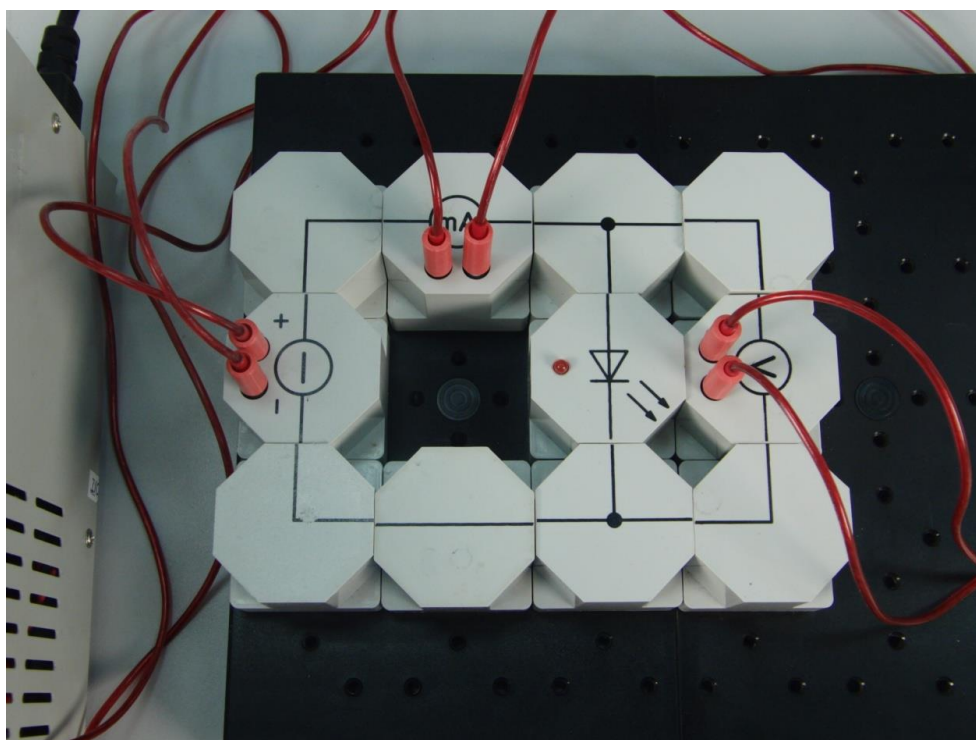


Рис. 3.25 – Схема для дослідження світлодіода

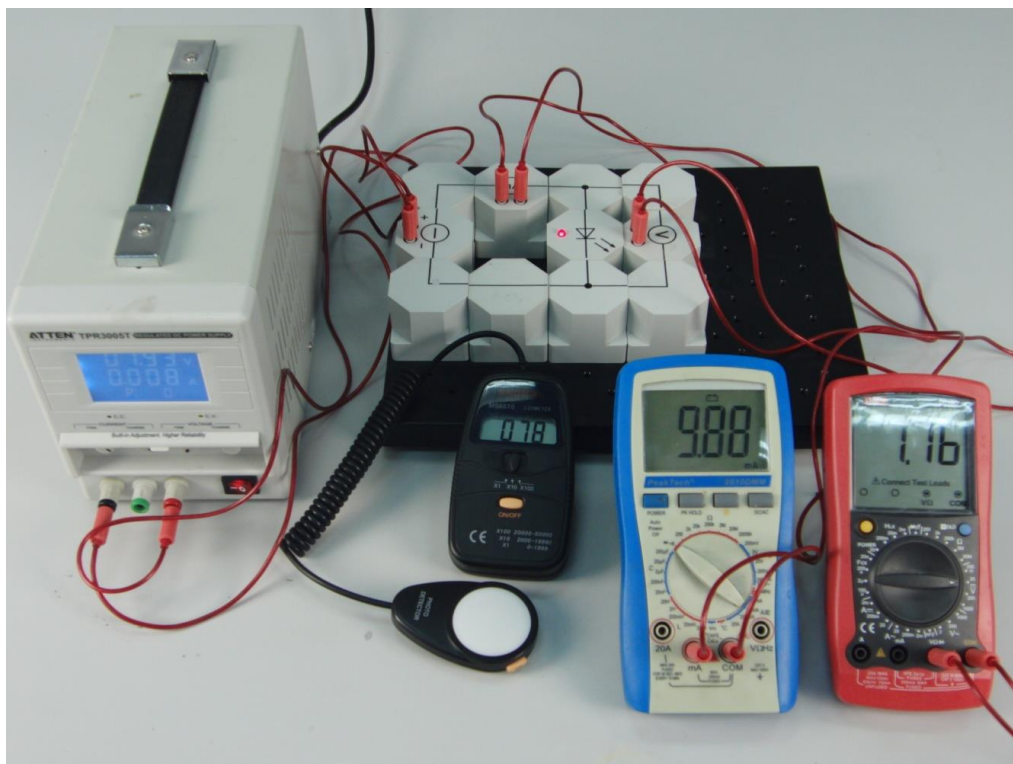


Рис. 3.26. Обладнання для досліджень

3.2. Переконайтеся, що ручки регуляторів джерела живлення знаходяться у положенні, що відповідають нульовій напрузі. Увімкніть джерело живлення.

3.3. За допомогою регуляторів плавно підняти напругу до моменту, коли світлодіод почне світитися.

3.4. Виміряти напругу, струм та освітленість, що відповідає початку світіння світлодіоду та записати результати до таблиці. *Освітленість треба вимірювати при безпосередньому контакті центральної точки датчика люксметра з корпусом світлодіоду.*

3.5. Збільшувати напругу з кроком 0,1...0,2 В та кожного разу здійснювати виміри напруги, струму та освітленості. Результати заносити до таблиці.

3.6. Припинити збільшення напруги та вимірювання, коли струм світлодіоду досягне значення 20 мА.

4. Аналіз отриманих результатів.

4.1. За формулою (3.2) визначити потужність, що споживається світлодіодом.

4.2. За формулою (3.1) визначити ефективність світлодіоду.

4.3. Побудувати графік залежності ефективності світлодіоду від електричної потужності, яку він споживає.

4.4. Користуючись отриманим графіком, визначити, за якої електричної потужності, напруги та струму ефективність світлодіода буде максимальною.

4.5. Дійти висновків щодо правильності висунутої гіпотези.

4.6. Сформулювати рекомендації з практичного застосування результатів досліджень.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

1. За допомогою інструменту IV-Analysis побудуйте та порівняйте ВАХ звичайного діоду 1N4007 та діоду Шоткі 1N5817.

2. За допомогою інструменту IV-Analysis побудуйте та порівняйте ВАХ звичайного діоду 1N4007 та стабілітрону 1N4470. Визначте напругу стабілізації даного стабілітрону.

3. У схемі коливального контуру з налаштуванням за допомогою варикапу (див. рис. 3.10) індуктивність котушки дорівнює 400 нГн, ємність конденсатору C1 – 2 пФ, а конденсатору C2 – 8 пФ. В якості варикапу VD1 застосовується прилад BB135, ємність якого змінюється від 21 пФ при зворотній напрузі 0,5 В до 2,1 пФ при зворотній напрузі 28 В. Визначте діапазон частот, на які може бути налаштований даний коливальний контур.

4. За допомогою інструменту IV-Analysis побудуйте ВАХ світлодіодів з різними кольорами світіння. За отриманими ВАХ визначте для кожного світлодіоду пряме падіння напруги, яке відповідає струму 1 мА. Побудуйте графік залежності прямого падіння напруги світлодіоду від довжини хвилі його випромінювання. Дійдіть висновків.

РОЗДІЛ 4

ТРАНЗИСТОРИ Й ТРІОДИ

4.1. Основні властивості й види транзисторів. Транзистор – це напівпровідниковий елемент електронної техніки, який дозволяє керувати струмом, що протікає через нього, за допомогою прикладеної до додаткового електрода напруги.

Транзистори є основними елементами сучасної електроніки. Зазвичай вони застосовуються в підсилювачах і логічних електронних схемах.

У мікросхемах в єдиний функціональний блок об'єднані тисячі й мільйони окремих транзисторів.

За будовою та принципом дії транзистори поділяють на два великі класи – біполярні та польові. До кожного з цих класів входять численні типи транзисторів, що відрізняються за будовою і характеристиками.

В біполярному транзисторі носії заряду рухаються від емітера через тонку базу до колектора. База відділена від емітера й колектора р-п переходами. Струм протікає через транзистор лише тоді, коли носії заряду інjektуються з емітера в базу через р-п перехід. В базі вони є неосновними носіями заряду й легко проникають через інший р-п перехід між базою й колектором, прискорюючись при цьому. В самій базі носії заряду рухаються за рахунок дифузійного механізму, тож база повинна бути досить тонкою. Управління струмом між емітером і колектором здійснюється зміною напруги між базою і емітером, від якої залежать умови інжекції носіїв заряду в базу.

В польовому транзисторі струм протікає від витоку до стоку через канал під затвором. Канал існує в легованому напівпровіднику в проміжку між затвором і нелегованою підкладкою, в якій немає носіїв заряду, й вона не може проводити струм. Безпосередньо під затвором існує область збіднення, в якій теж немає носіїв заряду завдяки утворенню між легованим напівпровідником і металевим затвором контакту Шотткі. Таким чином ширина каналу обмежена простором між підкладкою та областю збіднення. Прикладена до затвору напруга збільшує чи зменшує ширину області збіднення, а тим самим ширину каналу, контролюючи струм.

Окрім поділу на біполярні та польові транзистори, існує багато різних типів, специфічних за своєю будовою.

Біполярні транзистори розрізняються за полярністю: вони бувають р-п-р та n-р-n типу. Середня літера в цих позначеннях відповідає типу провідності матеріалу бази.

Польові транзистори розрізняються за типом провідності в каналі: на р-канальні (основний тип провідності – дірковий) та n-канальні – основний тип провідності електронний.

Транзистор має два основні застосування: в якості підсилювача і в якості перемикача.

Підсилювальні властивості транзистора зв'язані з його здатністю контролювати великий струм між двома електродами за допомогою малого

струму між двома іншими електродами. Таким чином малі зміни величини сигналу в одному електричному колі можуть відтворюватися з більшою амплітудою в іншому колі.

Використання транзистора у якості перемикача пов'язане з тим, що приклавши відповідну напругу до одного з його виводів, можна зменшити практично до нуля струм між двома іншими виводами, що називають запиранням транзистора. Цю властивість використовують для побудови логічних вентилів.

4.2. Біполярні транзистори. Позначення та будова біполярних транзисторів показана на рис. 4.1.

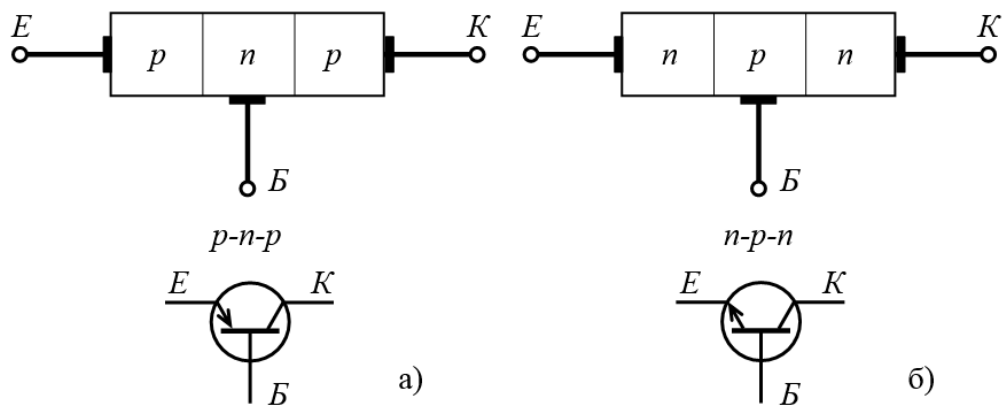


Рис. 4.1. Будова та позначення біполярних транзисторів:
а) *p-n-p* транзистор; б) *n-p-n* транзистор

На рис. 4.2 показана схема, яка дозволяє дослідити властивості транзистора.

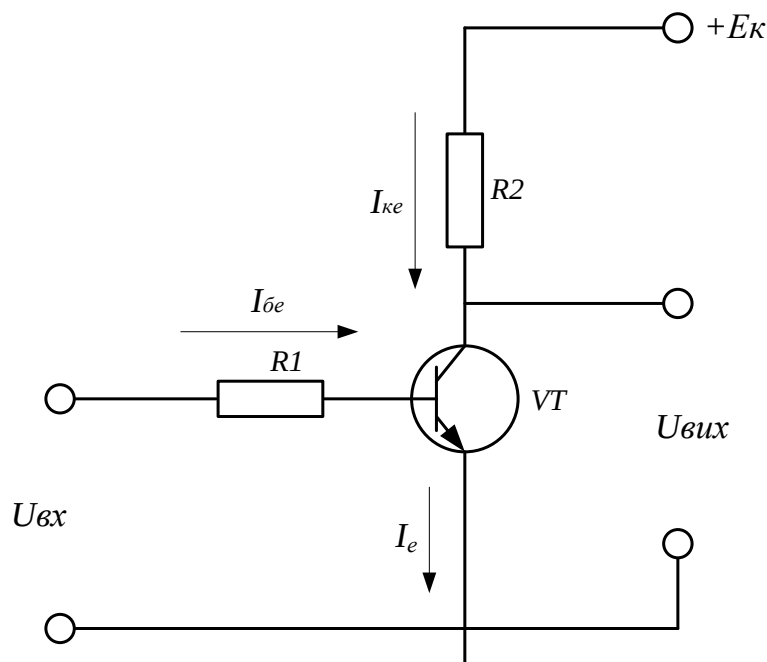


Рис. 4.2. Схема для дослідження транзистора

Дана схема являє собою схему підсилення з загальним емітером. $I_{\delta e}$ – струм бази, $I_{\kappa e}$ – струм колектора, I_e – струм емітера. Струм колектора зазвичай значно більший за струм бази і залежить від нього. Тобто струм бази керує струмом колектору.

Струм емітера складається зі струму колектора і струму бази:

$$I_e = I_{\kappa e} + I_{\delta e}. \quad (4.1)$$

Найважливішою характеристикою транзистора у даній схемі є коефіцієнт підсилення за струмом, який визначається за формулою:

$$\beta = \frac{I_{\kappa e}}{I_{\delta e}}. \quad (4.2)$$

Коефіцієнт підсилення за змінним струмом при нульовому опорі навантаження являє собою коефіцієнт передачі струму h_{21} , що є одним з основних довідникових параметрів транзистора поряд з номінальною напругою та струмом. За цими параметрами здійснюють вибір транзистора під час проектування різноманітних електронних схем.

Вхідна характеристика біполярного транзистора – це залежність струму бази від напруги між базою та емітером за певної сталої напруги між колектором та емітером.

Приклад сімейства вхідних характеристик транзистора представлено на рис. 4.3.

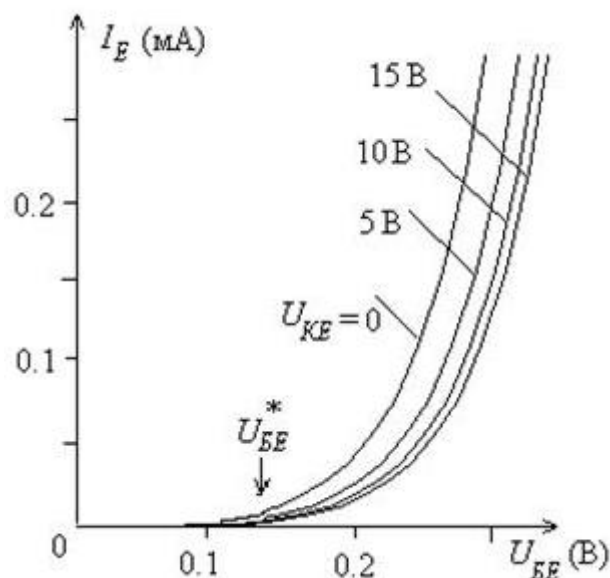


Рис. 4.3. Приклад сімейства вхідних характеристик біполярного транзистора

Вхідні характеристики транзистора являють собою вольт-амперні характеристики р-п переходу. З рисунку 4.3 видно, що при зростанні напруги між колектором та емітером струм бази при одній і тій самій напрузі між базою та емітером знижується. Це явище пов'язане з ефектом модуляції

товщини бази. При збільшенні напруги між колектором та емітером ефективна товщина бази зменшується. При меншій ефективній товщині бази зменшується кількість актів рекомбінації неосновних носіїв, а отже, зменшується базовий струм.

Вихідною характеристикою біполярного транзистора називається залежність струму колектора від напруги між колектором та емітером при постійному струмі бази. Приклад сімейства вихідних характеристик транзистора зображено на рис. 4.4.

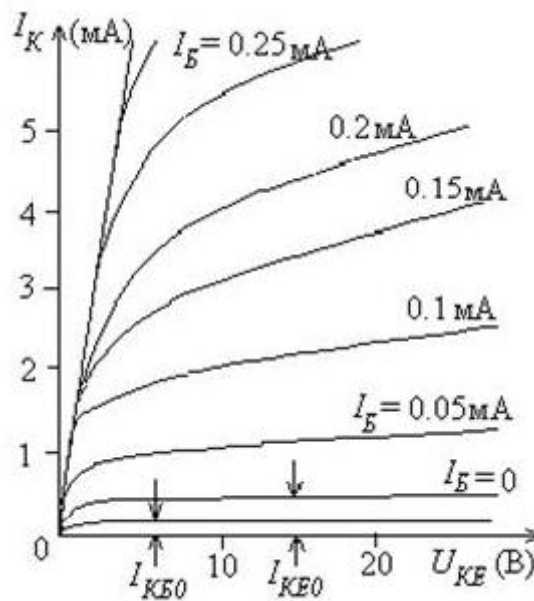


Рис. 4.4. Приклад сімейства вихідних характеристик транзистора

З рисунку 4.4 видно, що зі збільшенням струму бази за інших незмінних умов, струм колектора збільшується.

Передатною характеристикою транзистора називається залежність струму колектора від струму бази за певної сталої напруги між колектором та емітером. Приклад передатних характеристик біполярного транзистора зображено на рис. 4.5.

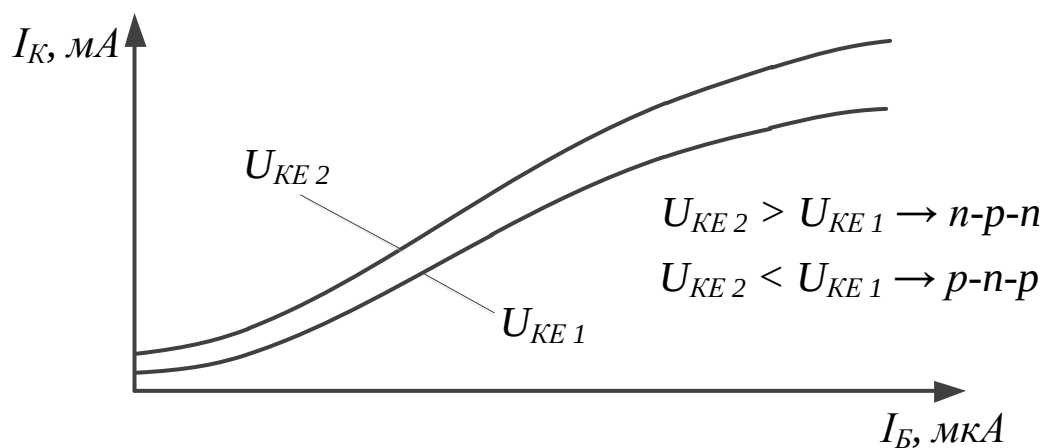


Рис. 4.5. Приклад передатних характеристик біполярного транзистора

4.3. Польові транзистори. Основною відмінністю польового транзистора від біполярного є те що у біполярного транзистора струм між двома електродами керується також **струмом** між двома іншими електродами, а у польового – струм між двома електродами керується **напругою** між двома іншими електродами.

Серед різновидів польових транзисторів можна виділити два основні класи: польові транзистори із затвором у вигляді р-п переходу та польові транзистори із затвором, який ізолюваний від робочого напівпровідникового об'єму діелектриком. Прилади цього класу часто також називають МДН транзисторами (від словосполучення метал – діелектрик – напівпровідник) та МОН транзисторами (від словосполучення метал – оксид – напівпровідник), оскільки як діелектрик найчастіше використовується діоксид кремнію.

В свою чергу транзистори з ізолюваним каналом поділяються на транзистори з вбудованим каналом (англ. depletion mode transistor) та індукованим каналом. Транзистори з вбудованим каналом (у них канал відкритий при нульовій напрузі витік-затвор) зустрічаються набагато рідше.

На рисунку 4.6 зображена класифікація за видами польових транзисторів з їх умовними позначеннями на схемах.

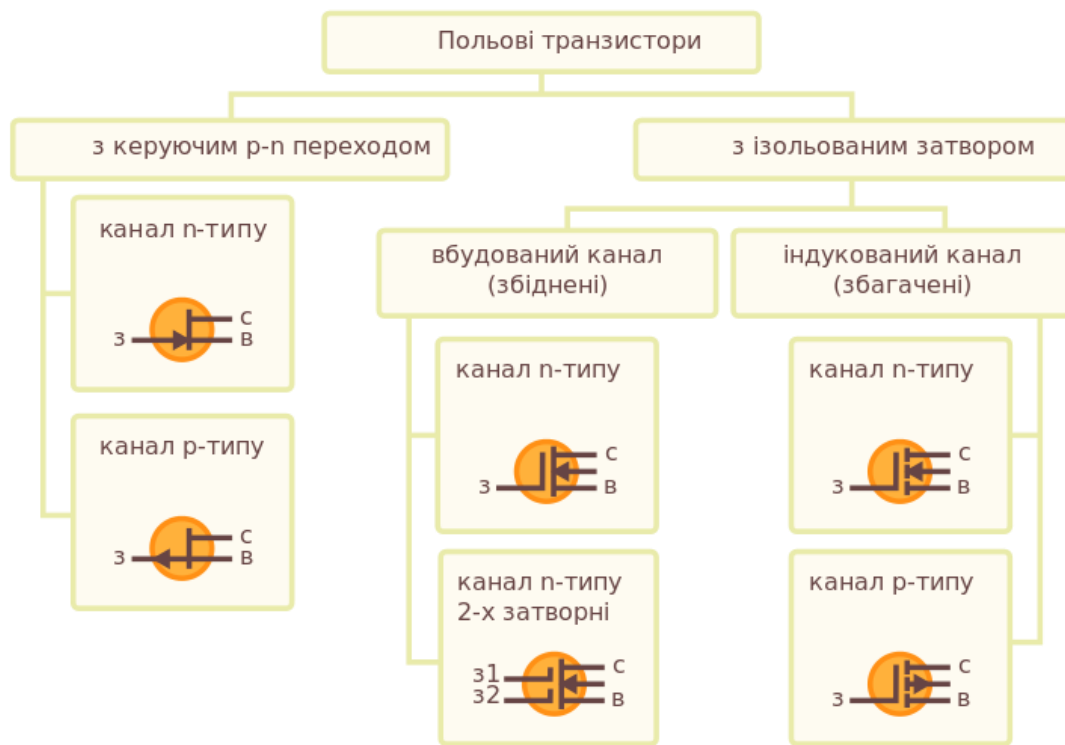


Рис. 4.6. Види польових транзисторів та їх позначення на принципових схемах

Розглянемо польовий транзистор з індукованим каналом n-типу (рис. 4.7 в). При відсутності напруги між затвором та витіком опір каналу такого транзистора досить великий і транзистор перебуває у закритому стані. По мірі зростання додатної напруги між затвором та витіком, опір каналу поступово зменшується, транзистор відкривається і починає проводити струм

між стоком та витоком. Опір каналу у відкритому стані є однією з основних характеристик польового транзистора. Чим він менший, тим більший струм може проводити транзистор.

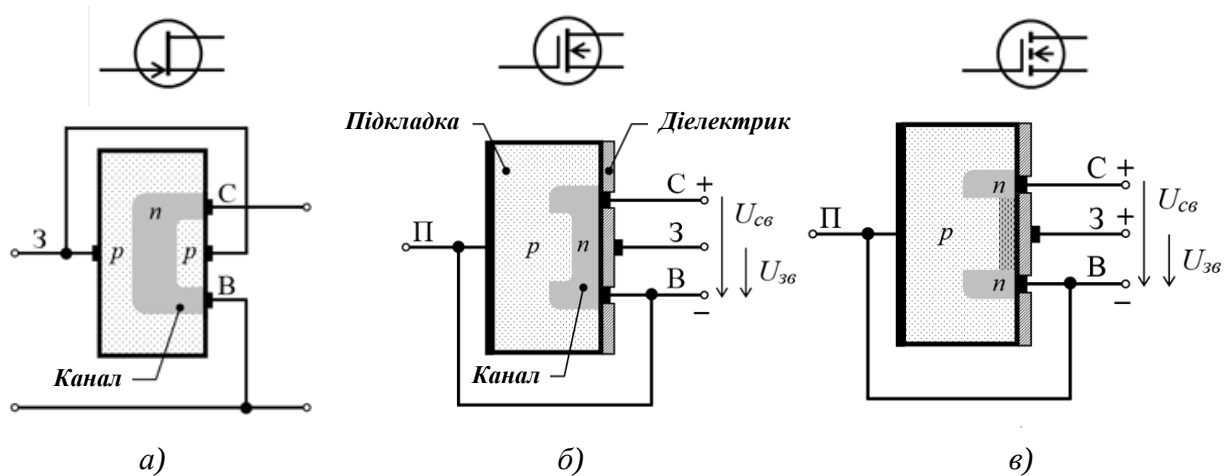


Рис. 4.7. Будова n-канальних польових транзисторів:
а) – транзистора з керуючим р-п переходом; б) – транзистора з ізованим затвором і вбудованим каналом; в) – транзистора з індукованим каналом

Передатною характеристикою польового транзистора називається залежність струму стоку при певній напрузі, прикладеній між стоком та витоком від напруги прикладеної між затвором та витоком (рис. 4.8).

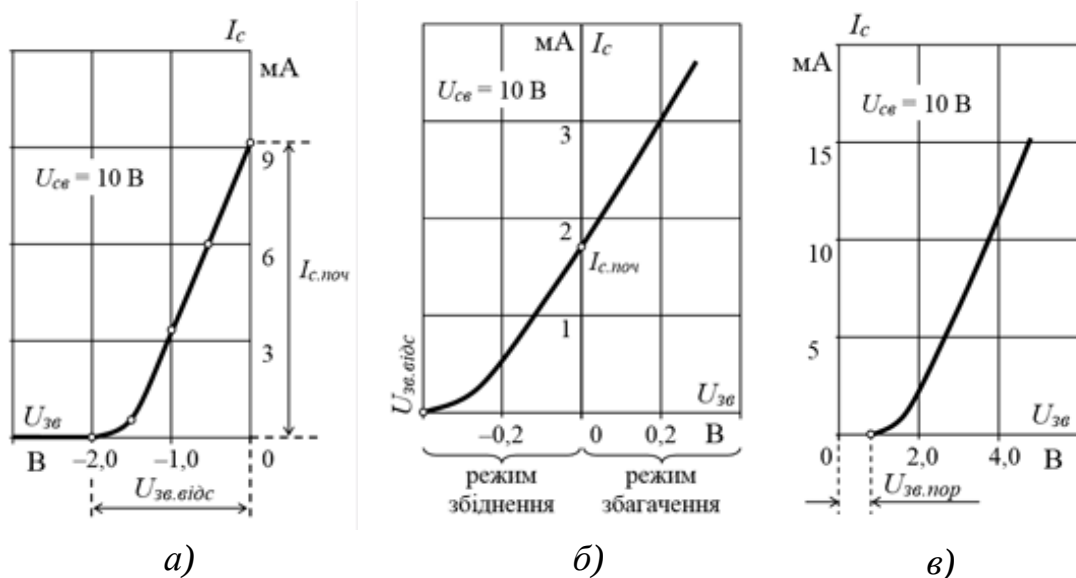


Рис. 4.8. Приклади передатних характеристик польових транзисторів з n-каналом: транзистора з керуючим р-п переходом (а); транзистора з ізованим затвором і вбудованим каналом (б); транзистора з індукованим каналом (в)

Вихідними характеристиками польового транзистора називаються залежності струму стоку від напруги, прикладеної між стоком і витоком при

різних значеннях напруг, прикладених між затвором та витоком (рис. 4.9). У описах конкретних моделей польових транзисторів зазвичай приводяться сімейства вихідних характеристик, як і в описах біполярних транзисторів.

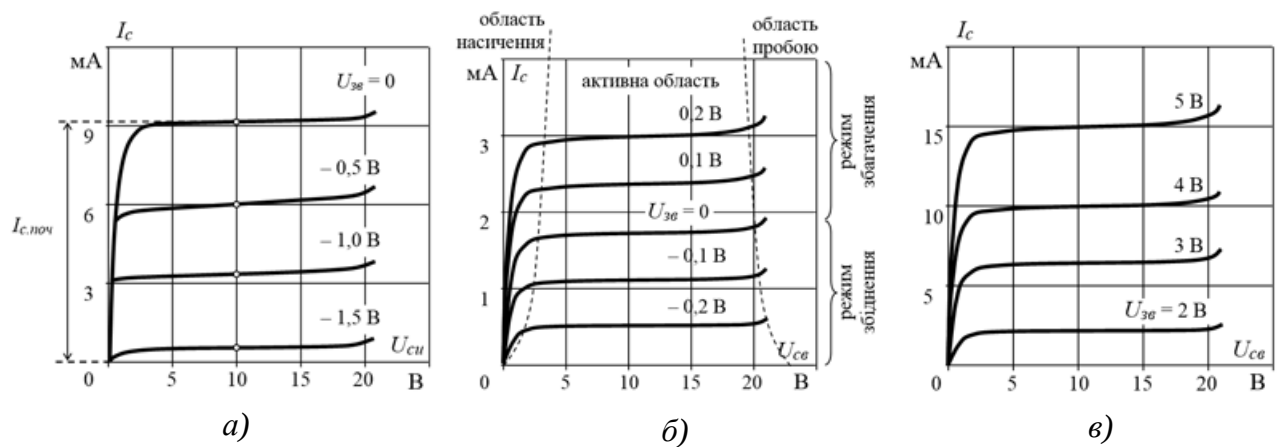


Рис. 4.9. Приклади вихідних характеристик польових транзисторів з n-каналом: транзистора з керуючим р-п переходом (а); транзистора з ізольованим затвором і вбудованим каналом (б); транзистора з індукованим каналом (в)

Польові транзистори застосовуються в підсилювальних каскадах з великим вхідним опором, ключових і логічних пристроях, при виготовленні інтегральних схем та ін.

Переваги польових транзисторів:

- мале споживання вхідного струму, а відповідно й енергії завдяки великому вхідному опору;
- висока надійність роботи завдяки ізоляції вхідного кола з боку затвора від вихідного кола з боку стоку й витоку;

Недоліки польових транзисторів:

- гірша стійкість при високих температурах на відміну від біполярних транзисторів;
- гірша стійкість до різких перепадів напруги;
- висока чутливість до статичної електрики.

4.4. Фототранзистори. Фототранзистор є варіантом біполярного транзистора, у якому база є доступною для зовнішнього освітлення, а струм між колектором та емітером залежить від інтенсивності освітлення. Фототранзистор слугує для перетворення оптичних сигналів на електричні і на відміну від фотодіода здатен їх підсилювати.

Фототранзистори, як і звичайні біполярні транзистори можуть мати структуру n-p-n або p-n-p.

Більшість промислових фототранзисторів не мають електричного виводу бази, але в деяких моделях такий вивід є, і слугує він для зміщення початкової робочої точки приладу шляхом подачі між базою та емітером певного струму.

На рисунку 4.10 показані умовні позначення фототранзисторів на кресленнях електронних схем, а на рисунку 4.11 – їх зовнішній вигляд.

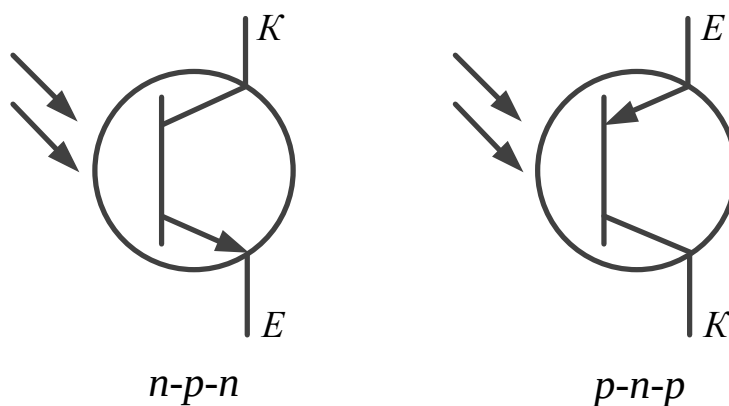


Рис. 4.10. Умовні позначення фототранзисторів на кресленнях електронних схем



Рис. 4.11. Зовнішній вигляд фототранзисторів

Включення фототранзистора у зовнішнє електричне коло здійснюється подібно включенню біполярного транзистора за схемою з загальним емітером. При потраплянні світла на базу, на ній утворюються парні носії зарядів (електрони й дірки), які розділяються електричним полем колекторного переходу. В результаті цього у базовій області накопичуються основні носії, що призводить до зниження потенціального бар'єру емітерного переходу і збільшення (посилення) струму через фототранзистор порівняно зі струмом, обумовленим перенесенням лише тих носіїв, які утворилися безпосередньо під дією світла.

Основними параметрами і характеристиками фоторанзистора як і інших фотоелектричних приладів є:

- інтегральна чутливість – відношення струму через прилад до падаючого світлового потоку. В сучасних фототранзисторів вона досягає декілька сотень мА/лм;

- спектральна характеристика – залежність чутливості до монохроматичного випромінювання від довжини хвилі цього випромінювання;
- стала часу, що характеризує інерційність фототранзистора. У сучасних фототранзисторів вона не перевищує декількох сотень мкс;
- коефіцієнт підсилення первинного фотоструму, що досягає $10^2 \dots 10^3$.

Фототранзистори застосовуються в якості приймачів випромінювання у різноманітних системах автоматики, безпеки, охоронної сигналізації, датчиках положення та відстані.

4.5. Вакуумний тріод. Вакуумний тріод – це вакуумний прилад з трьома електродами: катодом, сіткою й анодом, що має властивість підсилювати електричний сигнал. Електроди розміщуються у скляному або металевому балоні з вакуумом у середині (рис. 4.12).

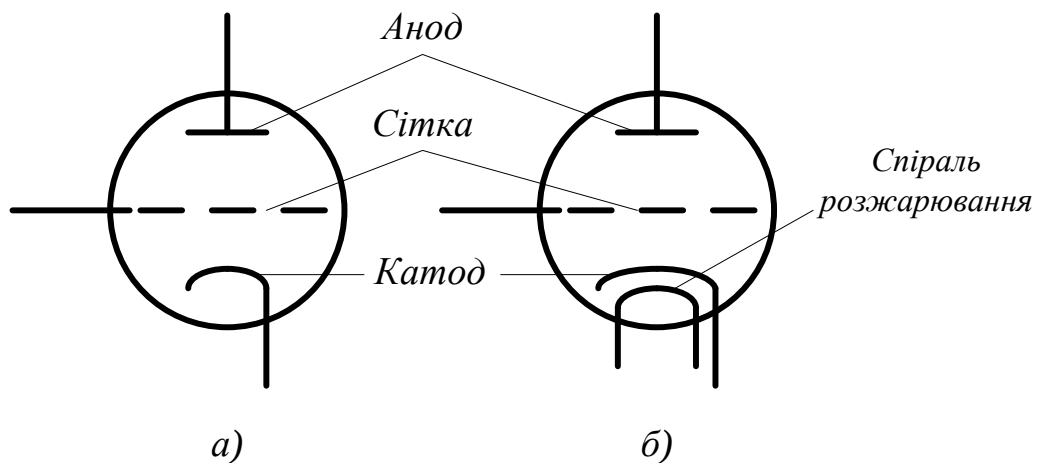


Рис. 4.12. Умовне позначення тріодів на кресленнях електронних схем: з прямим розжарюванням катоду (а); з непрямым розжарюванням катоду (б)

Катод тріоду, що розжарюється прямо, або не прямо за допомогою спіралі, емітує електрони завдяки термоелектронній емісії. Анод вловлює електрони, емітовані катодом. Потенціал аноду має бути додатним відносно катоду. Кількість електронів, що потрапляють до аноду тим більша чим більший додатний потенціал аноду (анодна напруга). Електрони утворюють у колі аноду анодний струм.

Сітка тріоду (керуюча сітка) розміщена між анодом та катодом. Вона зазвичай має форму спіралі, навитої з тонкого дроту. Сітка впливає на розподіл електричного поля між катодом та анодом, в результаті чого змінюється кількість електронів, що потрапляють на анод, а відповідно й анодний струм. Зазвичай сітка має від'ємний потенціал по відношенню до катоду. Чим більший цей від'ємний потенціал, тим менше анодний струм. Зміна сіткової напруги відносно катоду від -3 до -2 В викликає зростання анодного струму від 10 до 20 мА.

Тріод забезпечує значне підсилення сигналу за напругою та за струмом. Керування у ланцюгу сітки здійснюється напругою, а її струм нехтовно малий.



Рис. 4.13. Тріод 12AX7B

Тріоди застосовуються в якості підсилювальних, а також в якості генераторних ламп. Порівняно з транзисторами тріоди мають наступні недоліки:

- великі габаритні розміри;
- необхідність застосування напруги розжарювання катоду;
- великі напруги живлення;
- більші викривлення сигналу.

Перевагами тріодів є наступні:

- можливість роботи з великими напругами та струмами;
- мала чутливість до температури;
- стійкість до іскріння.

Зараз у більшості електронних пристроїв тріоди, а також інші вакуумні лампи, витіснені транзисторами. Але й досі електронні лампи застосовуються у гітарних підсилювачах, оскільки звучання електрогітари з ламповим підсилювачем свого часу стало класичним.



Рис. 4.14. Сучасний ламповий гітарний підсилювач потужність 100 Вт

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНЗИСТОРА.

Мета: Дослідити підсилювальні властивості транзистора. Визначити коефіцієнт підсилювання транзистора.

Матеріали та обладнання: набірне поле «Школяр», міліамперметр (2 шт), з'єднувальні провідники, джерело струму.

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися зі схемою експериментальної установки.

Схема експериментальної установки представлена на рисунку 4.15.

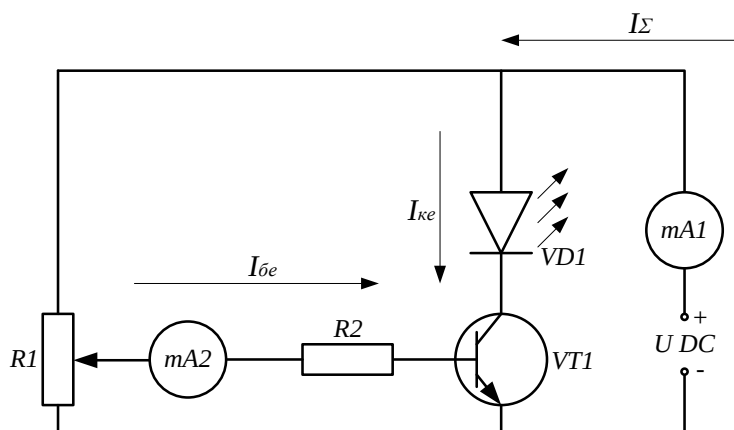


Рис. 4.15. Схема експериментальної установки

Дана схема являє собою схему підсилення з загальним емітером. Міліамперметр $mA1$ реєструє загальний струм, а міліамперметр $mA2$ – струм бази транзистора $VT1$. Вхідний сигнал, що подається на базу, імітується змінним резистором $R1$. Резистор $R2$ слугує для обмеження струму бази. В якості навантаження схеми використовується світлодіод $VD1$. Струм колектора у даній схемі визначається за формулою:

$$I_{ке} = I_{\Sigma} - I_{бе} - \frac{U}{R1}. \quad (4.3)$$

Струм емітера складається із струму колектора і струму бази і визначається за формулою (4.1).

2. Підготувати 2 таблиці для занесення результатів вимірювань.

Таблиця 4.1. Результати вимірювань

№	I_{Σ} , мА	$I_{бе}$, мА	$I_{ке}$, мА	I_e , мА	β
1					
2					
...					
6					

3. Зібрати експериментальну установку.

3.1. На набірному полі «Школяр» зібрати електричне коло у відповідності до рисунку 4.16 керуючись також схемою на рисунку 4.15.

3.2. Підключити до зібраного кола міліамперметри.

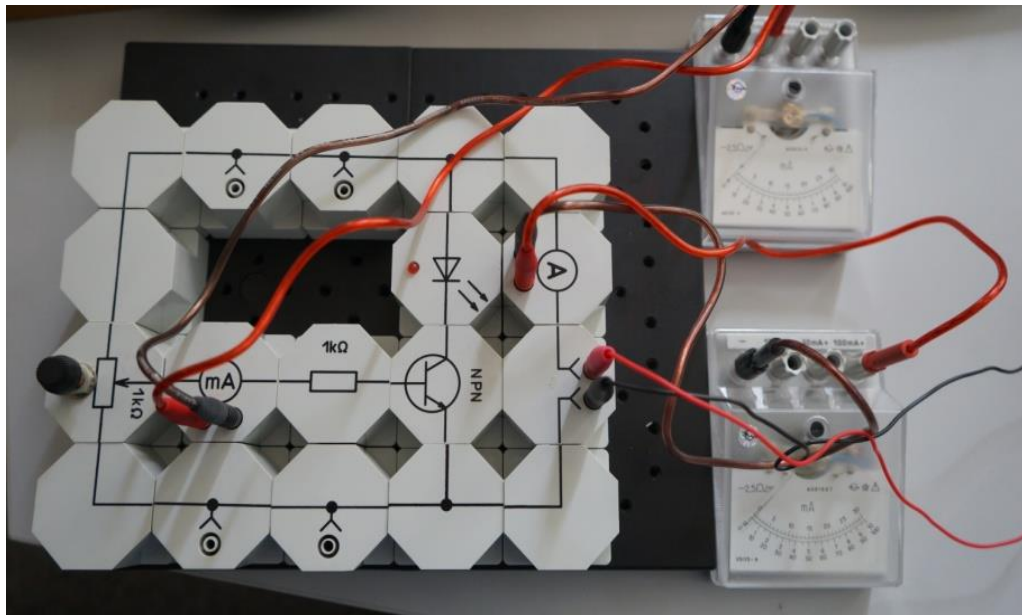


Рис. 4.16. Електричне коло для дослідження властивостей транзистора

3.3. Встановити на джерелі живлення напругу 5 В, вимкнути його та з'єднати з зібраним електричним колом, дотримуючись полярності.

3.4. Встановити ручку змінного резистора $R1$ в одне з крайніх положень.

4. Проведення досліду.

4.1. Увімкнути джерело живлення.

4.2. Зчитати показання міліамперметрів та занести їх до таблиці результатів.

4.3. За допомогою змінного резистора змінювати струм бази та фіксувати показання міліамперметрів ще у 5-ти положеннях ручки резистора, у тому числі у іншому крайньому. Результати вимірювань заносити до таблиці.

4.4. Вимкнути джерело живлення.

4.5. Замінити світлодіод у схемі лампою розжарювання та повторити дослід. Результати вимірювань заносити до другої таблиці.

5. Аналіз даних.

5.1. За формулою (4.3) розрахувати струм колектора.

5.2. За формулою (4.1) розрахувати струм емітера.

5.3. За формулою (4.2) розрахувати коефіцієнт підсилення.

6. Зробити висновки про значення коефіцієнту підсилення транзистора та його залежності від струмів у схемі

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНЗИСТОРА У МОДЕЛЮВАЛЬНОМУ КОМП'ЮТЕРНОМУ СЕРЕДОВИЩІ.

Мета: Дослідити підсилювальні властивості транзистора. Визначити коефіцієнт підсилення транзистора.

Обладнання: ПК з програмою Multisim 11.0.

ХІД РОБОТИ

1. Підготувати таблицю для занесення результатів дослідів.

Таблиця 4.2. Результати вимірювань

№	$R1_p, \%$	$I_{\Sigma}, \text{мА}$	$I_{б\epsilon}, \text{мА}$	$I_{к\epsilon}, \text{мА}$	$I_e, \text{мА}$	β
1	5					
2	20					
3	40					
4	60					
5	80					
6	100					

2. Створення моделі.

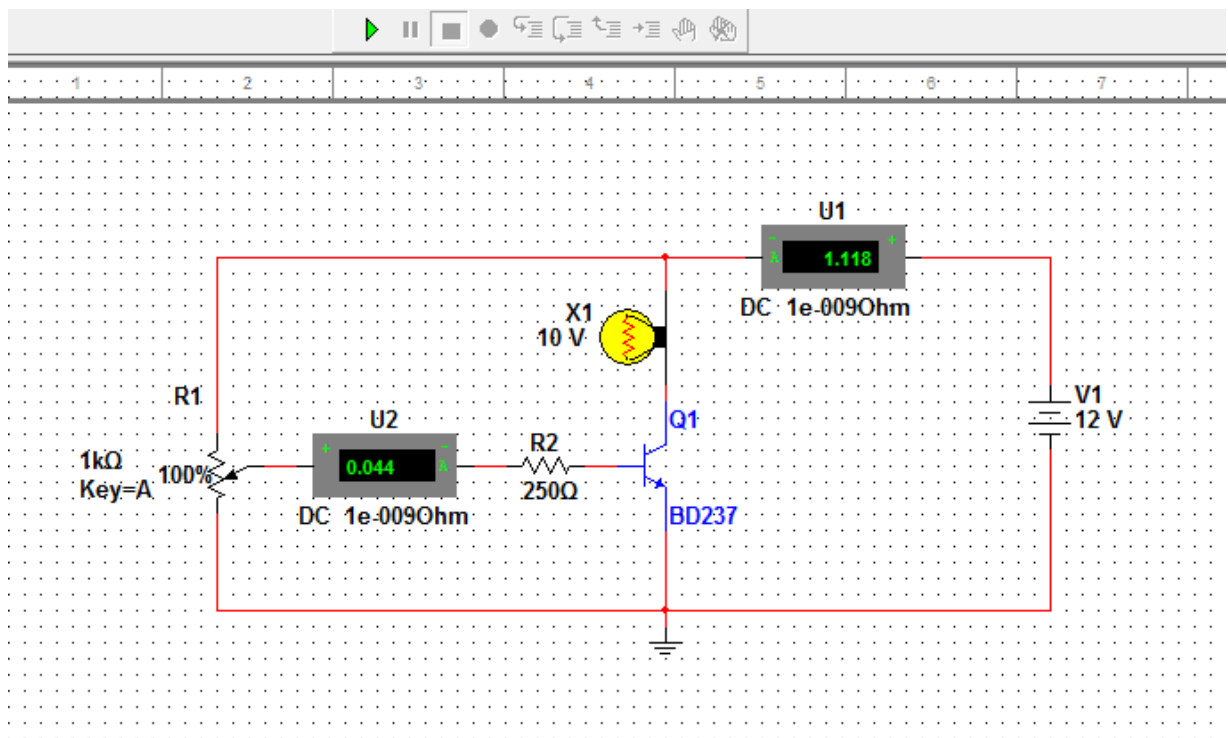


Рис. 4.17. Модель схеми для дослідження транзистора

2.1. Запустити програму Multisim 11.0.

2.2. Зайти в меню «Place» – «Component».

2.3. У вікні, що з'явилося обрати розділ «Transistors» та сімейство «BJT_NPN».

2.4. Обрати транзистор BD237. Натиснути ОК та поставити його у довільне місце робочого поля програми.

2.5. Обрати розділ «Basic» та сімейство «Potentiometer» (Потенціометр).

2.6. Обрати потенціометр опором $1\text{ k}\Omega$ (кОм) та поставити його поряд з транзистором.

2.7. Обрати сімейство «Resistor» (резистор, активний опір).

2.8. Обрати резистор опором $250\ \Omega$ (Ом), та поставити його поряд з іншими компонентами.

2.9. Обрати розділ «Indicators» та сімейство «Ammeter» (Амперметр).

2.10. Обрати «Ammeter_H» та поставити його поряд з іншими компонентами. Здійснити цю операцію ще раз, оскільки за схемою потрібно два амперметри.

2.11. Обрати сімейство «Virtual_Lamp» (Віртуальна лампа), натиснути ОК та встановити лампу поряд з іншими компонентами.

2.12. Обрати розділ «Sources» (джерела).

2.13. Обрати сімейство «Power sources» (джерела живлення).

2.14. Обрати джерело живлення постійного струму «DC_Power», натиснути ОК та встановити його поряд з іншими компонентами.

2.15. Обрати «Ground» (заземлення), натиснути ОК та встановити його поряд з іншими компонентами.

2.16. Закрити вікно добору компонентів.

2.17. З'єднати усі компоненти у відповідності до схеми на рис. 4.17. Заземлення має бути з'єднаним з загальним (від'ємним) провідником схеми.

2.18. Подвійним клацанням лівою кнопкою миші на лампі X1 відкрити вікно її налаштування.

2.19. У вікні що з'явилося задати параметри: максимальна напруга – 10 V ; максимальна потужність – 10 W .

2.20. Закрити вікно налаштування лампи.

3. Проведення віртуальних вимірювань.

3.1. Натиснути кнопку «Пуск» . Почалося моделювання роботи схеми. На амперметрі U1 має відтворюватися значення загальної сили струму I_{Σ} , а на амперметрі U2 – значення сили струму бази $I_{\text{бе}}$.

3.2. Підвести курсор до потенціометра R1 та за допомогою віртуального движка встановити опір $R1_p$ 5% від номінального (50 Ом).

3.3. Зачекати декілька секунд, та записати показники амперметрів у відповідні графи таблиці результатів.

3.4. Повторити кроки за пп. 3.2 та 3.3 для опорів від 5 до 100 % від номінального у відповідності до другого графа таблиці результатів. Результати вимірювань заносити до таблиці.

3.5. Після завершення вимірювань натиснути кнопку «Стоп».

4. Аналіз даних.

4.1. За формулою (4.3) розрахувати струм колектора.

4.2. За формулою (4.1) розрахувати струм емітера.

4.3. За формулою (4.2) розрахувати коефіцієнт підсилення.

5. Зробити висновки про значення коефіцієнту підсилення транзистора та його залежності від струмів у схемі.

**Примітка.* Для транзистора BD237 коефіцієнт підсилення знаходиться у межах від 25 до 275, залежно від режиму роботи.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 1

ІНДИКАТОР ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ЗАРЯДУ

Мета: Виготовити і випробувати індикатор електростатичного заряду.

Матеріали та обладнання: макетна плата; п-канальні польові транзистори з керуючим р-п переходом J108, J109, J110, J111, або J112 (2 шт. однакових); резистори опором 1 кОм та 750 Ом, 0,25...1 Вт; червоний та синій світлодіоди; з'єднувальні провідники; батарея «Крона» (9 В); тримач батареї «Крона» (контактна площадка зі з'єднувальними проводами).

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися зі схемою та принципом роботи індикатора електростатичного заряду.

1.1. Принципова схема індикатору електростатичного заряду.

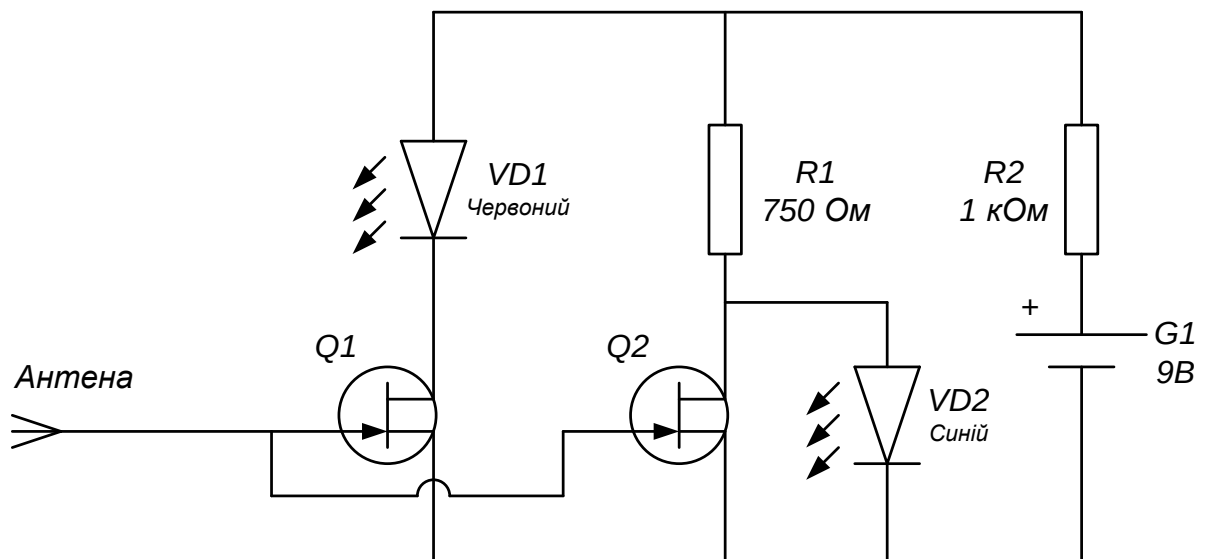


Рис. 4.18. Принципова схема індикатору заряду

1.2. Принцип роботи індикатору.

Робота індикатору ґрунтується на тому, що заряджені тіла утворюють навколо себе електростатичне поле, на яке даний пристрій реагує.

Основними елементами індикатору є польові транзистори $Q1$ та $Q2$ і антена, з'єднана з їхніми затворами. Оскільки струм польового транзистору фактично керується зарядом затвору, то він буде змінюватися залежно від заряду, наведеного на антені. Якщо піднести антену до наелектризованого тіла, навколо якого є електростатичне поле, то у антені за рахунок електростатичної індукції відбудеться перерозподіл зарядів і на затворах транзисторів також з'явиться заряд такого ж знаку, як і заряд наелектризованого тіла.

Якщо антена має нейтральний заряд, обидва транзистори перебувають у частково відкритому стані, струм від джерела живлення йде через світлодіод $VD1$ і транзистор $Q1$ та через резистор $R1$, транзистор $Q2$ і світлодіод $VD2$. Обидва світлодіоди при цьому будуть світитися не дуже яскраво.

Якщо піднести антену до наелектризованого тіла з додатним зарядом, транзистори відкриваються сильніше і червоний світлодіод $VD1$ починає світитися яскравіше. Оскільки при сильнішому відкриванні транзисторів опір їх каналу знижується, напруга на транзисторі $Q2$ також знижується і синій світлодіод $VD2$ згасає.

Якщо антену піднести до наелектризованого тіла, що має від'ємний заряд, транзистори закриваються, червоний світлодіод $VD1$ згасає, а весь струм проходить через резистор $R1$ і синій світлодіод починає світитися яскравіше.

Таким чином не дуже яскраве світіння обох світлодіодів відповідає нейтральному заряду, або відсутності електричного поля. Світіння червоного світлодіоду відповідає додатному заряду тіла, синього – від'ємному.

Після складання пристрою та підключення до джерела живлення зазвичай починає яскраво світитися один зі світлодіодів. Це зумовлено тим, що у оточуючому просторі завжди є хоч трохи заряджені тіла та електростатичні поля, а чутливість індикатору досить висока. Але якщо піднести антену до тіла, наелектризованого шляхом тертя, то індикатор однозначно покаже знак заряду цього тіла, оскільки після такої електризації тіла мають значно більший заряд, ніж оточуючі предмети.

Антена являє собою з'єднувальний провід під макетні плати, одним кінцем з'єднаним із затворами транзисторів.

2. Виготовлення індикатору.

2.1. На макетній платі скласти схему індикатору електростатичного заряду у відповідності до схеми на рис. 4.18 з урахуванням даних про розміщення електродів польових транзисторів на рис. 4.19. При підключенні світлодіодів треба враховувати те, що вони, як і всі діоди, пропускають струм у напрямі від аноду «+» до катоду «-». Довша ніжка світлодіоду є анодом, а коротша – катодом. Приклад зібраної схеми приведено на рисунку 4.20.

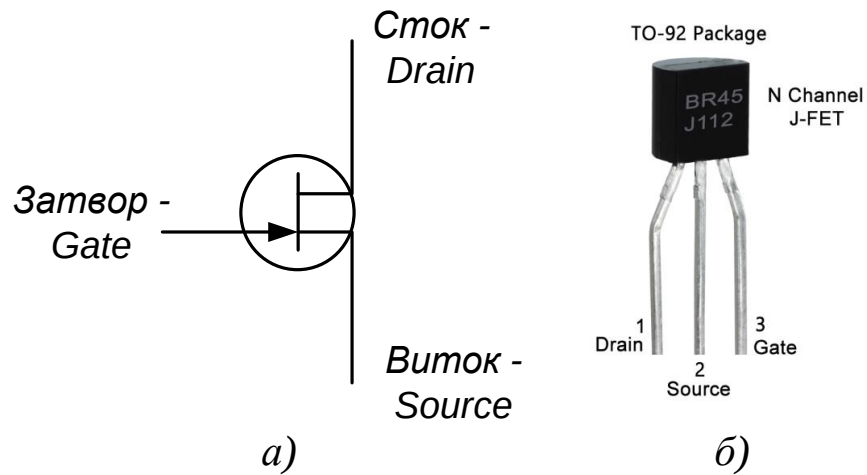


Рис. 4.19. Розміщення електродів польових транзисторів J108, J109, J110, J111 та J112 на позначенні в електричних схемах (а) та у виробі у корпусі TO-92 (б)

2.2. Підключити до схеми живлення.

3. Тестування індикатору.

3.1. Доторкнутися рукою до антени і з'ясувати, який електричний заряд має власне тіло.

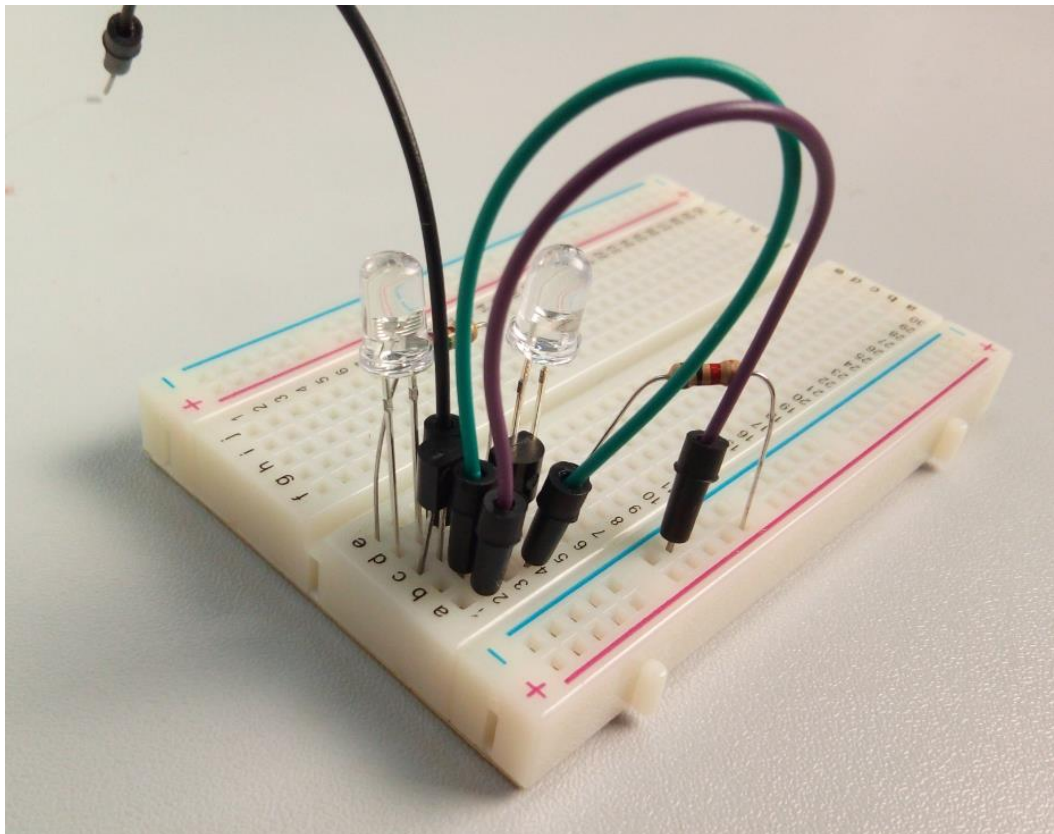


Рис. 4.20 – Приклад зібраної схеми індикатору електростатичного заряду

3.2. Потерти пластикову ручку об волосся і піднести її до антени. З'ясувати, якого заряду набув пластик при терті об волосся (рис. 4.21).

3.3. Провести тестування з іншими матеріалами, наприклад, скло, вовна, синтетичні та натуральні тканини, вата, різні сорти пластику.

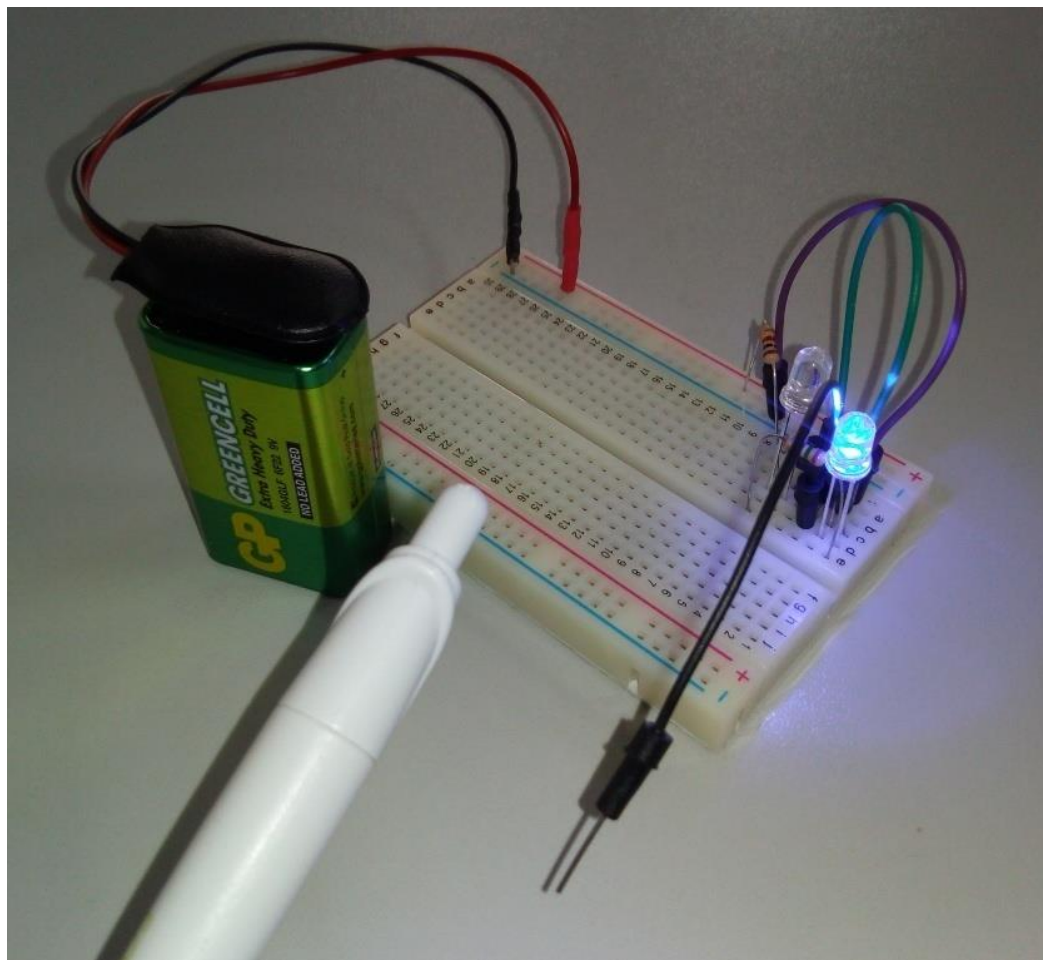


Рис. 4.21. Прототип індикатора електростатичного заряду в роботі при піднесенні наелектризованого предмету (пластикової авторучки)

5. Зробити висновки щодо знаку електростатичного заряду, якого набувають тіла з різних матеріалів при терті одне об одне.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 2

ЕЛЕКТРОННИЙ ЕЛЕКТРОМЕТР

Мета: Виготовити і випробувати електронний електрометр.

Матеріали та обладнання: макетна плата; п-канальний польовий транзистор з керуючим р-п переходом J108, J109, J110, J111, або J112; резистори опором 220 кОм, 100 кОм та 10 кОм, 0,25...0,5 Вт; змінний багатообертовий резистор 50 кОм; з'єднувальні провідники; батарея «Крона»

(9 В); тримач батареї «Крона» (контактна площадка зі з'єднувальними проводами); мультиметр.

ХІД РОБОТИ

1. Пригадати будову та принцип роботи найпростішого електromетру. Проаналізувати його можливості.

Електromетром називається прилад для індикації електричного заряду і визначення його величини. Схема найпростішого електromетра представлена на рис. 4.22.

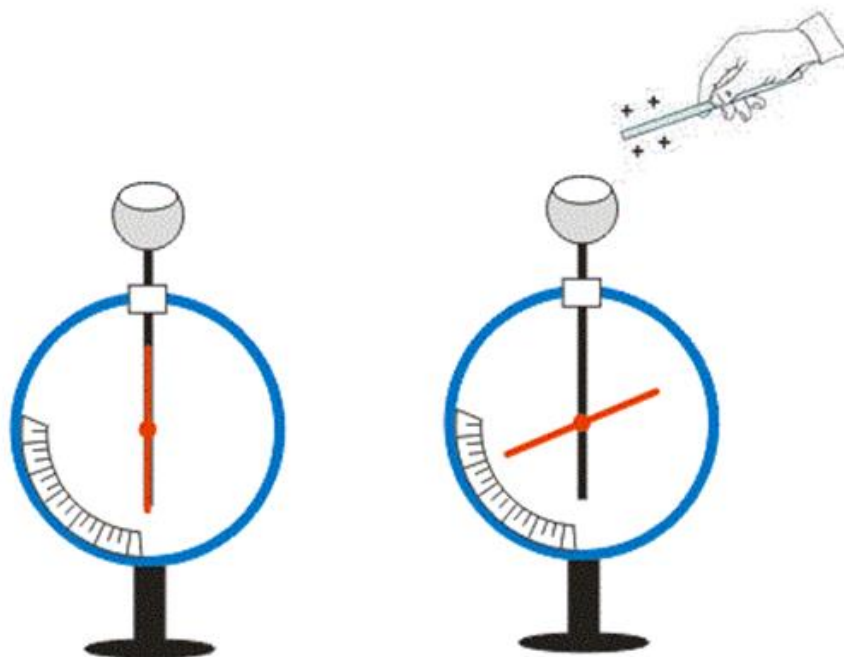


Рис. 4.22. Найпростіший електromетр

Найпростіший електromетр складається з металевого стрижня, порожньої провідної кулі, металеві стрілки, шарнірно закріпленої до стрижня, металевого корпусу, скляних кришок, що закривають корпус з обох боків, шкали і непровідної підставки. Стрижень відділяється від корпусу за допомогою пластикової втулки. При дотику до кулі зарядженим предметом заряди стікають на електрод і стрілку, які виявляються однойменно зарядженими і тому стрілка відхиляється від електрода на певний кут, що залежить від величини заряду, переданого кулі. Такі прості електromетри і досі застосовуються у фізичних кабінетах для демонстрацій. Шкала таких електromетрів не тарується і за допомогою них можна визначати лише відносну величину електричного заряду.

Недоліком такого приладу є те, що він не показує знак заряду тіла.

2. Ознайомитися зі схемою та принципом роботи електронного електromетру.

2.1. Принципова схема електронного електromетру.

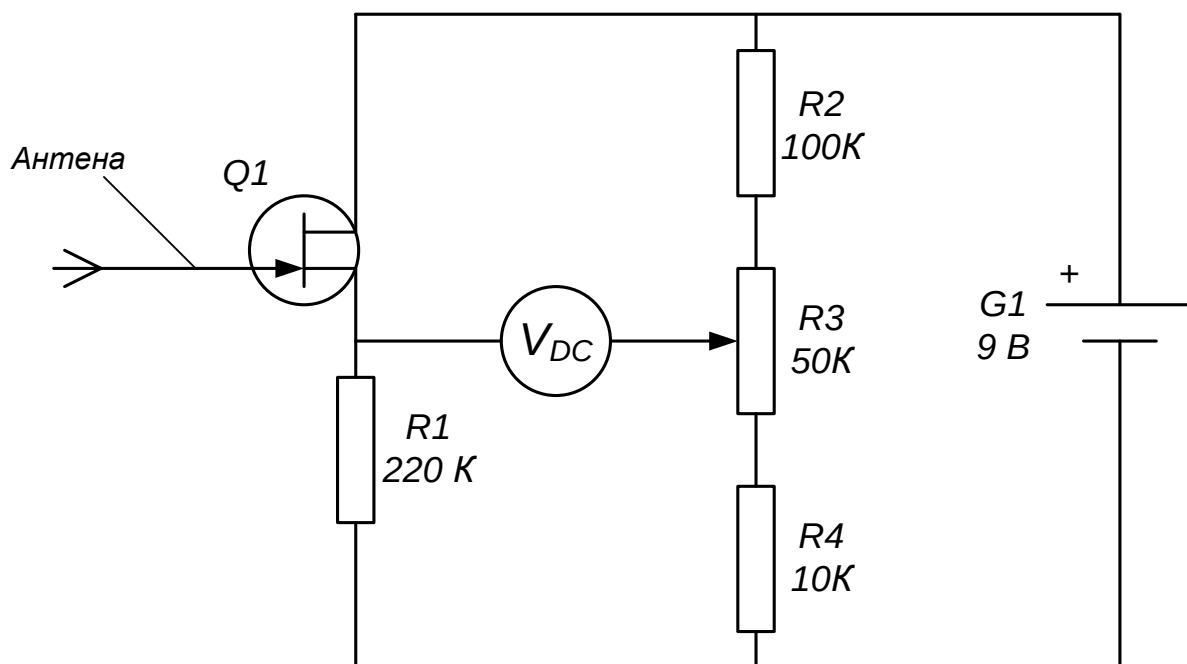


Рис. 4.23. Принципова схема електронного електрометра

2.2. Принцип роботи електронного електрометру.

Схема увімкнення польового транзистору $Q1$ та резисторів $R1$, $R2$, $R3$ та $R4$ називається мостовою. Транзистор $Q1$ та резистор $R1$ утворюють витоковий повторювач.

Повторювачем називається пристрій, який повторює вихідний сигнал. В електроніці застосовуються катодні (на електронних лампах), емітерні (на біполярних транзисторах) та витокові (на польових транзисторах) повторювачі. Повторювачі характеризуються високим коефіцієнтом підсилення за струмом та близьким до одиниці коефіцієнтом передачі напруги. Вони мають відносно високий вхідний опір, та відносно низький вихідний опір. Особливо високий вхідний опір мають саме витокові повторювачі на польових транзисторах.

Ланцюг з резисторів $R2$, $R3$ та $R4$ слугує для балансування мостової схеми. Мостова схема має дві діагоналі. До однієї діагоналі подається живлення, а до іншої підключається вольтметр. Антенною слугує з'єднувальний провід під макетні плати.

Для балансування схеми електрометра треба з'єднати антену з «-» джерела живлення і встановити змінний резистор в таке положення, при якому вольтметр (мультиметр увімкнений в режим вимірювання постійної напруги) покаже значення 0 В.

Після балансування та відключення антени від «-» джерела живлення за допомогою приладу можна визначати і знак заряду і його відносну величину, на відміну від найпростішого електрометру.

3. Виготовлення електрометру.

3.1. На макетній платі скласти схему електрометра у відповідності до схеми на рисунку 4.23 з урахуванням даних про розміщення електродів польових транзисторів на рисунку 4.19. Приклад зібраної схеми приведено на рисунку 4.24.

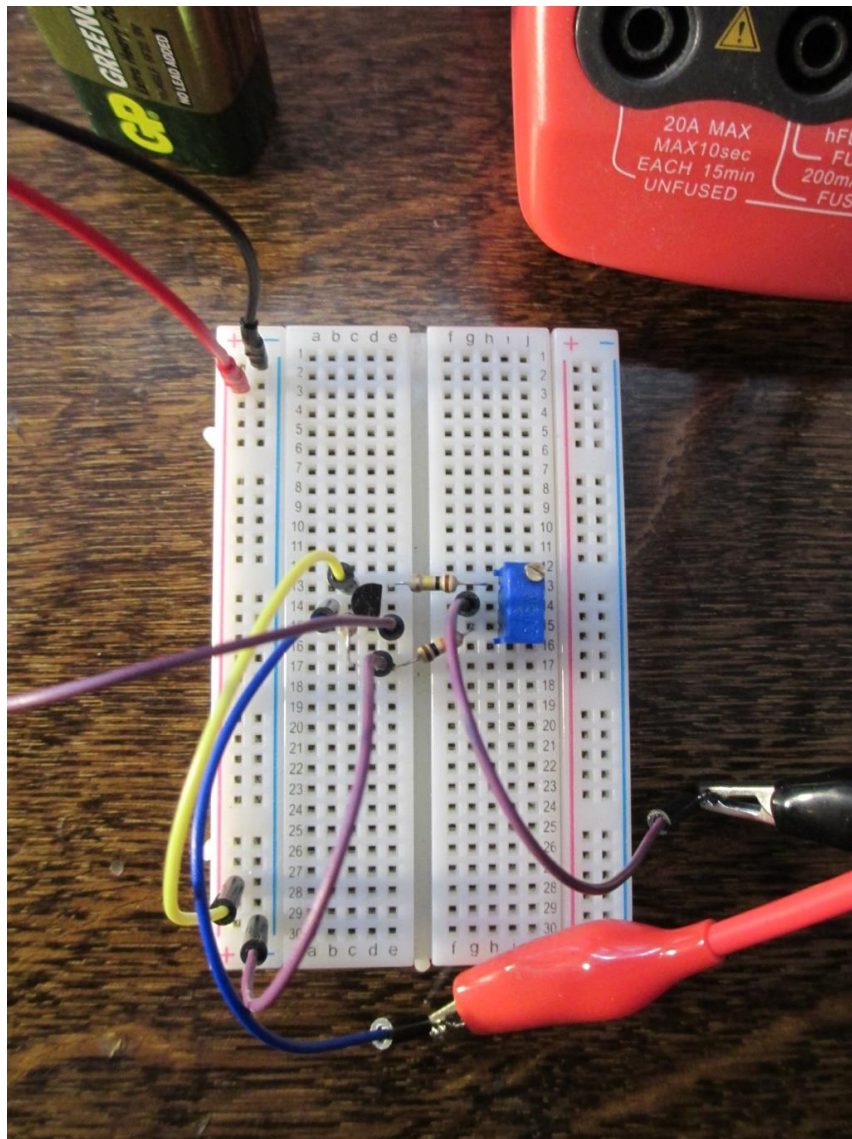


Рис. 4.24 – Приклад зібраної схеми електрометра

3.2 Підключити до схеми живлення і мультиметр.

3.3. Увімкніть мультиметр на режим вимірювання постійної напруги VDC (рис. 4.25).

3.3. З'єднати кінець антени з «-» джерела живлення.

3.4. Обертаючи ротор змінного резистора встановити його в положення, при якому покази мультиметра будуть дорівнювати 0 В.

4. Тестування електрометру.

4.1. Від'єднати кінець антени від «-» джерела живлення.

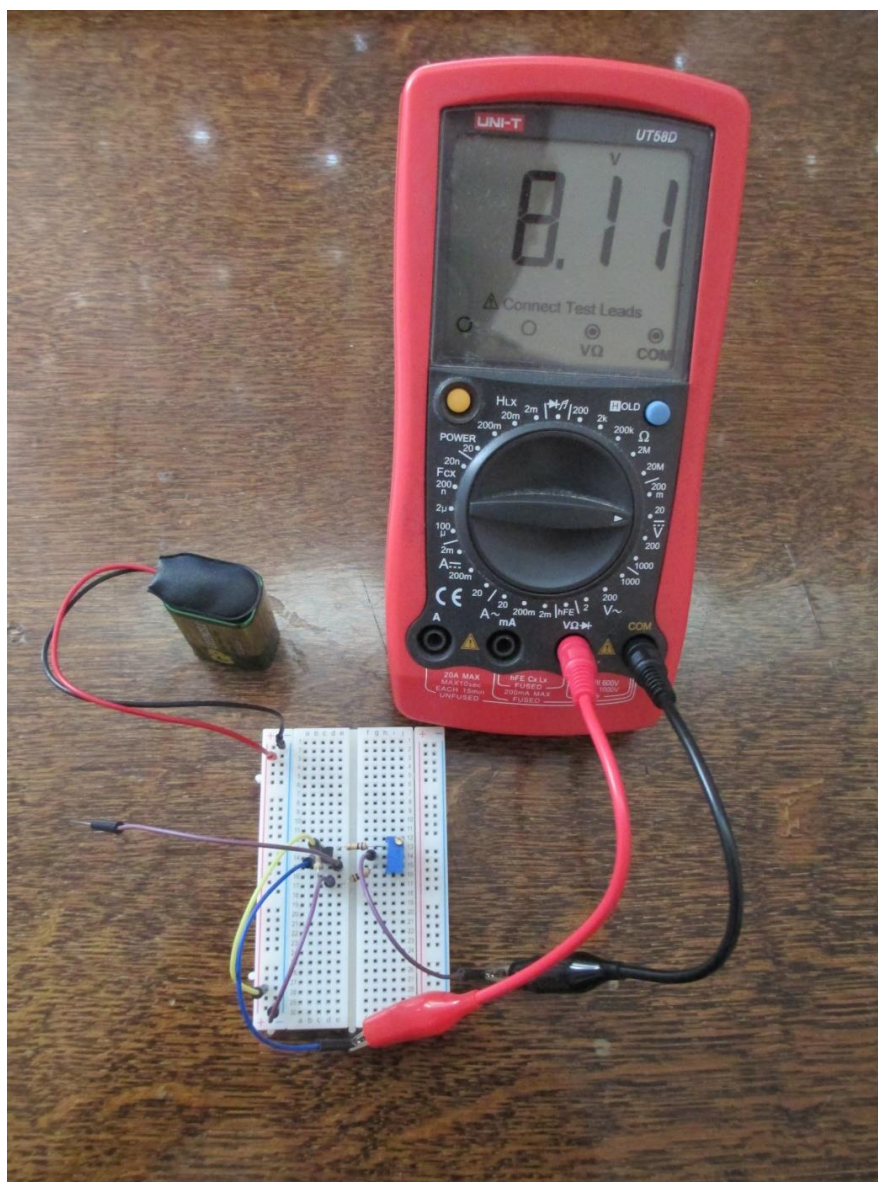


Рис. 4.25. Загальний вигляд електронного електрометру

4.2. Доторкнутися рукою до антени і з'ясувати який електричний заряд має власне тіло.

4.3. Потерти пластикову ручку об волосся і піднести її до антени. З'ясувати, заряду якого знаку та якої відносної величини набув пластик при терті об волосся.

4.4. Провести тестування з іншими матеріалами, наприклад, скло, вовна, синтетичні та натуральні тканини, вата, різні сорти пластику.

Якщо під час роботи з приладом його чутливість виявиться занадто високою, то до кінця антени можна під'єднати провідну кульку діаметром 5...10 см, зроблену, наприклад, з алюмінієвої фольги.

5. Зробити висновки щодо знаку та відносної величини електростатичного заряду, якого набувають тіла з різних матеріалів при терті одне об одне.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

1. Змодельуйте у середовищі Multisim 11.0. схему, зображену на рис. 4.26.

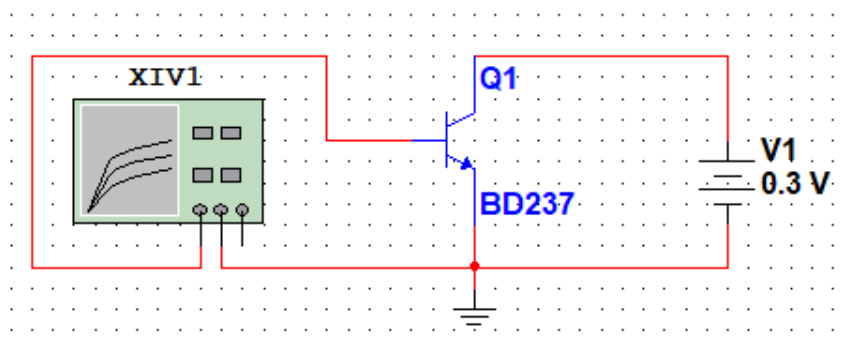


Рис. 4.26. Схема для отримання вхідних характеристик транзистора

Зніміть за допомогою інструменту IV-Analysis та побудуйте у Excel вхідні характеристики транзистора за різних напруг між колектором та емітером: 0 В; 0,1 В; 0,2 В; 0,3 В; 0,5 В; 1 В; 2 В. Порівняйте отримані графіки з графіками на рис. 4.3. Дійдіть висновків. В чому полягає ефект модуляції товщини бази?

2. За допомогою інструменту IV-Analysis зніміть сімейство вихідних характеристик транзистора BD237 та побудуйте їх у Excel. Розрахуйте та побудуйте передатні характеристики транзистора для 5...7 значень напруги між колектором та емітером. Порівняйте отримані графіки з графіками на рис. 4.5. Дійдіть висновків.

3. Опір відкритого каналу МОН-транзистора 2N7000 при напрузі між затвором та витокom 10 В дорівнює близько 2 Ом. Розрахуйте потужність, що розсіюється транзистором у схемі на рисунку 4.27.

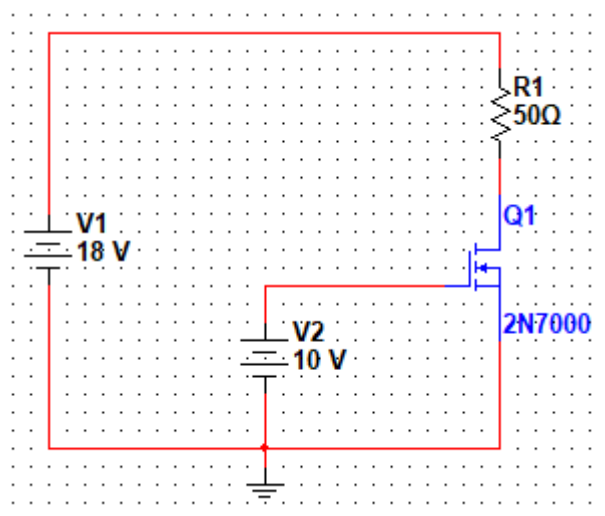


Рис. 4.27. Схема з транзистором 2N7000

2. За допомогою інструменту IV-Analysis зніміть сімейство вихідних характеристик транзистора 2N7000 та побудуйте їх у Excel. Розрахуйте та побудуйте передатні характеристики транзистора для 5...7 значень напруги між стоком та виток. Порівняйте отримані графіки з графіками на рис. 4.8. Дійдіть висновків.

4. Проаналізуйте роботу електронного пристрою, схема якого зображена на рис. 4.28. Що це за пристрій? Де він може бути використаний?

**X1 – лампа розжарювання.*

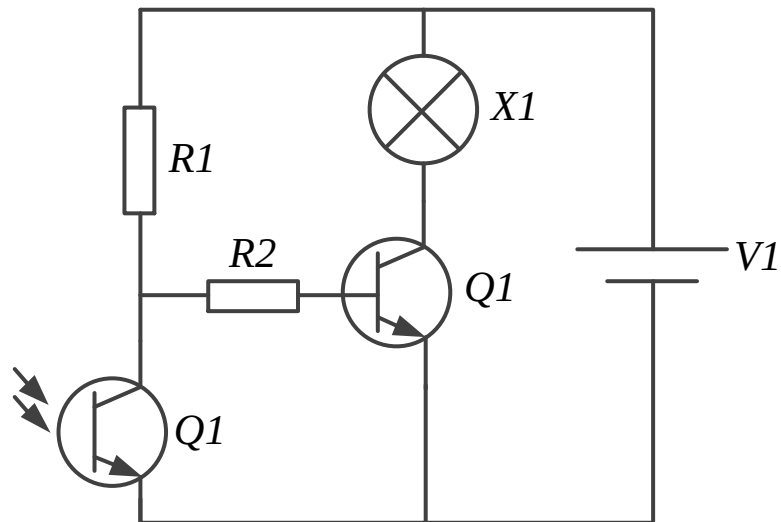


Рис. 4.28. Схема електронного пристрою.

РОЗДІЛ 5

НАПІВПРОВІДНИКОВІ РЕЗИСТОРИ, ТИРИСТОРИ ТА МІКРОСХЕМИ

Окрім найбільш розповсюджених серед напівпровідникових приладів діодів і транзисторів, в електроніці застосовуються й інші прилади, зокрема напівпровідникові резистори, тиристори та інтегральні мікросхеми.

5.1. Напівпровідникові резистори. Напівпровідниковий резистор, це резистор, виготовлений з рівномірно легованого напівпровідникового матеріалу.

Напівпровідникові резистори бувають лінійними та нелінійними. Лінійні резистори не змінюють свого опору залежно від зовнішніх факторів. Струм через них завжди пропорційний до прикладеної напруги. Нелінійні напівпровідникові резистори залежно від типу змінюють свій опір залежно від прикладеної напруги, температури, освітлення та інших факторів.

На рисунку 5.1 представлена класифікація та умовні позначення основних типів напівпровідникових резисторів.

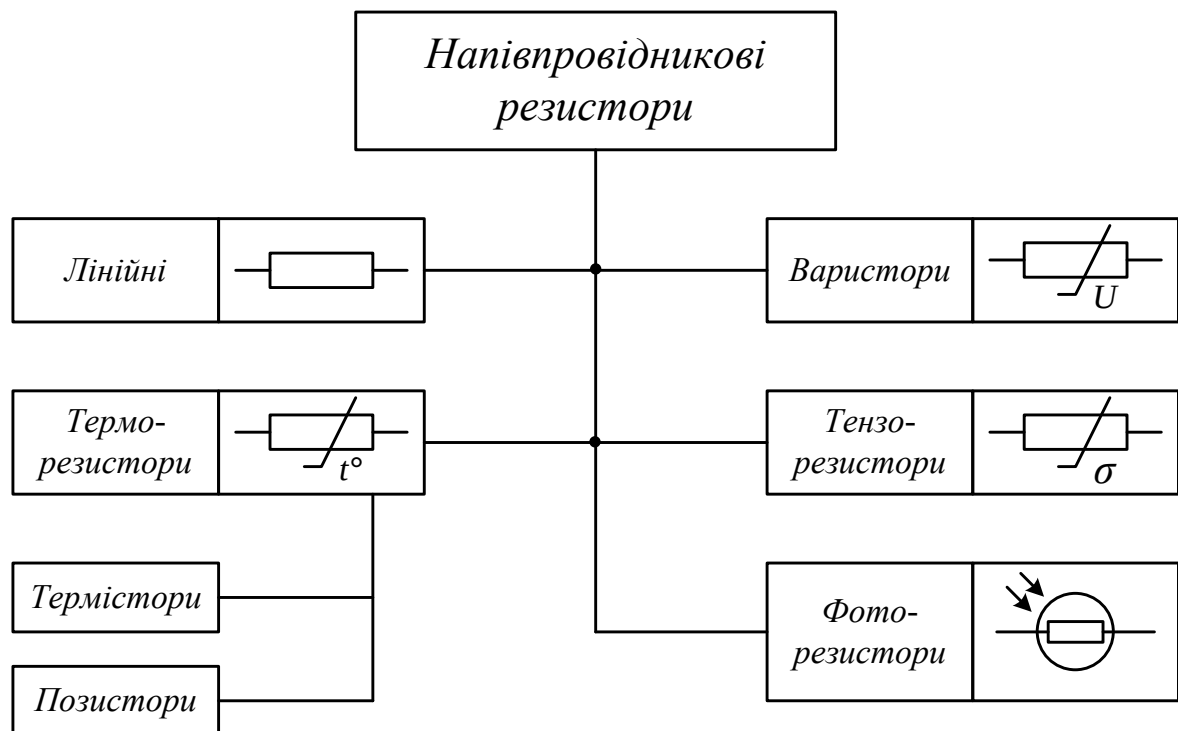


Рис. 5.1. Класифікація та умовні позначення напівпровідникових резисторів

Лінійні резистори виготовляють зі слабологованого кремнію або арсеніду галію. Їх опір мало залежить від прикладеної напруги та струму. Такі резистори використовуються найчастіше в інтегральних мікросхемах.

Варистор – це нелінійний напівпровідниковий резистор, опір якого залежить від прикладеної напруги. На рисунку 5.2 представлено приклад ВАХ варистора.

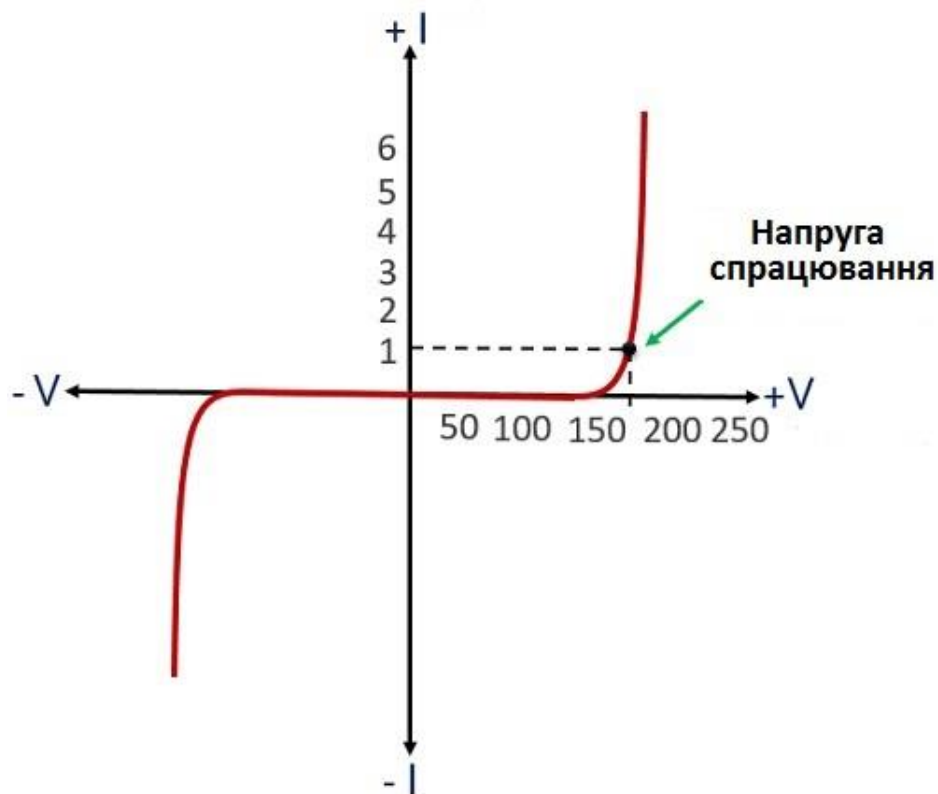


Рис. 5.2. Приклад ВАХ варистора

Виготовляють варистори зазвичай з порошкоподібного кристалічного карбиду кремнію, змішаного з глиною. З цієї маси пресують заготовки циліндричної або дискової форми та обпалюють їх при високій температурі. Потім, шляхом гарячого напилювання, наносять на торці електропровідний шар, до якого прикріплюють електроди. Усю отриману конструкцію, окрім виводів електродів покривають електроізоляційним лаком для захисту від зовнішнього впливу.

На рисунку 5.3 показано зовнішній вигляд варисторів.



Рис. 5.3. Зовнішній вигляд варисторів

Застосовуються варистори для захисту електронних виробів та їх елементів від перевищення напруги, для стабілізації напруги й струму, а також для регулювання та перетворення електричних сигналів.

Терморезистор – це напівпровідниковий резистор, опір якого істотно залежить від температури. Існують два види терморезисторів:

- *термістори* – терморезистори, опір яких зменшується зі зростанням температури;
- *позистори* – терморезистори, опір яких збільшується зі зростанням температури.

На рисунку 5.4 зображено графіки залежностей опору терморезисторів від температури – їх температурні залежності.

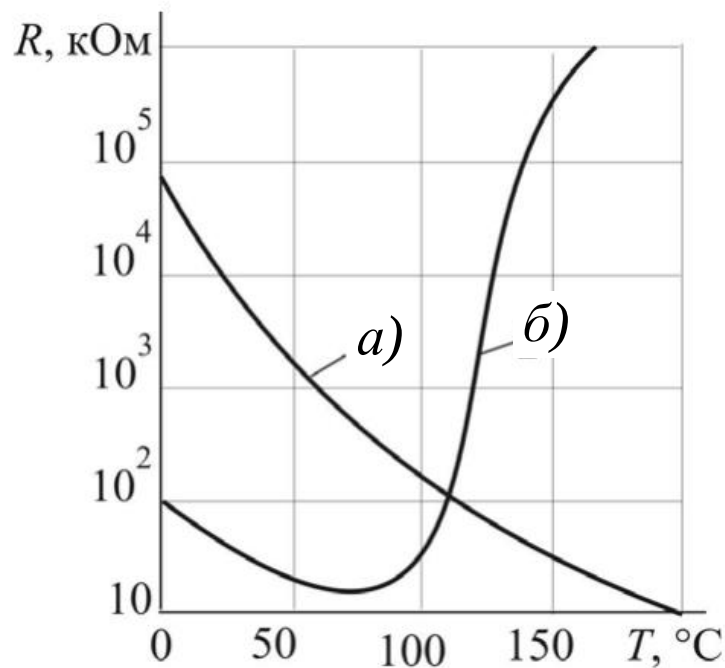


Рис. 5.4. Температурні характеристики термістора (а) та позистора (б).

Для виготовлення термісторів зазвичай застосовуються оксидні напівпровідники n-типу та їх суміші, а для виготовлення позисторів – титано-барієву кераміку з домішками рідкоземельних елементів.

За технологією виготовлення та конструкцією терморезистори схожі з варисторами.

Терморезистори застосовуються і якості датчиків температури в системах її вимірювання та автоматичного регулювання, а також для термокомпенсації різних елементів електричних кіл, теплового захисту, протипожежної сигналізації.

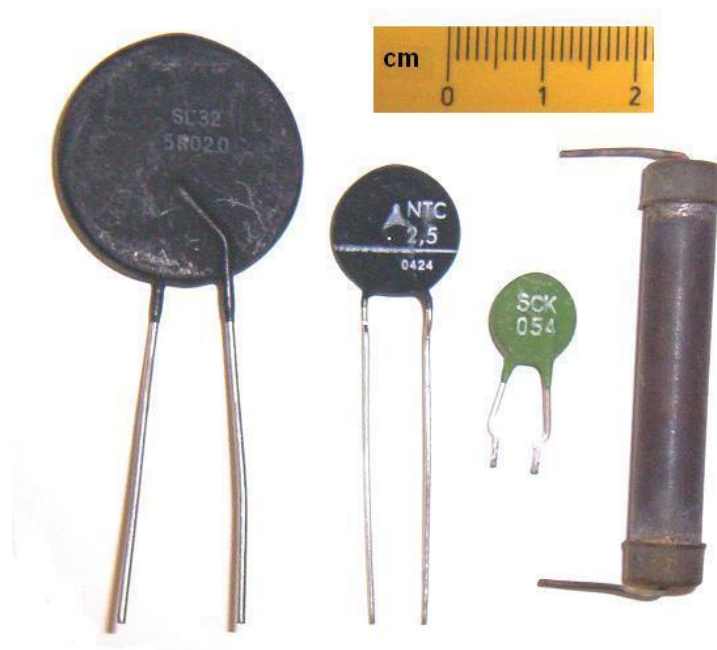


Рис. 5.5. Зовнішній вигляд терморезисторів

Тензорезистор – це резистор, опір якого залежить від його механічної деформації.

Для виготовлення тензорезисторів використовують кремній з провідністю як n-, так і р-типу. Заготовки матеріалу, порізані на невеликі пластинки, шліфуються до отримання гладкої поверхні і до них приварюють контактні виводи.

Тензорезистор, закріплений на тих чи інших деталях, дозволяє вимірювати деформацію цих деталей і визначати механічні напруги в них.

Тензорезистори широко застосовуються у електронних вагах а також під час випробувань деталей різних машин і механізмів.

На рисунку 5.6 показано зовнішній вигляд кремнієвого тензорезистора.



Рис. 5.6. Зовнішній вигляд кремнієвих тензорезисторів

На рисунку 5.7 зображено зовнішній вигляд тензодатчика для електронних ваг та показані місця розміщення тензорезисторів на ньому.

Тензорезистори до тензодатчику або до випробуваної деталі зазвичай приклеюються за допомогою спеціального клею, після чого герметизуються за допомогою еластичного компаунду.

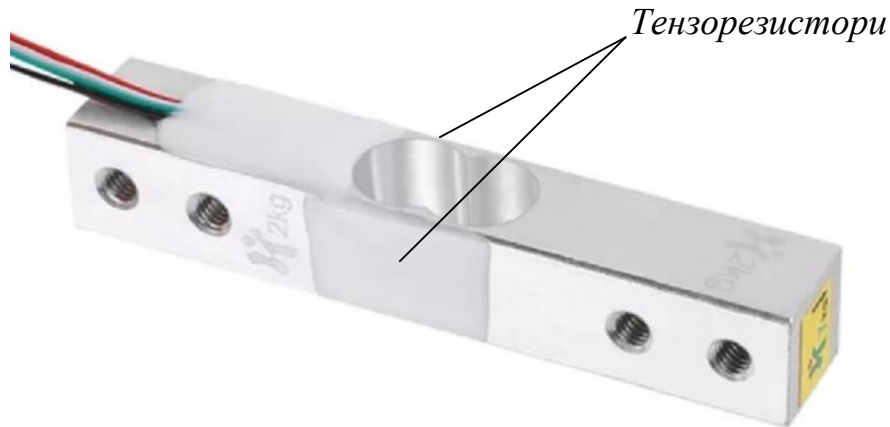


Рис. 5.7. Зовнішній вигляд тензодатчика електронних ваг

Фоторезистор – це напівпровідниковий резистор, опір якого змінюється залежно від параметрів освітлення. Його принцип дії ґрунтується на ефекті фотопровідності – явищі зменшення опору напівпровідника при збудження носіїв заряду світлом. Тобто опір фоторезисторів зменшується зі зростанням освітленості.

Найпопулярнішим напівпровідником для виготовлення фоторезисторів є сульфід кадмію, але використовуються також селенід кадмію та сульфід свинцю. Світлочутливі елементи з даних матеріалів розташовують у пластикових або металевих корпусах з відповідним отвором для освітлення. В деяких випадках, коли потрібні невеликі розміри, їх виготовляють без корпусу.



Рис. 5.8. Зовнішній вигляд сучасного фоторезистора

Фоторезистор не містить р-п переходу, тому має однаковий опір незалежно від напрямку протікання струму.

Основною характеристикою фоторезистора є залежність його опору від освітленості – світлова характеристика. На рис. 5.9 представлено приклад

такої характеристики для конкретної моделі фоторезистора, взятої з технічної документації.

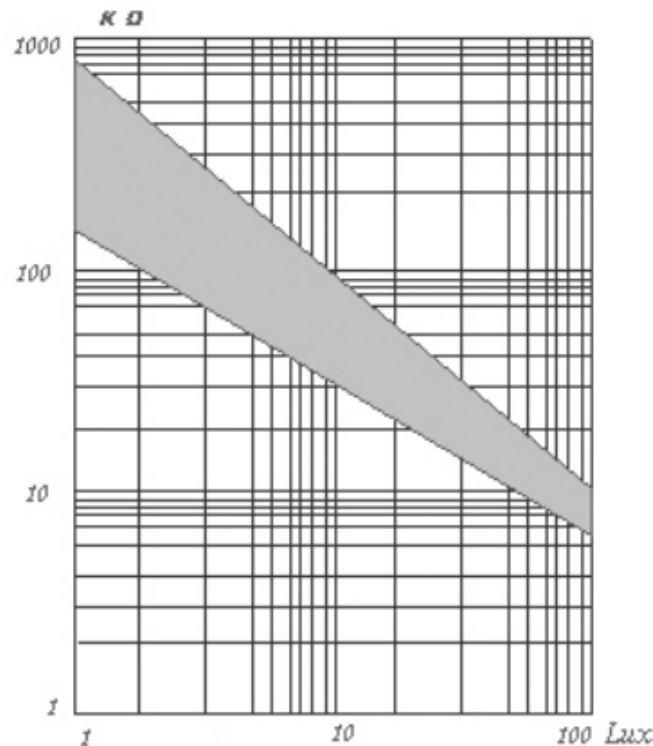


Рис. 5.9. Приклад світлової характеристики фоторезистора

З рис. 5.9 видно, що навіть для однієї і тієї самої моделі фоторезистора не існує точної світлової характеристики у вигляді однієї лінії, що зумовлено значним розкидом параметрів, пов'язаним з особливостями їх виготовлення. У зв'язку з цим разом зі світловою характеристикою використовують параметр γ_{100}^{10} , який визначається за формулою:

$$\gamma_{100}^{10} = \lg \left(\frac{R_{10}}{R_{100}} \right), \quad (5.1)$$

де R_{10} та R_{100} – значення опору фоторезистора при освітленості 10 та 100 Лк відповідно.

Логарифм співвідношення опорів γ_{100}^{10} є досить точним показником, і саме він зазвичай використовується разом з темновим опором R_T та опором R_{10} , значення яких також приводяться у документації, при підборі моделі фоторезистора для вирішення тих чи інших задач.

Фоторезистори застосовуються у багатьох галузях науки й техніки, а особливо – в оптоелектроніці. Вони входять до складу різноманітних фотореле, датчиків освітленості, тощо.

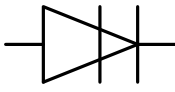
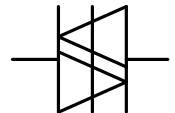
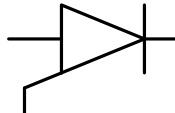
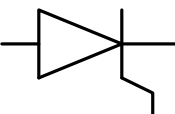
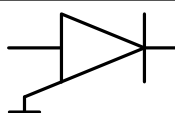
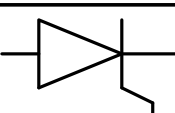
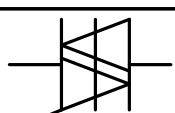
5.2. Тиристори. Тиристором називається напівпровідниковий прилад з трьома або більше р-п-переходами, що характеризується двома стійкими станами. Тиристор відкривається для пропускання електричного струму при

досягненні граничного значення напруги між анодом та катодом, або при подачі невеликої напруги на керуючий електрод.

Тиристори виготовляються з кремнію, в якому створюються прошарки з електронною та дірковою провідністю, які чергуються. Зазвичай таких прошарків чотири з трьома р-п-переходами. Існують тиристори з двома виводами – катодом й анодом (диністори, або діодні тиристори), і з трьома виводами, у яких крім аноду і катоду є керуючий електрод – триністори.

У таблиці 5.1 представлені умовні позначення і назви основних видів тиристорів.

Таблиця 5.1. Умовні позначення тиристорів

	<i>Диністор</i>
	<i>Симетричний диністор (діак)</i>
	<i>Триністор з керуванням за анодом</i>
	<i>Триністор з керуванням за катодом</i>
	<i>Замикаючий анодний триністор</i>
	<i>Замикаючий катодний триністор</i>
	<i>Симетричний триністор (симістор)</i>

Диністор – це тиристор, що має два зовнішні виводи (анод і катод) і являє собою чотиришаровий напівпровідниковий прилад, що складається з чотирьох областей, провідності яких чергуються. Диністори застосовуються в безконтактних перемикаючих приладах, які керуються напругою.

Структура диністора та його ВАХ представлені на рисунку 5.10.

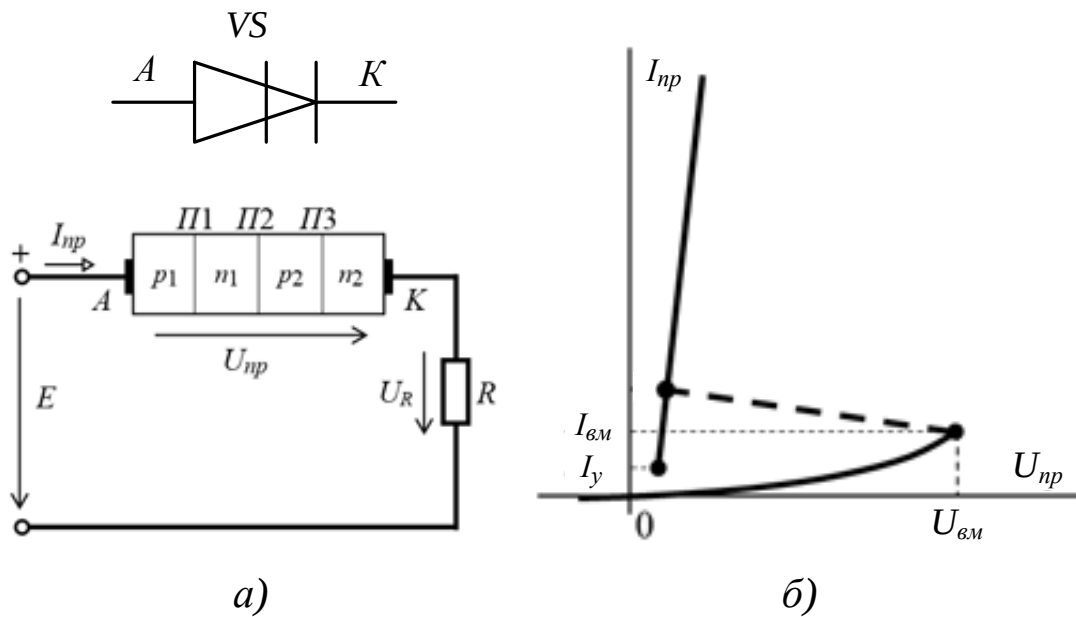


Рис. 5.10. Структура (а) та ВАХ (б) диністора

При підведенні до диністора прямої напруги U_{np} р-п-переходи $\Pi 1$ і $\Pi 3$ відкриваються подібно до діодів. А для переходу $\Pi 2$ напруга U_{np} виявляється зворотною, і крізь нього буде проходити лише невеликий зворотний струм, який буде збільшуватися з підвищенням прямої напруги на приладі. Проходячи крізь перехід $\Pi 2$, неосновні носії заряду сприяють деіонізації домішкових атомів в переході і зменшують тим самим його ширину. При досягненні певного рівня прямої напруги $U_{вм}$ на диністорі, ширина переходу $\Pi 2$ зменшується практично до нуля, і він відкривається для основних носіїв заряду, концентрація яких зростала з підвищенням напруги. Починається їх лавиноподібний рух, внаслідок якого утворюється великий прямий струм, а пряме падіння напруги зменшується до 0,5...1 В. Відбувається так зване «вмикання» диністора.

Таким чином, диністор може перебувати у двох станах: закритому, що характеризується великим опором, і відкритому, який характеризується малим опором. Для вимикання диністора необхідно зменшити прямий струм до значення $I_{np} < I_y$, (де I_y – струм утримання – мінімальний прямий струм, при якому диністор ще залишається у відкритому стані), або подати на прилад напругу зворотної полярності. Струм утримання для диністорів, а також для інших різновидів тиристорів є одним з довідникових параметрів і приводиться у технічній документації.

Напруга $U_{вм}$, при якій відкривається тиристор, може бути зменшена шляхом введення додаткових неосновних носіїв заряду у будь-який з прошарків побіч переходу $\Pi 2$. Це сприятиме збільшенню актів деіонізації в переході, і зменшенню напруги вмикання. Для введення додаткових носіїв електричних зарядів у тріодному (триелектродному) тиристорі (триністорі) використовують керуючий електрод, який живиться від незалежного джерела напруги.

На рисунку 5.11 представлена структура та ВАХ триністора з керуванням за катодом.

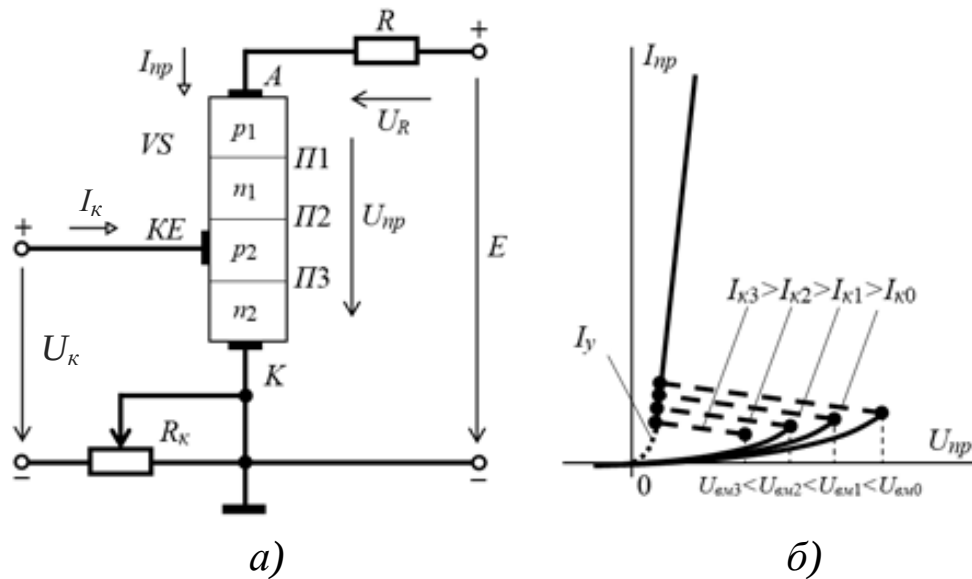


Рис. 5.11. Структура (а) та ВАХ (б) триністора з керуванням за катодом

З рисунку 5.10 видно, що чим більшим є струм керуючого електроду, тим меншою є напруга вмикання триністора.

Особливістю звичайного триністора є те, що будучи включеним, він перебуває в такому стані навіть при знятті керуючої напруги. Ця властивість дозволяє включати триністор за допомогою короткого імпульсу струму й тим самим значно знизити витрати енергії на керування ним.

Для вимикання триністора необхідно зменшити прямий струм до значення $I_{np} < I_y$ (де I_y – струм утримання – мінімальний прямий струм, який не виключає тиристор) або подати на прилад напругу зворотної полярності. Якщо триністор включений у коло джерела змінної напруги, то його перемикання з провідного стану в замкнений відбувається автоматично при переході позитивної півхвилі напруги через нуль.

У триністорах з керуванням за анодом керуючий електрод з'єднується з прошарком n_1 , а керуючий струм протікає у напрямі від аноду до керуючого електроду.

Існують також триністори, які можуть як відкриватися, так і закриватися за допомогою керуючого електроду – замикаючі триністори. Схема їх структури ідентична до структури звичайних триністорів з різницею лише у товщині прошарків напівпровідників та вмісті у них домішок. Замикаючий триністор вмикається шляхом подачі на керуючий електрод імпульсу прямої полярності, а вимикається – шляхом подачі на керуючий електрод імпульсу зворотної полярності. Замикаючі триністори також бувають з керуванням за катодом та анодом.

Ми розглянули диністори і триністори, що можуть відкриватися для проходження струму лише в одному напрямку – від аноду до катоду. Такі тиристори називаються несиметричними.

Тиристори, які можуть проводити струм у обох напрямках називаються симетричними. Вони також можуть бути двоелектродними – симетричні диністори та триелектродними – симетричні триністори.

На рисунку 5.12 зображено будову симетричного диністора та його ВАХ.

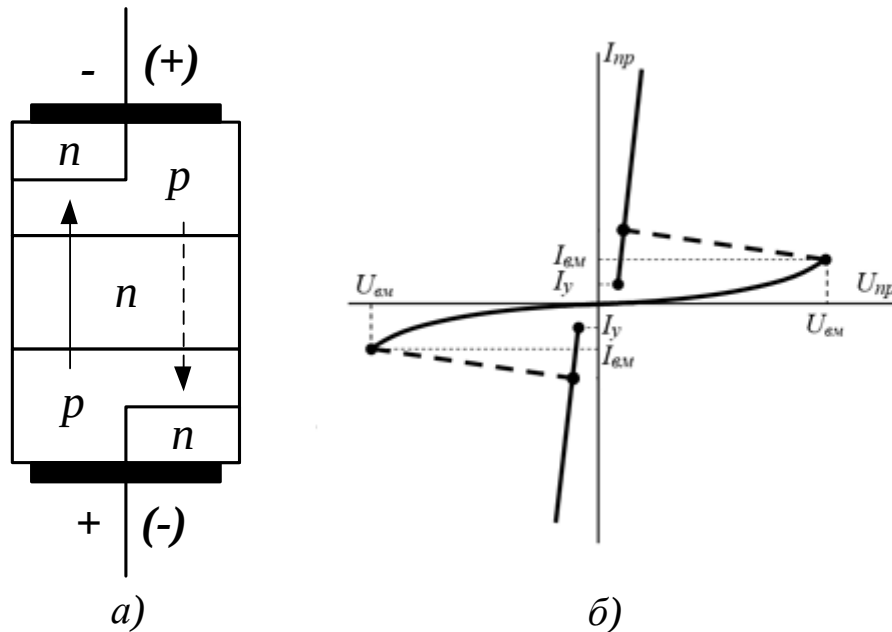


Рис. 5.12. Структура (а) та ВАХ (б) симетричного диністора

При полярності прикладеної напруги без дужок (рис. 5.11) працює ліва половина приладу (напрямок струму показаний суцільною стрілкою), а при полярності в дужках – права (напрямок струму показаний пунктирною лінією).

На рисунку 5.13 зображено структуру та ВАХ симетричного триністора, що має керуючий електрод.

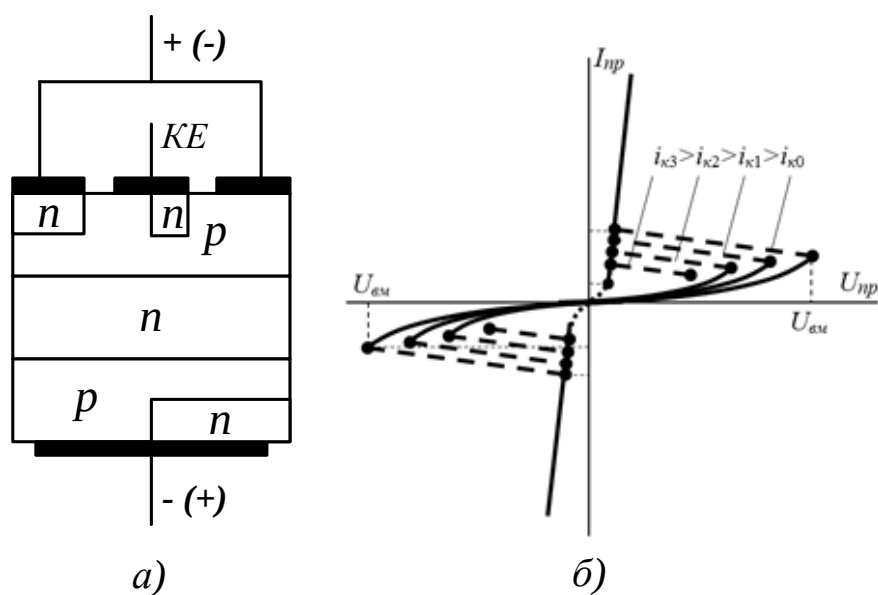


Рис. 5.13. Структура (а) та ВАХ (б) симетричного триністора

Для вмикання симетричного триністора керуючий імпульс подається на керуючий електрод відносно ближчого до нього основного електроду. Симетричні тиристори переключаються у провідний стан імпульсом як прямої так і зворотної полярності, незалежно від миттєвої полярності джерела напруги.

Тиристори, особливо симетричні, широко застосовуються у ланцюгах змінного струму для регулювання напруги або потужності.

На рисунку 5.14 зображено схему симісторного регулятора потужності, подібного до тих які застосовуються у диммерах для регулювання освітлення та у побутових пилососах для регулювання обертів двигуна.

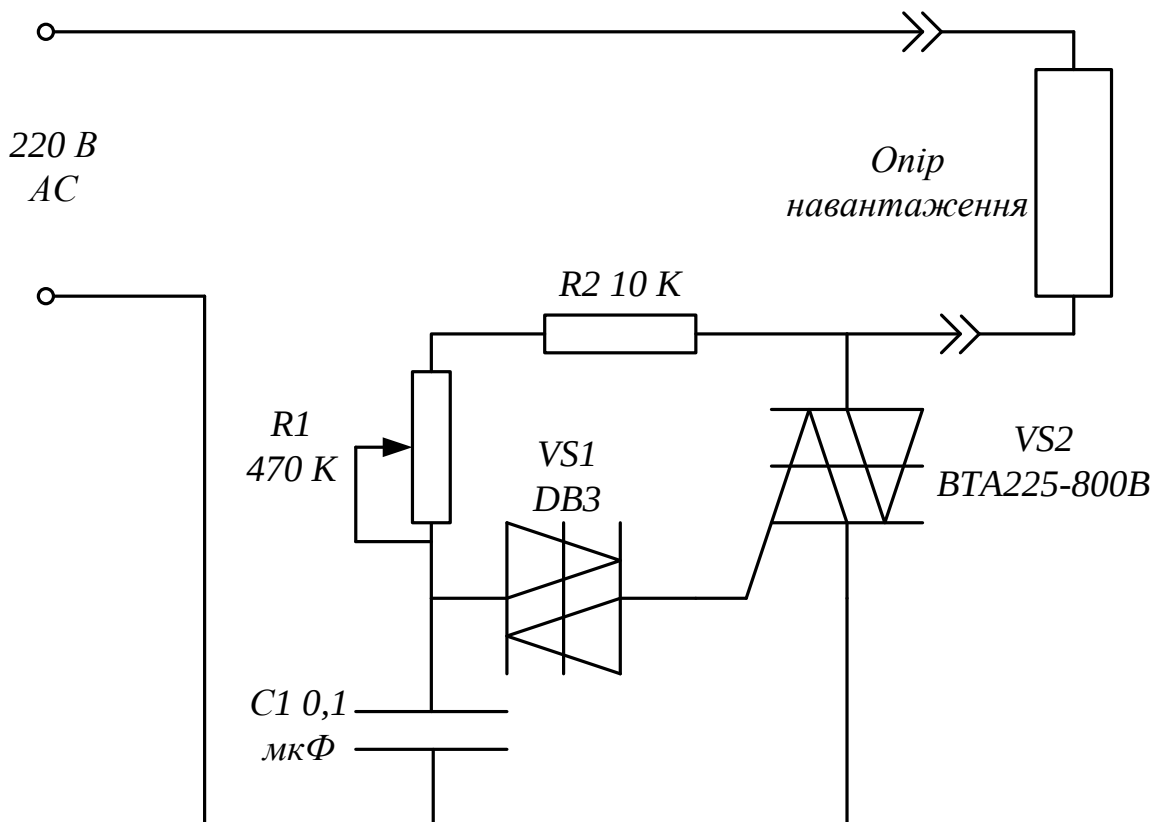


Рис. 5.14. Схема симісторного регулятора потужності

Регулятор потужності включається до мережі послідовно з опором навантаження. Симістор VS2 відкривається в момент, коли напруга на конденсаторі $C1$ досягне рівня включення симетричного диністора VS1 і до керуючого електроду VS2 надійде сигнал на відкриття. Чим більший опір буде виставлено на потенціометрі $R1$, тим пізніше відкриється VS2, і тим меншою буде вихідна потужність.

На рисунку 5.15 зображено діаграми напруги на опорі навантаження при різних опорах потенціометра, а відповідно й при різних значеннях потужності.

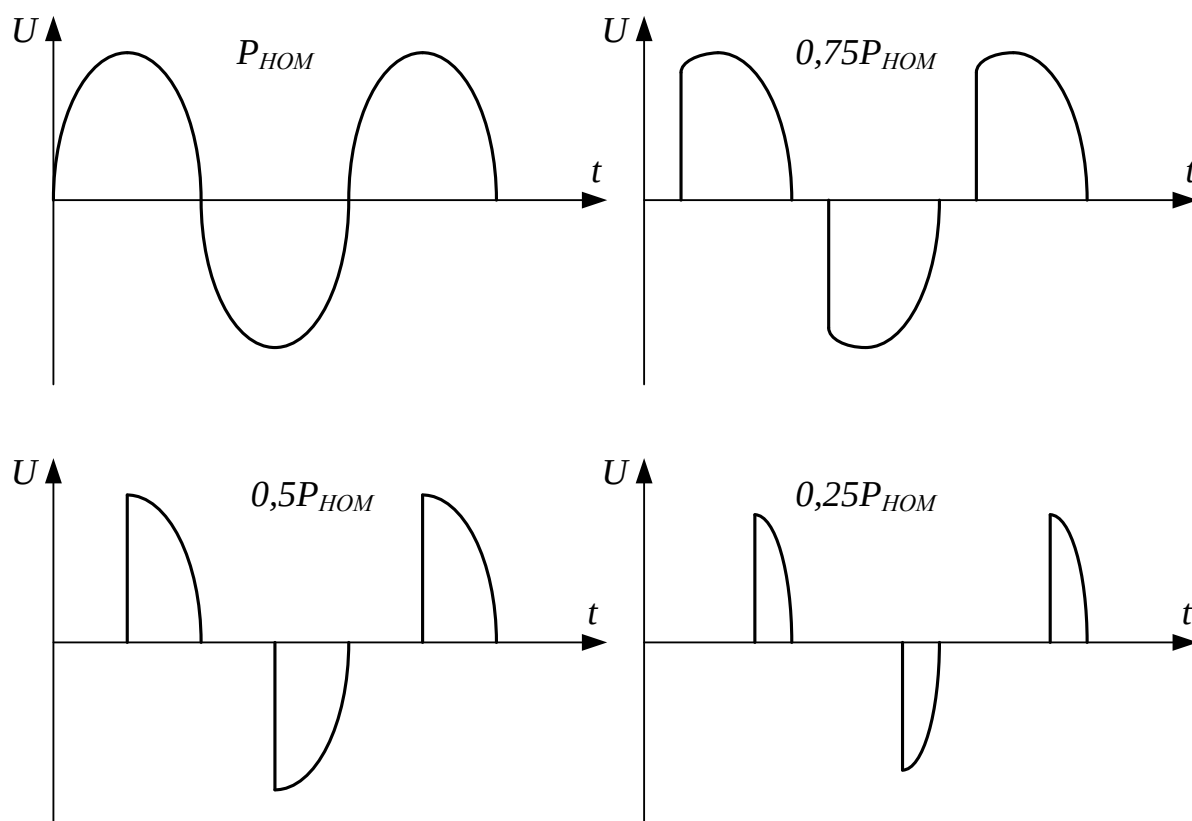


Рис. 5.15. Діаграми напруги на опорі навантаження при різних потужностях

На рисунку 5.16 зображено зовнішній вигляд симетричного диністора DB3 та симістора BTA225-800B, які застосовуються у схемі на рисунку 5.14.

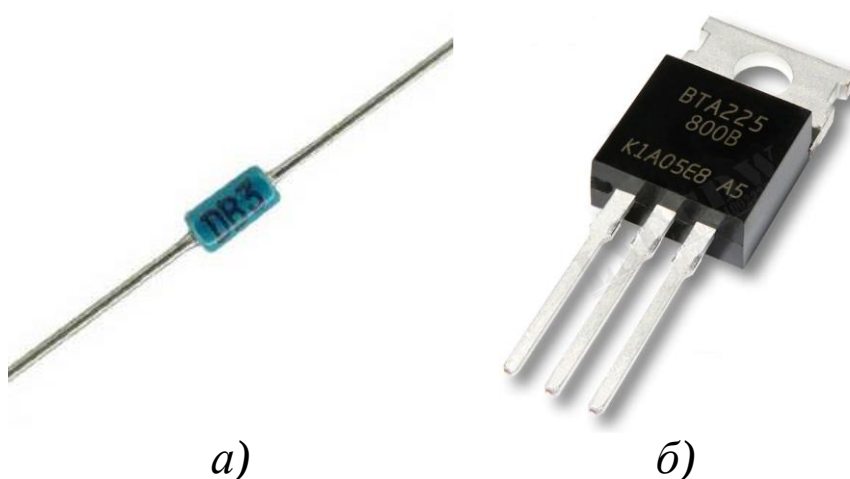


Рис. 5.16. Симетричний диністор DB3 (а)
та симістор BTA225-800B (б)

5.3. Інтегральні мікросхеми. Інтегральна мікросхема (ІМС) – це мікроелектронний виріб, до складу якого входить не менше п'яти активних (транзисторів, діодів) і пасивних (резисторів, конденсаторів) елементів, які

виготовляють в одному технологічному процесі. Ці елементи електрично з'єднані між собою, вміщені в загальний корпус і є нероздільним цілим.

Основними параметрами ІМС є щільність пакування і ступінь інтеграції. Щільність пакування характеризується кількістю елементів в одиниці об'єму ІМС, а ступінь інтеграції – кількістю елементів, які входять до складу ІМС. За ступенем інтеграції всі ІМС поділяють на: ІМС першого ступеня інтеграції – до 10 елементів, другого ступеня – від 10 до 100 елементів, третього ступеня – від 100 до 1000 елементів і т.д.

Інтегральні мікросхеми є основними компонентами сучасних електронних пристроїв.

За технологією виготовлення розрізняють напівпровідникові і гібридні ІМС.

Напівпровідникова ІМС – це інтегральна мікросхема, всі елементи і їх з'єднання якої виконані в об'ємі і на поверхні напівпровідника.

У технології напівпровідникових інтегральних мікросхем окремі елементи виготовляють шляхом спрямованої зміни властивостей певних областей підкладки, а саме, внесення домішок у кристал напівпровідника за допомогою дифузії за високої температури або іонної імплантації. Таке легування здійснюється локально за допомогою спеціальних масок з отворами, через які атоми домішки проникають у кристал на потрібних ділянках. Роль маски зазвичай виконує плівка двоокису кремнію SiO_2 , що покриває поверхню кремнієвої пластини. В цій плівці різними методами формуються вікна необхідної форми, через які відбувається введення домішок. Потім елементи з'єднують один з одним тонкими металевими доріжками. Ділянки маски з двоокису кремнію можуть слугувати також діелектриками конденсаторів.

Щільність пакування сучасних напівпровідникових ІМС сягає 10^5 елементів на 1 см^3 для шостого ступеня інтеграції. Лінійні розміри окремих елементів і відстані між ними можуть бути зменшені до 1 мкм.

Гібридна ІМС – інтегральна мікросхема, пасивні елементи якої виконані нанесенням різних плівок на поверхню діелектричної підкладки зі скла, кераміки, сіталу або сапфіру, а активними елементами є безкорпусні напівпровідникові прилади.

Щільність пакування гібридних ІМС менша порівняно з напівпровідниковими – до 150 елементів на 1 см^3 , ступінь інтеграції – перший і другий. Гібридні ІМС перспективні для пристроїв з невеликою кількістю елементів, в яких може бути забезпечена висока точність параметрів.

На рисунку 5.17 показано фрагмент однієї і тієї самої схеми (рис. 5.17 а), реалізованої у складі ІМС, виготовлених за напівпровідниковою (рис. 5.17 б) та гібридною (рис. 5.17 в) технологіями.

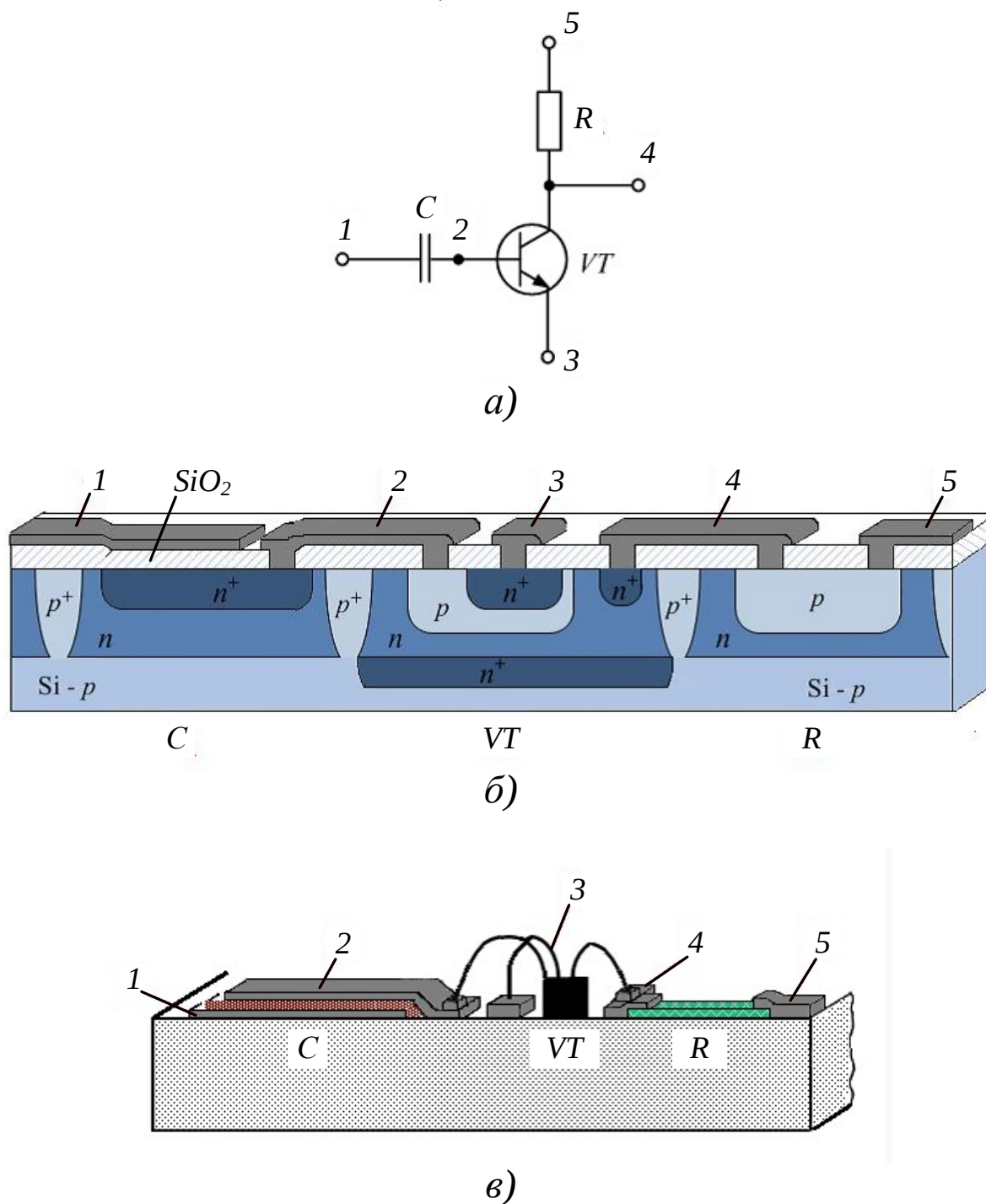


Рис. 5.17. Реалізація фрагменту електронної схеми (а) у складі напівпровідникової (б) та гібридної (в) ІМС

Останнім часом застосовують суміщену технологію, за якою до складу гібридних мікросхем входять безкорпусні напівпровідникові ІМС. За такою технологією виготовляють мікросхеми до шостого ступеня інтеграції для швидкодіючих електронно-обчислювальних машин.

Застосування мікросхем істотно збільшує надійність електронних пристроїв, тому що надійність мікросхем загалом, до складу яких входить велика кількість елементів, не поступається надійності окремих транзисторів, діодів, резисторів, тощо.

На відміну від напівпровідникових діодів і транзисторів, ІМС є не окремими елементами, а цілими функціональними вузлами, призначеними для перетворення електричних сигналів. Залежно від типу сигналів, які формують та перетворюють ІМС, розрізняють два класи ІМС: аналогові та цифрові.

Аналогові ІМС призначені для оброблення та перетворення аналогових сигналів і реалізують такі основні аналогові функції: підсилення, порівняння, перемноження, обмеження, частотну фільтрацію. Кожна із названих функцій є відповідною математичною операцією, яку здійснюють ІМС над аналоговими сигналами:

- функція підсилення – це збільшення миттєвих значень сигналу в K разів без нелінійних спотворень у необмеженій смузі частот;
- функція порівняння – це зіставлення двох аналогових сигналів з деякою заданою точністю;
- функція перемноження дає змогу отримати результат перемноження двох аналогових сигналів;
- функція обмеження встановлює межі допустимих змін миттєвих значень сигналу, які він не може перейти. Розрізняють обмеження зверху, знизу та двостороннє обмеження;
- функція частотної фільтрації – це виділення потрібного діапазону частот із повного спектра сигналу, в якому здійснюється передавання його гармонік.

Перелічені основні аналогові функції утворюють у сукупності повний набір операцій, необхідних для перетворення та оброблення аналогових сигналів. Аналогові ІМС виготовляють переважно у вигляді напівпровідникових ІМС.

Основу номенклатури аналогових мікросхем утворюють ІМС, які реалізують основні та спеціальні аналогові функції. Залежно від реалізованої аналогової функції розрізняють такі основні типи аналогових ІМС: багатоцільові підсилювачі, операційні підсилювачі, компаратори напруги, обмежувачі, перемножувачі, активні та пасивні фільтри, аналого-цифрові (АЦП) та цифро-аналогові (ЦАП) перетворювачі, стабілізатори напруги, комутатори і ключі, формувачі, генератори, детектори, модулятори, змішувачі, тощо.

Багатоцільові підсилювачі призначені для підсилення сигналів у широкому діапазоні частот. До них належать підсилювачі низьких, проміжних та високих частот, а також широкосмугові підсилювачі і підсилювачі постійного струму.

Окрему підгрупу становлять операційні підсилювачі – найпоширеніший тип підсилювача широкого застосування, який реалізує функцію підсилення і виконує роль базового універсального елемента для побудови аналогових функціональних вузлів різноманітного призначення. Типовий операційний підсилювач характеризується високим коефіцієнтом підсилення (десятки – сотні тисяч), високим вхідним опором (сотні кОм – десятки МОм), низьким вихідним опором (сотні Ом – одиниці кОм).

Компаратори напруги реалізують функцію порівняння двох сигналів і в момент їхньої рівності стрибком змінюють вихідну напругу.

Обмежувачі реалізують функцію обмеження і призначені для зміни форми сигналів.

Перемножувачі реалізують функцію перемноження двох аналогових сигналів. Їх застосовують під час здійснення таких перетворень сигналів, як модуляція, помноження, ділення та перетворення частоти коливальних, детектування, генерування коливальних.

Фільтри реалізують функції частотної вибірконості (селекції). Їх випускають серійно у вигляді активних RC-фільтрів на основі операційних підсилювачів, а також у вигляді пристроїв на основі поверхневих акустичних хвиль та приладів із зарядовим зв'язком.

АЦП і ЦАП призначені для перетворення відповідно аналогових сигналів у цифровий код і цифрової інформації на аналогові сигнали. Їхнє застосування забезпечує цифрове оброблення аналогових сигналів і подальше перетворення результатів оброблення в аналогову форму.

Стабілізатори напруги призначені для підтримання сталої напруги живлення електронних вузлів, блоків, пристроїв.

Аналогові комутатори і ключі застосовують для перемикання і перерозподілу у часі потоків інформації у вигляді сигналів.

Формувачі сигналів, генератори, детектори, модулятори, змішувачі належать також до аналогових ІМС. Оскільки кількість таких схем велика, а їхня стандартизація ускладнена, то під час їхнього виготовлення використовують різні типи операційних підсилювачів з додатковими зовнішніми підсхемами.

Різноманітність функцій, які реалізують аналогові ІМС, не дає змогу характеризувати їх сукупністю параметрів, єдиних для усіх типів мікросхем. Кожну групу аналогових ІМС характеризують певними параметрами, притаманними лише однотипним мікросхемам.

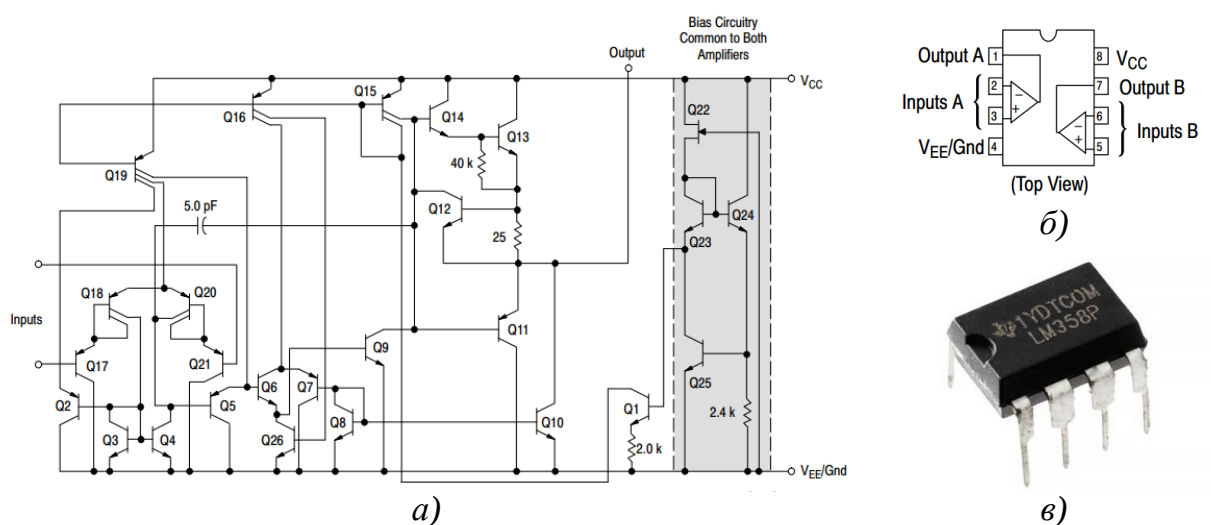


Рис. 5.18. Двоканальний операційний підсилювач LM358: схема одного каналу (а), розміщення виводів (б), зовнішній вигляд (в)

На рисунку 5.18 в якості прикладу зображено електронну схему (одного каналу), розміщення виводів та зовнішній вигляд операційного підсилювача загального призначення LM358.

Цифрові ІМС призначені для обробки та перетворення цифрових сигналів і реалізують логічні та арифметичні операції та операції запам'ятовування цифрової інформації. При цьому зазвичай використовують двійкову систему числення. Двійкова система порівняно з іншими системами дає змогу найпростіше реалізувати арифметичні дії.

Основою будови цифрових ІМС є так звані логічні елементи, тобто електронні схеми, які виконують найпростіші логічні операції, до яких належать:

- операція логічного заперечення (інверсія) – функція “НЕ”;
- операція логічного додавання (диз’юнкція) – функція “АБО”;
- операція логічного множення (кон’юнкція) – функція “І”.

Ці елементарні логічні функції утворюють так званий основний логічний базис. З їхньою допомогою можна реалізувати будь-яку більш складну логічну функцію. Інтегральні логічні елементи становлять основу більш складних мікросхем та цифрових пристроїв і систем. Найпоширенішими є цифрові ІМС на біполярних та польових транзисторах.

На рисунку 5.19 в якості прикладу зображено електронну схему (одного логічного елемента), розміщення виводів та зовнішній вигляд цифрової ІМС CD4011, що складається з чотирьох логічних елементів 2І-НЕ.

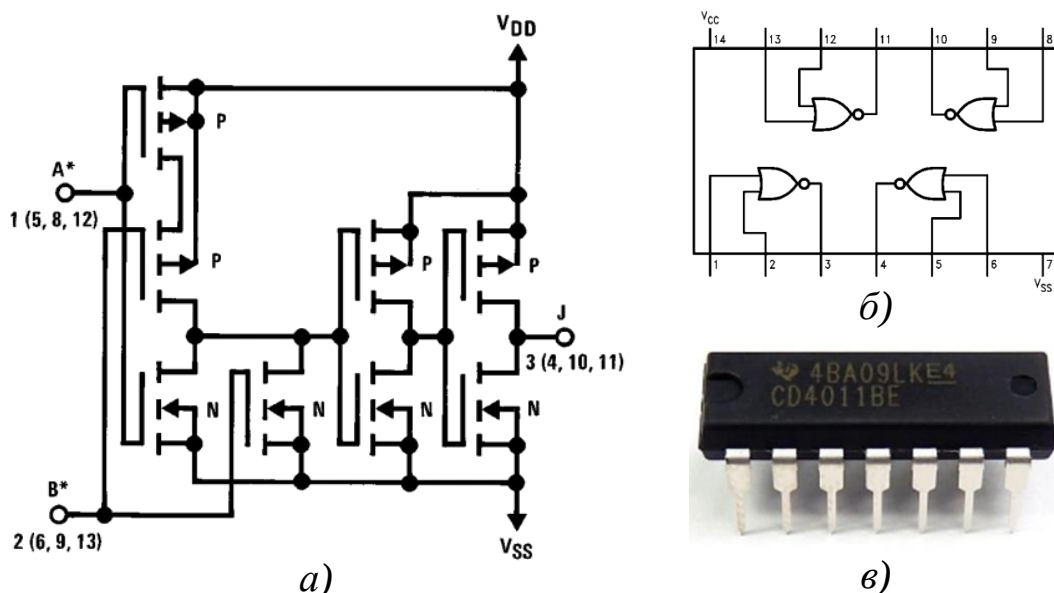


Рис. 5.19. Цифрова ІМС CD4011:
схема одного елемента (а), розміщення виводів (б), зовнішній вигляд (в)

Кожний логічний елемент даної ІМС має два входи – А та В, та один вихід J. Таблиця 5.2 являє собою таблицю станів логічного елемента 2І-НЕ.

Таблиця 5.2. Стани логічного елементу 2І-НЕ.

Вхід А	Вхід В	Вихід J
0	0	1
1	0	1
0	1	1
1	1	0

Таким чином, якщо лише на обох входах з'являється сигнал логічної одиниці (рівень напруги відносно загального виводу перевищить певне значення), то на виході з'являється сигнал логічного нуля. В інших випадках на виході буде сигнал логічної одиниці, що відповідатиме рівню напруги, дещо меншому від напруги живлення всієї ІМС.

Цифрові ІМС поділяють на дві основні групи:

а) комбінаційні схеми (цифрові автомати без пам'яті), особливість яких полягає у тому, що їхні вихідні сигнали у будь-який момент часу залежать лише від комбінації вхідних сигналів у той самий момент. До комбінаційних схем належать суматори, комутатори (мультиплексори і демультиплексори), перетворювачі кодів (шифратори і дешифратори), компаратори, програмовані логічні матриці, арифметико-логічні блоки тощо.

б) послідовні схеми (цифрові автомати з пам'яттю), до складу яких входять елементи пам'яті – запам'ятовувальні комірки. Внаслідок цього вихідні сигнали послідовних схем залежать не тільки від комбінації вхідних сигналів, але і від стану елементів пам'яті. До послідовних схем належать регістри, лічильники, генератори чисел та мікропроцесори – програмно керовані великі інтегральні схеми, які реалізують арифметичні та логічні операції над цифровими сигналами. Програмування мікропроцесорів здійснюють поданням зовнішніх сигналів, комбінація яких утворює певну команду для мікропроцесора, забезпечуючи виконання тієї чи іншої операції.

Окрему групу цифрових ІМС утворюють запам'ятовувальні пристрої, які призначені для зберігання інформації і реалізують операції запису, запам'ятовування та зчитування цифрових сигналів.

На відміну від аналогових, цифрові ІМС характеризують набором основних параметрів, однакових для усіх мікросхем, що дає змогу порівнювати між собою мікросхеми різних типів.

До основних параметрів належать: логічна функція, яку реалізує мікросхема; навантажувальна здатність (коефіцієнт розгалуження на виході n та коефіцієнт об'єднання на вході m); середній час затримки передавання сигналу $t_{з.ср}$; статична завадостійкість U_z ; споживана потужність $P_{ср}$; гранична робоча частота $f_{гр}$.

Перелічені параметри взаємопов'язані функціональними залежностями, специфічними для схем різних типів. Для усіх типів мікросхем характерно те, що покращення одного з параметрів призводить до погіршення інших параметрів.

Навантажувальна здатність характеризує максимальну кількість однотипних мікросхем, які можна з'єднувати між собою. Коефіцієнтом

розгалуження на виході називають кількість n однотипних мікросхем, які можна під'єднати до виходу такої самої мікросхеми без спотворення інформації, яка передається. Коефіцієнтом об'єднання на вході називають кількість m виходів однотипних мікросхем, які можна під'єднати до входу мікросхеми без спотворення інформації.

Середній час затримки сигналу $t_{з.ср}$ характеризується швидкодією цифрових ІМС і визначає середній час проходження сигналу через одну мікросхему.

Статична завадостійкість U_z характеризує максимальне значення напруги зовнішньої статичної завади, яка діє на мікросхему і не призводить до порушення нормального її функціонування.

Потужність, яку споживає мікросхема від джерел живлення, не є сталою у будь-який момент часу, а залежить від логічного стану і типу логічних елементів і змінюється у разі перемикавання схеми. Тому як основний параметр використовують не миттєве, а середнє значення потужності, яку споживає мікросхема упродовж достатньо великого часу. Якщо потужність, споживана під час перемикань мікросхеми, більша від потужності, споживаної у статичних станах, мікросхеми додатково характеризують потужністю, споживаною за максимальної частоти перемикавання. Чим більшу потужність споживає мікросхема, тим більша її швидкодія.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА **ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОРЕЗИСТОРА**

Мета: Виміряти опір фоторезистора за різних умов освітленості. Побудувати графік залежності опору від освітленості. Розрахувати величину γ_{100}^{10} . Порівняти отримані характеристики з даними документації на досліджувану модель фоторезистора.

Матеріали та обладнання: фоторезистор відомої моделі, мультиметр, макетна плата, з'єднувальні проводи під макетну плату, проводи «банан-крокодил», люксметр цифровий Mastech MS6610, або ТКА-ПКМ-31.

ХІД РОБОТИ

1. Підготувати таблицю для занесення результатів вимірювань.

Таблиця 5.3. Результати вимірювань

$R_T =$ _____ кОм

Освітленість, Лк											
Опір R, кОм											

2. Проведення вимірювань.

2.1. Встановити фоторезистор на макетну плату та підключити до нього мультиметр, як показано на рисунку 5.20.

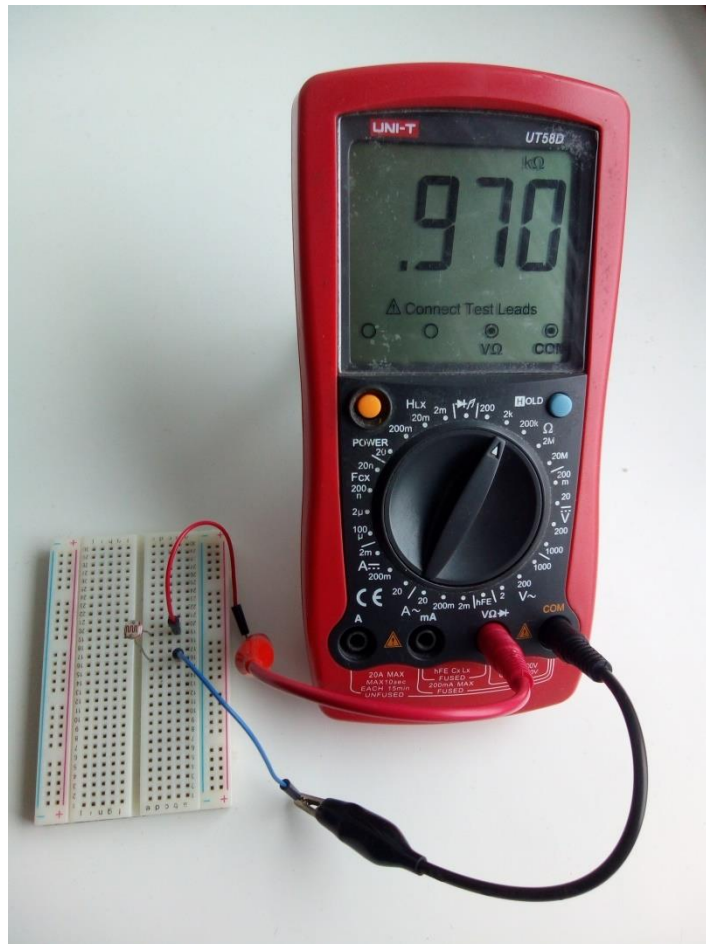


Рис. 5.20. Вимірювання опору фоторезистора

2.2. Включити мультиметр у режим вимірювання опору.

2.3. Закрити фоторезистор непрозорим ковпачком та виміряти значення темнового опору R_T . Записати отримане значення до таблиці результатів.

2.4. Зняти ковпачок з фоторезистора.

2.5. Увімкнути люксметр та розмістити його зонд поряд з фоторезистором.

2.6. Виміряти освітленість та опір фоторезистора та записати результати до таблиці.

2.7. Провести аналогічні вимірювання у кількості 10...15 за інших умов освітленості. Постаратися отримати значення опору при значеннях освітленості, якомога близьких до 10 та 100 Лк. Результати заносити до таблиці.

3. Аналіз даних.

3.1. За результатами вимірювань у Excel побудувати графік залежності опору фоторезистора від освітленості.

3.2. За отриманим графіком визначити опори R_{10} та R_{100} .

- 3.3. За формулою (5.1) розрахувати показник γ_{100}^{10} .
- 3.4. У побудованого графіку встановити логарифмічні шкали.
- 3.5. Порівняти отримані світлову характеристику, темновий опір, опір R_{10} та показник γ_{100}^{10} з даними технічної документації на модель фототранзистора, який застосовувався в роботі.

4. Зробити висновки.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

1. Проаналізуйте принципову схему, зображену на рис. 5.21.

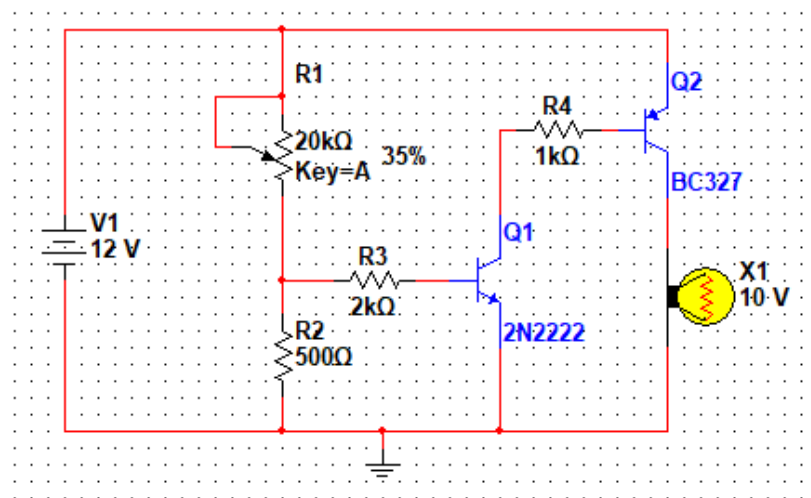


Рис. 5.21. Схема принципова до завдання 1

Опишіть роботу схеми, якщо потенціометр R1 у ній замінити терморезистором? Фоторезистором?

2. Змоделюйте у середовищі Multisim 11.0. схему, зображену на рис. 5.22.

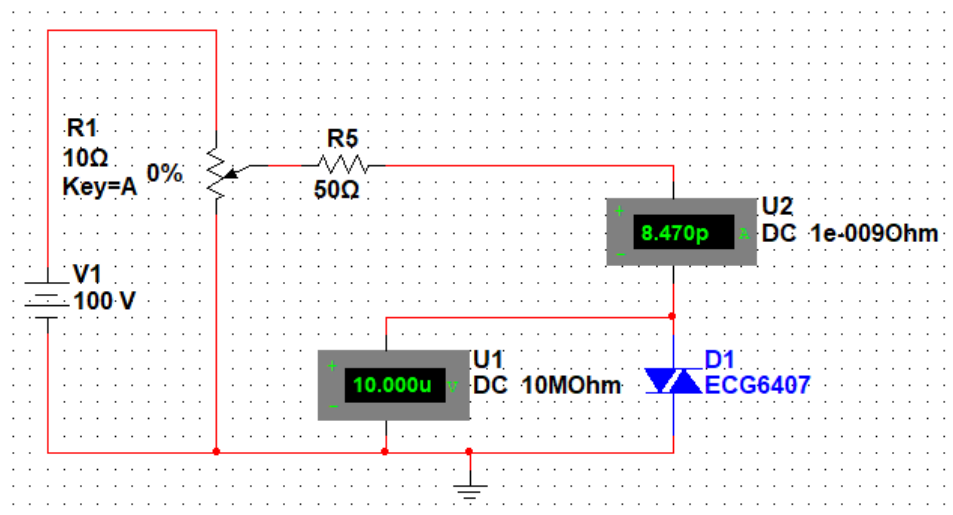


Рис. 5.22. Схема для отримання ВАХ диністорів

За допомогою змодельованої схеми зніміть ВАХ диодів ECG6407, ECG6408, ECG6411, ECG6412 та визначте напруги їх вмикання.

3. Змодельуйте у середовищі Multisim 11.0. схему, зображену на рис. 5.23.

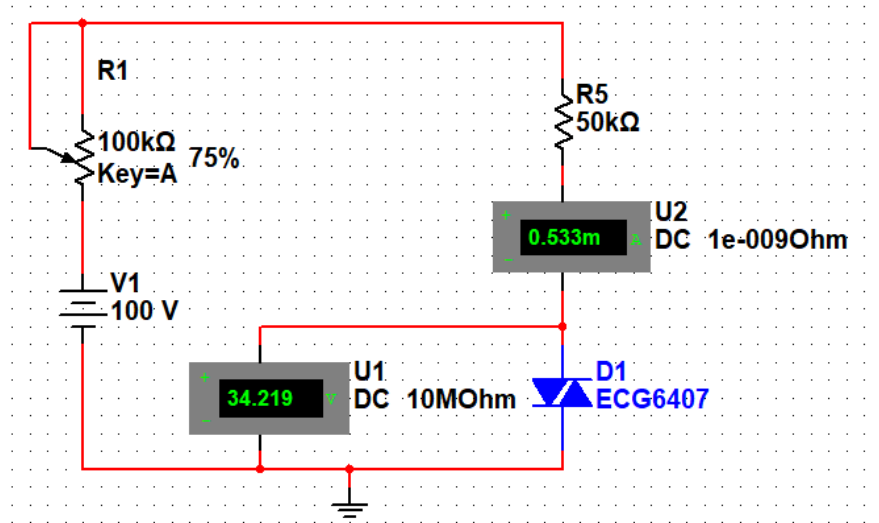


Рис. 5.23. Схема для визначення струму утримання диодів

За допомогою змодельованої схеми визначте струми утримання диодів ECG6407, ECG6408, ECG6411, ECG6412.

4. Змодельуйте у середовищі Multisim 11.0. схему симісторного регулятора потужності зображену на рис. 5.24.

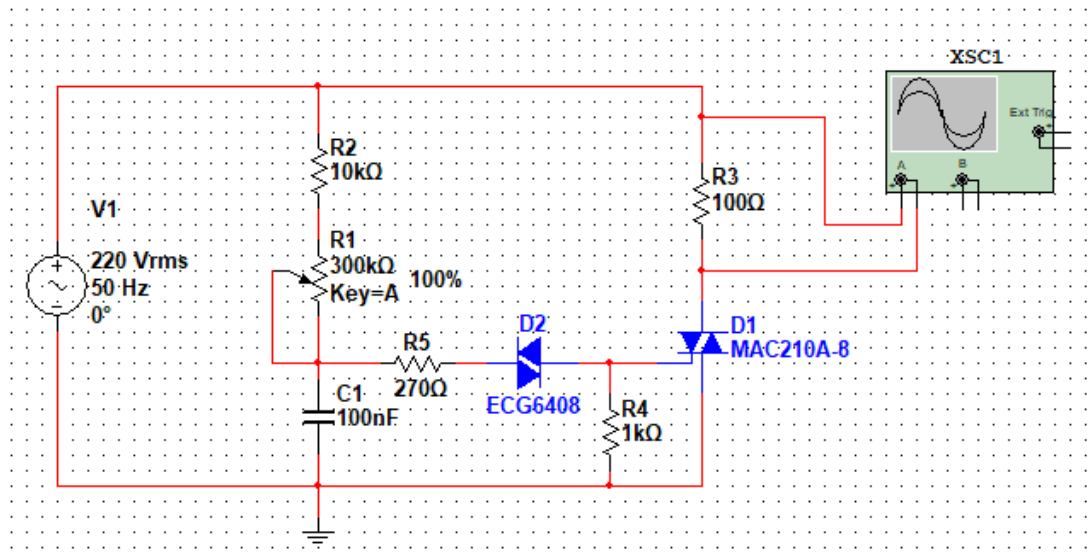


Рис. 5.24. Схема симісторного регулятора потужності

Проаналізуйте її роботу. Чи відповідають осцилограми напруги на опорі навантаження R3 осцилограмам, зображеним на рис. 5.15?

Знайдіть у мережі Internet технічну документацію на симістор MAC210A8 та визначте максимальну потужність даного регулятора.

5. На рис. 5.25 зображена принципова схема ІМС LM555 виробництва Texas Instruments.

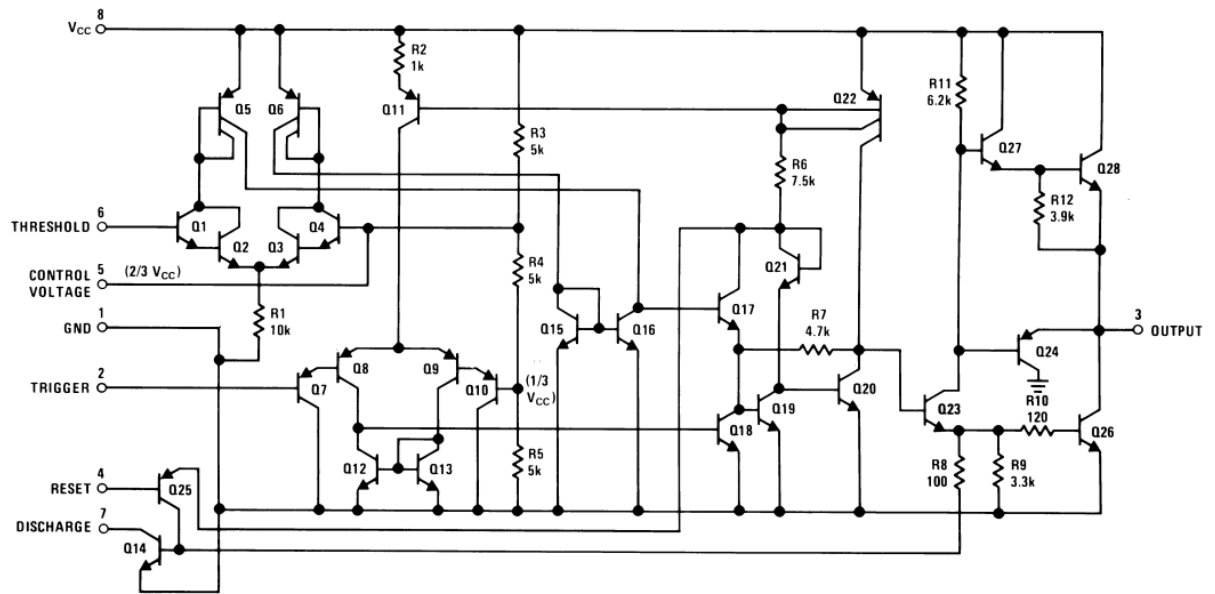


Рис. 5.25. Схема електрична принципова ІМС LM555

Розміри корпусу мікросхеми дорівнюють приблизно $5 \times 4 \times 1,75$ мм. Визначте щільність пакування та ступінь інтеграції даної ІМС.

РОЗДІЛ 6. ВИПРЯМЛЯЧІ ЗМІННОГО СТРУМУ

6.1. Однопівперіодний та двопівперіодні випрямлячі. Випрямлячем називається пристрій, призначений для перетворення змінного струму на постійний. В основу роботи випрямляча покладена основна властивість діода, яка полягає у однонаправленій провідності електричного струму. Випрямлячі можуть бути однопівперіодними та двопівперіодними. Однопівперіодний випрямляч містить лише один напівпровідниковий діод. Двopівперіодні випрямлячі містять щонайменше два діоди.

Однопівперіодний випрямляч, це такий випрямляч, на виході якого після процесу випрямлення залишаються коливання одного знаку.

Схема однопівперіодного випрямляча та діаграми вхідної і вихідної напруг представлені на рисунку 6.1.

Діод VD увімкнений таким чином, що проводить струм лише при додатних півперіодах вхідної напруги. $U_{вх. m}$ – це амплітудне значення вхідної напруги, а $U_{вих. m}$ – це амплітудне значення вихідної напруги на опорі навантаження R_H .

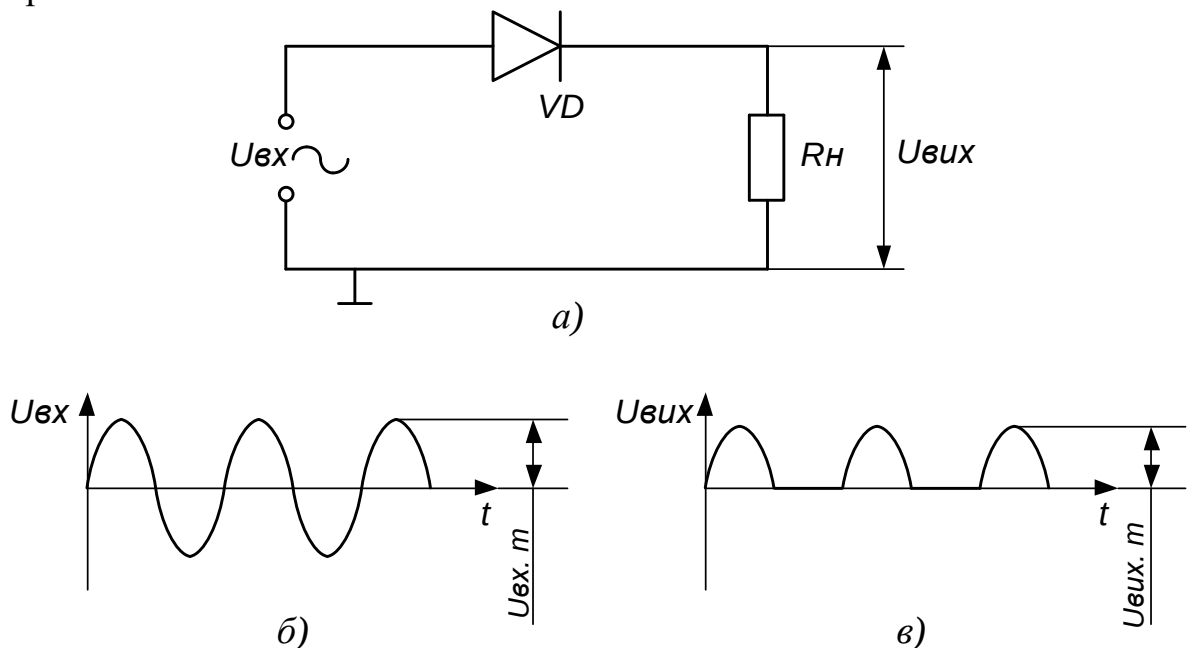


Рис. 6.1. Схема (а) та діаграми вхідної (б) та вихідної (в) напруг однопівперіодного випрямляча.

Амплітудне значення вихідної напруги менше за амплітудне значення вхідної напруги на величину прямого падіння напруги діода $U_{пр}$:

$$U_{вих. m} = U_{вх. m} - U_{пр}. \quad (6.1)$$

Амплітудне значення змінної напруги визначається за формулою:

$$U_m = U_d \cdot \sqrt{2}, \quad (6.2)$$

де U_d – діюча змінна напруга.

Поняття «діюче значення струму» та «діюче значення напруги» були введені в електротехніці та електроніці для зручності. В основу цих понять покладено теплову (або механічну) дію електричного струму, що не залежить від його напрямку. Діюче значення змінного струму – це значення постійного струму, при якому за період змінного струму у провіднику виділяється стільки ж теплоти, скільки і при постійному струмі. Діюче значення змінної напруги відповідає діючому значенню змінного струму при його протіканні через опір навантаження. Якщо діюче значення напруги у побутовій мережі дорівнює 220 В, то його амплітудне значення буде дорівнювати приблизно 311 В.

Як видно з діаграм на рис. 6.1, форма вихідної напруги однопівперіодного випрямляча є пульсуючою. При цьому частота пульсацій співпадає з частотою змінної вхідної напруги. Якщо для живлення пристрою необхідна постійна напруга без пульсацій, то на вихід випрямляча, паралельно до навантаження ставлять згладжуючий конденсатор, або інший фільтр.

У сучасній електронній техніці зазвичай використовуються **двопівперіодні випрямлячі**, побудовані за мостовою схемою з напівпровідникових діодів.

Схема мостового випрямляча та діаграми вхідної і вихідної напруги представлені на рисунку 6.2.

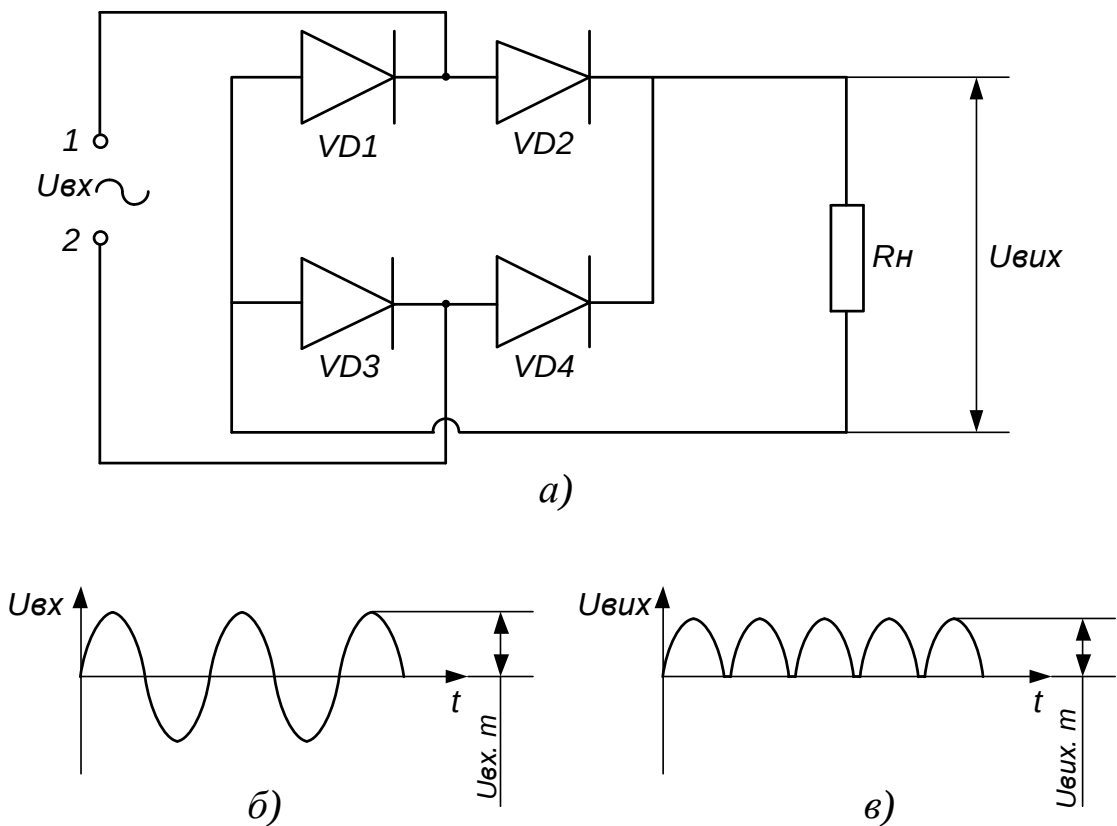


Рис. 6.2. Схема (а) та діаграми вхідної (б) та вихідної (в) напруг мостового випрямляча.

До виводів 1 та 2 підводиться змінна напруга з певною частотою. Коли миттєва полярність відповідає «+» на виводі 1, то проводять струм діоди $VD2$ та $VD3$. Струм при цьому проходить через діод $VD2$, опір навантаження R_n та діод $VD3$. Коли миттєва полярність змінюється на протилежну, проводять діоди $VD1$ та $VD4$. Струм при цьому проходить через діод $VD4$, опір навантаження R_n та діод $VD1$. Таким чином напруга на опорі навантаження має постійну полярність.

Амплітудне значення вихідної напруги менше за амплітудне значення вхідної напруги на подвоєну величину прямого падіння напруги діодів U_{np} :

$$U_{вих.т} = U_{вх.т} - 2 \cdot U_{np}. \quad (6.3)$$

Як видно з діаграм на рис. 6.2, форма вихідної напруги двопівперіодного випрямляча є пульсуючою. При цьому частота пульсацій є вдвоє більшою за частоту змінної вхідної напруги. Якщо для живлення пристрою необхідна постійна напруга з меншою амплітудою пульсацій, то на вихід випрямляча, паралельно до навантаження також ставлять згладжуючий конденсатор або інший фільтр.

Схема мостового випрямляча зі згладжуючим конденсатором представлена на рисунку 6.3.

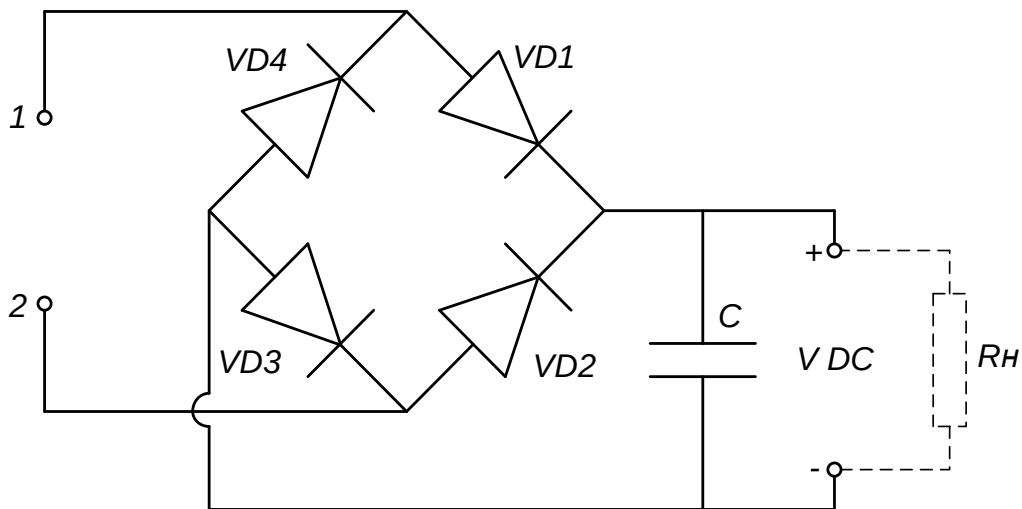


Рис. 6.3. Схема мостового випрямляча зі згладжуючим конденсатором

Вихідна постійна напруга на згладжуючому конденсаторі у разі відсутності навантаження дорівнює амплітудному значенню вхідної змінної напруги за вирахуванням подвійного прямого падіння напруги діодів, тобто амплітудному значенню пульсуючої вихідної напруги випрямляча.

Окрім мостового випрямляча також існує схема двопівперіодного випрямляча з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора (рис. 6.4).

Діоди $VD1$ та $VD2$ пропускають струм через опір навантаження по черзі. Амплітуда пульсуючої вихідної напруги такого випрямляча дорівнює

половині амплітуди напруги вторинної обмотки трансформатора за вирахуванням прямого падіння напруги на діодах.

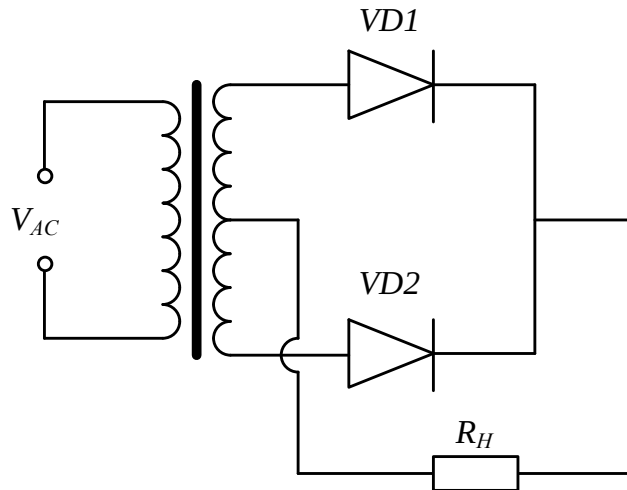


Рис. 6.4. Двопівперіодний випрямляч з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора.

Перевагою випрямляча з виводом середньої точки вторинної обмотки трансформатора є менша кількість діодів у порівнянні з мостовою схемою, а недоліком – необхідність застосування трансформатору з виводом від середньої точки вторинної обмотки і збільшеною кількістю її витків.

6.2. Пульсації випрямлячів та електричні фільтри. Важливим показником роботи будь якого випрямляча є коефіцієнт пульсацій. Коефіцієнт пульсацій визначається як відношення половини значення повного розмаху коливань вихідної напруги до середнього значення постійної складової вихідної напруги:

$$k = \frac{U_{вих.т}}{2 \cdot U_0}. \quad (6.4)$$

Значення повного розмаху коливань вихідної напруги визначається як різниця між максимальним і мінімальним її значенням:

$$U_{вих.т} = U_{max} - U_{min}. \quad (6.5)$$

Чим менше значення коефіцієнту пульсацій, тим краща якість роботи випрямляча.

Так, наприклад, середнє значення постійної складової вихідної напруги однопівперіодного випрямляча визначається за формулою:

$$U_0 = \frac{U_{вих.т}}{\pi} = 0,318 \cdot U_{вих.т}. \quad (6.6)$$

Якщо підставити вираз (6.6) до (6.4), то коефіцієнт пульсацій однопівперіодного випрямляча дорівнює $\pi/2 = 1,57$.

Для зменшення пульсацій випрямлячів застосовують електричні фільтри.

Електричні фільтри – це пристрої, які пропускають з малим згасанням сигнали одного діапазону частот та з великим згасанням – сигнали іншого діапазону частот.

Для згладжування пульсацій випрямлячів застосовують фільтри нижніх частот, що пропускають з малим згасанням постійну складову і з великим згасанням – змінну складову електричного струму. Зазвичай це ємнісні, індуктивні та комбіновані фільтри.

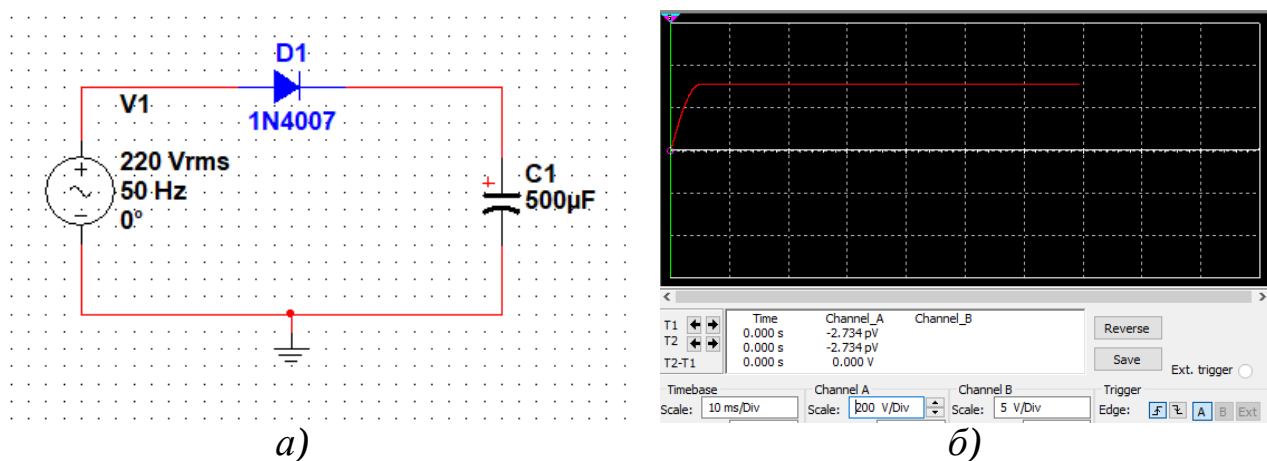


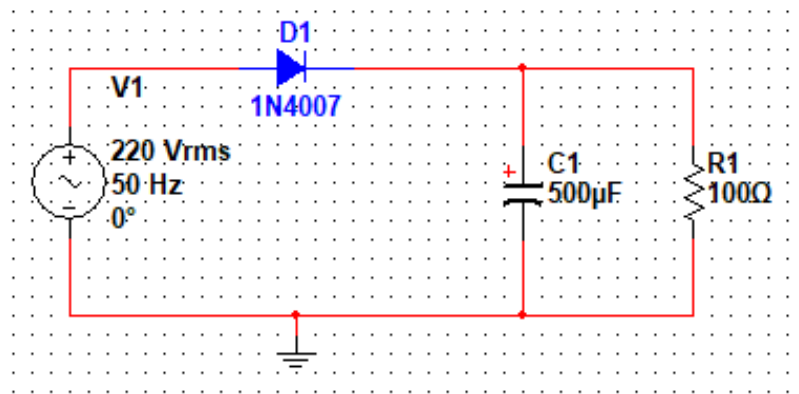
Рис. 6.5. Однопівперіодний випрямляч зі згладжувачим конденсатором (а) та осцилограма вихідної напруги без навантаження (б)

Найпростішим і найдешевшим є **ємнісний фільтр**, який являє собою звичайний конденсатор, підключений паралельно до виходу випрямляча – згладжувачий конденсатор. Як було сказано вище, вихідна постійна напруга на згладжувачому конденсаторі у разі відсутності навантаження дорівнює амплітудному значенню пульсуючої вихідної напруги випрямляча. На рисунку 6.5 показана схема однопівперіодного випрямляча зі згладжувачим конденсатором, змодельована у моделюючому комп'ютерному середовищі та осцилограма напруги при відсутності навантаження, отримана за допомогою віртуального осцилографа.

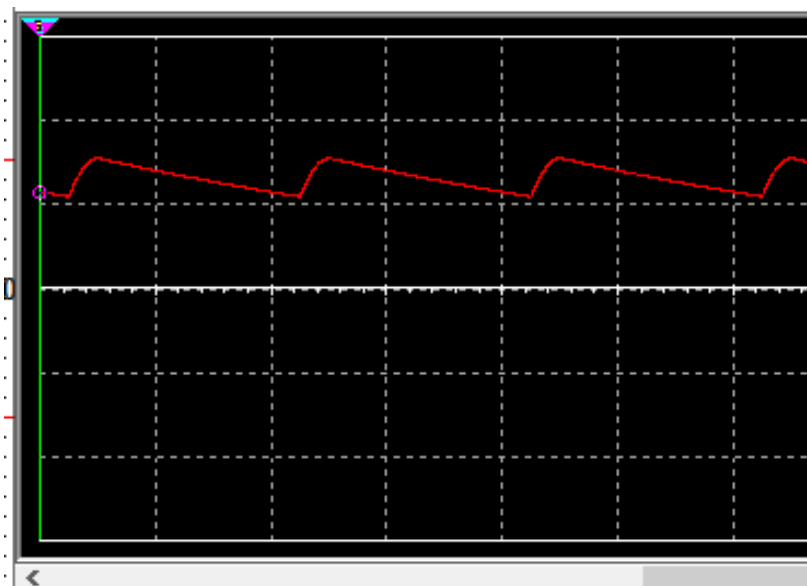
Якщо до випрямляча зі згладжувачим конденсатором підключити опір навантаження, то з'являться пульсації з певною амплітудою (рис. 6.6).

Конденсатор заряджається в той час, коли діод проводить струм. Час заряду конденсатора від джерела живлення значно менший ніж час розряду на опір навантаження, оскільки опір навантаження більший ніж внутрішній опір джерела живлення.

Амплітуда пульсацій буде тим меншою, чим більшими будуть ємність конденсатора і опір навантаження.



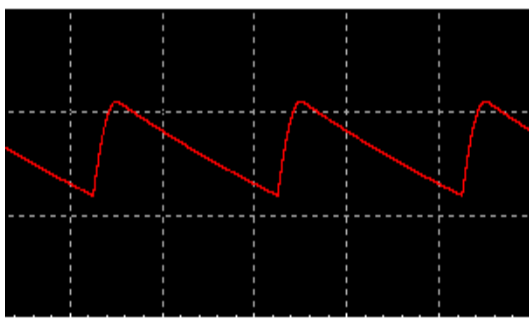
а)



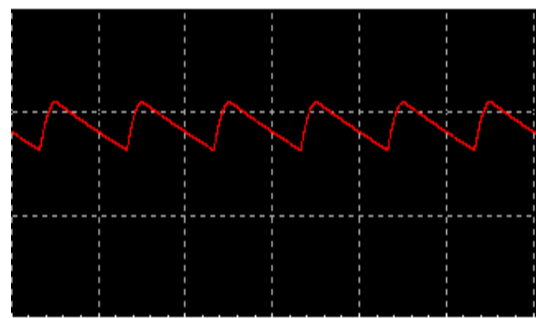
б)

Рис. 6.6. Однопівперіодний випрямляч зі згладжуючим конденсатором (а) та осцилограма вихідної напруги з навантаженням (б)

У разі застосування двопівперіодного випрямляча зі згладжуючим конденсатором такої самої ємності та з таким самим опором навантаження, амплітуда пульсацій зменшиться у два рази (рис. 6.7).



а)



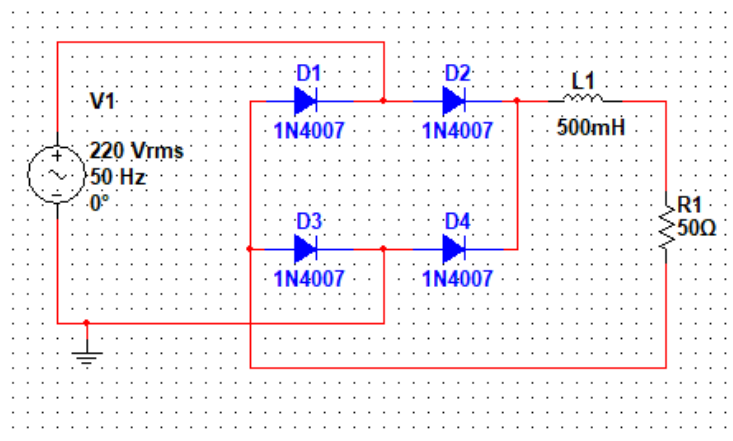
б)

Рис. 6.7. Пульсації однопівперіодного (а) та двопівперіодного (б) випрямлячів за інших рівних умов

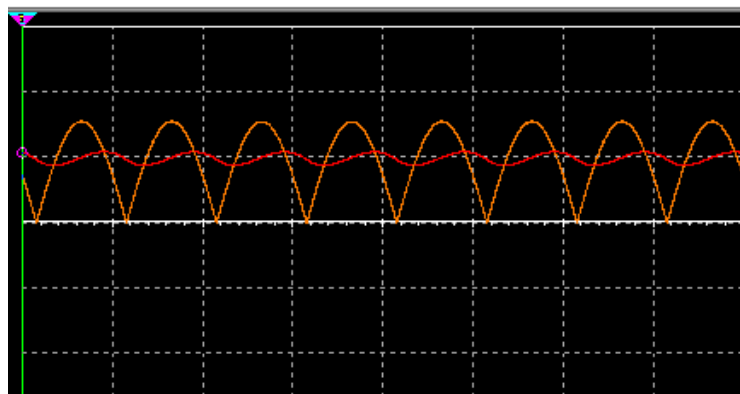
Отже, можна сказати, що для забезпечення того самого зниження пульсацій для двопівперіодного випрямляча знадобиться конденсатор з вдвічі меншою ємністю, ніж для однопівперіодного.

Недоліком ємнісного фільтра є те, що при його застосуванні для виготовлення випрямляча доводиться застосовувати діоди зі збільшеною зворотною напругою. В період коли діод не проводить струм, на нього діє зворотна напруга, що складається з напруги від'ємного півперіоду джерела живлення і напруги на згладжуючому конденсаторі. Крім того, в момент підключення випрямляча до джерела живлення, коли конденсатор розряджений, через діоди проходить імпульс досить великого зарядного струму. Діоди, з яких виготовляється випрямляч мають надійно витримувати цей імпульс.

Індуктивний фільтр являє собою дросель, увімкнений послідовно з опором навантаження (рис. 6.8). Робота такого фільтра ґрунтується на явищі самоіндукції, при якому внаслідок змін струму виникає ЕРС самоіндукції, яка завжди перешкоджає цим змінам. Дросель накопичує енергію у ті моменти часу, коли струм через навантаження зростає, і віддає її коли струм зменшується, підтримуючи сталу складову струму через навантаження і згладжуючи його пульсації.



а)



б)

Рис. 6.8. Двопівперіодний випрямляч з індуктивним фільтром (а) та осцилограми напруги (б) з фільтром (червона) та без (помаранчева)

До переваг індуктивних фільтрів відносяться:

- покращення згладжувальної дії зі збільшенням потужності навантаження. Дійсно, збільшення потужності у разі незмінного значення напруги означає збільшення струму, і відповідно, енергії, яку накопичує і віддає дросель;

- відсутність великих імпульсів струму через діод, тому що струм весь час протікає рівномірно. Це дає змогу використовувати діоди, що розраховані на меншу силу струму, ніж у схемах з ємнісними фільтрами;

- менше значення зворотної напруги на діодах.

До недоліків індуктивних фільтрів відносяться:

- менше середнє значення випрямленої напруги на навантаженні, ніж у схемі з ємнісним фільтром. В той час як ємнісний фільтр заряджається майже до амплітудного значення змінної напруги, у схемі з індуктивним фільтром напруга на навантаженні починає зменшуватися, не встигнувши зрости до амплітудного значення. Причому чим краще фільтр згладжує пульсації напруги, тим меншим є середнє значення випрямленого струму, а отже, і напруги на навантаженні;

- великі габарити і більша вартість, порівняно з ємнісним фільтром.

Таким чином, ємнісні фільтри доцільно застосовувати у малопотужних випрямлячах, коли потужність навантаження не перевищує 300 Вт. Індуктивні фільтри доцільно застосовувати у потужних випрямлячах за великих струмів і малих значень опору навантаження.

Для кращого згладжування пульсацій та усунення недоліків характерних для простих ємнісного та індуктивного фільтрів застосовують комбіновані LC-фільтри (рис. 6.9).

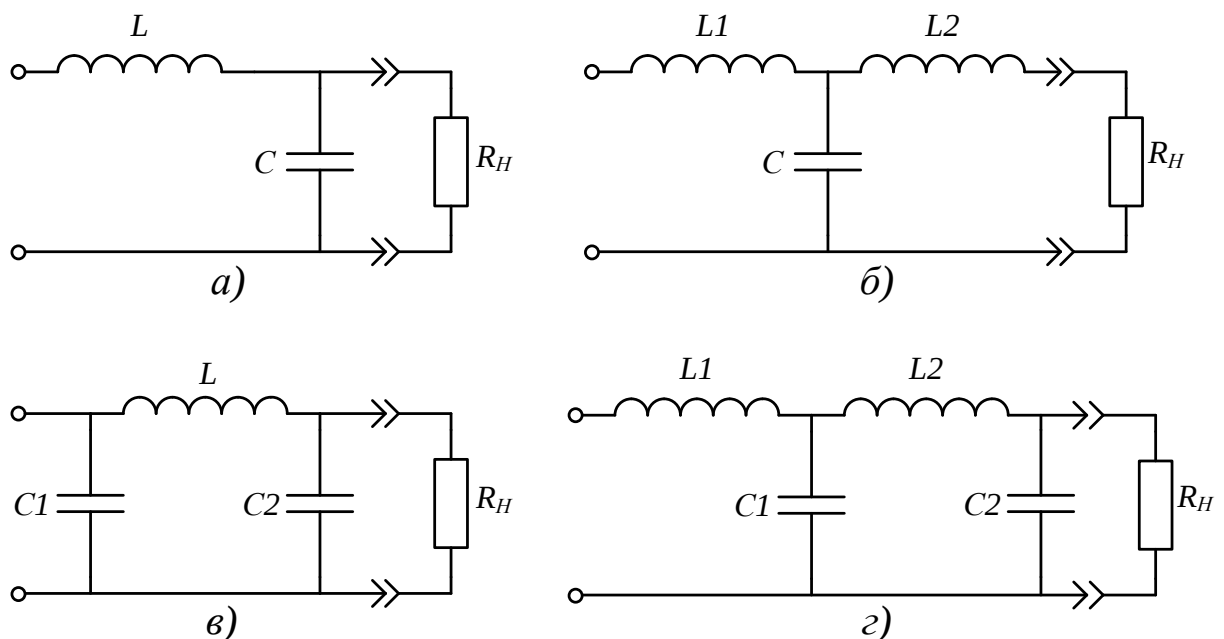
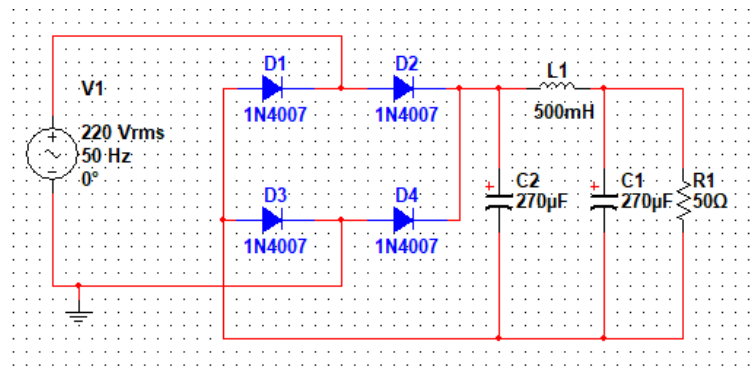


Рис. 6.9. Комбіновані LC-фільтри

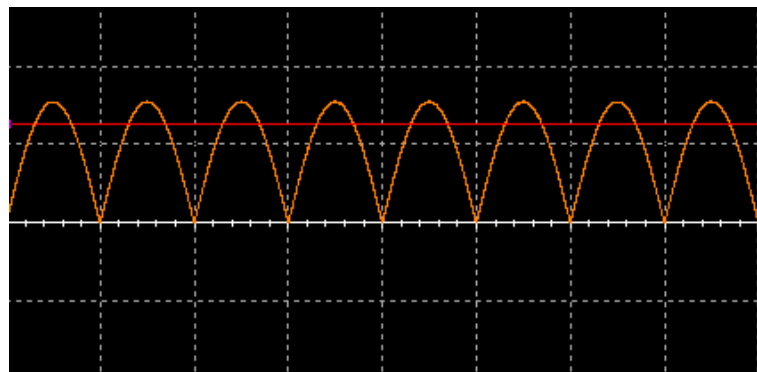
Найбільш широкого застосування набули:

- одноланковий Г-подібний фільтр (рис. 6.9 а), в якому послідовно з опором навантаження вмикають дросель, а паралельно навантаженню – конденсатор;
- Т-подібний фільтр (рис. 6.9 б);
- П-подібний фільтр (рис. 6.9 в);
- дволанковий Г-подібний фільтр (рис. 6.9 г).

На рисунку 6.10 в якості прикладу показана модель двопівперіодного випрямляча з П-подібним фільтром, створена у моделюючому комп'ютерному середовищі та осцилограми напруг з фільтром та без фільтра.



а)



б)

Рисунок 6.10. Двопівперіодний випрямляч з П-подібним фільтром (а) та осцилограми напруги (б) з фільтром (червона) та без (помаранчева)

З рисунку 6.10 видно, що при застосуванні тих самих номіналів ємності та індуктивності досягається значно краще згладжування пульсацій, більше значення випрямленої напруги та збільшення навантажувальної здатності.

6.3. Стабілізатори напруги й струму. Для повного уникнення пульсацій окрім електричних фільтрів застосовують також стабілізатори.

Стабілізатором напруги (струму) називають пристрій, який автоматично забезпечує підтримання напруги (струму) на навантаженні з потрібним значенням точності.

Стабілізатори, що використовують в джерелах живлення ділять на дві групи: параметричні та компенсаційні.

Параметричні стабілізатори – це такі стабілізатори напруги або струму, принцип дії яких базується на використанні елементів з нелінійними ВАХ, наприклад стабілітронів.

Схема найпростішого параметричного стабілізатора напруги зображена на рис. 6.11. За допомогою стабілізатора на основі напівпровідникового стабілітрона VD можна отримувати стабільну напругу від кількох одиниць до сотень вольт при струмах навантаження від одиниць міліампер до одиниць ампер.

Дія параметричного стабілізатора на напівпровідниковому стабілітроні ґрунтується на тому, що при досить великих змінах струму через прилад, напруга на ньому майже не змінюється. Резистор R_b називається баластним і слугує для обмеження струму через стабілітрон до допустимих значень.

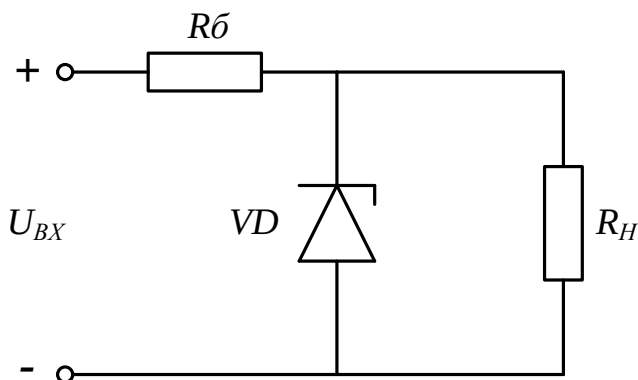


Рис. 6.11. Параметричний стабілізатор напруги на стабілітроні

У **компенсаційних** стабілізаторах здійснюється порівняння фактичного та заданого значень вихідного сигналу, і залежно від значення та знаку неузгодження між ними автоматично здійснюється регулювання, спрямоване на зменшення цього неузгодження.

Схема простого компенсаційного стабілізатора напруги зображена на рис. 6.12.

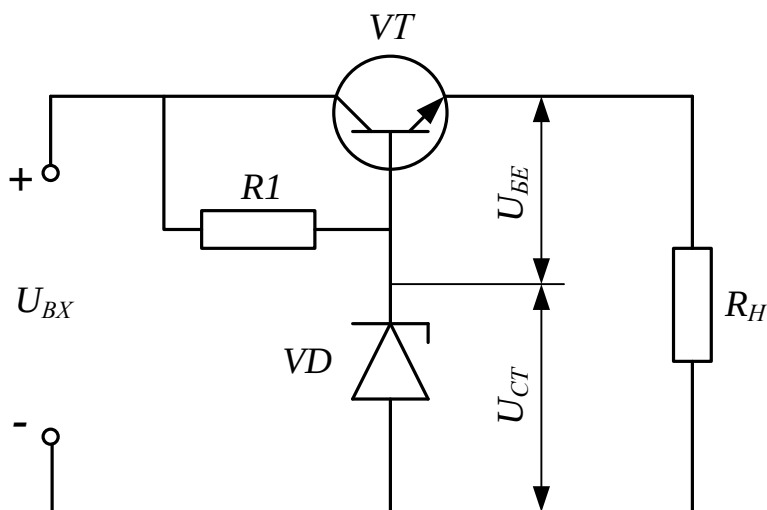


Рис. 6.12. Компенсаційний стабілізатор напруги

Стабілітрон VD слугує джерелом заданої (опорної) напруги U_{CT} . Транзистор VT є порівняльним та регулювальним елементом. Режим роботи транзистора задається резистором $R1$ та обирається таким, щоб при відсутності дестабілізації вихідної напруги він був неповністю відкритим.

Напруга U_{BE} між базою і емітером транзистора в даному випадку називається порівняльною. Вона дорівнює різниці між напругою на стабілітроні та напругою на опорі навантаження:

$$U_{BE} = U_{CT} - U_H \quad (6.7)$$

В разі зменшення напруги на опорі навантаження, напруга U_{BE} , а відповідно й струм бази транзистора зростають, він відкривається сильніше і напруга на опорі навантаження збільшується. В разі підвищення напруги на опорі навантаження – навпаки, напруга U_{BE} , а відповідно й струм бази транзистора зменшуються, він закривається сильніше і напруга на опорі навантаження зменшується.

Компенсаційний стабілізатор напруги за схемою на рис. 6.12 має менший внутрішній опір та більший ККД на відміну від параметричного (рис. 6.11) за рахунок відсутності баластного опору та значно менших струмів через стабілітрон.

На рисунку 6.13 зображено схему стабілізатора струму, задача якого полягає у стабілізації струму колектора транзистора VT , що проходить через опір навантаження R_H . Робоча точка транзистора задається опором базового ланцюга R_B і обирається такою, щоб транзистор перебував у частково відкритому стані.

Резистор емітерного ланцюга R_E має відносно невеликий опір і виконує у даній схемі роль своєрідного датчика струму. Коли струм через опір навантаження з якихось причин зменшується, напруга на резисторі R_E також зменшується. А оскільки напруга на стабілітроні U_{CT} є сталою, то при зменшенні напруги на резисторі R_E збільшується напруга між базою і емітером транзистора U_{BE} , що призводить до зростання струму бази з подальшим відкриванням транзистора і збільшенням струму через опір навантаження. Якщо струм з якихось причин збільшується, то напруга U_{BE} зменшується, що призводить до зменшення струму бази з подальшим частковим закриванням транзистора і зменшенням струму через опір навантаження.

Процеси стабілізації напруги або струму можуть відбуватися з досить високими частотами, тому стабілізатори за схемами на рис. 6.12 та 6.13 забезпечують на виході випрямлячів наявність постійних напруги або струму, практично позбавлених пульсацій. При застосуванні стабілізаторів відпадає необхідність застосування згладжуючих конденсаторів з великими ємностями.

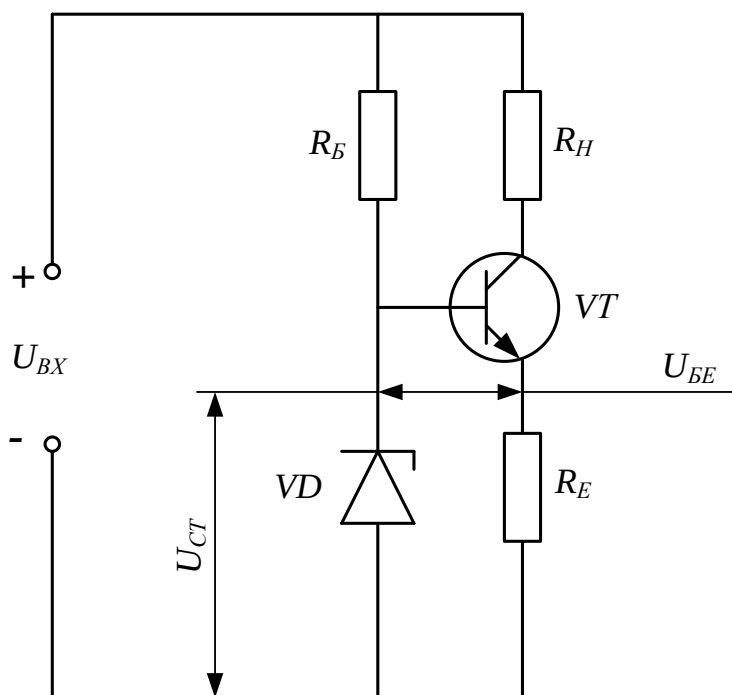


Рис. 6.13. Схема стабілізатора струму

Якщо проаналізувати схеми на рис. 6.12 та 6.13, можна побачити деякі спільні риси, зокрема включення стабілітрону між базою та емітером транзистора, а також наявність резистора, що задає робочу точку транзистора. У зв'язку з цим свого часу були розроблені та створені інтегральні мікросхеми, які застосовуються для побудови стабілізаторів. Окрім елементів і ланцюгів, зображених на розглянутих схемах, до складу цих мікросхем входять також елементи, що підвищують точність стабілізації та забезпечують температурну компенсацію параметрів.

Яскравим представником такої ІМС є LM317 (рис. 6.14), яка може застосовуватися як для стабілізації струму, так і для стабілізації напруги.

На рисунку 6.15 зображено схеми стабілізаторів напруги (а) та струму (б), побудованих із застосуванням LM317.

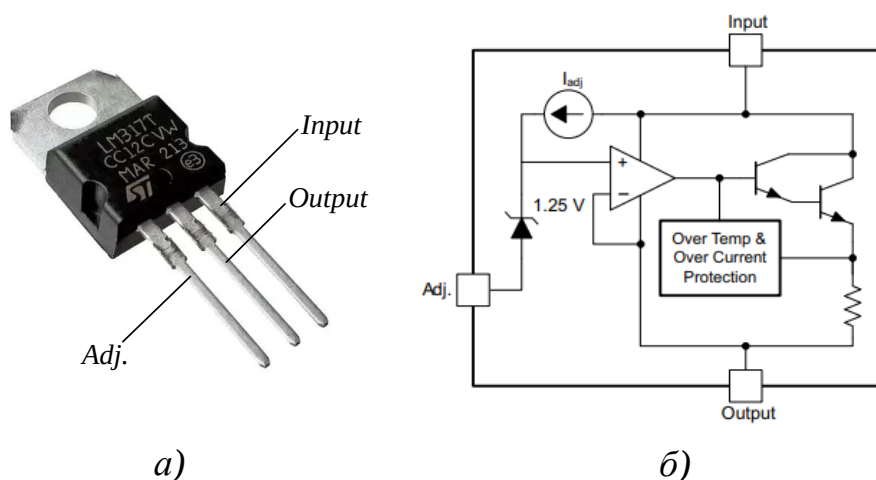


Рис. 6.14. Зовнішній вигляд (а) та функціональна схема (б) інтегрального стабілізатора LM317.

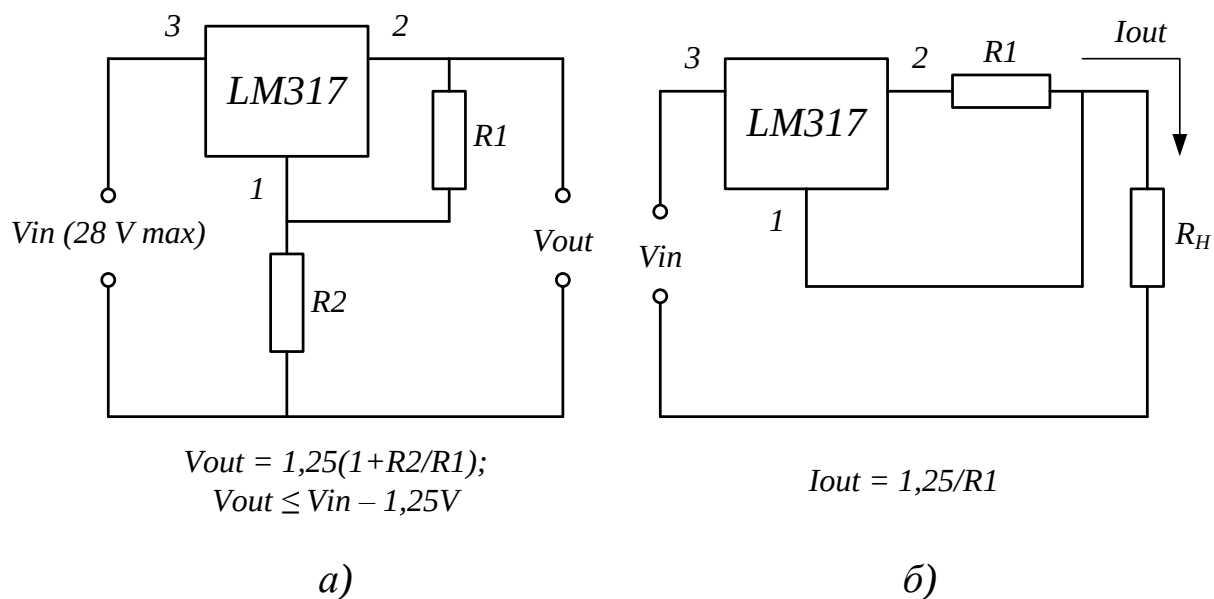


Рис. 6.15. Схеми стабілізаторів напруги (а) та струму (б) на ІМС LM317

Необхідна напруга або струм стабілізації задаються зовнішніми резисторами. Якщо у схемі стабілізатора напруги застосувати змінний резистор $R2$, то стабілізатор напруги стане регульованим. Застосування змінного резистора $R1$ у схемі стабілізатора струму дасть змогу регулювати стабілізований струм.

6.4. Помножувачі напруги. Помножувачем напруги називається пристрій, який перетворює змінний струм на постійний та помножує напругу у декілька разів. На рисунку 6.16 представлена схема паралельного подвоювача напруги.

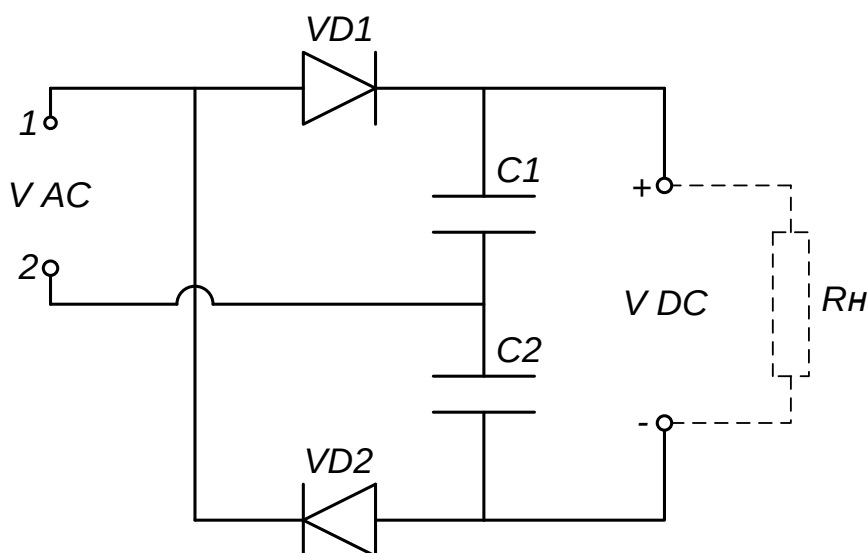


Рис. 6.16 – Схема паралельного подвоювача напруги

Коли миттєва полярність відповідає «+» на виводі 1, то конденсатор $C1$ заряджається через діод $VD1$ до амплітудного значення вхідної змінної напруги. Коли миттєва полярність змінюється на протилежну, то конденсатор $C2$ заряджається через діод $VD2$ також до амплітудного

значення вхідної напруги. Напруга на послідовно з'єднаних конденсаторах дорівнює подвоєному амплітудному значенню вхідної напруги за вирахуванням подвоєного прямого падіння напруги діодів та має постійну полярність.

Схема послідовного подвоювача напруги представлена на рисунку 6.17.

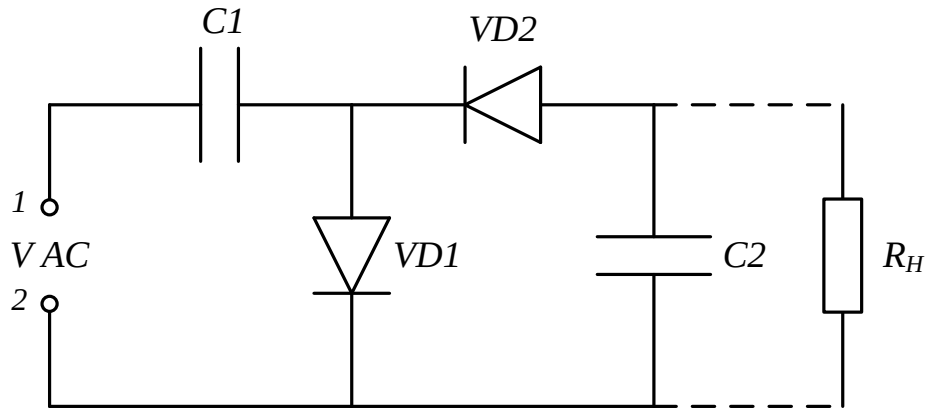


Рис. 6.17. Схема послідовного подвоювача напруги

Коли миттєва полярність відповідає «+» на виводі 1, то конденсатор $C1$ заряджається через діод $VD1$ до амплітудного значення вхідної змінної напруги. Коли миттєва полярність змінюється на протилежну, то до конденсатора $C2$ через діод $VD2$ прикладається напруга, яка дорівнює сумі амплітудного значення вхідної змінної напруги джерела живлення та напруги, до якої був заряджений конденсатор $C1$ під час попереднього півперіоду – теж амплітудного значення вхідної напруги. Таким чином напруга на конденсаторі $C2$ дорівнює подвійному амплітудному значенню вхідної змінної напруги, також за вирахуванням подвоєного прямого падіння напруги діодів.

Послідовний перехід напруги з одного, вже зарядженого конденсатора, на наступний дає можливість використовувати схему послідовного помножувача напруги не лише для подвоювання, а і для багаторазового її підвищення.

На рисунку 6.18 зображено схему послідовного потроювача напруги, отриману шляхом додавання до схеми подвоювача конденсатора та діода.

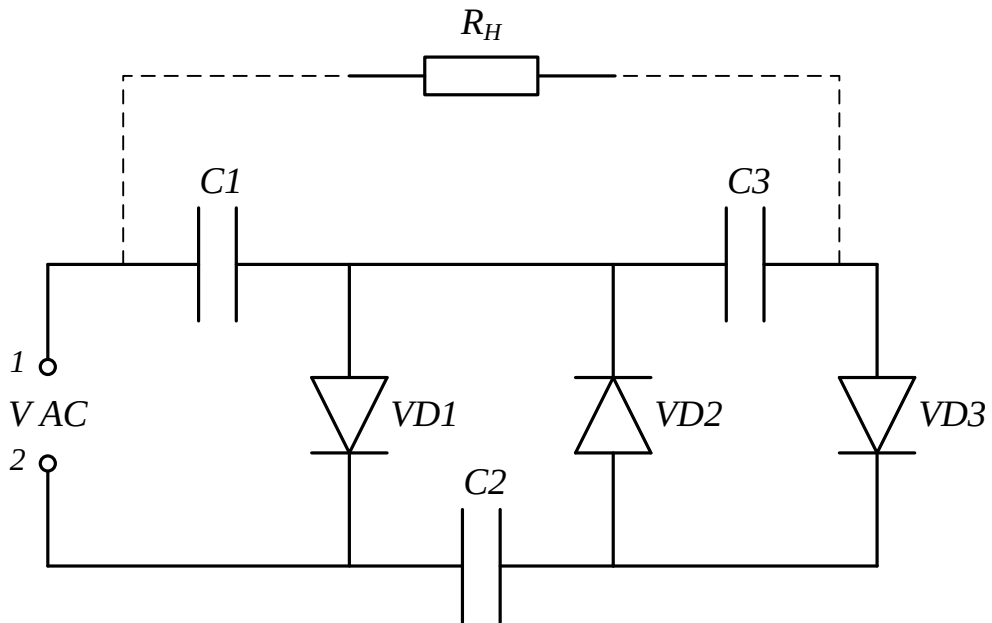


Рис. 6.18. Схема послідовного потроювача напруги

Коли миттєва полярність відповідає «+» на виводі 1, то конденсатор $C1$ заряджається через діод $VD1$ до амплітудного значення вхідної змінної напруги. Коли миттєва полярність змінюється на протилежну, то конденсатор $C2$ через діод $VD2$ заряджається до подвійного амплітудного значення вхідної напруги, а напруга на конденсаторі $C1$ змінює полярність на протилежну. При наступній зміні полярності конденсатор $C3$ через діод $VD3$ заряджається до напруги, що дорівнює $U_{C3} = U_{ex.m} + U_{C2} - U_{C1}$, тобто подвійному амплітудному значенню вхідної напруги, а полярність напруги на конденсаторі $C1$ знову змінюється на протилежну. В результаті цього напруга на конденсаторах $C1$ та $C3$ дорівнює потроєному амплітудному значенню вхідної змінної напруги.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

ДОСЛІДЖЕННЯ МОСТОВОГО ВИПРЯМЛЯЧА У МОДЕЛЮВАЛЬНОМУ КОМП'ЮТЕРНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Мета: Змодельовати мостовий випрямляч, розрахувати теоретичне значення вихідної напруги та порівняти результати розрахунків з результатами вимірювань під час моделювання.

Матеріали та обладнання: ПК з програмою Multisim 11.0.

ХІД РОБОТИ

1. Підготувати таблицю для занесення результатів розрахунків та моделювання.

Таблиця 6.1. Результати розрахунків та моделювання

U_D , В	U_A (розр.), В	U_A (вим.), В	$U_{Анульс}$ (вим.), В	$U_{Вих}$, В

2. Моделювання випрямляча
 - 2.1. Запустити програму Multisim 11.0.
 - 2.2. Зайти в меню «Place» – «Component».
 - 2.3. У вікні, що з'явилося обрати розділ «Diodes» та сімейство «Diode».
 - 2.4. Обрати діод 1N4007. Натиснути ОК та поставити його у довільне місце робочого поля програми.
 - 2.5. Обрати ще 3 таких самих діода та поставити їх поряд із першим.
 - 2.6. Обрати розділ «Sources» (джерела).
 - 2.7. Обрати сімейство «Power sources» (джерела живлення).
 - 2.8. Обрати джерело живлення змінного струму «AC_Power», натиснути ОК та встановити його поряд з іншими компонентами.
 - 2.9. Обрати «Ground» (заземлення), натиснути ОК та встановити його поряд з іншими компонентами.
 - 2.10. Закрити вікно добору компонентів.
 - 2.11. За допомогою інструментів програми з'єднати усі компоненти у відповідності до схеми на рис. 6.19. Заземлення має бути з'єднаним з загальним (нульовим) провідником джерела живлення змінного струму.
 - 2.12. Обрати у правому вертикальному меню осцилограф та встановити його з правого боку від схеми (XSC1).
 - 2.13. З'єднати канал «А» осцилографа XSC1 з виходом випрямляча.
 - 2.14. Обрати у правому вертикальному меню ще один осцилограф та встановити його з лівого боку від схеми (XSC2).
 - 2.15. З'єднати канал «А» осцилографа XSC2 з джерелом змінного струму «AC_Power».

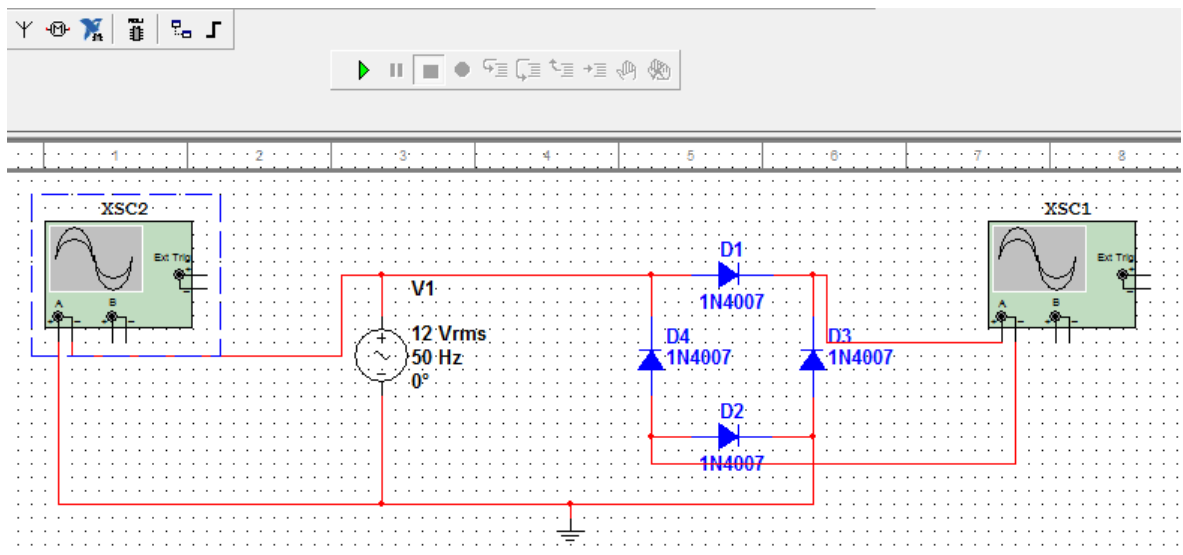


Рис. 6.19. Приклад побудованої схеми

2.16. Подвійним клацанням лівою кнопкою миші на джерелі змінного струму AC_Power відкрити вікно його налаштування.

2.17. У вікні що з'явилося задати параметри: діюче значення напруги «Voltage (RMS)» – 12 V; та частоту F – 50 Hz (Герц). Записати діюче значення напруги до таблиці результатів у колонку U_d , В.

2.18. Закрити вікно налаштування джерела змінного струму.

2.19. Відкрити вікна обох осцилографів подвійним клацанням лівої кнопки миші та встановити їх в зручних місцях поля програми.

2.20. Натиснути кнопку «Пуск» . Почалося моделювання роботи схеми. На осцилографах мають відтворюватися сигнали вхідної та вихідної напруг.

2.21. Через декілька секунд натиснути кнопку «Стоп» поряд з кнопкою «Пуск».

2.22. На екранах осцилографів знайти ділянки з записаними сигналами.

2.23. Встановити на екранах осцилографів зручні для роботи масштаби часу та рівня сигналу.

2.24. За графіками сигналів вхідної та вихідної напруг за допомогою інструментів осцилографів (кнопки T1 та T2 у нижній лівій частині вікна осцилографа) визначити амплітудні значення вхідної змінної та вихідної пульсуючої напруг (рис. 6.20). Результати вимірювань записати до таблиці результатів – U_A (вим.), В та $U_{\text{Анупльс}}$ (вим.), В.

З отриманих осцилограм видно, що вихідна напруга діодного мосту хоч і має постійну полярність, але її характер є пульсуючим, що не є прийнятним для пристроїв, які потребують для живлення постійної напруги. Для отримання постійної напруги у схемі випрямляча окрім діодного мосту застосовується згладжуючий конденсатор C (рис. 6.3).

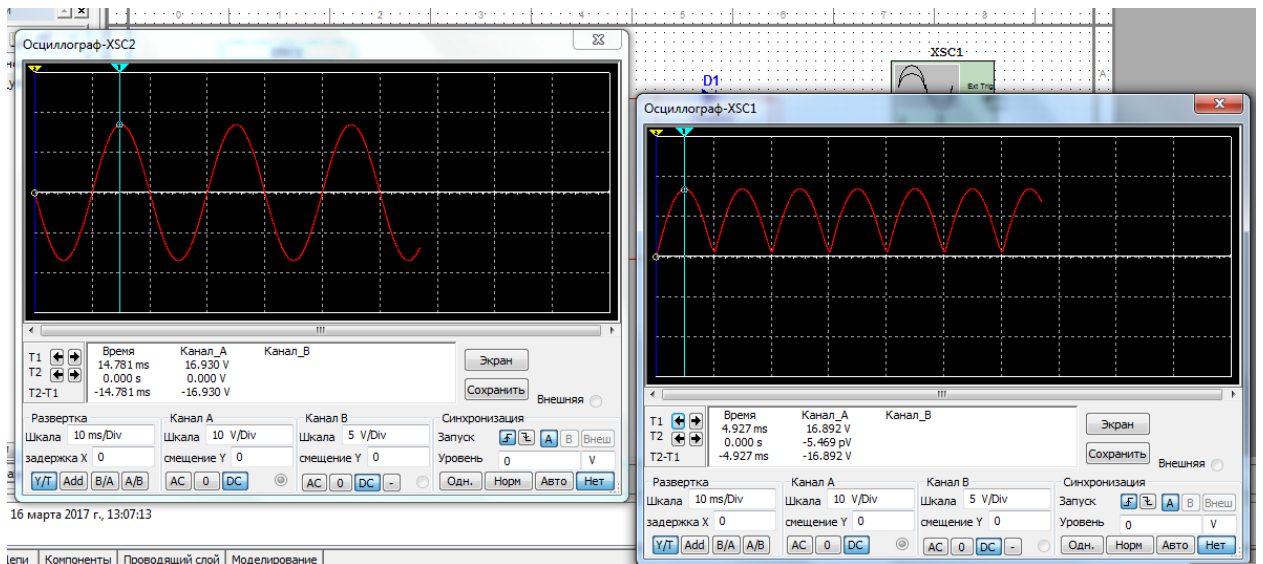


Рис. 6.20. Приклад записаних осцилограм сигналів вхідної та вихідної напруг з вимірюванням їх амплітудного значення

2.25. Обрати розділ «Basic» та сімейство «Capacitor» (конденсатор).

2.26. Обрати конденсатор ємністю 1μ ($1\text{ мкФ} = 10^{-6}\text{ Ф}$) та підключити його паралельно з виходом діодного мосту.

2.27. Видалити осцилограф XSC2, а канал «B» осцилографа XSC1 з'єднати з джерелом змінного струму (рис. 6.21)

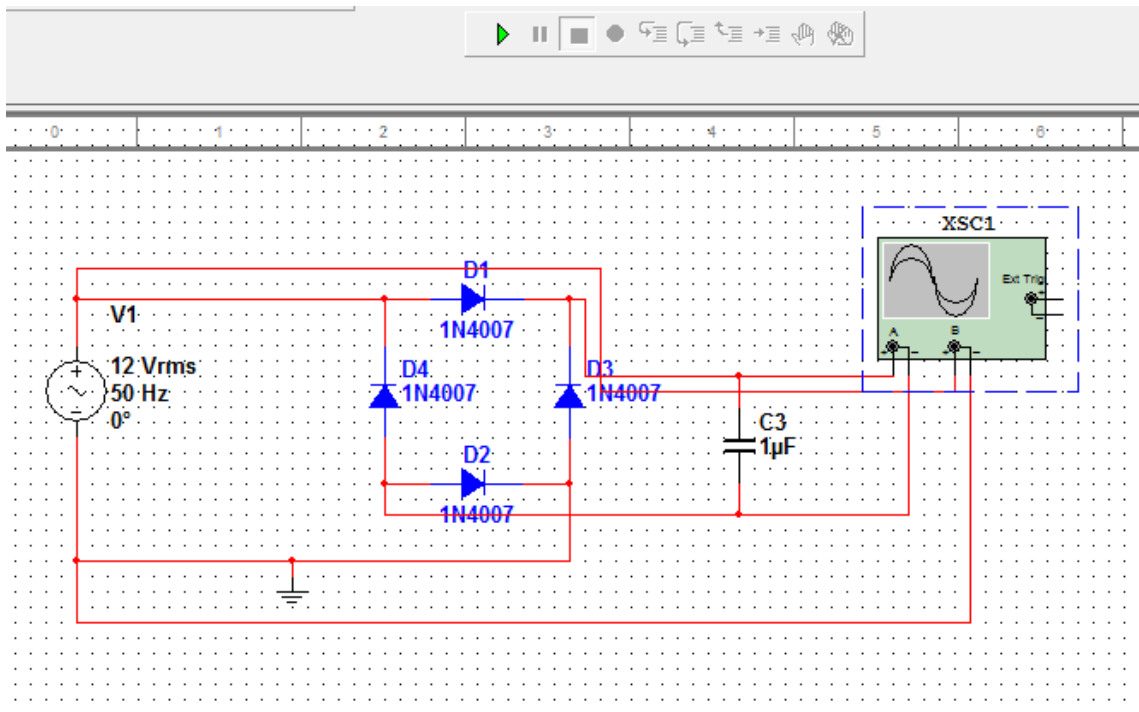


Рис. 6.21. Схема випрямляча зі згладжуючим конденсатором.

2.28. Відкрити вікно осцилографа та встановити його в зручному місці поля програми.

2.29. Натиснути кнопку «Пуск» . Почалося моделювання роботи схеми. На осцилографі мають відтворюватися сигнали вхідної та вихідної напруг.

2.30. Через декілька секунд натиснути кнопку «Стоп» поряд з кнопкою «Пуск».

2.31. На екрані осцилографу знайти ділянку з записаними сигналами.

2.32. Встановити на екрані осцилографу зручні для роботи масштаби часу та рівня сигналу.

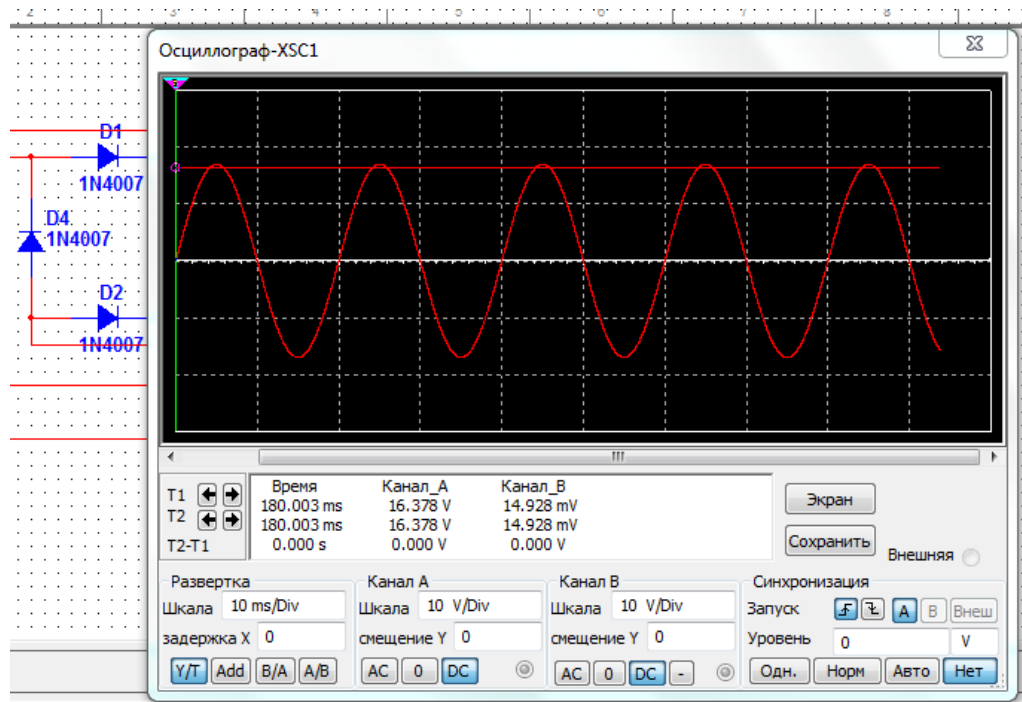


Рис. 6.22. Приклад записаних осцилограм сигналів вхідної та вихідної напруг з використанням згладжуючого конденсатора.

2.33. За графіком сигналу вихідної постійної напруги за допомогою інструментів осцилографу (кнопки T1 та T2 у нижній лівій частині вікна осцилографу) визначити значення вихідної постійної напруги (рисунок 6.22). Результат вимірювань занести до таблиці результатів у колонку $U_{Вих}$, В.

3. Аналіз даних.

3.1. За формулою (6.2) розрахувати амплітудне значення змінної напруги та записати результат до таблиці у колонку U_A (розр.), В.

3.2. Порівняти розрахункове амплітудне значення змінної напруги з вимірним під час моделювання.

3.3. Порівняти вихідну постійну напругу випрямляча з амплітудним значенням змінної напруги а також з амплітудним значенням пульсуючої напруги.

3.4. Зробити висновки щодо властивостей діодного мосту та випрямляча в цілому.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОМНОЖУВАЧА НАПРУГИ

Мета: Змодельовати та дослідити паралельний подвоювач напруги, розрахувати теоретичне значення вихідної напруги та порівняти результати розрахунків з результатами вимірювань під час моделювання.

Матеріали та обладнання: ПК з програмами Multisim 11.0.

ХІД РОБОТИ

1. Підготувати таблицю для занесення результатів розрахунків та моделювання.

Таблиця 6.2. Результати розрахунків та моделювання

U_d , В	U_A (розрах.), В	$U_{Вих}$ (розрах.), В	U_A (вим.), В	$U_{Вих}$ (вим.), В

2. Моделювання помножувача напруги.
 - 2.1. Запустити програму Multisim 11.0.
 - 2.2. Зайти в меню «Place» – «Component».
 - 2.3. У вікні, що з'явилося обрати розділ «Diodes» та сімейство «Diode».
 - 2.4. Обрати діод 1N4007. Натиснути ОК та поставити його у довільне місце робочого поля програми.
 - 2.5. Обрати ще 1 такий самий діод та поставити його поряд із першим.
 - 2.6. Обрати розділ «Basic» та сімейство «Capacitor» (конденсатор).
 - 2.7. Обрати конденсатор ємністю 1 μ (1 мкФ = 10⁻⁶ Ф) та поставити його поряд з іншими компонентами.
 - 2.8. Обрати ще 1 такий самий конденсатор та поставити його поряд з іншими компонентами.
 - 2.9. Обрати розділ «Sources» (джерела).
 - 2.10. Обрати сімейство «Power sources» (джерела живлення).
 - 2.11. Обрати джерело живлення змінного струму «AC_Power», натиснути ОК та встановити його поряд з іншими компонентами.
 - 2.12. Обрати «Ground» (заземлення), натиснути ОК та встановити його поряд з іншими компонентами.
 - 2.13. Закрити вікно добору компонентів.
 - 2.14. За допомогою інструментів програми з'єднати усі компоненти у відповідності до схеми на рис. 6.16. Заземлення має бути з'єднаним з загальним (нульовим) провідником джерела живлення змінного струму.
 - 2.15. Обрати у правому вертикальному меню осцилограф та встановити його з правого боку від схеми (XSC1).
 - 2.16. З'єднати канал «A» осцилографа XSC1 з виходом помножувача.

2.17. Обрати у правому вертикальному меню ще один осцилограф та встановити його з лівого боку від схеми (XSC2).

2.18. З'єднати канал «А» осцилографа XSC2 з джерелом змінного струму «AC_Power». Приклад побудованої схеми зображено на рисунку 6.23.

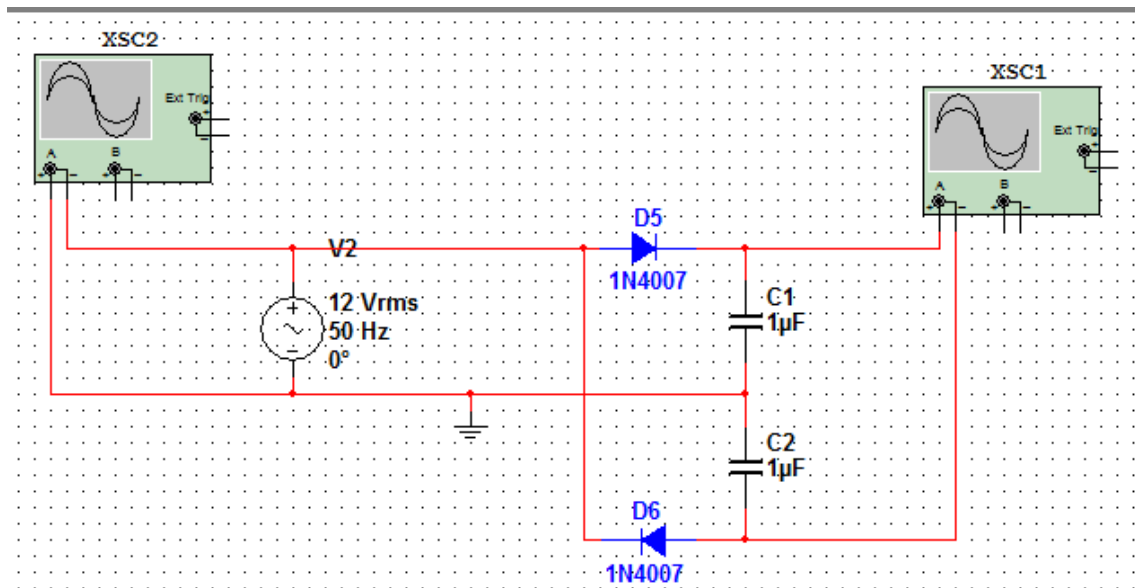


Рис. 6.23. Приклад побудованої схеми

2.19. Подвійним клацанням лівою кнопкою миші на джерелі змінного струму AC_Power відкрити вікно його налаштування.

2.20. У вікні що з'явилося задати параметри: діюче значення напруги «Voltage (RMS)» – 12 V; та частоту F – 50 Hz (Герц). Запишіть діюче значення напруги до таблиці результатів у колонку U_d , В.

2.21. Закрити вікно налаштування джерела змінного струму.

2.22. Відкрити вікна обох осцилографів подвійним клацанням лівої кнопки миші та встановити їх в зручних місцях поля програми.

2.23. Натиснути кнопку «Пуск» . Почалося моделювання роботи схеми. На осцилографах мають відтворюватися сигнали вхідної та вихідної напруг.

2.24. Через декілька секунд натиснути кнопку «Стоп» поряд з кнопкою «Пуск».

2.25. На екранах осцилографів знайти ділянки з записаними сигналами.

2.26. Встановити на екранах осцилографів зручні для роботи масштаби часу та рівня сигналу.

2.27. За графіками сигналів вхідної та вихідної напруг за допомогою інструментів осцилографів (кнопки T1 та T2 у нижній лівій частині вікна осцилографа) визначити амплітудне значення вхідної змінної напруги та значення вихідної постійної напруги (рисунок 6.24). Результати вимірювань записати до таблиці результатів – U_A (вим.), В та U_{Bux} (вим.), В.

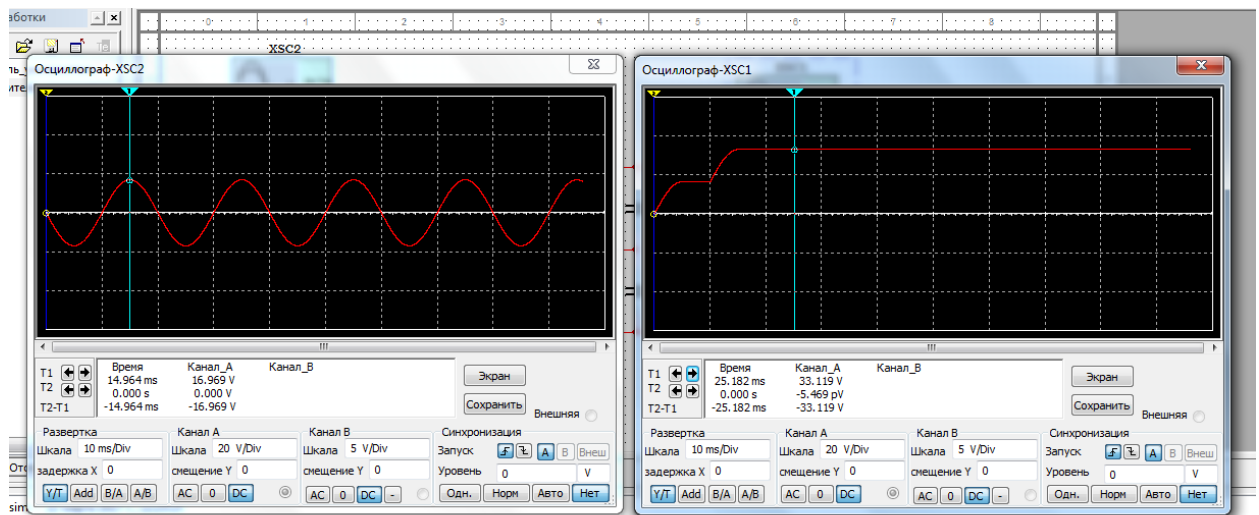


Рис. 6.24. Приклад записаних осцилограм сигналів вхідної та вихідної напруг з вимірюванням їх значень

3. Аналіз даних.

3.1. За формулою (6.2) розрахувати амплітудне значення змінної напруги та записати результат до таблиці у колонку U_A (розр.), В.

3.2 Розрахувати значення вихідної напруги помножувача за формулою:

$$U_{\text{Вих}} (\text{розр.}) = 2 \cdot U_A (\text{розр.}) \quad (6.8)$$

3.3. Порівняти розрахункове амплітудне значення змінної напруги з виміряним під час моделювання.

3.4. Порівняти розрахункове значення вихідної постійної напруги помножувача з виміряним під час моделювання.

3.5. Зробити висновки щодо властивостей паралельного подвоювача напруги.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

1. Змодельуйте у середовищі Multisim 11.0 схему, зображену на рис. 6.6, та визначить коефіцієнти пульсацій при значеннях опору навантаження 50, 100, 200 та 500 Ом.

2. Змодельуйте у середовищі Multisim 11.0:

а) Одноланковий Г-подібний фільтр з ємністю 500 мкФ та індуктивністю 500 мГн;

б) Дволанковий Г-подібний фільтр з ємностями по 250 мкФ та індуктивностями по 250 мГн.

Визначте та порівняйте коефіцієнти пульсацій обох фільтрів при опорі навантаження 50 Ом, та напрузі 220 В, 50 Гц.

3. Дослідіть, як буде змінюватися коефіцієнт пульсацій одноланкового Г-подібного фільтра залежно від частоти.

4. На рис. 6.11 зображено схему параметричного стабілізатора напруги на стабілітроні. Розрахуйте значення опору баластного резистора, якщо у схемі буде застосовано стабілітрон 1N5333BRLG з напругою стабілізації 3,3 В, струмом стабілізації 380 мА, а напруга живлення схеми складатиме 5 В.

5. Розрахуйте та накресліть схему стабілізатора напруги на ІМС LM317 (рис. 6.15 (а)) на напругу 9 В за умови, що опір резистора $R1$ складатиме 240 Ом.

6. Розрахуйте та накресліть схему стабілізатора струму на ІМС LM317 (рис. 6.15 (б)) на струм стабілізації 500 мА. Якою має бути потужність резистора $R1$?

7. Змодельуйте та дослідіть у середовищі Multisim 11.0 схему послідовного потроювача напруги (рис. 6.18) з діодами 1N4007 та конденсаторами ємністю 1 мкФ. Дослідіть навантажувальну здатність змодельованого потроювача.

РОЗДІЛ 7. ПІДСИЛЮВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ

7.1. Підсилювачі та їх класифікація. Підсилювачем називається пристрій, призначений для збільшення рівня електричного сигналу за рахунок енергії джерела живлення. Підсилювачі використовуються, зокрема, для збільшення акустичного сигналу (акустичні підсилювачі).

Для збільшення сигналу у підсилювачах використовуються транзистори або електронні лампи. Підсилювальні властивості транзистора зв'язані з його здатністю контролювати великий струм між двома електродами за допомогою малого струму між двома іншими електродами. Таким чином малі зміни величини сигналу в одному електричному колі можуть відтворюватися з більшою амплітудою в іншому колі.

Основними параметрами підсилювачів є наступні:

- коефіцієнт підсилення за напругою K_U – відношення напруги вихідного сигналу підсилювача до напруги його вхідного сигналу:

$$K_U = \frac{U_{вих}}{U_{вх}}. \quad (7.1)$$

- коефіцієнт підсилення за струмом K_I – відношення струму вихідного сигналу підсилювача до струму його вхідного сигналу;
- коефіцієнт підсилення за потужністю K_P – відношення потужності, що віддається навантаженню до потужності вхідного сигналу підсилювача;
- робочий діапазон частот f_P – смуга частот від нижньої робочої частоти f_H до верхньої робочої частоти f_B у межах якої коефіцієнт підсилення зменшується не більше ніж до 0,7 своєї максимальної величини;
- вхідний опір $R_{вх}$ – опір між вхідними контактами підсилювача для змінного вхідного струму;
- вихідний опір $R_{вих}$ – опір між вихідними контактами підсилювача для змінного струму при відключеному навантаженні;
- коефіцієнт корисної дії підсилювача η – відношення потужності, що віддається підсилювачем у навантаження, до потужності, що споживається від джерела живлення;
- динамічний діапазон D – відношення максимальної напруги вхідного сигналу до його мінімальної напруги, при якому нелінійні викривлення не перевищують встановлених норм;
- лінійні викривлення – це викривлення, зумовлені залежністю параметрів підсилювача від частоти і не залежать від амплітуди вхідного сигналу. Вони мають місце через наявність в колах підсилювача реактивних елементів (індуктивностей і ємностей), опори яких залежать від частоти, а також залежністю від частоти параметрів напівпровідникових приладів;

- нелінійні викривлення – це викривлення, зумовлені залежністю коефіцієнта підсилення підсилювача від амплітуди вхідного сигналу. Нелінійні викривлення викликані нелінійністю ВАХ активних елементів підсилювача (транзисторів та ін.).

До основних характеристик підсилювачів відносяться:

- амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) – залежність коефіцієнта підсилення за напругою від частоти сигналу, що підсилюється;
- фазо-частотна характеристика (ФЧХ) – залежність кута зсуву фаз вихідної і вхідної напруг від частоти;
- амплітудна характеристика (АХ) підсилювача – залежність амплітуди вихідного сигналу від амплітуди вхідного сигналу на деякій постійній частоті.

Приклади основних характеристик підсилювачів представлені на рисунку 7.1.

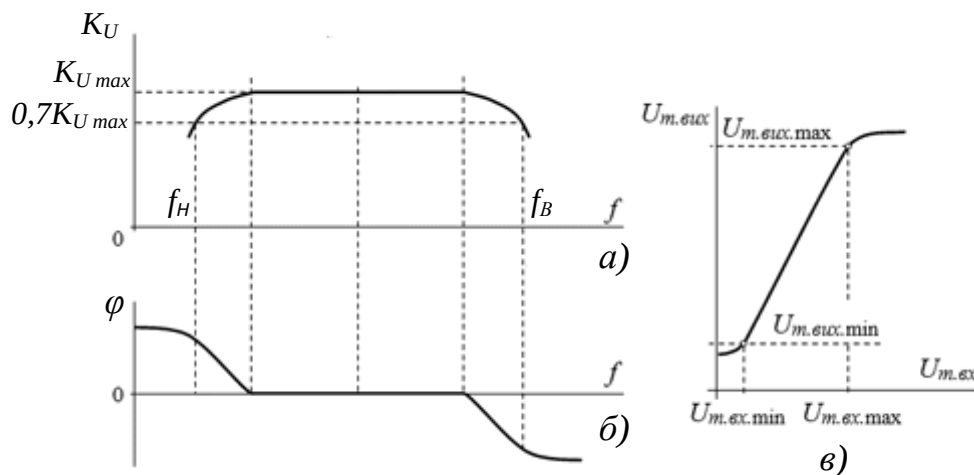


Рис. 7.1. Приклади основних характеристик підсилювачів:
АЧХ (а); ФЧХ (б); АХ (в).

Завдання передачі максимальної потужності від джерела сигналу на вхід підсилювача, а також з виходу підсилювача на навантаження називається узгодженням. Для оптимального узгодження вхідний опір підсилювача $R_{вх}$ має бути значно більшим за внутрішній опір джерела сигналу R_c , а вихідний опір $R_{вих}$ – значно меншим за опір навантаження R_n . Питання узгодження виникають і в багатокаскадних підсилювачах. Якщо два підсилювальні каскади не узгоджені між собою за вхідним й вихідним опором, то між ними ставиться повторювач (емітерний, витоковий, або катодний), який має великий вхідний і малий вихідний опір.

Усі підсилювачі можна розділити на два класи – з лінійним і нелінійним режимом роботи.

У підсилювачах з лінійним режимом роботи вихідний сигнал повинен бути близьким за формою до вхідного. Викривлення форми сигналу, внесені підсилювачем, повинні бути мінімальними.

У підсилювачів з нелінійним режимом роботи пропорційність у передачі вхідного сигналу відсутня. Після досягнення деякої величини напруги вхідного сигналу при його збільшенні сигнал на виході підсилювача залишається без зміни (обмежується на деякому рівні). Такі підсилювачі використовуються для перетворення вхідного сигналу, наприклад синусоїдального, в імпульсний сигнал, а також для посилення імпульсів.

Залежно від діапазону частот вхідних сигналів розрізняють:

- підсилювачі постійного струму (ППС) для підсилення сигналів, які змінюються повільно (від 0 Гц і вище);
- підсилювачі низької частоти (ПНЧ) для підсилення в діапазоні від звукових частот і вище (від десятків герц до 10...15 МГц);
- підсилювачі високої частоти (ПВЧ) для підсилення в діапазоні частот від десятків кілогерц до сотень мегагерц;
- широкосмугові підсилювачі (ШСП) для підсилення імпульсних сигналів, що мають спектр частот від десятків герц до сотень мегагерц;
- вузькосмугові (вибіркові) підсилювачі (ВСП) для підсилення сигналів у вузькому діапазоні частот.

За видом зв'язку між джерелом сигналу, каскадами та навантаженням підсилювачі поділяються на підсилювачі з безпосереднім, резистивним, оптронним, резистивно-ємнісним, трансформаторним або резонансно-трансформаторним зв'язком. Перші три види зв'язку можуть використовуватися у підсилювачах як постійного, так і змінного струму, решта – тільки у підсилювачах змінного струму.

7.2. Підсилювальні каскади. Підсилення електричного сигналу не завжди вдається здійснити в один етап. Для здійснення підсилення сигналу у декілька етапів застосовують декілька підсилювальних каскадів.

Підсилювальні каскади розділяють на каскади попереднього підсилення й вихідні каскади. Каскади попереднього підсилення призначені для підвищення рівня сигналу за напругою, а вихідні каскади – для одержання необхідних значень струму або потужності сигналу в навантаженні.

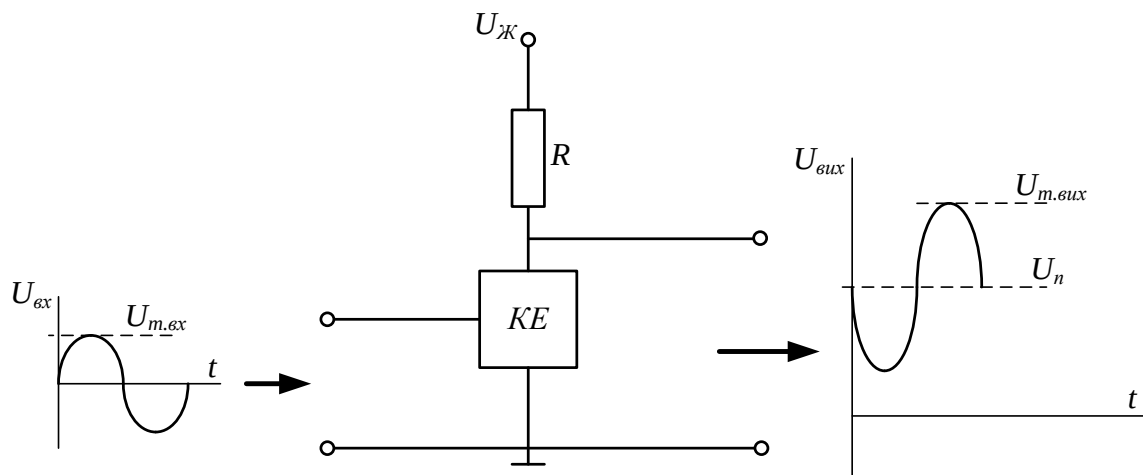


Рис. 7.2. Структурна схема підсилювального каскаду

На рисунку 7.2 представлена структурна схема підсилювального каскаду.

Основним елементом підсилювального каскаду є керований елемент KE , в якості якого можуть бути застосовані біполярні або польові транзистори, а також електронні лампи, та резистор R . Разом з джерелом живлення ці елементи утворюють вихідне коло каскаду.

Вхідний сигнал $U_{вх}$, наприклад, синусоїдальної форми, подається на вхід KE . Вихідний сигнал $U_{вих}$, знімається з виходу KE або з резистора R . Він формується в результаті зміни опору KE , а отже, струму у вихідному колі під впливом напруги живлення. Процес підсилення ґрунтується на перетворенні енергії джерела постійної напруги $U_{ж}$ в енергію змінної напруги у вихідному колі за рахунок зміни опору KE за законом, що задається вхідним сигналом.

Через використання для живлення джерела постійної напруги струм у вихідному ланцюзі каскаду є односпрямованим. При цьому змінний струм і напруга вихідного кола (пропорційні струму й напрузі вхідного сигналу) слід розглядати як змінні складові сумарних значень струму й напруги, що накладаються на їх постійні складові I_n і U_n . Зв'язок між постійними й змінними складовими має бути таким, щоб амплітудні значення змінних складових не перевищували постійних складових:

$$U_n > U_{m.вих}; I_n > I_{m.вих} \quad (7.2)$$

Невиконання цих умов призводить до викривлення форми вихідного сигналу.

Таким чином, для забезпечення роботи підсилювального каскаду при змінному вхідному сигналі в його вхідному й вихідному колі повинні бути створені постійні складові струму й напруги. Вони визначають режим спокою підсилювального каскаду, і характеризують електричний стан схеми за відсутності вхідного сигналу.

Підсилювальні властивості каскадів ґрунтуються на тому, що при подачі на керований елемент напруги вхідного сигналу, в струмі вихідного кола створюється змінна складова, внаслідок чого на керованому елементі утворюється аналогічна змінна складова напруги, що перевищує змінну складову напруги на вході.

Розглянемо будову підсилювального каскаду на прикладі підсилювача змінного струму на біполярному транзисторі, схема якого представлена на рисунку 7.3.

В даному підсилювачі транзистор увімкнено за схемою з загальним емітером. Такий підсилювач називається резистивним підсилювачем з ємнісним зв'язком. Назва схеми пов'язана з характером опору навантаження (резистор R_k) та ємнісним зв'язком з джерелом сигналу (конденсатор $C_{вх}$) та навантаженням наступного каскаду (конденсатор $C_{вих}$).

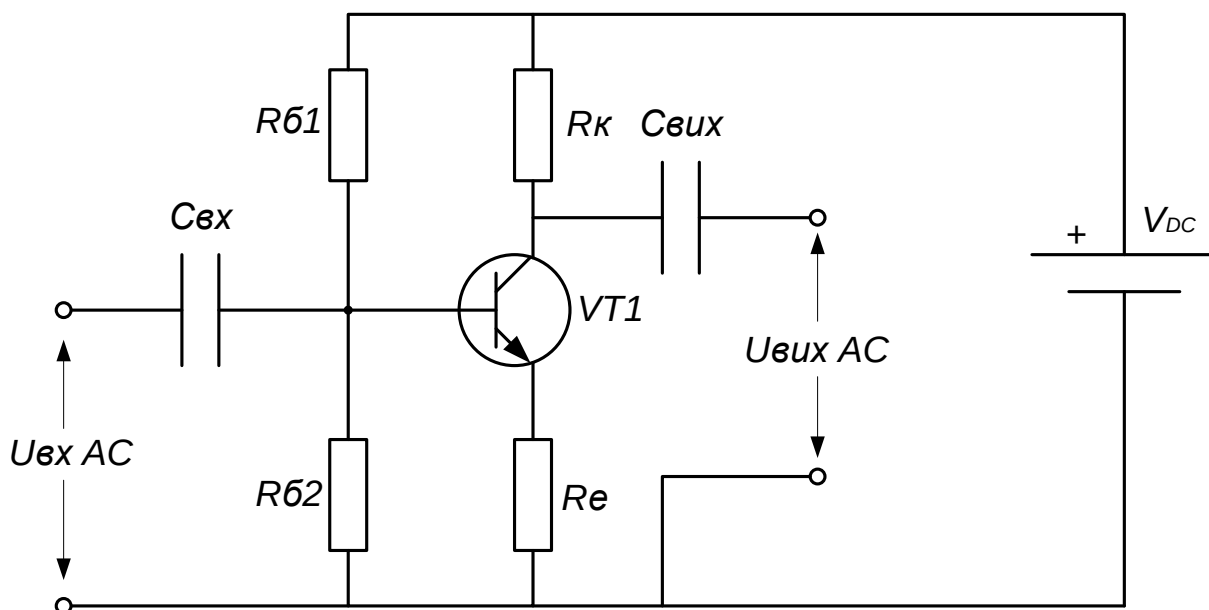


Рис. 7.3. Схема підсилювального каскаду на біполярному транзисторі

Резистори R_{b1} , R_{b2} , R_k та R_e визначають робочу точку транзистора $VT1$. Робоча точка транзистора – це точка на його робочій характеристиці яка відповідає лінійній залежності зміни рівня вихідного сигналу від рівня вхідного сигналу. Резистори R_{b1} та R_{b2} визначають напругу зміщення бази, тобто створюють постійну складову у вхідному колі. Резистори R_k та R_e призначені для обмеження струму через транзистор $VT1$ до його номінального значення. Резистор R_e визначає напругу емітера та стабілізує робочу точку транзистора.

Конденсатори $C_{вх}$ та $C_{вих}$ слугують для відокремлення постійної та змінної складових вхідного й вихідного сигналів.

Для схеми, представленої на рисунку 7.3 коефіцієнт підсилення наближено визначається за формулою:

$$K_u = \frac{R_k}{R_e}. \quad (7.3)$$

Формула (7.3) використовується для розрахункового наближеного визначення коефіцієнту підсилення. Для практичного визначення коефіцієнту підсилення використовується формула (7.1). При цьому амплітуди вхідного та вихідного сигналів визначаються за допомогою осцилографа. На практиці розрахункове значення коефіцієнта підсилення не завжди співпадає з його реальним значенням. Реальне значення коефіцієнта підсилення залежить від багатьох факторів, зокрема, від частоти вхідного сигналу.

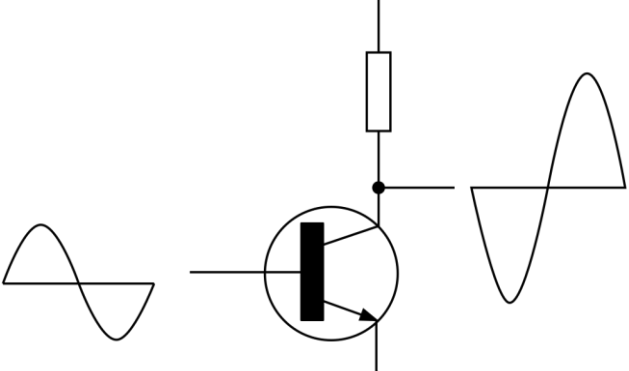
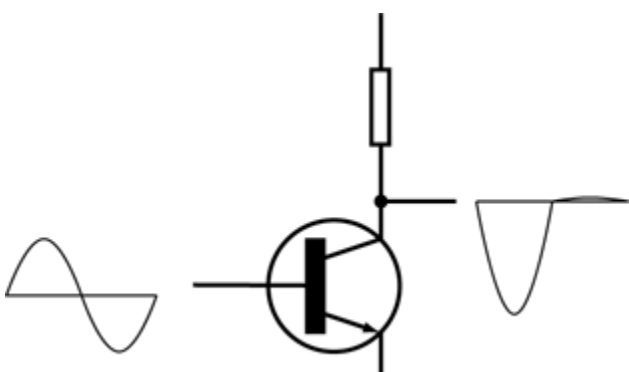
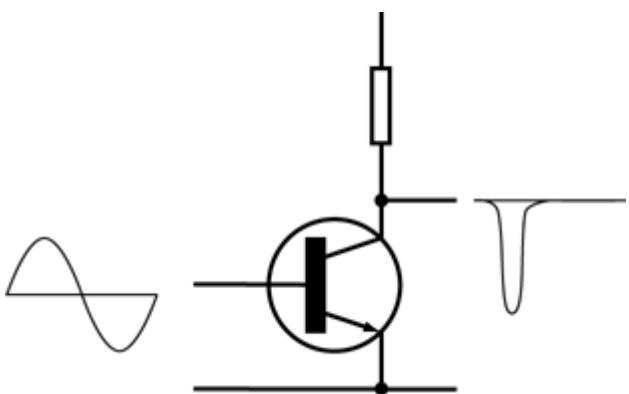
Як було зазначено вище, підсилювальні каскади можуть бути побудовані також на польових транзисторах. У разі застосування польових транзисторів з керуючим р-п переходом або транзисторів з ізольованим затвором та вбудованим каналом, часто відпадає необхідність у створенні постійної складової напруги у вхідному колі. Перевагою підсилювальних каскадів на польових транзисторах є більш високий вхідний опір.

7.3. Режими (класи) роботи підсилювачів.

Залежно від розташування точки спокою на характеристиках транзисторів розрізняють три основні режими роботи підсилювальних каскадів: А, В, С. Відрізняються ці режими за ступенем спотворення вхідного сигналу при підсиленні і значенням ККД.

Основні класи роботи підсилювачів приведені у таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Режими (класи роботи) підсилювачів

Клас А. Струм спокою становить близько половини від максимального.	
Клас В. Струм спокою становить 1...3 % від максимального.	
Клас С. Струм спокою дорівнює нулю.	

При роботі підсилювача в класі А підсилення вхідного сигналу відбувається практично без спотворень. Недоліком підсилювачів класу А є дуже низький ККД.

У підсилювачах класу В змінні складові струму і напруги транзистора виникають тільки в позитивні півперіоди вхідного сигналу. При

синусоїдальній вхідній напрузі вихідна напруга підсилювального каскаду має форму півсинусоїди. Для того щоб на виході відтворити синусоїдальний сигнал, підсилювальні каскади створюються за двотактними схемами (рис. 7.4)

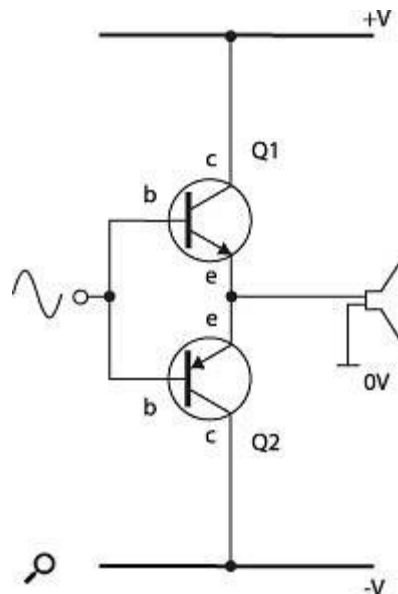


Рис. 7.4. Двотактний підсилювальний каскад класу В.

Значення ККД підсилювачів класу В є значно вищими порівняно з класом А.

У підсилювачах класу С струм в транзисторі проходить лише протягом частини позитивного півперіоду вхідного сигналу, що призводить до значних спотворень вихідного сигналу. ККД таких підсилювачів може досягати 80 %, але через значні спотворення сигналу, такі підсилювачі застосовуються лише у складі спеціальних підсилювачів та автогенераторів.

Принципово іншим класом підсилювачів є підсилювачі класу D. В основі роботи такого підсилювача лежить принцип широтно-імпульсної модуляції (ШИМ), який полягає у модуляції корисного сигналу певною несучою частотою.

На рисунку 7.5 представлено структурну схему та часові діаграми аудіопідсилювача класу D. Керуюча схема підсилювача містить генератор пилоподібної напруги з певною постійною частотою, за якою відбувається модуляція вхідного сигналу. Модульований сигнал у вигляді імпульсів, тривалість яких пропорційна амплітуді вхідного сигналу подається до силових ключів, в якості яких можуть бути застосовані польові транзистори з низьким опором каналу.

Підсилений модульований сигнал подається через фільтр нижніх частот (ФНЧ) до динаміку.

Завдяки тому, що вихідні транзистори підсилювача класу D перебувають лише у повністю відкритому, або повністю закритому стані, ККД таких підсилювачів може наближатися до 100 %. При цьому нагрівання транзисторів мінімізується, що дозволяє мінімізувати габаритні розміри підсилювача за рахунок зменшення або відсутності радіаторів охолодження.

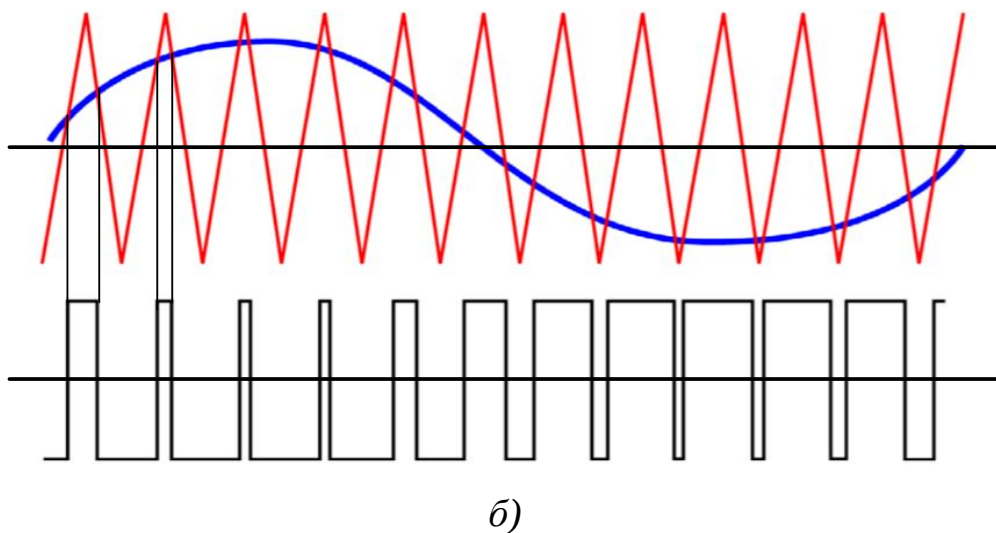
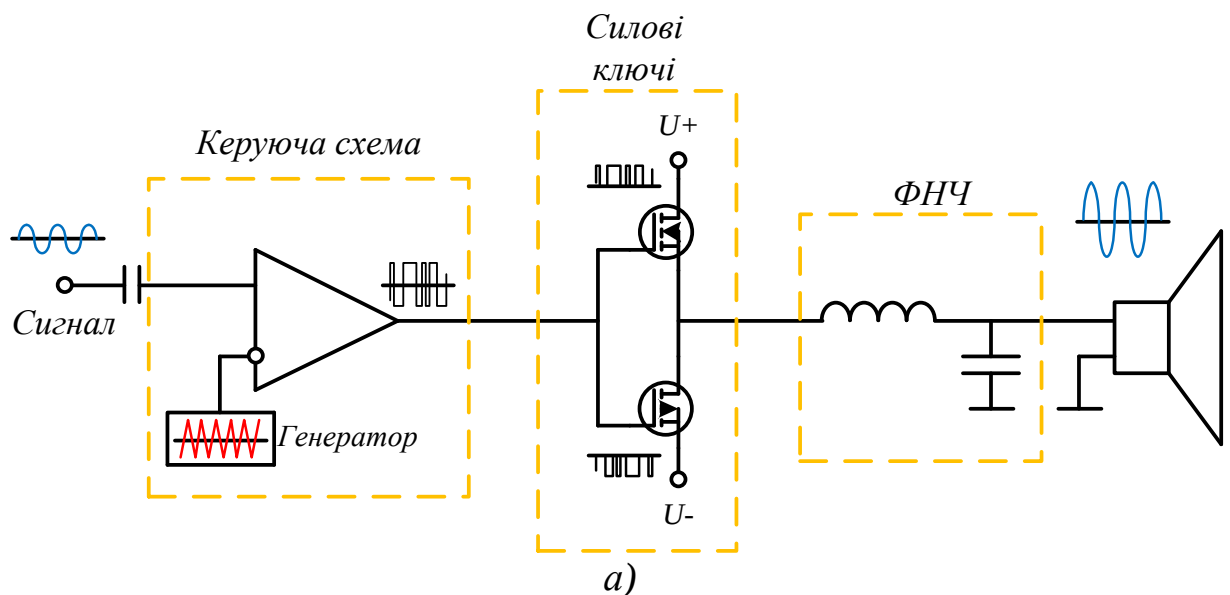


Рис. 7.5. Структурна схема (а) та часові діаграми (б)
підсилювача класу D

7.4. Операційні підсилювачі. Вище мова йшла лише про підсилення електричних сигналів змінного струму. Для підсилення коливань, що повільно змінюються в часі та мають постійну складову застосовуються підсилювачі постійного струму. Проблемою, пов'язаною з цим типом підсилювачів є проблема стійкості. Кожна зміна, пов'язана з нестабільністю робочої точки транзистора (дрейфу), або фону, викликаного неідеальною фільтрацією напруги живлення не може бути виділеною з корисного сигналу і виділяється у вихідному сигналі у вигляді завади. Крім цього додається температурна чутливість транзисторів. Тому у схемах підсилювачів постійного струму мають бути присутні ланцюги компенсації. Наразі підсилювачі постійного струму на дискретних елементах практично не виготовляються, а для підсилення сигналів постійного струму

застосовуються інтегральні мікросхеми, що мають назву «операційні підсилювачі». До складу такої мікросхеми може входити декілька десятків транзисторів та інших елементів. У більшості випадків немає необхідності знати їх внутрішню структуру – досить знання їх основних характеристик і принципів роботи.

Операційним підсилювачем (ОП) називається підсилювач постійного струму з великим коефіцієнтом підсилення, охоплений колом від'ємного зворотного зв'язку (ВЗЗ), яке визначає основні якісні показники й характер виконуваних підсилювачем операцій.

Назва цих підсилювачів пов'язана із застосуванням головним чином для виконання різних операцій над аналоговими величинами (алгебраїчне додавання, вирахування, множення на постійний коефіцієнт, інтегрування, диференціювання, логарифмування й ін.). Вони застосовуються в підсилювальній техніці, пристроях генерації сигналів синусоїдальної та імпульсної форми, у стабілізаторах напруги, активних фільтрах, тощо.

На рисунку 7.6 представлені варіанти умовних позначень операційних підсилювачів на кресленнях електронних схем.

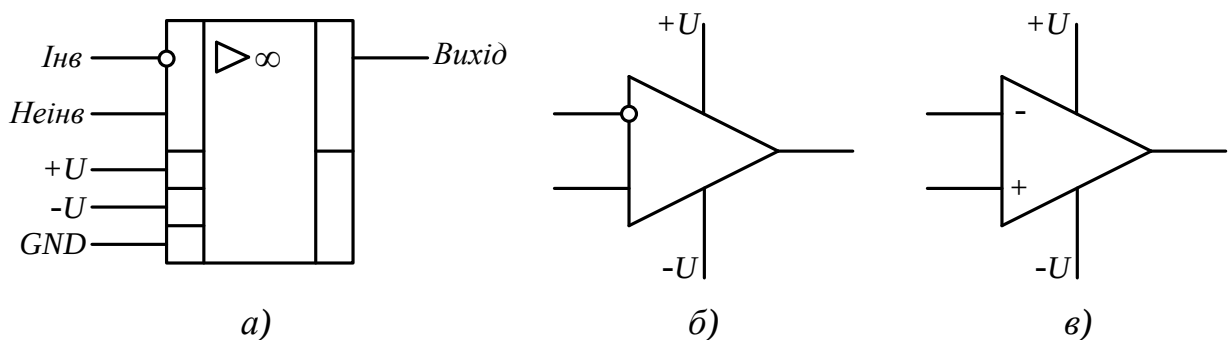


Рис. 7.6. Умовні позначення операційних підсилювачів

Один з входів ОП називається інвертуючим, а інший – неінвертуючим. При подачі сигналу на неінвертуючий вхід, приріст вихідного сигналу співпадає за знаком (фазою) з приростом вхідного сигналу. Якщо ж сигнал подати на інвертуючий вхід, то збільшення вихідного сигналу має зворотний знак (протилежний за фазою) у порівнянні зі збільшенням вхідного сигналу. Інвертуючий вхід часто використовують для введення в ОП зовнішніх ВЗЗ.

Живлення ОП здійснюється зазвичай від двох джерел $+U$ і $-U$ з однаковою напругою, що утворюють двополюсне живлення. Джерела живлення мають загальну точку GND .

Окрім входів, виходу та виводів живлення операційні підсилювачі можуть мати додаткові виводи призначені для корекції АЧХ та для встановлення нуля на виході при відсутності вхідних сигналів.

ОП є диференціальними підсилювачами постійного струму із двома входами. Тобто вихідна напруга пропорційна різниці напруг між його входами.

ОП можуть підсилювати сигнали як постійного, так і змінного струму, тобто від частоти 0 Гц, до верхньої частоти, яка залежить від багатьох факторів – частотних характеристик транзисторів, що входять в ОП, коефіцієнта підсилення тощо.

ОП мають дуже великий вхідний опір – десятки – сотні МОм, тобто вони практично не впливають на джерело вхідного сигналу.

Існує два основних варіанти включення операційного підсилювача: інвертуючий і неінвертуючий.

Схема інвертуючого підсилювача на основі ОП наведена на рисунку 7.7. У цій схемі вхідний сигнал подається на інвертуючий вхід. Вихідна напруга $U_{вих}$ інвертована (протифазна) відносно вхідної напруги $U_{вх}$.

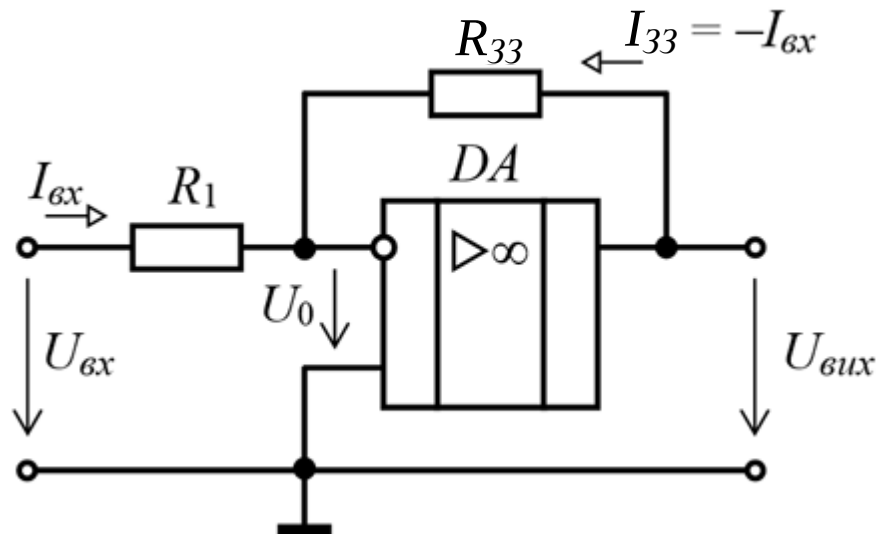


Рис. 7.7. Схема інвертуючого підсилювача

Резистор R_{33} забезпечує ВЗЗ у підсилювачі. Коефіцієнт підсилення за напругою інвертуючого підсилювача з ВЗЗ визначається параметрами тільки пасивної частини схеми:

$$K_U = U_{вих} / U_{вх} = -R_{33} / R1. \quad (7.4)$$

Неінвертуючий підсилювач (рис. 7.8) містить послідовний ВЗЗ за напругою (резистор R_{33}), поданий на інвертуючий вхід. Вхідний сигнал подається на неінвертуючий вхід.

Коефіцієнт підсилення за напругою неінвертуючого підсилювача визначається за формулою:

$$K_U = U_{вих} / U_{вх} = 1 + (R_{33} / R1). \quad (7.5)$$

При однакових номіналах R_{33} і $R1$ коефіцієнт підсилення K_U неінвертуючого підсилювача за модулем більший на одиницю ніж у інвертуючого.

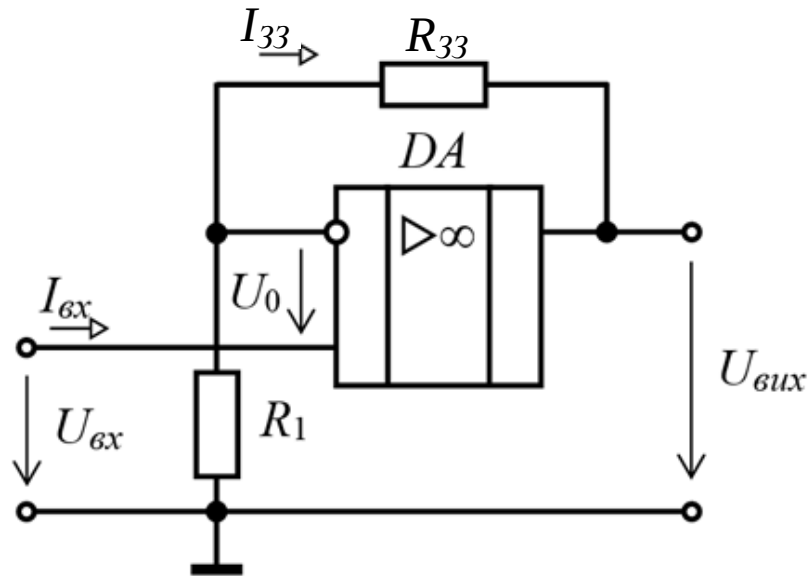


Рис. 7.8. Неінвертуючий підсилювач

Окрім інвертуючих та неінвертуючих підсилювачів на ОП можуть бути створені інші функціональні схеми, зокрема суматори, диференціатори, інтегратори, компаратори, тощо.

Схема суматора на ОП представлена на рис. 7.9. Даний варіант суматора виконано на основі схеми інвертуючого підсилювача з паралельними гілками на вході, кількість яких дорівнює кількості сигналів, призначених для додавання. Напряга на виході такої схеми визначається за формулою:

$$U_{vux} = -(K_{U1} \cdot U_{6x1} + K_{U2} \cdot U_{6x2} + K_{U3} \cdot U_{6x3}), \quad (7.6)$$

де $K_{U1} = R_{33}/R_1$, $K_{U2} = R_{33}/R_2$, $K_{U3} = R_{33}/R_3$.

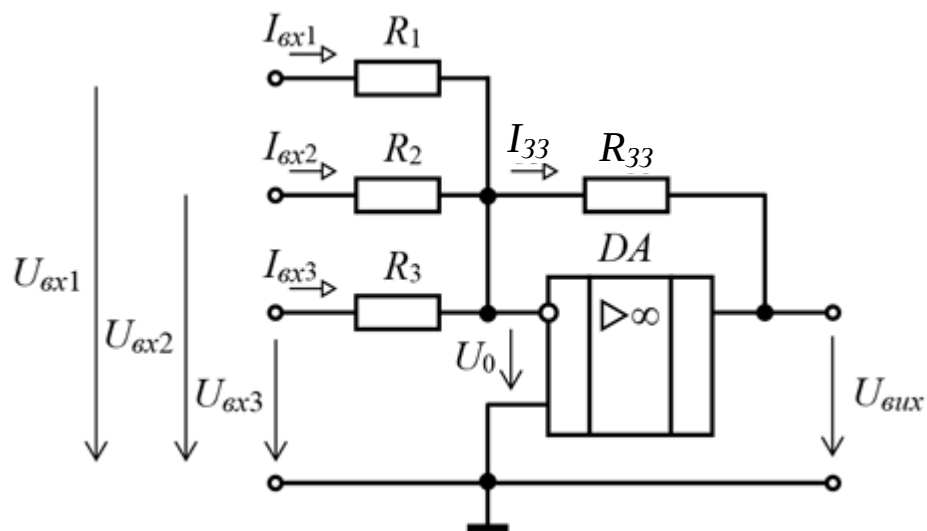


Рис. 7.9. Схема інвертуючого суматора на ОП

У диференціаторі (рис. 7.10) ОП включений за схемою інвертуючого підсилювача з ВЗЗ, виконаним на резисторі R . Конденсатор C і резистор R для вхідного сигналу є диференціюючим колом.

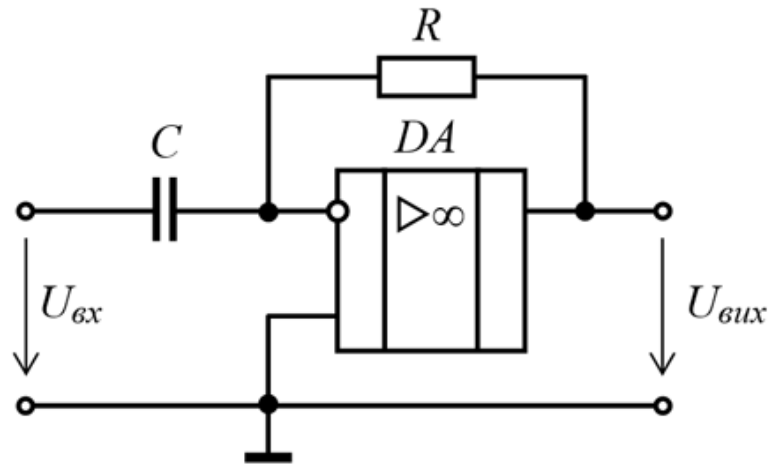


Рис. 7.10. Схема диференціатора на основі ОП.

Вихідна напруга диференціатора визначається за формулою:

$$U_{\text{вих}} = R \cdot C \cdot (dU_{\text{вх}}/dt). \quad (7.7)$$

Таким чином диференціатор підсилює не значення вхідного сигналу, а значення швидкості його зміни.

У інтеграторі (рис. 7.11) роль ВЗЗ виконує конденсатор C . Резистор R і конденсатор C для вхідного сигналу є інтегруючим колом.

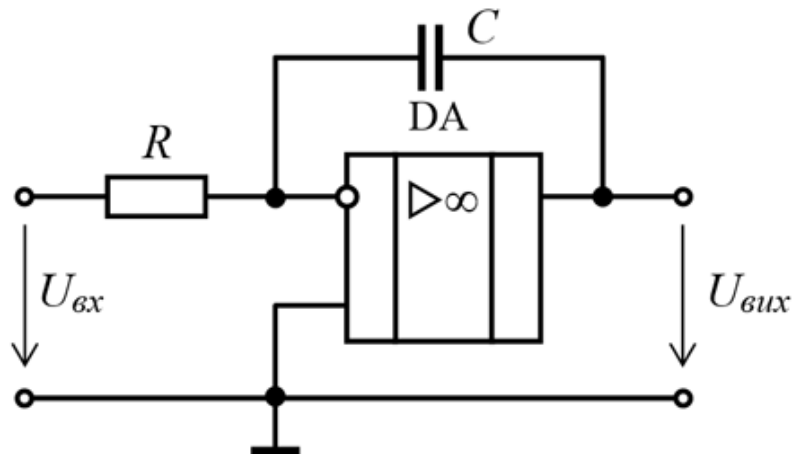


Рис. 7.11. Схема інтегратора на основі ОП.

Вихідна напруга пропорційна інтегралу вхідної напруги за часом:

$$U_{\text{вих}} = 1/(R \cdot C) \cdot \int (U_{\text{вх}} \cdot dt). \quad (7.8)$$

Якщо вхідна напруга незмінна за величиною $U_{\text{вх}} = \text{const}$, то вихідна напруга буде пропорційною тривалості часу інтегрування t :

$$U_{вих} = 1/(R \cdot C) \cdot U \cdot t. \quad (7.9)$$

Компаратор – це елемент порівняння вхідної напруги з деякою заданою напругою, який широко використовуються в системах контролю та автоматичного керування і відносяться до елементів імпульсної техніки.

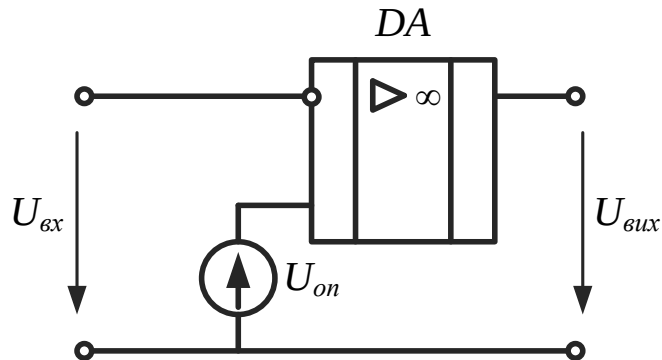


Рис. 7.12. Схема компаратора на основі ОП

Компаратор, виконаний на базі ОП (рис. 7.12), порівнює вимірювану напругу $U_{вх}$, яка подається на один із входів (переважно на інвертуючий), з опорною напругою (наперед заданою) $U_{оп}$, яка подається на інший вхід. Опорна напруга є незмінною в часі, може мати додатну чи від’ємну полярність, а вхідна напруга – змінюється. Коли $U_{вх} = U_{оп}$, вихідна напруга ОП змінює свій знак на протилежний (з $+ U_{вих.мах}$ на $- U_{вих.мах}$, або навпаки). Тобто зміна полярності вихідної напруги (перемикання) відбувається за умови, що $U_{вх} - U_{оп} = 0$. Значення напруг $+ U_{вих.мах}$ та $- U_{вих.мах}$ є близькими до напруг живлення ОП.

На базі ОП також можуть бути отримані схеми, що виконують інші математичні операції, такі як логарифмування, множення, розподіл, добування кореня й зведення в ступінь.

7.5. Вузькосмугові підсилювачі. Вузькосмугові підсилювачі призначені для підсилення сигналів у деякій вузькій смузі частот. Підсилювачі з такими властивостями використовуються для побудови багатоканальних пристроїв зв’язку (радіо та телекомунікаційних), пристроїв автоматичного керування й контролю та інших пристроїв, які працюють на фіксованих частотах.

Завдання формування вузькосмугової АЧХ може бути вирішене наступними способами:

- включення фільтру з необхідною АЧХ до вихідного кола звичайного підсилювача;
- включення фільтру з необхідною АЧХ до кола зворотного зв’язку звичайного підсилювача;
- застосування резонансних підсилювачів.

Розглянемо в якості прикладу резонансний підсилювач схема якого представлена на рисунку 7.13.

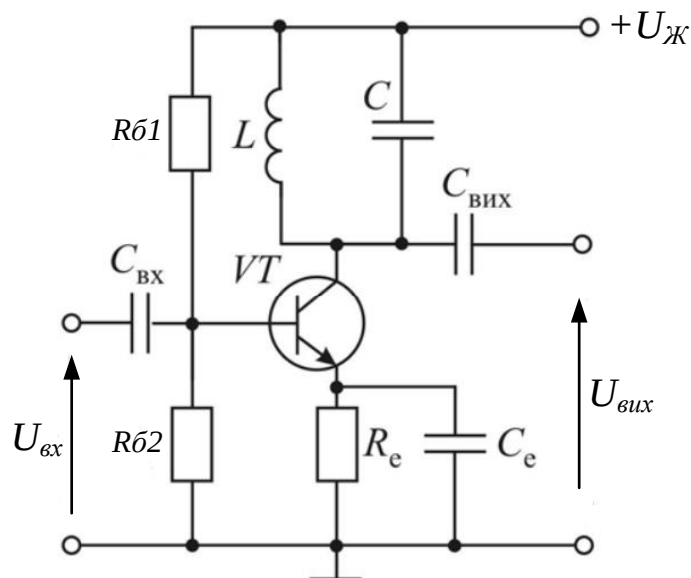


Рис. 7.13. Резонансний підсилювач.

Як видно з рисунку 7.13, схема резонансного підсилювача нагадує схему резистивного підсилювача (рис. 7.3), але замість резистора R_k використовується паралельний коливний контур. АЧХ резонансного підсилювача визначається резонансною частотою коливного контуру f_p та його добротністю Q . Амплітудно-частотні характеристики резонансного підсилювача з однією і тією самою резонансною частотою та різними значеннями добротності коливного контуру представлені на рисунку 7.14.

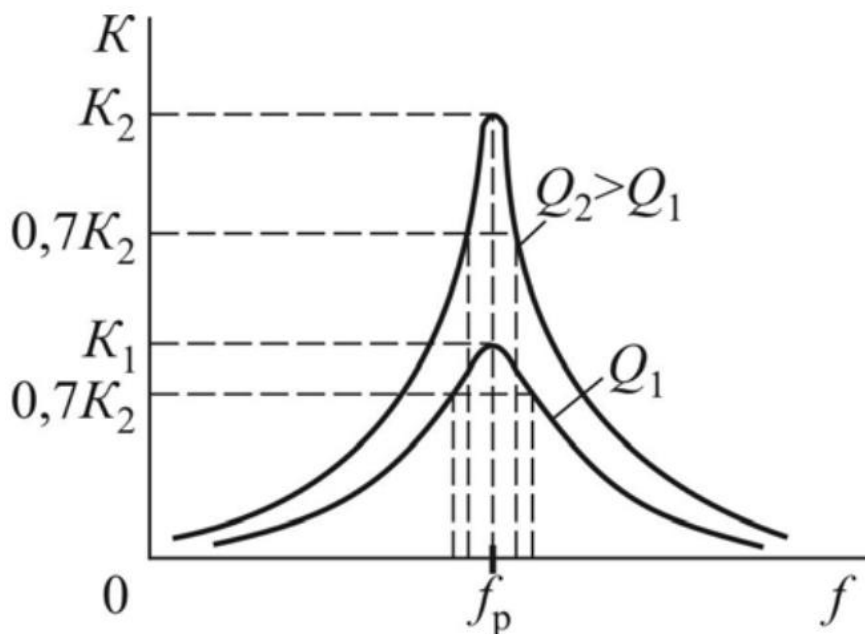


Рис. 7.14. Амплітудно-частотні характеристики резонансного підсилювача

Схожі за формою АЧХ мають також і вузькосмугові підсилювачі з фільтрами, включеними до вихідного кола, або у коло зворотного зв'язку звичайних підсилювачів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДСИЛЮВАЧА

Мета роботи: Змодельовати підсилювач у моделюючому комп'ютерному середовищі та визначити його характеристики у межах звукових частот.

Матеріали та обладнання: ПК з програмами Multisim 11.0 та Excel.

В даній лабораторній роботі пропонується змодельовати та дослідити підсилювач за схемою, представленою на рисунку 7.3 при різних частотах вхідного сигналу у звуковому діапазоні.

Параметри компонентів для моделювання схеми зведені до таблиці 7.2.

Таблиця 7.2. Вихідні дані

$C_{вх}, \mu F$	$C_{вих}, \mu F$	$R_{б1}, \Omega$	$R_{б2}, \Omega$	R_k, Ω	R_e, Ω	VT1
22	2200	1000	200	20	2	2N2222

ХІД РОБОТИ

1. Підготувати таблицю для занесення результатів розрахунків та моделювання.

Таблиця 7.2. Результати розрахунків та моделювання

F, Hz	20	100	200	500	1000	2000	5000	10000	12000	15000	18000	20000
$U_{вих}, \text{В}$												
K_u												

$$U_{вх} = Pk = 500 \text{ mV.}$$

2. Моделювання підсилювача.

2.1. Запустити програму Multisim 11.0.

2.2. Зайти в меню «Place» – «Component».

2.3. У вікні, що з'явилося обрати розділ «Transistors» та сімейство «BJT_NPN».

2.4. Обрати транзистор 2N2222. Натиснути ОК та поставити його у довільне місце робочого поля програми.

2.5. Обрати розділ «Basic» та сімейство «Capacitor» (конденсатор).

2.6. Обрати конденсатори ємністю 22μ (22 мкФ = 22·10⁻⁶ Ф) та 2200μ та поставити їх поряд з транзистором.

2.7. Обрати сімейство «Resistor» (резистор, активний опір).

2.8. Обрати резистори опором 1 kΩ (кОм), 200 Ω, 20 Ω та 2 Ω та поставити їх поряд з іншими компонентами.

- 2.9. Обрати розділ «Sources» (джерела).
- 2.10. Обрати сімейство «Power sources» (джерела живлення).
- 2.11. Обрати джерело живлення постійного струму «DC_Power», натиснути ОК та встановити його поряд з іншими компонентами.
- 2.12. Обрати сімейство «Signal voltage sources».
- 2.13. Обрати джерело живлення змінного струму «AC_Voltage», натиснути ОК та встановити його поряд з іншими компонентами.
- 2.14. Обрати «Ground» (заземлення), натиснути ОК та встановити його поряд з іншими компонентами.
- 2.15. Закрити вікно добору компонентів.
- 2.16. За допомогою інструментів програми з'єднати усі компоненти у відповідності до схеми на рисунку 7.3. Заземлення має бути з'єднаним з загальним (від'ємним) провідником схеми.
- 2.17. Обрати у правому вертикальному меню осцилограф та встановити його з правого боку від схеми (XSC1).
- 2.18. З'єднати канал «A» осцилографа XSC1 з виходом підсилювача.
- 2.19. Обрати у правому вертикальному меню ще один осцилограф та встановити його з правого боку від схеми (XSC2).
- 2.20. З'єднати канал «A» осцилографа XSC2 з джерелом вхідного сигналу AC_Voltage. Приклад побудованої схеми зображено на рисунку 7.15.

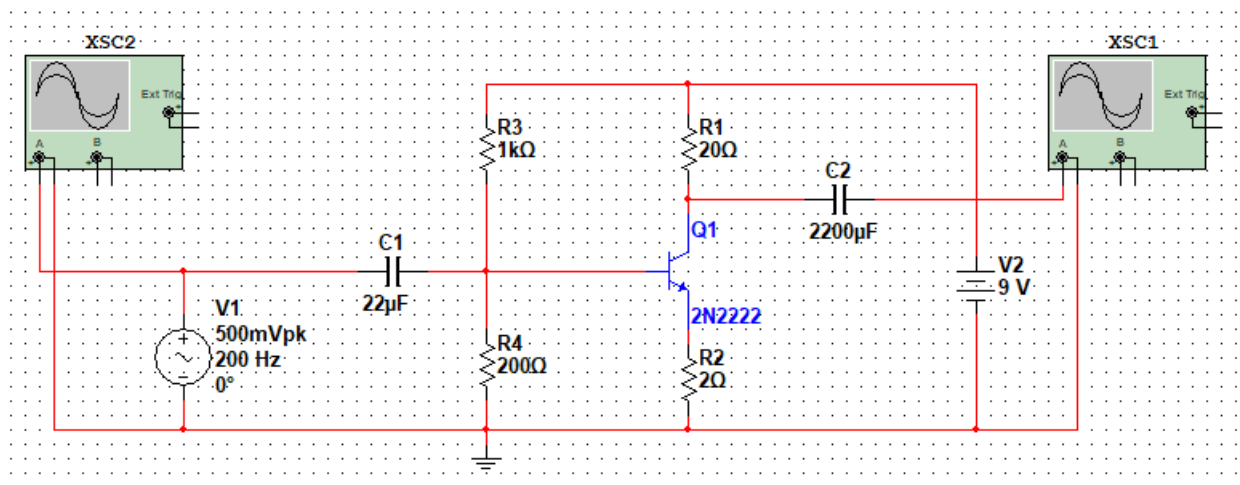


Рис. 7.15. Приклад побудованої схеми

- 2.21. Подвійним клацанням лівою кнопкою миші на джерелі вхідного сигналу AC_Voltage відкрити вікно його налаштування.
- 2.22. У вікні що з'явилося задати параметри: амплітудне значення напруги «Voltage (Pk)» – 500 mV; та частоту F 20 Hz (Герц).
- 2.23. Закрити вікно налаштування джерела вхідного сигналу.
- 2.24. Відкрити вікна обох осцилографів подвійним клацанням лівої кнопки миші та встановити їх в зручних місцях поля програми.
- 2.25. Натиснути кнопку «Пуск» . Почалося моделювання роботи схеми. На осцилографах мають відтворюватися вхідний та вихідний сигнали.

2.26. Через декілька секунд натиснути кнопку «Стоп» поряд з кнопкою «Пуск».

2.27. На екранах осцилографів знайти ділянки з записаними сигналами.

2.28. Встановити на екранах осцилографів зручні для роботи масштаби часу та рівня сигналу.

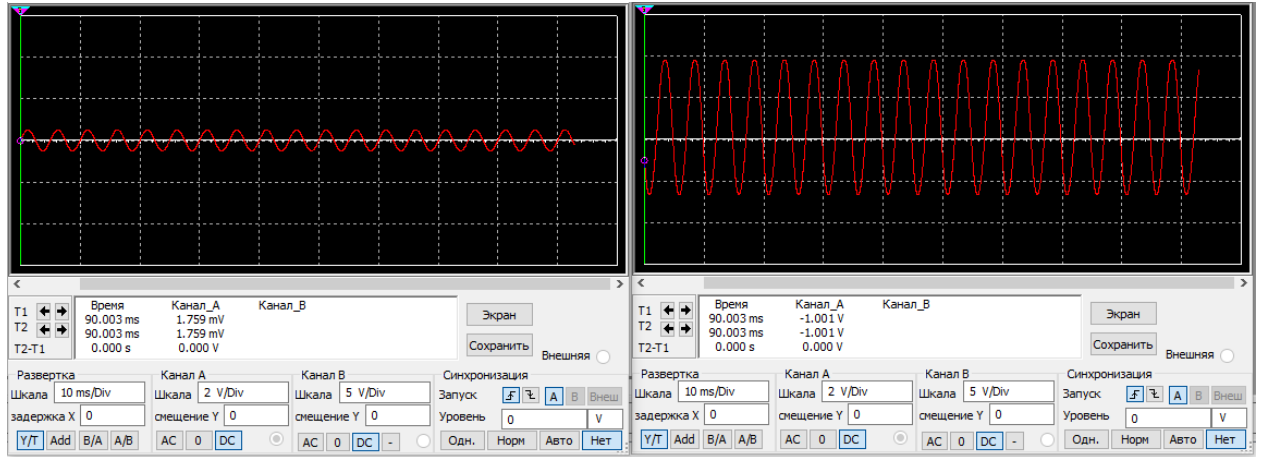


Рис. 7.16. Приклад зареєстрованих осцилографами вхідного та вихідного сигналів

2.29. За графіком вихідного сигналу на осцилографі XSC1 визначити його амплітуду $U_{вих}$ та записати до таблиці результатів. Амплітуда вхідного сигналу $U_{вх}$ дорівнює 500 mV.

2.30. Відкрити вікно налаштування джерела вхідного сигналу AC_Voltage та встановити частоту 100 Hz. Амплітудне значення напруги вхідного сигналу залишити незмінним.

2.31. Повторити попередні вимірювання для нового значення частоти вхідного сигналу. Результати вимірювань занести до таблиці результатів.

2.32. Повторити попередні кроки для частот вхідного сигналу 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 12000, 15000, 18000 та 20000 Hz. Результати вимірювань заносити до таблиці.

3. Аналіз даних

3.1. За формулою (7.1) розрахувати коефіцієнт підсилення змодельованого підсилювача для кожної з частот, на якій проводилися вимірювання. Результати розрахунків занести до таблиці.

3.2. За допомогою Excel побудувати амплітудно-частотну характеристику підсилювача.

3.3. За амплітудно-частотною характеристикою визначити найбільше значення коефіцієнту підсилення та частоту, яка йому відповідає.

3.4. За амплітудно-частотною характеристикою визначити діапазон частот, у якому коефіцієнт підсилення зменшується не більше ніж на 30 % порівняно з максимальним.

4. Зробити висновки за результатами лабораторної роботи.

ПРАКТИЧНА РОБОТА

МОДЕЛЮВАННЯ ПІДСИЛЮВАЧА

Мета: Виготовити і випробувати прототип підсилювача.

Матеріали та обладнання: макетна плата; біполярний рпн-транзистор 2N2222; резистори опором 1 кОм, 200 Ом, 20 Ом та 2 Ом, 0,25...1 Вт; електролітичні конденсатори 22 мкФ та 2200 мкФ; з'єднувальні провідники; елемент живлення «Крона», 9 В; тримач елементу живлення типу «Крона» (контактна площадка зі з'єднувальними проводами); динамік 8 Ом; штекер jack 3,5 з проводами; ПК.

В даній практичній роботі пропонується виготовити й випробувати прототип резистивного підсилювача, схема якого була змодельована та досліджена на попередній лабораторній роботі.

ХІД РОБОТИ

1. Накреслити схему електричну принципову підсилювача (рис. 7.17).

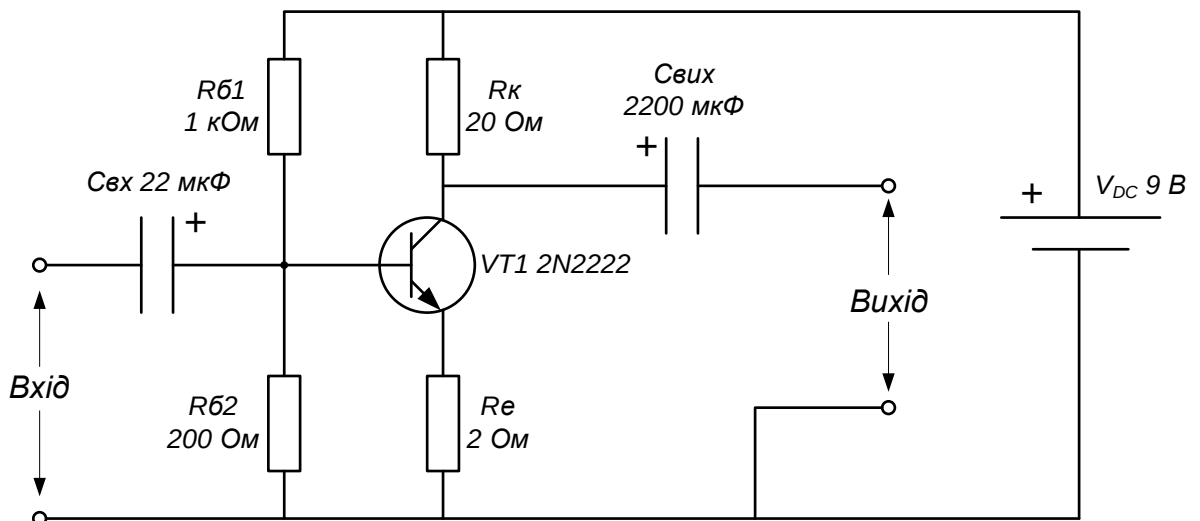


Рис. 7.17. Принципова схема підсилювача

2. Скласти на макетній платі прототип підсилювача у відповідності до схеми на рисунку 7.17 з урахуванням розміщення виводів транзистора 2N2222 (рис. 7.18). Приклад зібраного підсилювача без підключення живлення та динаміку представлено на рисунку 7.19.

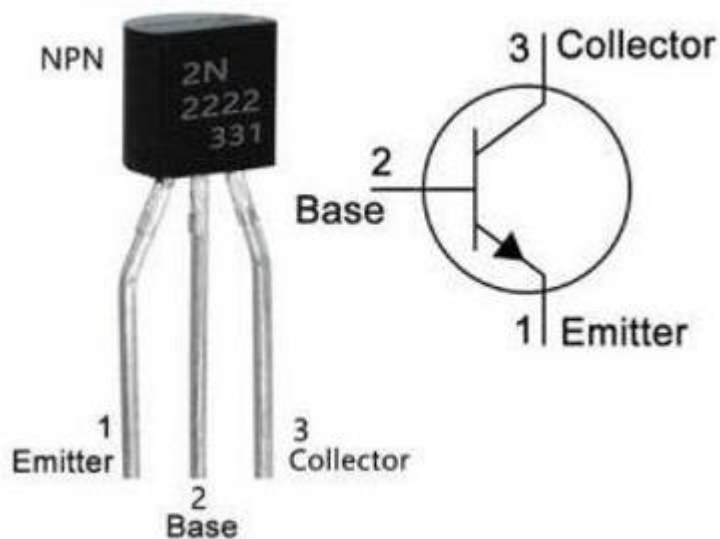


Рис. 7.18. Розміщення виводів транзисторів 2N2222

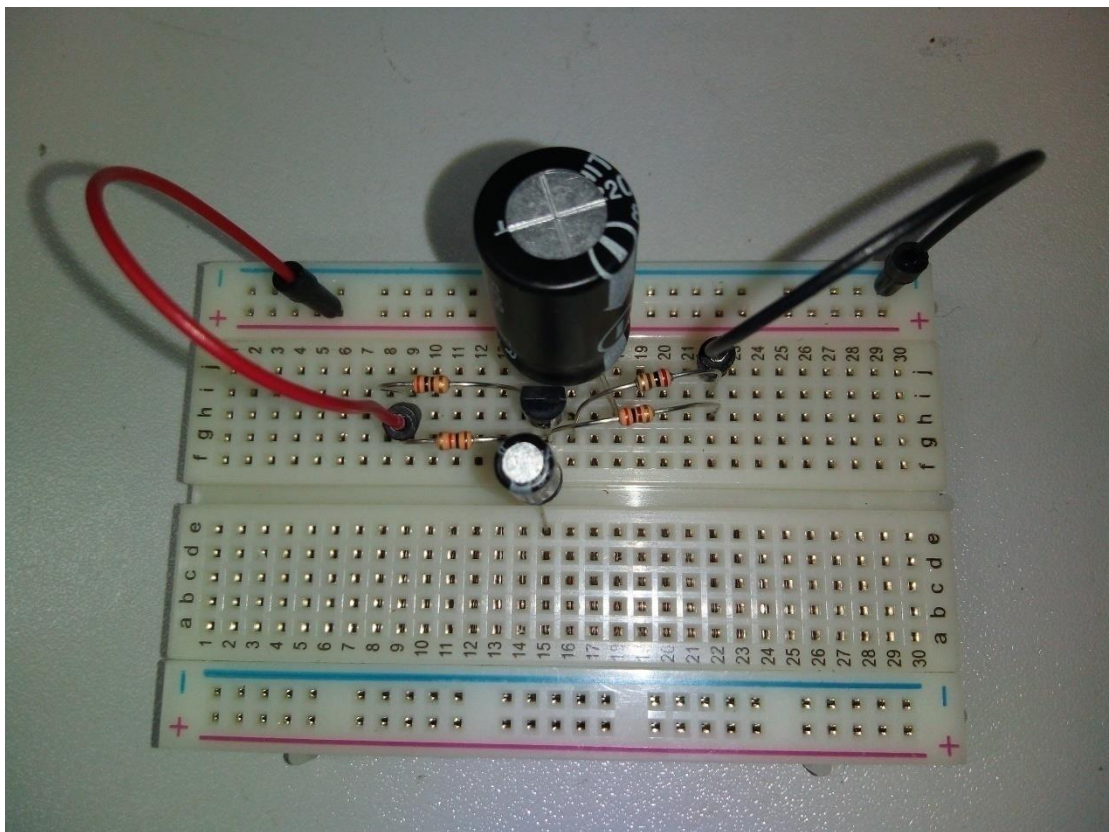


Рис. 7.19. Приклад зібраної схеми підсилювача

2. На вільному місці макетної плати з'єднати динамік напряму з проводами штекера.
3. Підключити штекер до аудіовиходу ПК.
4. Включити на ПК будь яку музичну композицію і встановити рівень гучності так, щоб її було ледь чути у динаміку. Рівень гучності при цьому має бути не більше 50 %.
5. Виключити музику та від'єднати штекер від ПК.

6. Підключити динамік до виходу схеми підсилювача (рис. 7.20).
7. Підключити проводи штекеру до входу схеми підсилювача (рис. 7.21).
8. Підключити штекер до ПК (рис. 7.20).
9. Підключити до схеми підсилювача живлення (рис. 7.20).

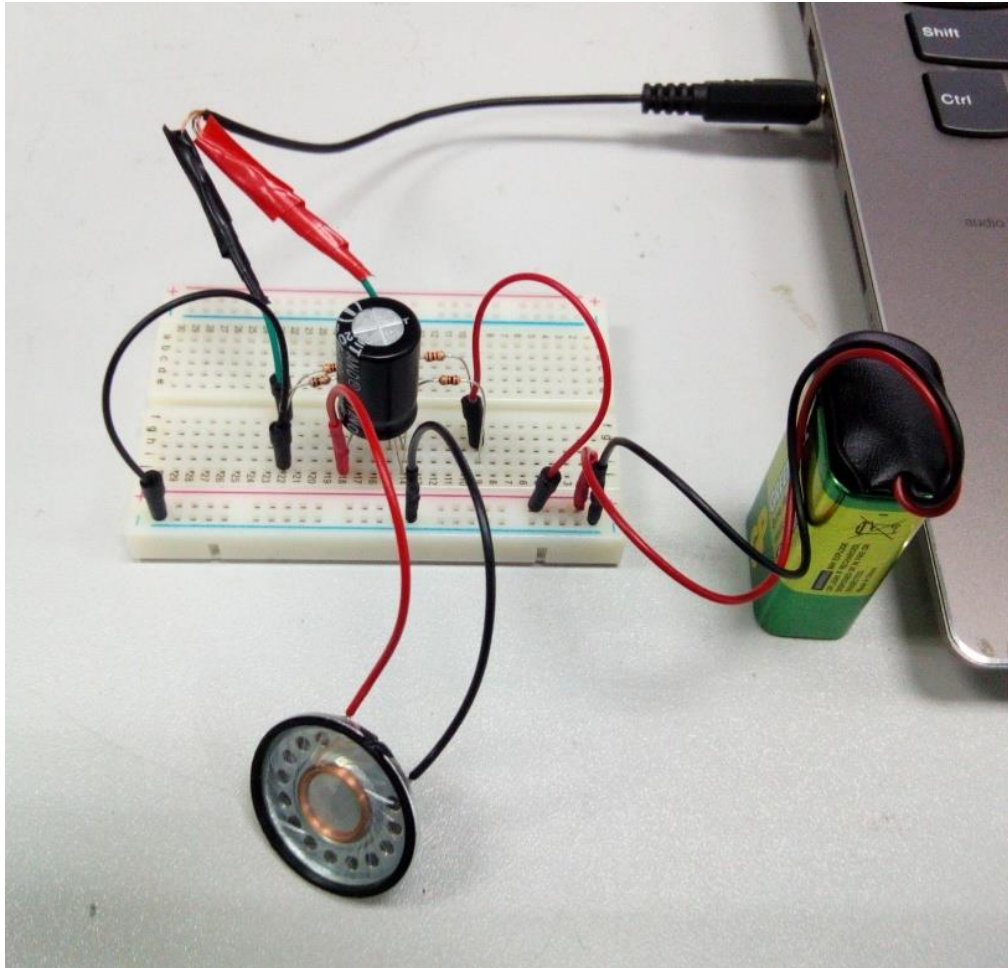


Рис. 7.20. Прототип підсилювача з підключеним динаміком та живленням

10. Включити на ПК ту саму музичну композицію, не змінюючи налаштувань гучності. Гучність програвання композиції у динаміку має зрости.
11. За бажанням, встановити на смартфон застосунок для вимірювання гучності звуку (шумомір), наприклад, SoundMeter.
12. Виміряти рівень гучності звучання динаміку без підсилювача, та з підсилювачем. При таких вимірюваннях рівень сторонніх шумів має бути якомога меншим.
13. Зробити висновки за результатами роботи.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

1. В якому класі працює підсилювальний каскад, змодельований вами під час виконання лабораторної роботи? Як треба змінити його схему, щоб він став працювати в класі С? Здійсніть моделювання підсилювача класу С у середовищі Multisim 11.0.

2. Проаналізуйте схему, зображену на рис. 7.21. Розрахуйте опір резистора R_2 , за якого вихідна напруга буде дорівнювати 6 В при незмінних вхідній напрузі та опорі резистора R_1 . Перевірте правильність розрахунків шляхом комп'ютерного моделювання схеми у середовищі Multisim 11.0.

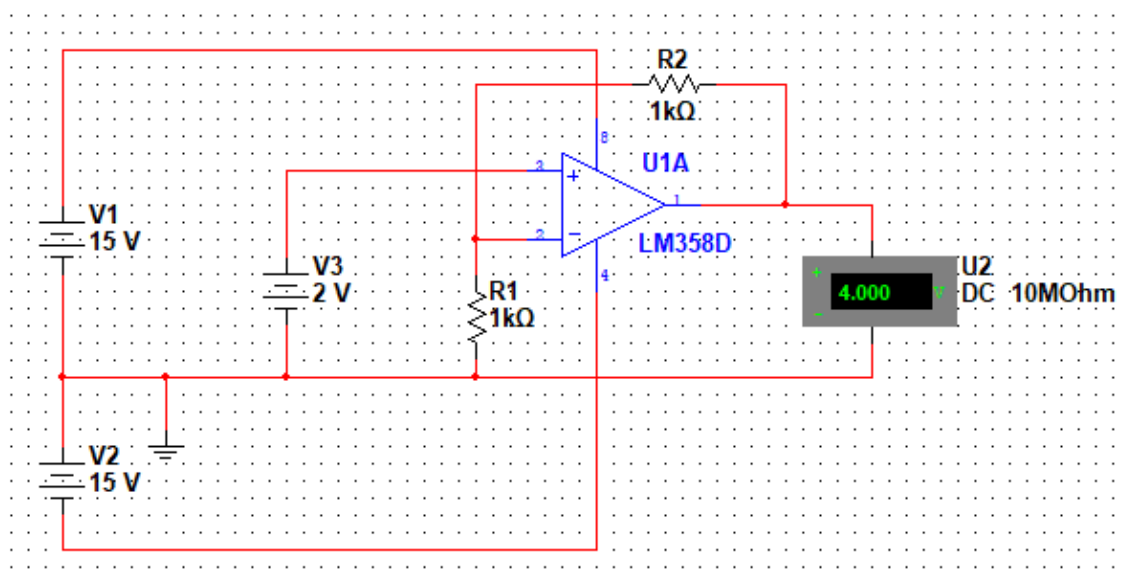


Рис. 7.21. Схема з операційним підсилювачем

* Операційні підсилювачі у моделювальному комп'ютерному середовищі Multisim 11.0 знаходяться у розділі «Analog», сімействі «OPAMP».

3. У інвертуючого операційного підсилювача (рис 7.7) резистор R_1 має опір 1 кОм, а резистор $R_{зз}$ – 3 кОм. Якою буде вихідна напруга підсилювача при вхідній напрузі 1 В?

4. Проаналізуйте схему, зображену на рис. 7.22. Розрахуйте вихідну напругу. Перевірте правильність розрахунків шляхом комп'ютерного моделювання схеми у середовищі Multisim 11.0.

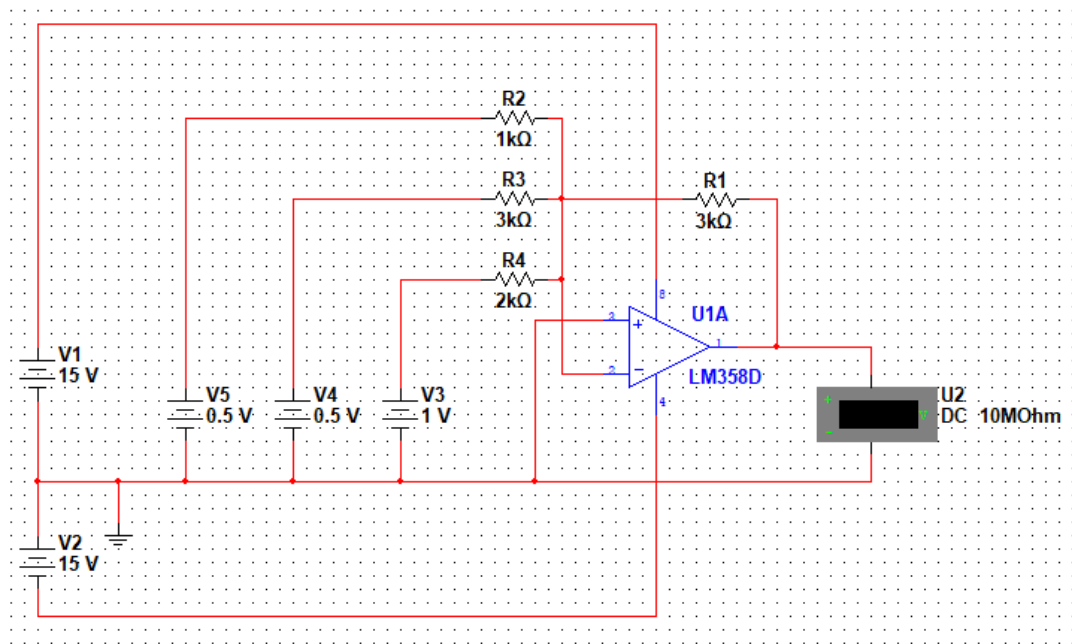


Рис. 7.22. Схема з операційним підсилювачем

5. У моделювальному комп'ютерному середовищі Multisim 11.0. змодельуйте схему резонансного підсилювача, зображену на рис. 7.23.

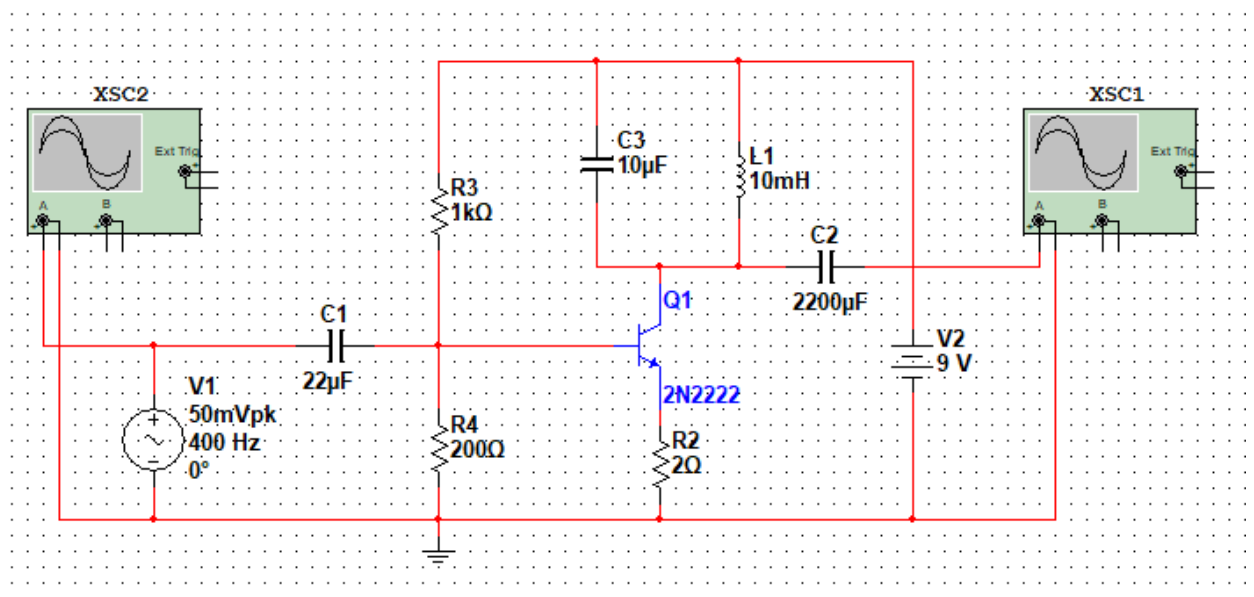


Рис. 7.23. Резонансний підсилювач

Зніміть АЧХ цього підсилювача та порівняйте з АЧХ підсилювача, змодельованого під час виконання лабораторної роботи. Чим відрізняються схеми та АЧХ обох підсилювачів.

РОЗДІЛ 8

ГЕНЕРАТОРИ. ЗВОРОТНИЙ ЗВ'ЯЗОК.

8.1. Автоколивальні системи. Перш ніж розглядати генератори електричних коливань розглянемо механічні автоколивальні системи.

Механічними коливаннями називають рухи тіл, що повторюються через однакові проміжки часу. Пристрої, які можуть здійснювати коливання, називаються коливальними системами. Однією з найпростіших коливальних систем є, наприклад маятник у вигляді твердого тіла, підвішеного на нитці.

Якщо тіло відхилити від положення рівноваги і відпустити, то маятник почне здійснювати коливання. Відомо, що коливання реального маятника є згасаючими, тому амплітуда коливань маятника буде поступово зменшуватися, і вони зрештою припиняться. Згасання коливань реального маятника зумовлене витратами механічної енергії на тертя у нитці, опір повітря, тощо. Для того щоб коливання маятника не припинялися, його треба періодично підштовхувати, тим самим передаючи йому механічну енергію для компенсації її витрат на тертя і опір середовища.

Вимушеними коливаннями називаються коливання, що відбуваються під дією зовнішньої періодичної сили. Вимушені коливання є незгасаючими.

Існують коливальні системи, у яких незгасаючі коливання виникають не за рахунок періодичного зовнішнього впливу, а в результаті того, що такі системи мають здатність самостійно регулювати надходження енергії від її постійного джерела. Такі системи називаються автоколивальними, а процес незгасаючих коливань в них – автоколиваннями.

В автоколивальній системі можна виділити три характерних елемента (рис. 8.1): коливальна система, джерело енергії і пристрій зворотного зв'язку між коливальною системою і джерелом енергії.

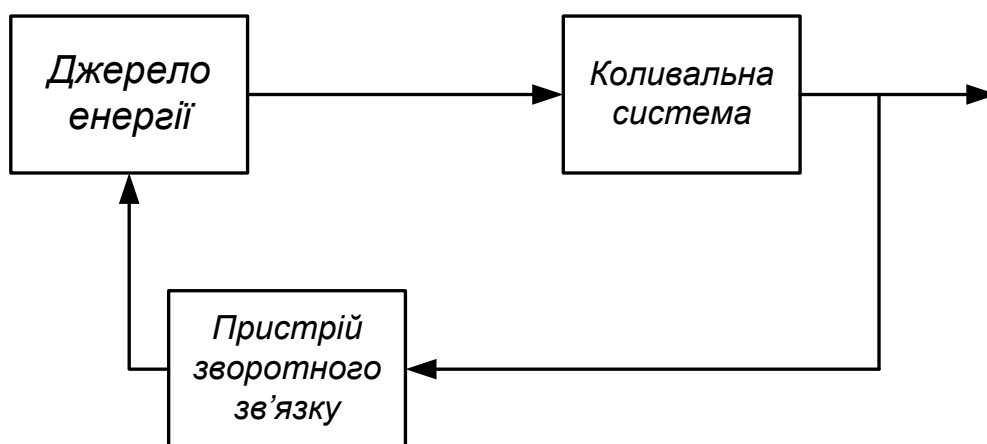


Рис. 8.1. Функціональна схема автоколивальної системи

В якості коливальної системи може виступати будь яка механічна система, здатна здійснювати власні згасаючі механічні коливання, наприклад маятник настінного годинника. Джерелом енергії може слугувати

потенціальна енергія вантажу в полі сили тяжіння, або енергія деформованої пружини. Пристрій зворотного зв'язку являє собою деякий механізм, за допомогою якого автоколивальна система регулює надходження енергії від джерела.

В більш широкому розумінні, зворотним зв'язком називається процес, який призводить до того, що результат функціонування будь якої системи впливає на параметри, від яких залежить функціонування системи. На вхід системи подається сигнал, який є функцією вихідного сигналу.

Прикладом механічної автоколивальної системи може слугувати годинниковий механізм з анкерним ходом (рис. 8.2).

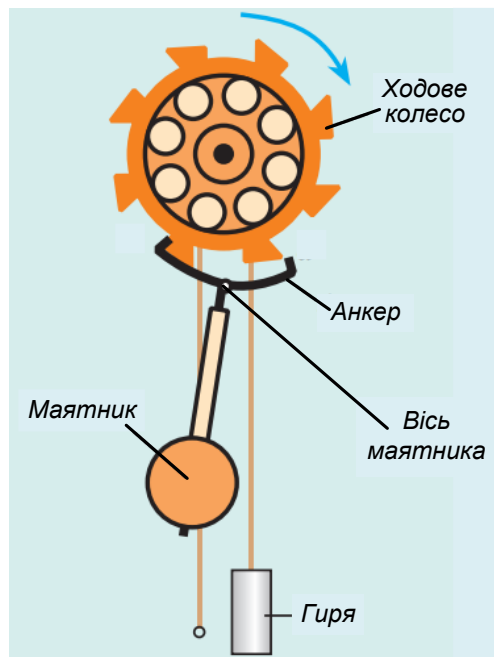


Рис. 8.2. Годинниковий механізм з анкерним ходом

Ходове колесо з косими зубцями жорстко зв'язане з зубчастим барабаном, через який перекинутий ланцюжок з гирею. На верхньому кінці маятника закріплений анкер з двома пластинами з твердого матеріалу, зігнутими по колу з центром на осі маятника.

Коливною системою в даному годинниковому механізмі є маятник, джерелом енергії – підвішена у полі сили тяжіння гиря, а пристроєм зворотного зв'язку – анкер, що дозволяє ходовому колесу повернутися на один зубець за один півперіод.

Зворотний зв'язок здійснюється взаємодією анкера з ходовим колесом. При кожному коливанні маятника зубець ходового колеса штовхає анкер у напрямі руху маятника, передаючи йому деяку порцію енергії, яка компенсує витрати енергії на тертя. Таким чином потенціальна енергія гирі поступово, окремими порціями передається маятнику синхронно з його рухом.

Автоколивальні системи бувають не лише механічними. Вони можуть бути, наприклад електромагнітними, електричними, або комбінованими.

Розглянемо електромагнітну автоколивальну систему на прикладі найпростішого генератору синусоїдального сигналу, коливальною системою в якому є коливний контур.

8.2. Найпростіший генератор синусоїдального сигналу. Відомо, що після однократної зарядки конденсатора у коливному контурі виникають гармонічні електромагнітні коливання, частота яких залежить від параметрів контуру. Електромагнітні коливання у будь якому реальному контурі швидко затухають через втрати енергії на нагрівання проводів та випромінювання електромагнітних хвиль.

Для підтримання незгасаючих електромагнітних коливань в контурі необхідно поповнювати запас енергії в ньому. Це можливо зробити періодично підключаючи його до джерела постійного струму з частотою, що відповідає його резонансній частоті. При цьому необхідно узгоджувати моменти підключень обкладинок конденсатора з моментами набуття ними заряду, що співпадають за знаком зі знаками полюсів підключеного джерела живлення.

В якості швидкодіючого ключа для отримання незгасаючих коливань може використовуватися напівпровідниковий транзистор. Для узгодження моментів підключення коливного контуру до джерела живлення також використовується принцип зворотного зв'язку.

Схема одного з найпростіших генераторів синусоїдальних електромагнітних коливань представлена на рис. 8.3.

Коливний контур генератора складається з конденсатору $C1$ та котушки $L1$ трансформатору $T1$.

Під час зарядки та розрядки конденсатора $C1$ коливного контуру, зміни струму у котушці $L1$ викликають зміни магнітного поля навколо неї. При цьому відбуваються зміни магнітного потоку та ЕРС індукції у котушці $L2$, що називається котушкою зворотного зв'язку. Один кінець котушки $L2$ з'єднаний з емітером транзистора $VT1$, а інший через конденсатор $C2$ – з його базою. Котушка зворотного зв'язку підключається таким чином, що під час зростання сили струму у ланцюгу колектора на базу подається сигнал, що відкриває транзистор, а під час зменшення струму – сигнал, що його закриває. Такий тип зворотного зв'язку називається додатним зворотним зв'язком (ДЗЗ).

Резистор $R1$ призначений для завдання початкового струму через базу та колектор за відсутності змінної напруги на кінцях котушки зв'язку.

При підключенні генератора до джерела постійного струму через резистор $R1$ та базу транзистора починає текти початковий струм та транзистор частково відкривається. При цьому заряджається конденсатор $C1$, а через котушку $L1$ починає протікати та зростати струм. У котушці $L2$ при цьому виникає ЕРС, яка збільшує струм через базу транзистора, що приводить до поступового відкривання транзистора та зростання струму через котушку $L1$. Коли транзистор переходить у повністю відкритий стан, нарощування струму припиняється, ЕРС індукції у котушці $L2$ зникає та транзистор починає переходити у закритий стан. Конденсатор $C1$ при цьому

перезаряджається через котушку $L1$. Коли конденсатор починає перезаряджатися у зворотному напрямку, струм у котушці $L1$ тече у протилежному напрямі, а у котушці $L2$ виникає ЕРС індукції, напрям якої відповідає подальшому закриванню транзистора.

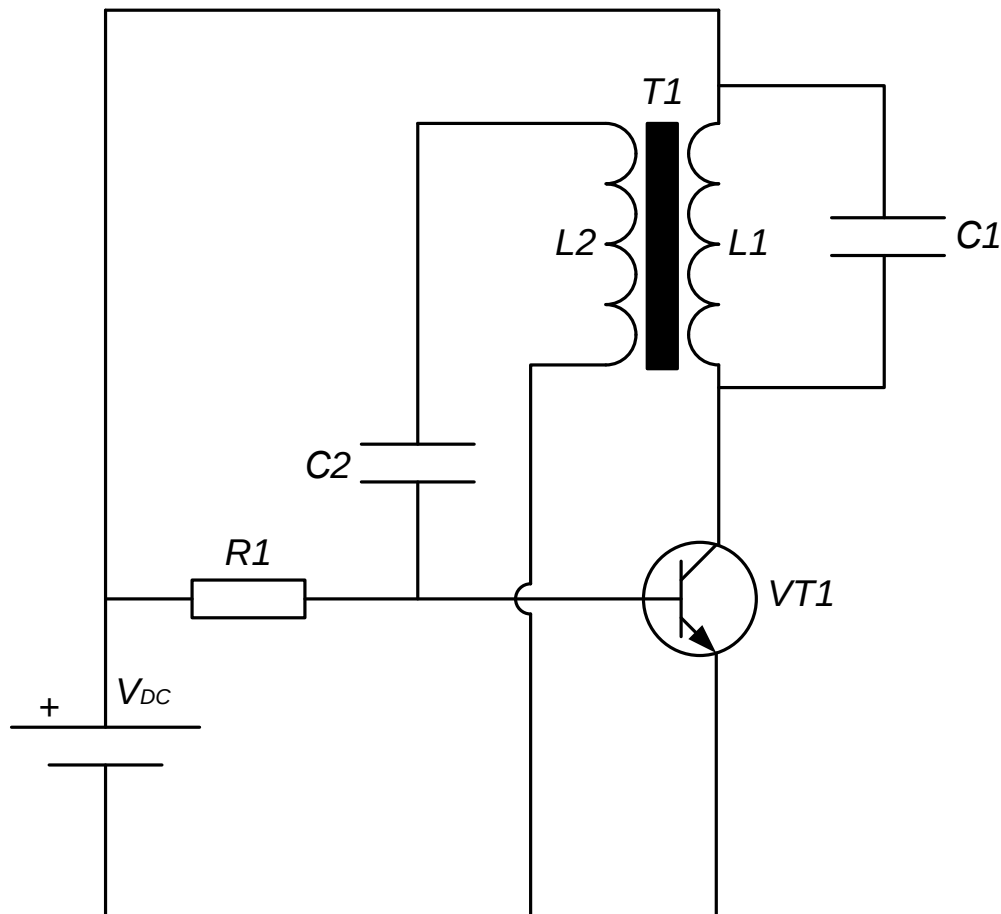


Рис. 8.3. Схема генератору синусоїдального сигналу

Коли струм через котушку $L2$ припиняється, транзистор знову переходить у частково відкритий стан за рахунок початкового струму через базу та цикл повторюється знову. При цьому у коливному контурі коливання вже збуджені та генератор починає працювати в стаціонарному режимі.

Теоретичне значення частоти коливань генератора дорівнює резонансній частоті коливного контуру і визначається за формулою, Гц:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L1 \cdot C1}}. \quad (8.1)$$

Тип зворотного зв'язку, що застосовується в даному генераторі називається трансформаторним.

Іншим різновидом генератору електромагнітних коливань з трансформаторним зворотним зв'язком є блокінг-генератор.

8.3. Блокінг-генератор. Схема найпростішого блокінг-генератору представлена на рисунку 8.4.

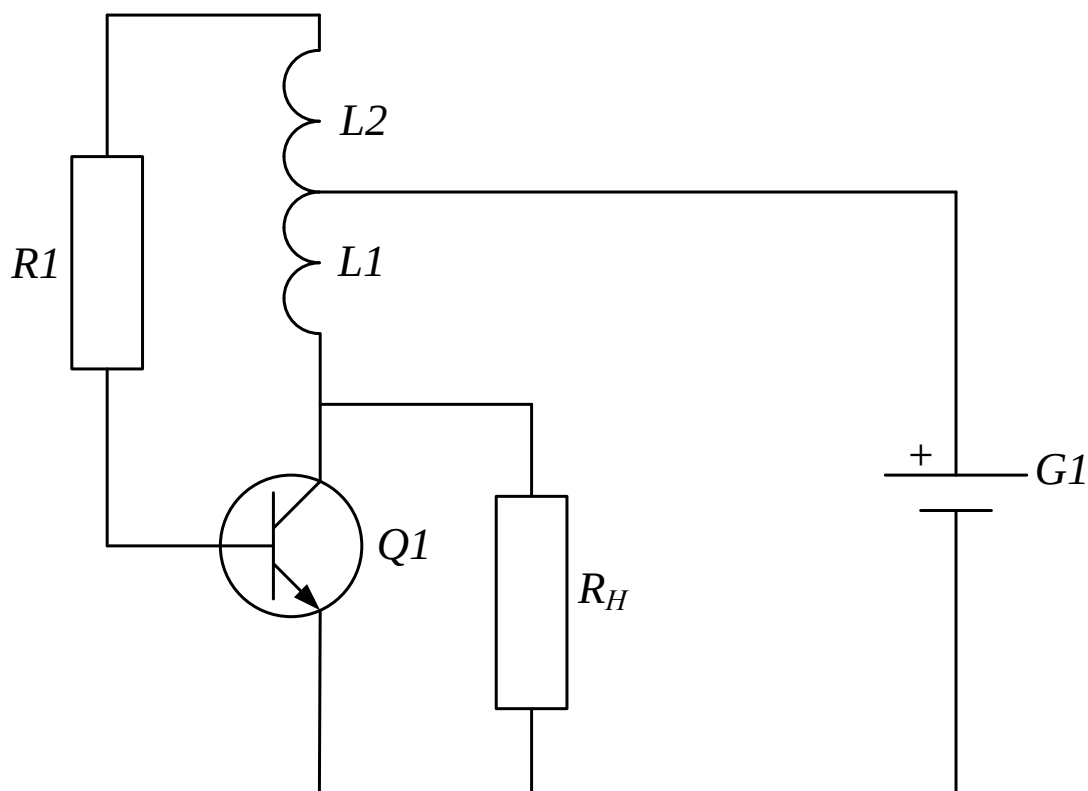


Рис. 8.4. Блокінг-генератор

Котушки $L1$ та $L2$ являють собою одну котушку з відводом від середини. Коли до схеми підключається джерело живлення, струм починає текти через котушку $L2$, резистор $R1$ і перехід база-емітер (Б-Е) транзистора $Q1$. Транзистор при цьому починає відкриватися. Через котушку $L1$ та колектор (К) транзистора також починає протікати і наростати струм, сила якого значно більша, за силу струму бази. При цьому за рахунок взаємоіндукції у котушці $L2$ наводиться ЕРС, під дією якої через неї починає протікати додатковий струм у тому ж напрямі, що й початковий струм, який призводить до ще більшого відкривання транзистора. Коли струм котушки $L1$ через колектор транзистора стабілізується після наростання, взаємоіндукція котушок припиняється і транзистор закривається. У котушках при цьому виникає ЕРС самоіндукції зворотного знаку, яка значним чином прискорює запирання транзистора. Між колектором і емітером транзистора виникають імпульси підвищеної напруги. Далі такі цикли повторюються доти, доки підключене джерело живлення. Такий процес генерації імпульсів називається *блокінг-процесом*, а генератори, які працюють за таким робочим процесом, відповідно *блокінг-генераторами*.

На рисунку 8.5 представлена діаграма вихідного сигналу (червона лінія) у порівнянні з рівнем напруги живлення (жовта лінія) блокінг-генератору. З рисунку 8.5 видно, що амплітуда імпульсів на опорі

навантаження є у декілька разів вищою за напругу живлення. Ця обставина дозволяє використовувати блокінг-генератори в якості підвищуючих перетворювачів напруги.

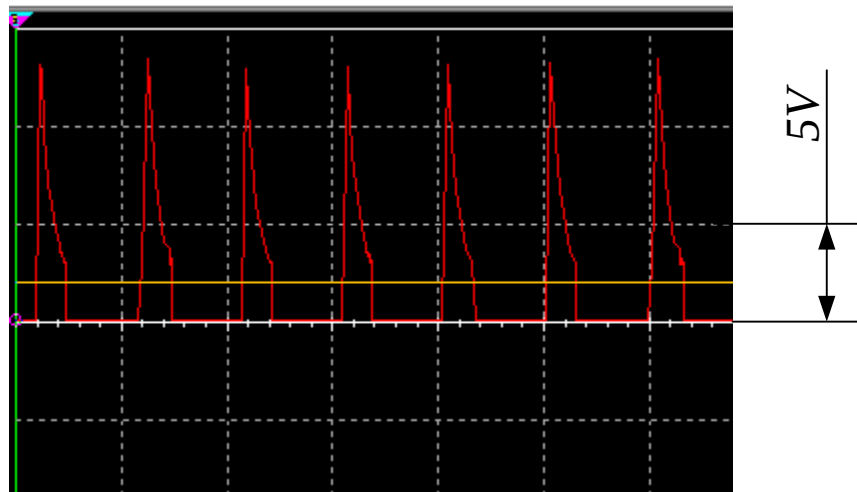


Рис. 8.5. Діаграма вихідного сигналу блокінг-генератора

Частота імпульсів блокінг-генератору визначається індуктивностями котушок, напругою та внутрішнім опором джерела живлення, а також опором резистору бази $R1$.

8.4. Структурна схема генераторів електричних коливань. Генератори на ОП. Таким чином генератори, залежно від форми вихідних коливань можуть бути розділені на дві основні групи: генератори гармонійних коливань і генератори імпульсів. Генератори імпульсів можуть генерувати як однополярні, так і різнополярні імпульси різних форм.

Основою будь-якого автогенератора електричних або електромагнітних коливань є підсилювач, охоплений колом ДЗЗ (рис. 8.6). При цьому частина вихідної напруги через ланцюг ДЗЗ надходить на вхід підсилювача у фазі з вхідною напругою.

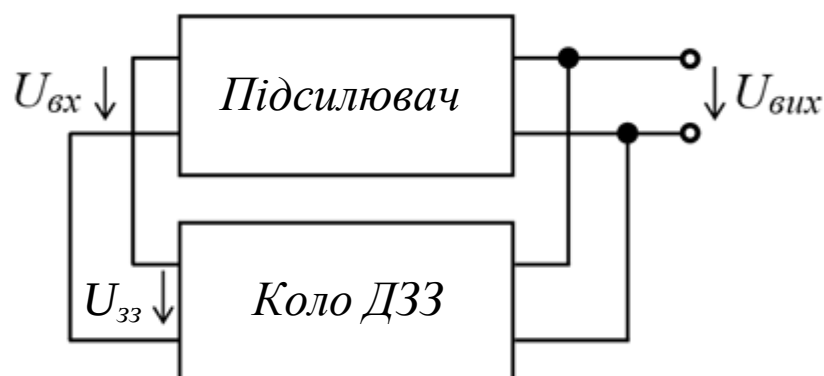


Рис. 8.6. Структурна схема автогенератора електричних коливань

Так, генератор синусоїдального сигналу можна розглядати, як резонансний підсилювач, що працює в класі А з трансформаторним зворотним зв'язком. У блокінг-генератора зворотний зв'язок також

трансформаторний а підсилювачем виступає транзистор, який працює в класі С.

На основі структурної схеми, представленою на рисунку 8.6 можна побудувати безліч варіантів різноманітних генераторів з різноманітними за формою вихідними сигналами. В якості підсилювачів у генераторах електричних коливань можуть бути застосовані не лише транзисторні підсилювальні каскади, а й операційні підсилювачі. Форма вихідного сигналу генераторів визначається схемою та параметрами кіл зворотних зв'язків.

Так, наприклад, якщо за основу взяти диференціатор на ОП, що містить ВЗЗ у вигляді конденсатора та резистора, та додати до нього ДЗЗ, з'єднавши вихід ОП з його неінвертуючим входом, то отримаємо генератор прямокутних двополярних імпульсів (рис. 8.7).

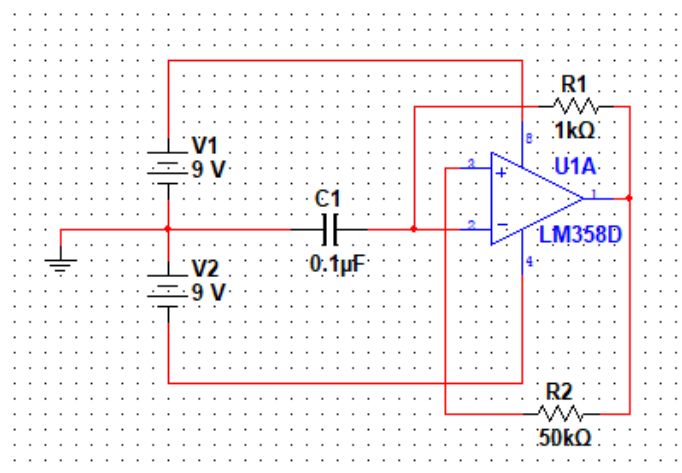


Рис. 8.7. Генератор прямокутних імпульсів на ОП

На рисунку 8.8 представлена осцилограма коливань на виході даного генератора.

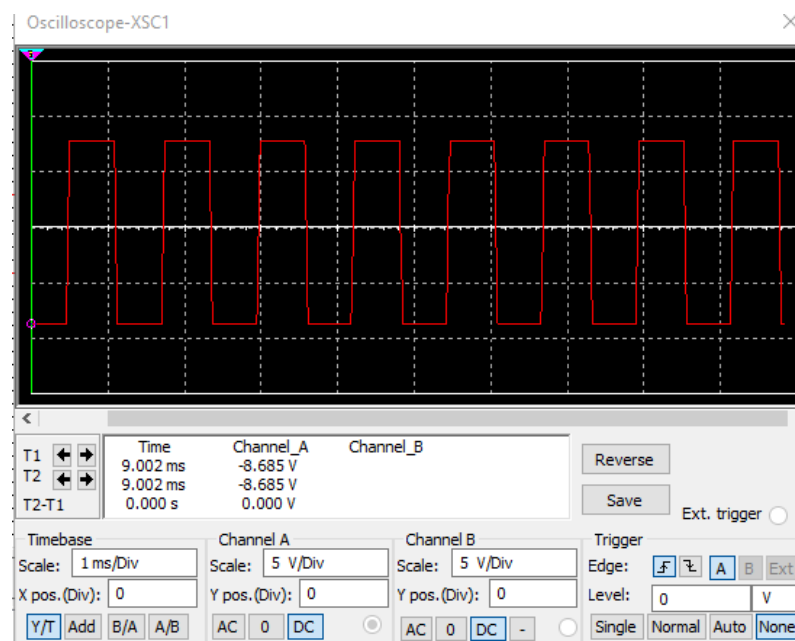


Рис. 8.8. Осцилограма коливань генератора прямокутних імпульсів

Якщо за основу взяти інвертуючий підсилювач на ОП, а якості кола ДЗЗ застосувати частото-залежне RC-коло, наприклад міст Віна, то отримаємо генератор гармонійних коливань (рис. 8.9).

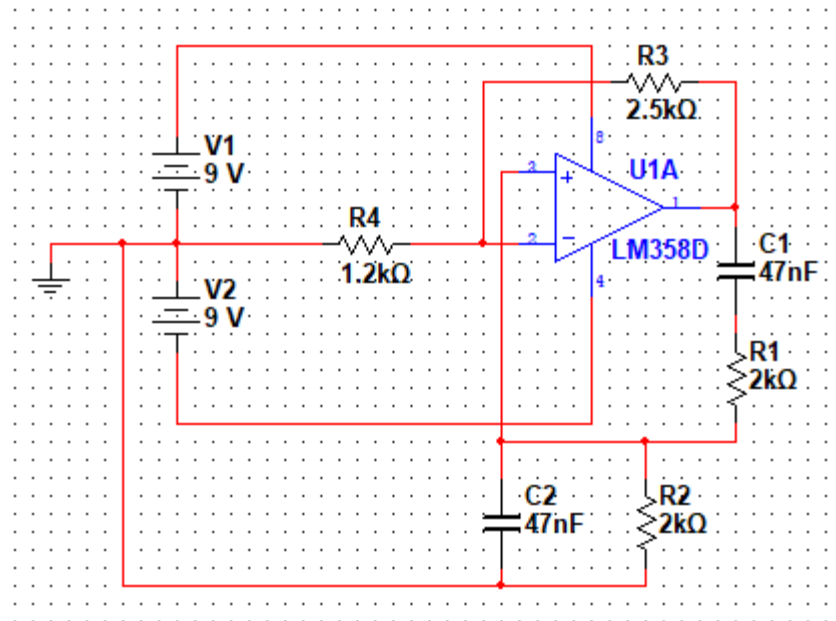


Рис. 8.9. RC-генератор на ОП з мостом Віна

На рисунку 8.10 представлена осцилограма вихідних коливань RC-генератору.

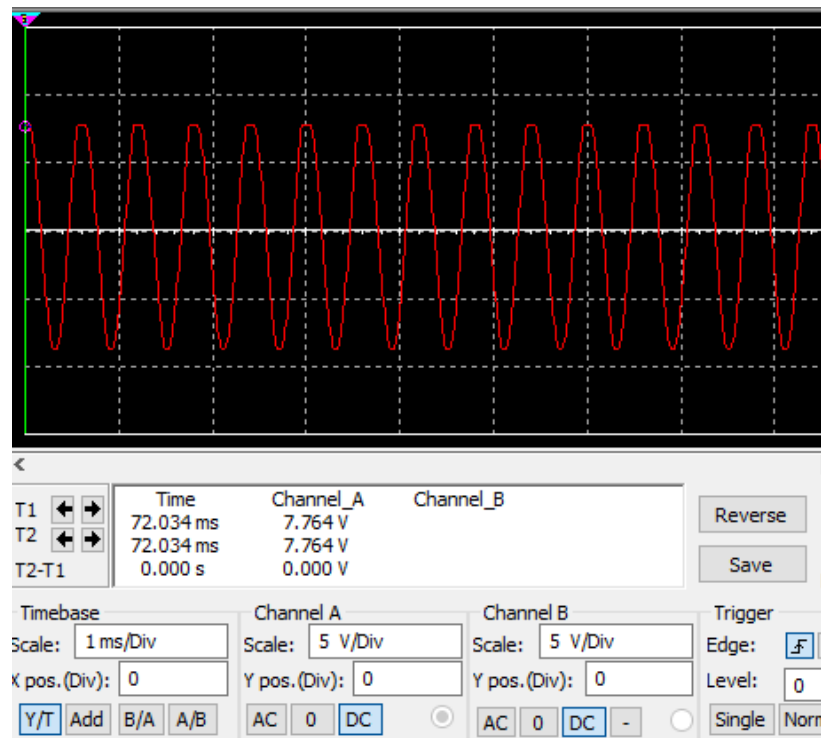


Рис. 8.10. Осцилограма вихідних коливань RC-генератору з мостом Віна.

Міст Віна у схемі на рисунку 8.9 складається з резисторів $R1$, $R2$ та конденсаторів $C1$, $C2$.

Частота генерації генератора з мостом Віна визначається за формулою:

$$f_0 = 1/(2\pi \cdot R \cdot C), \quad (8.2)$$

де $R = R1 = R2$; $C = C1 = C2$.

На частоті f_0 коефіцієнт передачі кола зворотного зв'язку β має максимальне значення, а зсув фаз φ між вхідною й вихідною напругою дорівнює нулю. Явище, що полягає в основі частотної вибіркової мосту Віна має назву квазірезонансу, а частота f_0 – відповідно – квазірезонансної частоти.

Таким чином, враховуючи різноманіття схемних рішень підсилювачів та одиничних підсилювальних каскадів з одного боку, та різноманіття схем частото-залежних кіл з іншого боку, можливе створення досить великої кількості варіантів генераторів з різними характеристиками. Залежно від конкретних задач інженери під час проектування електронних пристроїв можуть підібрати оптимальний варіант генератору для вирішення конкретних задач.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРУ СИНУСОЇДАЛЬНОГО СИГНАЛУ

Мета роботи: Змоделювати генератор синусоїдального сигналу та визначити його частоту.

Матеріали та обладнання: ПК з програмою Multisim 11.0.

В даній лабораторній роботі пропонується змоделювати генератор за схемою, представленою на рис. 8.3, визначити його частоту та порівняти з розрахунковою.

Параметри компонентів для моделювання схеми зведені до таблиці 8.1.

Таблиця 1

V_{DC} , В	$C1$, μF	$C2$, нF	$R1$, $\text{k}\Omega$	$L1$, мH	$L2$, мH	VT1
12	2	20	30	10	10	2N3904

ХІД РОБОТИ

1. Моделювання генератору.
 - 1.1. Запустити програму Multisim 11.0.
 - 1.2. Зайти в меню «Place» – «Component».
 - 1.3. У вікні, що з'явилося обрати розділ «Transistors» та сімейство «BJT_NPN».
 - 1.4. Обрати транзистор 2N3904. Натиснути ОК та поставити його у довільне місце робочого поля програми.
 - 1.5. Обрати розділ «Basic» та сімейство «Capacitor» (конденсатор).
 - 1.6. Обрати конденсатори ємністю 2μ ($2\text{ мкФ} = 2 \cdot 10^{-6}\text{ Ф}$) та 20п ($20\text{ нФ} = 20 \cdot 10^{-9}\text{ Ф}$) та поставити їх поряд з транзистором.
 - 1.7. Обрати сімейство «Resistor» (резистор, активний опір).
 - 1.8. Обрати резистор опором $30\text{ k}\Omega$ (кОм), та поставити його поряд з іншими компонентами.
 - 1.9. Обрати сімейство «Transformer» (трансформатор).
 - 1.10. Обрати компонент «TS_Ideal» та поставити його поряд з іншими компонентами.
 - 1.11. Обрати розділ «Sources» (джерела).
 - 1.12. Обрати сімейство «Power sources» (джерела живлення).
 - 1.13. Обрати джерело живлення постійного струму «DC_Power», натиснути ОК та встановити його поряд з іншими компонентами.
 - 1.14. Обрати «Ground» (заземлення), натиснути ОК та встановити його поряд з іншими компонентами.
 - 1.15. Закрити вікно добору компонентів.

1.16. За допомогою інструментів програми з'єднати усі компоненти у відповідності до схеми на рис. 8.3. Заземлення має бути з'єднаним з загальним (від'ємним) провідником схеми.

1.17. Обрати у правому вертикальному меню осцилограф та встановити його з правого боку від схеми (XSC1).

1.18. З'єднати канал «А» осцилографа XSC1 з коливним контуром генератора.

1.19. Обрати у правому вертикальному меню частотомір та встановити його з правого боку від схеми (XFC1).

1.20. З'єднати частотомір з коливним контуром генератора.

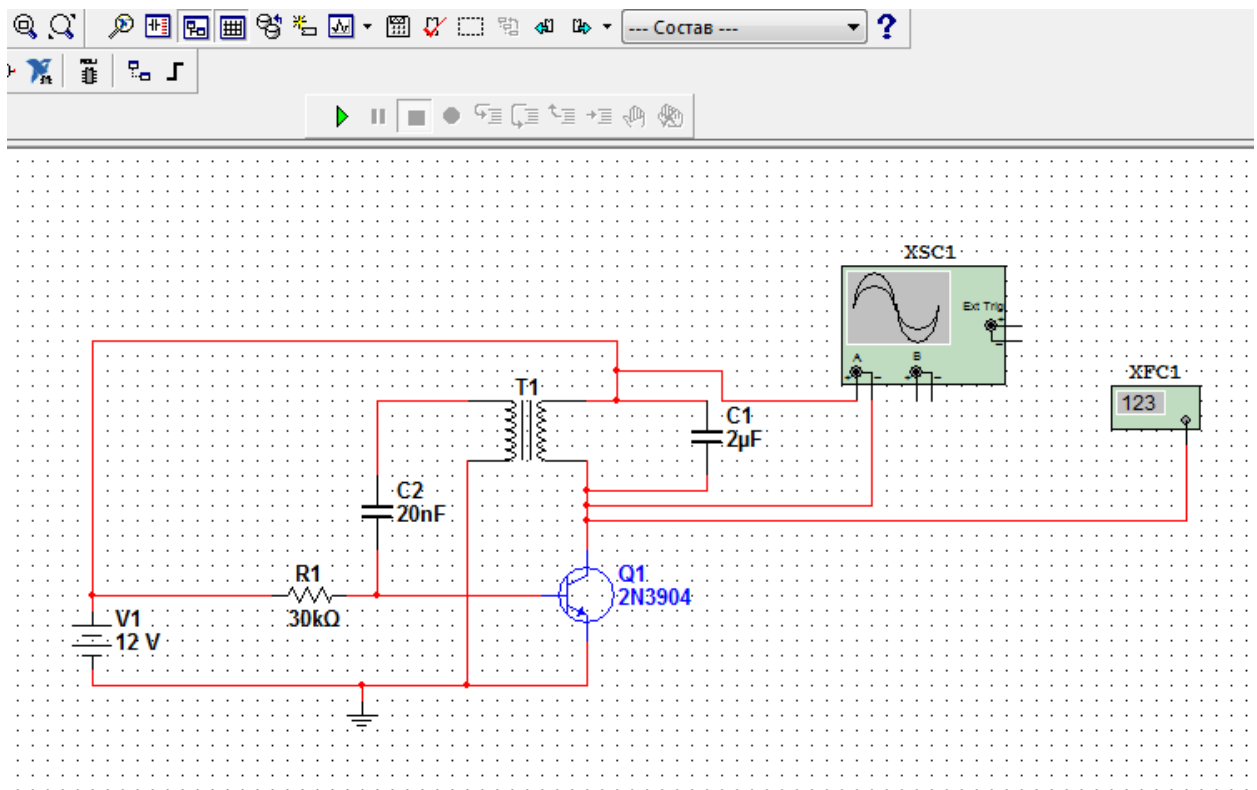


Рис. 8.11. Приклад побудованої схеми

1.21. Подвійним клацанням лівою кнопкою миші на трансформаторі T1 відкрити вікно його налаштувань.

1.22. У вікні що з'явилося задати параметри: індуктивність первинної обмотки – 10 mH; індуктивність вторинної обмотки – 10 mH ($10 \text{ mH} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$); коефіцієнт зв'язку – 1.

1.23. Закрити вікно налаштування трансформатора.

1.24. Відкрити вікна осцилографу та частотоміру подвійним клацанням лівої кнопки миші та встановити їх в зручних місцях поля програми.

1.25. Натиснути кнопку «Пуск» . Почалося моделювання роботи схеми. На осцилографі має відтворюватися сигнал генератора, а на частотомірі – значення частоти сигналу.

1.26. Встановити на екрані осцилографа зручні для роботи масштаби часу та рівня сигналу.

1.27. Через декілька секунд натиснути кнопку «Стоп» поряд з кнопкою «Пуск».

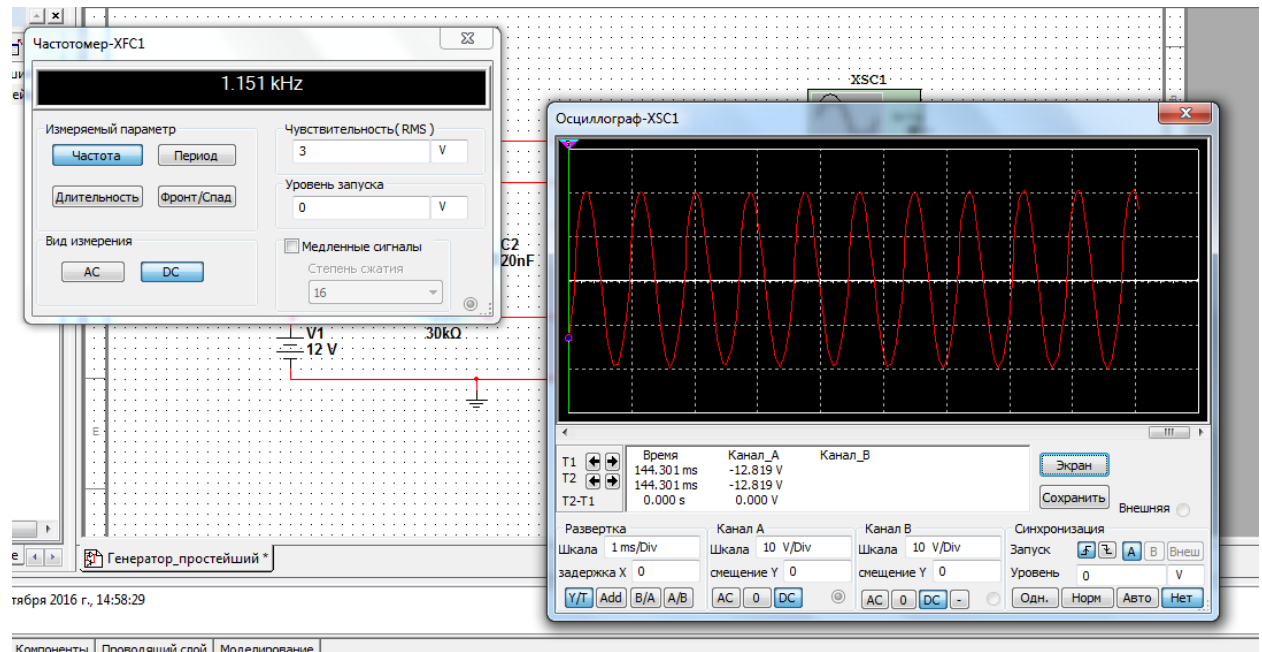


Рис. 8.12. Приклад зареєстрованого осцилографом сигналу генератора та частотоміром – його частота

2. Аналіз даних.

2.1. Розрахувати теоретичне значення частоти сигналу генератора за формулою 8.1.

2.2. Порівняти теоретичне значення частоти сигналу зі значенням, отриманим шляхом моделювання.

2.3. Зробити висновки, чому і на скільки значення частоти, отримане шляхом моделювання відрізняється від її розрахункового значення.

2.4. Проаналізувати форму сигналу, отриману за допомогою осцилографу.

2.5. Зробити висновки, чи відрізняється форма сигналу генератора від ідеальної синусоїди, якщо відрізняється, то на скільки і чому.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 1

ВИКРАДАЧ ДЖОУЛІВ

Мета: Виготовити і випробувати прототип низьковольтного перетворювача напруги.

Матеріали та обладнання: макетна плата; біполярний прп-транзистор 2N2222 або 2N3904; резистор опором 1 кОм, 0,25...1 Вт; емальований або ізольований монолітний дріт діаметром 0,3...0,5 мм (по міді); світлодіоди; з'єднувальні провідники; використані елементи живлення 1,5 В формату АА або ААА; циліндричне тіло діаметром 20...40 мм; ізоляційна стрічка, або вузький скотч; мультиметр.

Одноразові сольові та лужні елементи живлення («батарейки») мають номінальну напругу 1,5 В. При цьому у нового щойно купленого елемента напруга зазвичай децю більша за цю величину. Під час роботи елемент розряджається і його напруга поступово знижується. До моменту зниження напруги елемента до значення 0,8...0,9 В він віддає понад 90 % своєї енергії. Але фактично, пристрої, які живляться від батарейок перестають нормально працювати коли напруга на елементах живлення знижується лише до 1,2...1,3 В. Наприклад для живлення білого світлодіода можна застосувати батарею з двох з'єднаних послідовно елементів живлення. Світлодіод перестане світитися, коли напруга на батареї знизиться до значення близько 2,5 В, що приблизно дорівнює значенню його прямого падіння напруги. Напруга на кожному елементі знизиться до 1,25 В, а елементи при цьому можуть не віддати і половини енергії, яку мають.

Також варто пам'ятати, що одноразові елементи живлення потребують окремої правильної утилізації. У розвинених країнах витрати на збір і утилізацію відпрацьованих елементів живлення включаються у їх вартість. Вартість переробки 1 тони батарейок в Європі складає близько 400 Євро. Один відпрацьований елемент живлення формату АА (пальчикова батарейка), викинутий разом з загальними побутовими відходами забруднює до 20 м² ґрунту, або 400 л води. Така екологічна шкода еквівалентна смерті одного їжака. Отже одна пальчикова батарейка, викинута разом з загальними побутовими відходами вбиває одного їжака.

Для виготовлення елементів живлення використовуються корисні копалини, видобування яких також сильно шкодить навколишньому середовищу.

Таким чином проблема раціонального використання і утилізації елементів живлення є досить актуальною. Частково дана проблема вирішується шляхом застосування низьковольтних підвищуючих перетворювачів напруги, здатних працювати при вхідних напругах 0,7 В і навіть менше, а на виході забезпечувати напругу 3 В і більше. Такий перетворювач дозволяє використати всю енергію, що містить елемент

живлення, тому серед радіолюбителів такі перетворювачі жартома називають «викрадачами Джоулів».

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися з принципом роботи підвищуючих перетворювачів напруги.

Сучасні перетворювачі напруги зазвичай є імпульсними з індуктивним накопиченням енергії. Загальна структурна схема імпульсного перетворювача для підвищення напруги представлена на рис. 8.13.

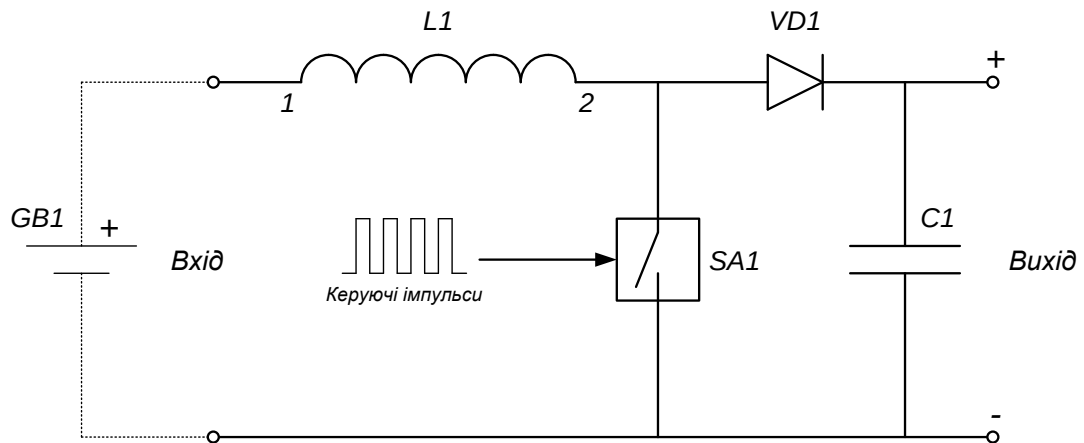


Рис. 8.13. Загальна схема імпульсного перетворювача напруги

Ключ $SA1$, зазвичай транзисторний, керується імпульсами, які формуються контролером, побудованим на спеціалізованих мікросхемах, і перебуває то в закритому, то у відкритому стані. Коли ключ відкривається, через дросель починає текти і збільшуватися струм від низьковольтного джерела живлення $GB1$. Дросель при цьому накопичує енергію. Полярність напруги, прикладеної до дроселя при цьому наступна: 1 – «+», 2 – «-». Коли ключ розмикається, на дроселі з'являється ЕРС самоіндукції, полярність якої зворотна напрямку струму, що протікав протягом часу, коли ключ перебував у відкритому стані. Полярність ЕРС самоіндукції дроселя наступна: 1 – «-», 2 – «+». Дросель в цей момент стає джерелом напруги, з'єднаним послідовно з джерелом $GB1$. До конденсатора $C1$ через діод $VD1$ в цей момент прикладена напруга яка дорівнює сумі напруги джерела $GB1$ і ЕРС самоіндукції дроселя за вирахуванням прямого падіння напруги на діоді. ЕРС самоіндукції дроселя за рахунок швидкого закривання ключа, і відповідно швидкої зміни струму може досягати значень в рази або десятки раз більших за напругу джерела живлення. Процеси відкривання і закривання ключа відбуваються з високими частотами (десятки або сотні кілогерц), а конденсатор $C1$ має достатню ємність для згладжування пульсацій напруги. Тому вихідна напруга перетворювача є постійною з незначними пульсаціями, які за необхідності можна усунути за допомогою додаткового лінійного стабілізатора напруги.

Імпульсні перетворювачі напруги, які випускаються промислово, зазвичай будуються із застосуванням спеціалізованих мікросхем, які формують керуючі імпульси для транзисторних ключів. Але перетворювач

напруги, що працює за таким же принципом може бути і автогенераторним. На відміну від перетворювачів на спеціалізованих мікросхемах автогенераторні перетворювачі мають менший ККД, але значно простіші за будовою і можуть працювати за менших вхідних напруг.

В даній практичній роботі пропонується виготовити прототип автогенераторного перетворювача напруги для живлення світлодіодів від однієї батарейки, принципова схема якого зображена на рис. 8.14.

2. Ознайомитися зі схемою і конструктивними особливостями автогенераторного перетворювача напруги.

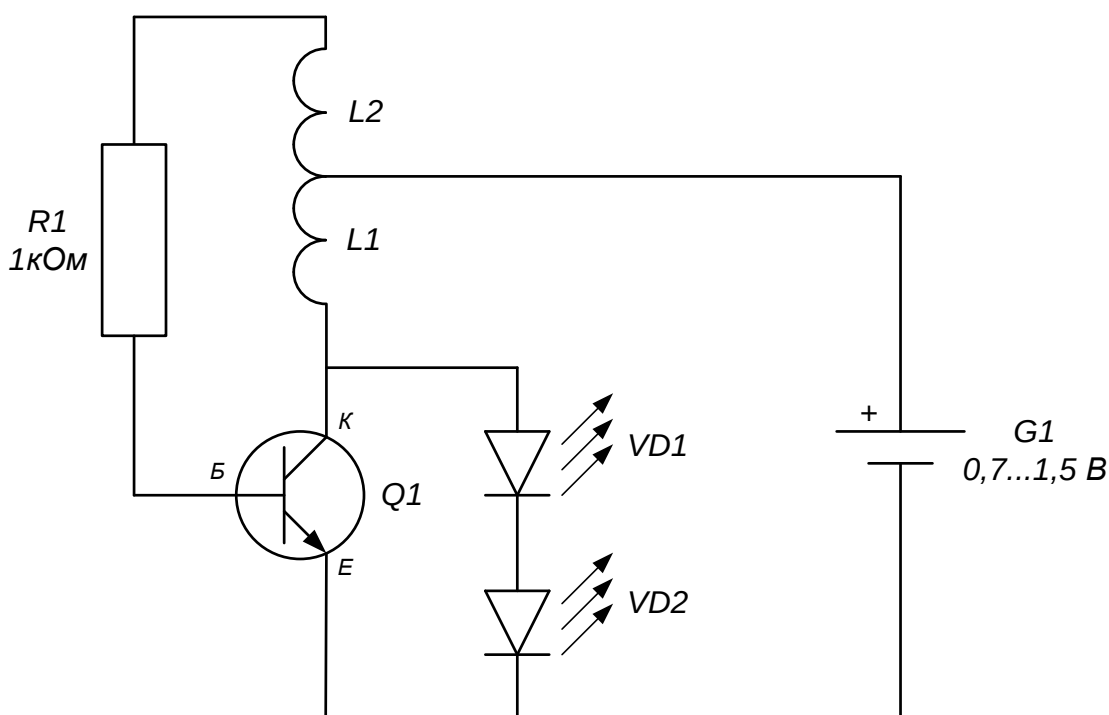


Рис. 8.14. Схема електрична принципова автогенераторного перетворювача

Даний перетворювач являє собою блокінг-генератор. Котушки $L1$ та $L2$ мають по 40...60 витків (80...120 витків з відводом від середини) і намотуються на циліндричному тілі діаметром 20...40 мм. Транзистор $Q1$ – 2N2222, або 2N3904.

3. Виготовлення прототипу перетворювача.

3.1. На циліндричному тілі намотати 40...60 витків ізольованим, або емальованим дротом, залишивши приблизно 10 см дроту від початку.

3.2. Зробити відвід довжиною приблизно 10 см і намотати у тому ж напрямі ще стільки ж витків.

3.3. Залишити приблизно 10 см дроту від кінця і обрізати решту. Ви намотали котушки $L1$ та $L2$, що являють собою одну котушку з відводом від середини.

3.4. Акуратно зняти намотану котушку і зафіксувати її за допомогою її ж виводів. Приклад котушки показано на рис. 8.15.



Рис. 8.15. Приклад котушки L1 – L2

3.5. Зафіксувати котушку також за допомогою ізоляційної стрічки.

3.6. Очистити кінці проводів від емалі або ізоляції, надійно скрутити та спаяти між собою кінці проводів, якими було зроблено відведення від середини.

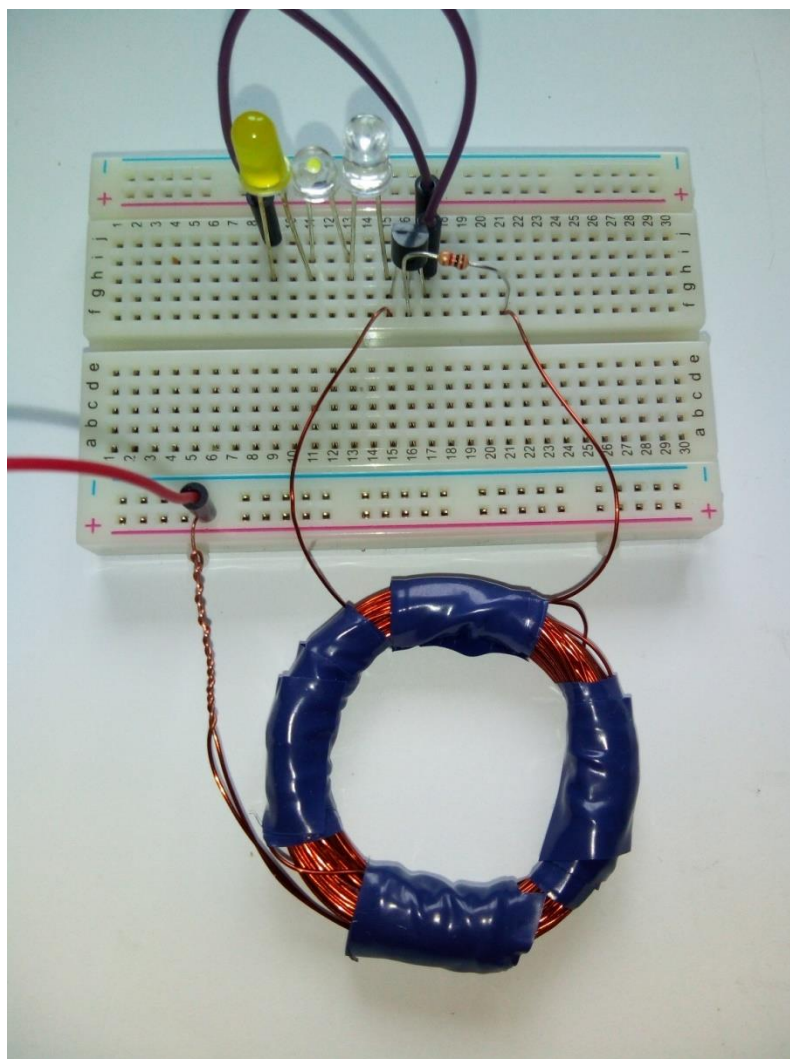


Рис. 8.16. Приклад зібраного пристрою

3.7. На макетній платі скласти електричну схему у відповідності до рис. 8.14, з урахуванням правильного розміщення виводів транзистора (рис. 7.18). Транзистор 2N3904 має таке саме розміщення виводів, як і 2N2222. Приклад зібраного пристрою показано на рисунку 8.16.

4. Випробування перетворювача.

4.1. Підключити до пристрою живлення у вигляді використаної батарейки. Якщо пристрій зібраний правильно, а батарейка має напругу 0,8...1 В, то 2...3 світлодіоди при підключенні живлення мають засвітитися.

4.2. Якщо світлодіоди не світяться – спробувати зменшити їх кількість, взяти іншу батарейку, перевірити правильність складання схеми.

4.3. Визначити максимальну кількість послідовно з'єднаних світлодіодів, які будуть світитися при живленні від перетворювача.

4.4. За допомогою мультиметру визначити мінімальну напругу при якій перетворювач працюватиме (рис. 8.17).

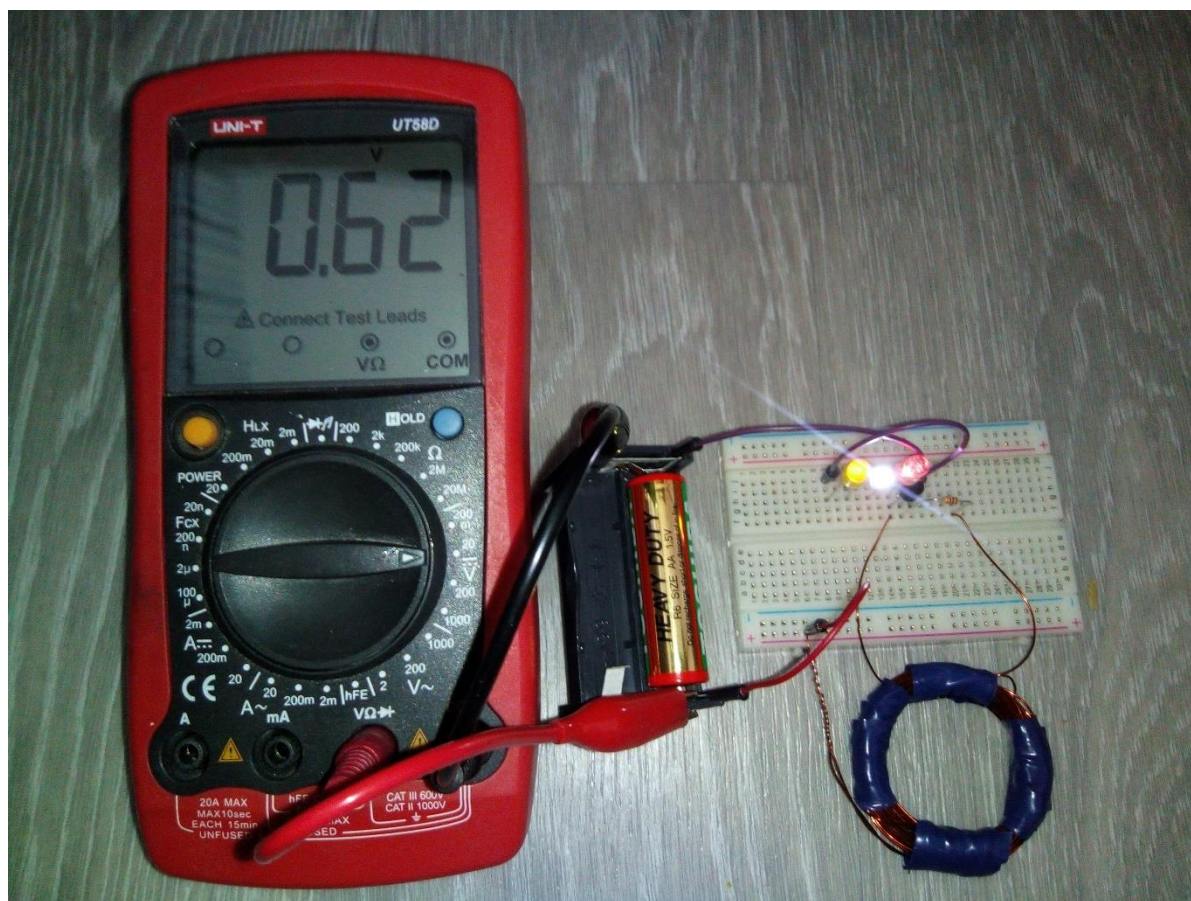


Рис. 8.17. Робота «Викрадача Джоулів» від однієї батарейки

5. Зробити висновки.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 2

БЕЗДРОТОВА ПЕРЕДАЧА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Мета: Виготовити і випробувати прототип пристрою для бездротової передачі електроенергії.

Обладнання: макетна плата; біполярний ррп-транзистор 2N2222 або 2N3904; резистор опором 1 кОм, 0,25...1 Вт; емальований або ізольований монолітний дріт діаметром 0,2...0,5 мм (по міді); світлодіод; з'єднувальні провідники; 1...2 елементи живлення 1,5 В формату АА або ААА; циліндричне тіло діаметром 20...40 мм; ізоляційна стрічка, або вузький скотч; лінійка, або штангенциркуль.

Бездротова передача електроенергії – це спосіб передачі електричної енергії без використання струмопровідних елементів в електричному колі. Відомі наступні способи бездротової передачі електроенергії:

- *спосіб електромагнітної індукції;*
- *за допомогою мікрохвильового випромінювання;*
- *спосіб електростатичної індукції;*
- *лазерний;*
- *ультразвуковий.*

Спосіб електромагнітної індукції ґрунтується на взаємоіндукції між двома котушками на одну з яких подається змінний струм, а інша слугує приймачем. На такому принципі відбувається передача електроенергії, зокрема між первинною і вторинною обмотками трансформатору.

Спосіб передачі електроенергії за допомогою мікрохвильового випромінювання є радіохвильовим способом. Використання радіохвиль мікрохвильового діапазону зумовлено тим, що зменшення довжини хвилі дозволяє зробити випромінювання більш спрямованим. При передачі електроенергії даним способом енергія постійного струму перетворюється на надвисокочастотні коливання, які подаються на антенну. Приймачем як правило слугує ректенна – пристрій, який поєднує у собі антенну та випрямляч.

У способі електростатичної індукції використовуються два електроди, піднесені над провідною поверхнею. Електричне поле утворюється за рахунок заряду ємності між передаючим електродом та провідною поверхнею струмом високої частоти та високого потенціалу. У ємності між приймаючим електродом і провідною поверхнею збуджується змінний струм за рахунок явища електростатичної індукції.

Лазерний спосіб передачі електроенергії полягає у опроміненні лазерним променем, що має високу спрямованість, фотоелементу, який генерує енергію постійного струму.

Ультразвуковий спосіб передачі електроенергії полягає у перетворенні електроенергії у передавачі в ультразвукові хвилі, прийомі цих хвиль приймачем з подальшим перетворенням на електроенергію.

Для використання у побуті знаходить розповсюдження спосіб електромагнітної індукції для бездротової передачі електроенергії. Він використовується для бездротового заряджання акумуляторів мобільних телефонів та інших пристроїв, а також для бездротового живлення портативних пристроїв на невеликих відстанях.

В даній практичній роботі пропонується виготовити і випробувати пристрій для передачі електроенергії саме способом електромагнітної індукції.

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися зі схемою пристрою для бездротової передачі електроенергії.

Схема пристрою, який пропонується виготовити представлена на рис. 8.18.

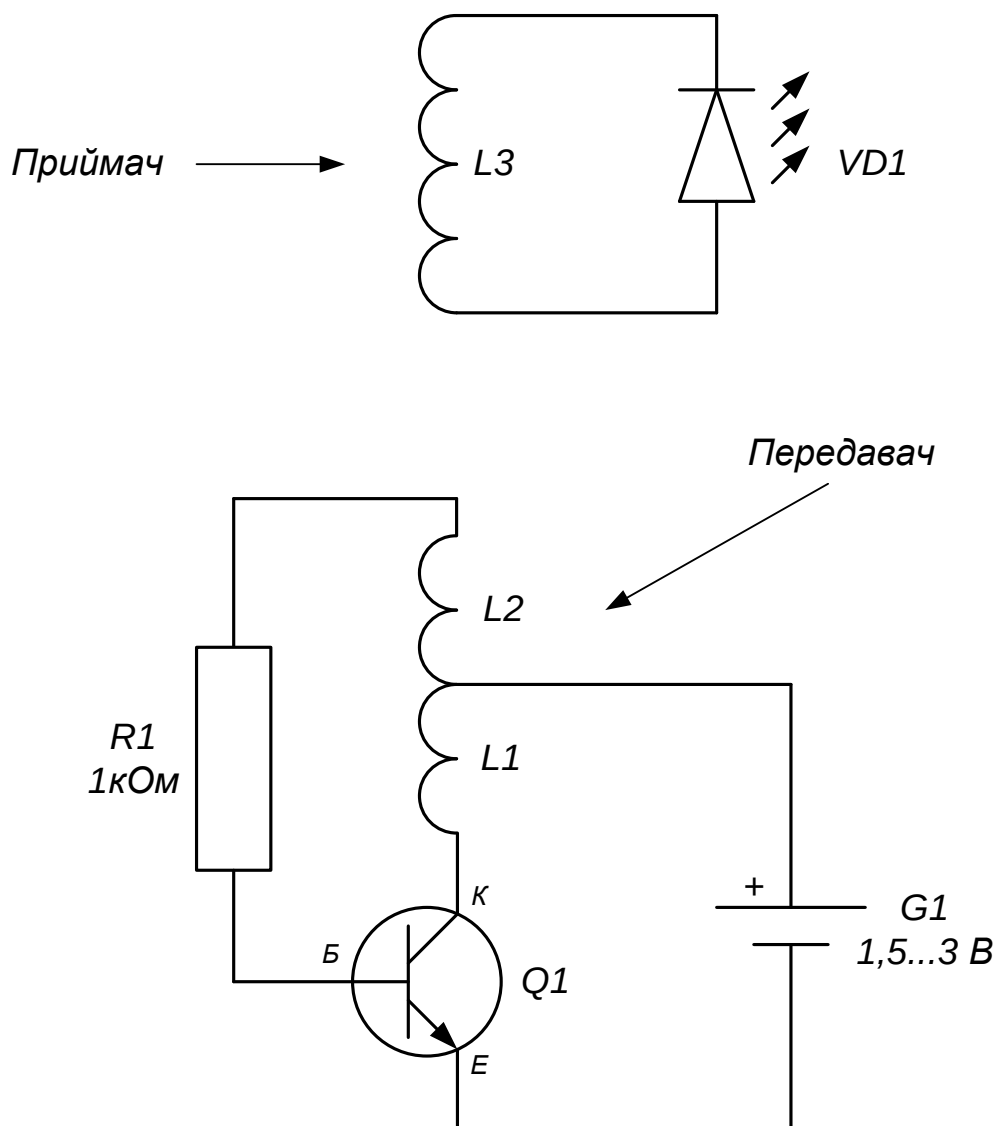


Рис. 8.18. Схема пристрою для бездротової передачі електроенергії

Передавач являє собою блокінг-генератор. Приймач являє собою котушку $L3$, навантажену світлодіодом $VD1$. Коли котушка приймача розміщується над котушкою передавача співвісно, на певній відстані, у ній за рахунок взаємодії наводиться змінна високочастотна ЕРС від котушки передавача. За рахунок наведеної ЕРС світлодіод починає світитися. У даній схемі світлодіод є одночасно споживачем електроенергії і випрямлячем змінного струму.

Котушки $L1$ та $L2$ мають по 15...20 витків (30...40 витків з відводом від середини), котушка $L3$ має 30...40 витків. Діаметр усіх котушок 20...40 мм.

2. Виготовлення прототипу пристрою для бездротової передачі електроенергії

2.1. На циліндричному тілі намотати 15...20 витків ізолюваним, або емальованим дротом, залишивши приблизно 5 см дроту від початку.

2.2. Зробити відвід довжиною приблизно 5 см і намотати у тому ж напрямі ще таку ж кількість витків.

2.3. Залишити приблизно 5 см дроту від кінця і обрізати решту. Ви намотали котушки $L1$ та $L2$, що являють собою одну котушку з відводом від середини.

2.4. Аккуратно зняти намотану котушку і зафіксувати її за допомогою ізоляційної стрічки або скотчу. Приклад котушки показано на рис. 8.19.

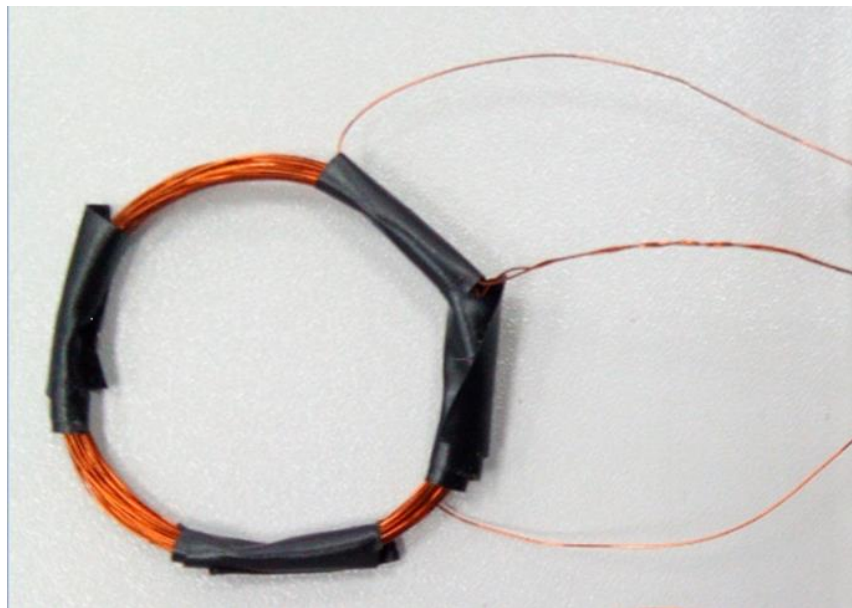


Рис. 8.19. Приклад котушки $L1 - L2$

2.5. Очистити кінці проводів від емалі або ізоляції, надійно скрутити і спаяти між собою кінці проводів, якими було зроблено відведення від середини, забезпечивши гарний електричний контакт між ними.

2.6. На тому ж циліндричному тілі намотати котушку $L3$ з кількістю витків, такою самою як у котушки $L1 - L2$, але без відводів. Так само акуратно зняти її з циліндричного тіла, зафіксувати ізоляційною стрічкою або вузьким скотчем і очистити її виводи від емалі або ізоляції.

2.7. На макетній платі скласти електричну схему у відповідності до рис. 8.18, з урахуванням правильного розміщення виводів транзистора у відповідності до рис. 7.18. Приклад зібраного пристрою показано на рис. 8.20. Як видно зі схеми на рис. 8.18 та зібраного пристрою на рис. 8.20, світлодіод не має електричного контакту з джерелом живлення.

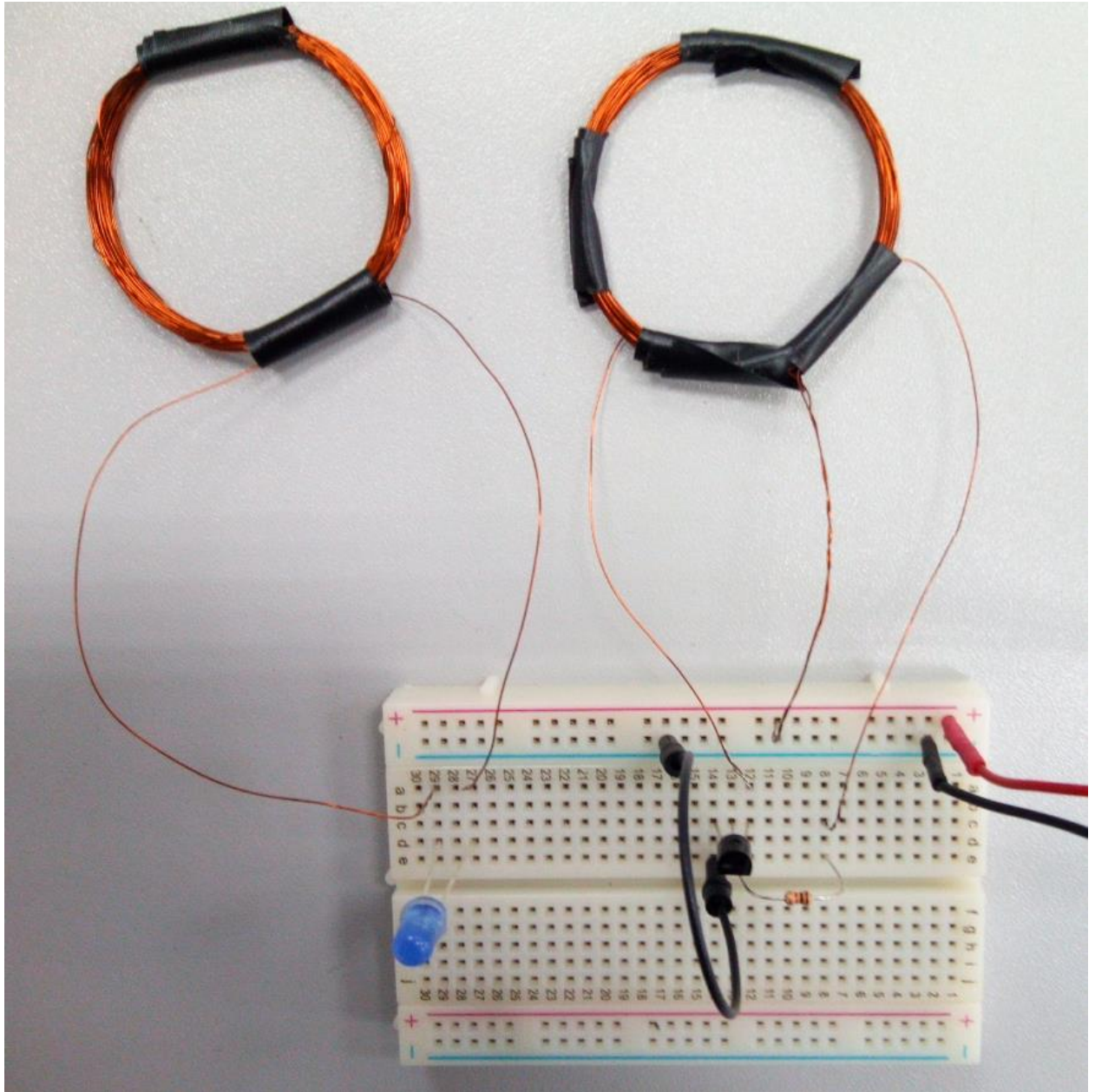


Рис. 8.20. Приклад зібраного пристрою.

3. Випробування пристрою для бездротової передачі електроенергії.

3.1. Підключити до пристрою живлення.

3.2. Розмістити котушку L_3 над котушкою $L_1 - L_2$ на відстані 1...2 см. Світлодіод має світитися (рис. 8.21). Якщо світлодіод не світиться, спробувати змінити його полярність.

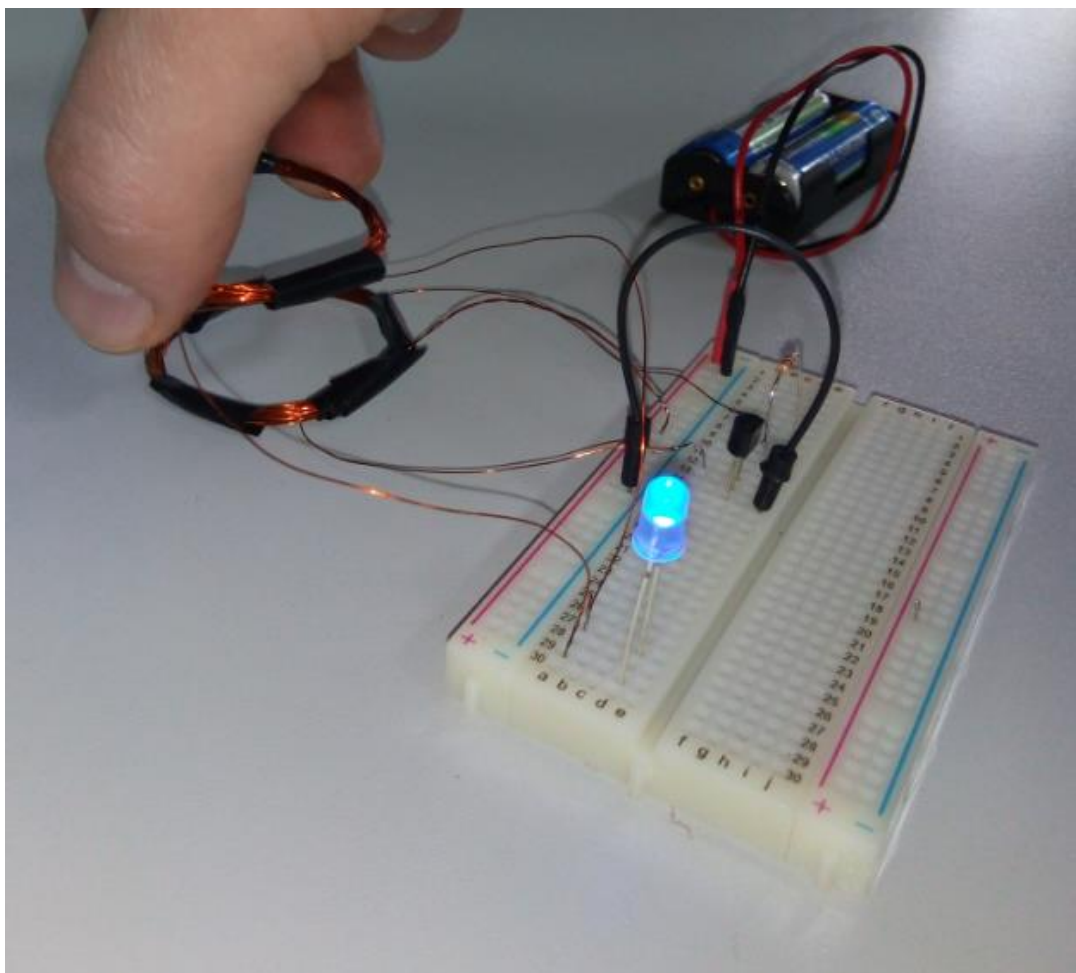


Рис. 8.21. Прототип пристрою для бездротової передачі електроенергії в роботі

3.3. Віддаляючи котушку L_3 , зафіксувати максимальну відстань між котушками, при якій світлодіод ще світиться.

3.4. Провести випробування, використавши для живлення пристрою замість двох – одну батарейку.

5. Зробити висновки про максимальну відстань передачі електроенергії залежно від напруги джерела живлення.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 3 **ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ МАЯТНИК**

Мета роботи: Виготовити і випробувати прототип автоколивальної системи у вигляді електромагнітного маятника.

Обладнання: мідний емальований дріт діаметром 0,1...0,15 мм; паяльник, припій, паяльний флюс або каніфоль; макетна плата; біполярний рпр-транзистор BC327, або 2N3906; діод випрямний 1N4148, 1N4007, або інший з близькими параметрами; з'єднувальні провідники; елемент живлення

«Крона» 9 В; тримач елементу живлення зі з'єднувальними проводами; капронова нитка; циліндричні неодимові магніти діаметром 10...15 мм; витратні матеріали: картон, пінопласт, пластикові трубочки і т. п., клей ПВА.

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися з описом та схемою електромагнітного маятника.

В даній практичній роботі пропонується виготовити і випробувати прототип автоколивальної системи з механічною коливальною системою, джерелом електричної енергії і електромагнітним пристроєм зворотного зв'язку.

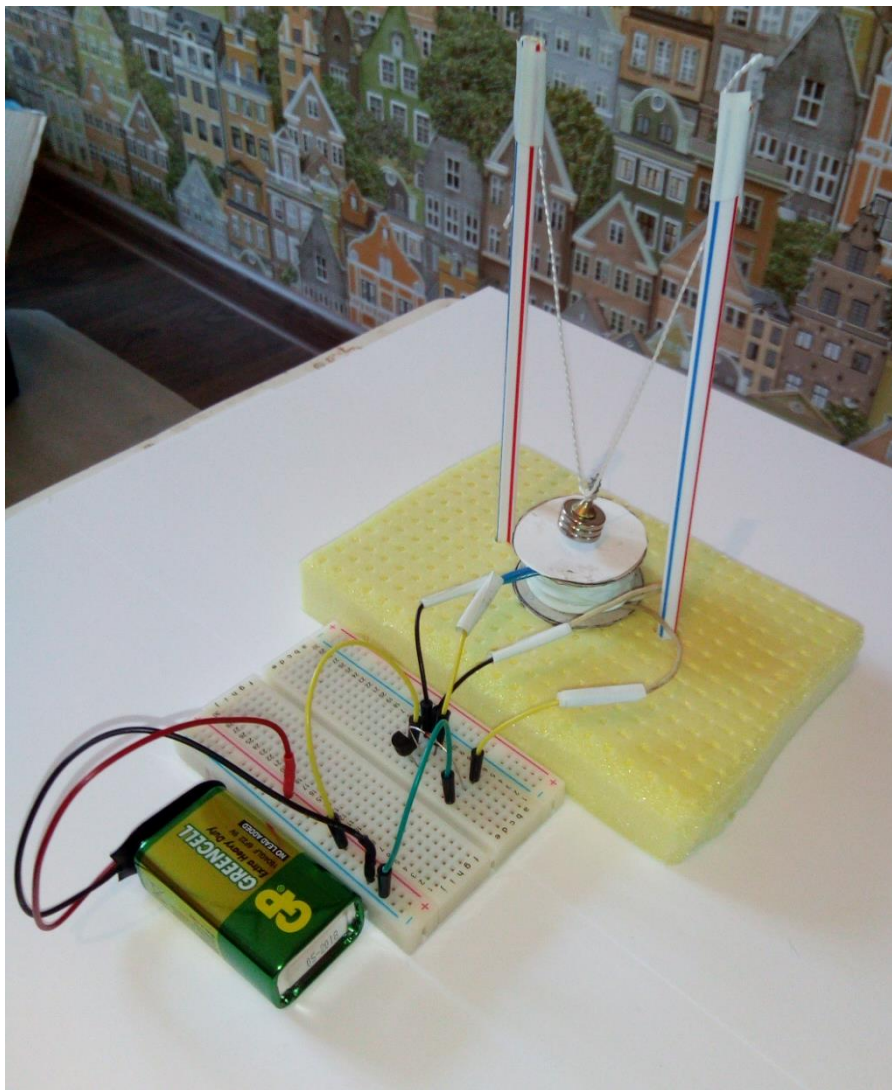


Рис. 8.22. Прототип електромагнітного маятника

Механічною коливальною системою слугує маятник, у якого в якості тіла, що здійснює коливання застосований невеликий постійний магніт. Такий маятник може здійснювати вільні згасаючі коливання у полі сили тяжіння. Пристроєм зворотного зв'язку є електромагніт з керуючою електронною схемою, яка подає на нього живлення від джерела енергії протягом одного півперіоду коливань таким чином, що електромагнітна сила

діє на тіло синхронно у напрямі його руху. Джерелом енергії слугує батарея типу «Крона» (рис. 8.22).

Принципова схема електромагнітного пристрою зворотного зв'язку з підключенням джерела живлення представлена на рис. 8.23.

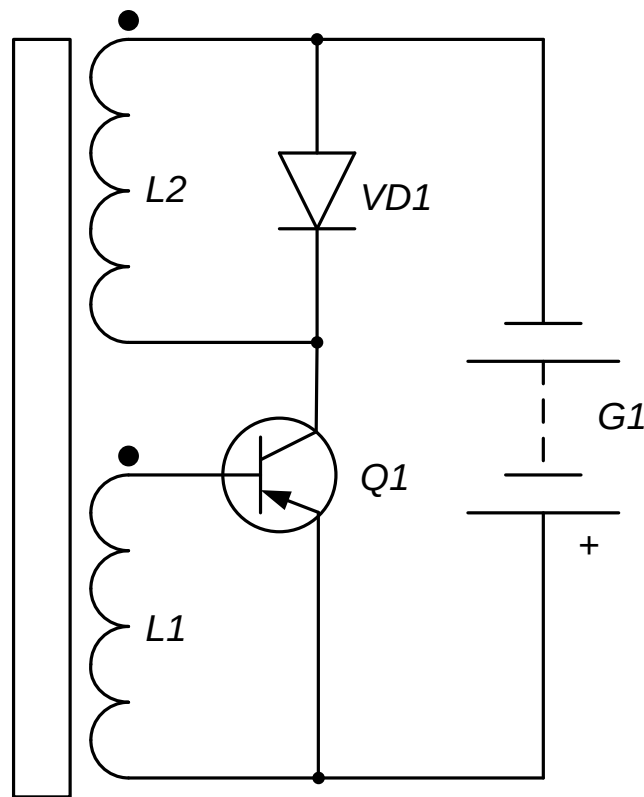


Рис. 8.23. Схема електрична принципова пристрою зворотного зв'язку

Електромагнітна котушка, яка розташовується під маятником, намотується на каркас без магнітного осердя і має дві однакових обмотки. Обмотка $L1$ є керуючою обмоткою. Котушка під маятником розташовується таким чином, що коли маятник здійснює коливання, при його русі вниз, або вгору, магнітне поле через обмотку $L1$ змінюється таким чином, що напрям ЕРС, яка виникає в котушці відповідає напрямку струму, який відкриває транзистор $Q1$. При відкриванні транзистору струм від джерела живлення починає текти через обмотку $L2$, яка є електромагнітом. Електромагніт при цьому притягує або відштовхує маятник, передаючи йому деяку кількість енергії синхронно з власними коливаннями маятника.

Діод $VD1$ слугує для усунення виникнення електромагнітних коливань у котушках.

Крапками біля обмоток на схемі показані їх початки. Обмотки $L1$ та $L2$ намотуються одночасно. Такий спосіб намотування називається *біфілярним*. Схема намотування обмоток на каркас котушки показана на рисунку 8.24.

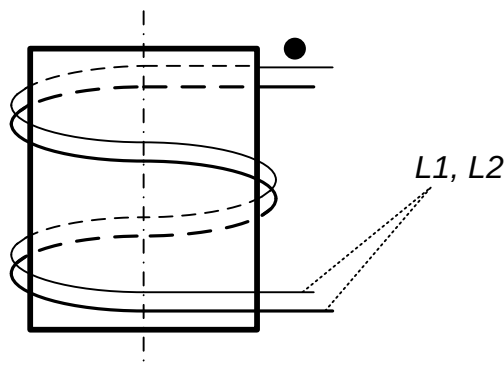


Рис. 8.24. Схема намотування котушки

Котушки намотуються емальованим мідним дротом діаметром 0,1...0,15 мм.

2. Виготовлення прототипу електромагнітного маятника.

2.1. Виготовити з картону за допомогою клею ПВА каркас котушки за кресленням, представленим на рис. 8.25. Дати час для висихання клею.

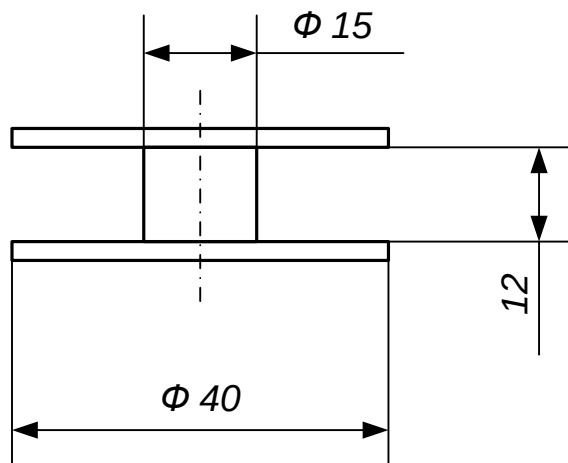


Рис. 8.25. Креслення каркасу котушки

2.2. З двох котушок з мідним емальованим дротом діаметром 0,1...0,15 мм намотати на виготовлений каркас разом дві обмотки до його заповнення у відповідності до схеми на рисунку 8.24. Перед і після намотування залишити кінці дротів довжиною 10...15 см. Після намотування зафіксувати кінці обмоток на котушці за допомогою ізоляційної стрічки.

2.3. Два з'єднувальні проводи під макетні плати, розрізати навпіл, зачистити та підпаяти до кінців обмоток. Заізолювати місця пайки. Надійно зафіксувати виводи обмоток на котушці за допомогою ізоляційної стрічки, так щоб з котушки виходили кінці багатожильних з'єднувальних проводів.

2.4. З підручних матеріалів зробити маятник з двома...трьома неодимовими магнітами в якості тягарців. Довжина осі маятника має дорівнювати 8...10 см Приклад виготовленого маятника зображено на рис. 8.26.



Рис. 8.26. Маятник

2.5. Відхилити маятник від положення рівноваги на кут близько 45° і відпустити. Засікти час до повного припинення коливань, або порахувати кількість вільних коливань до повної зупинки.

2.6. Скласти на макетній платі схему у відповідності до рис. 8.23. Розміщення виводів для транзисторів BC327 (а) та 2N3906 (б) представлено на рис. 8.27. Приклад складеної схеми приведений на рисунку 8.28.

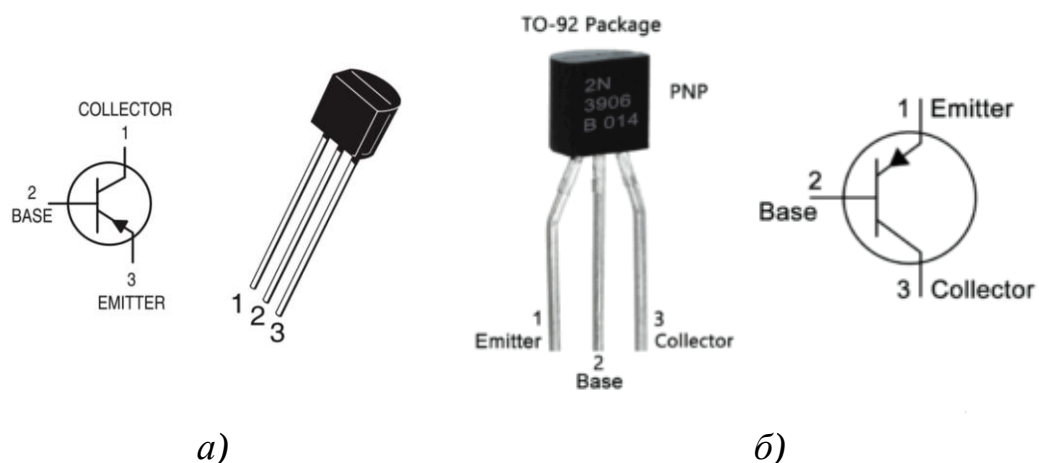


Рис. 8.27. Розміщення виводів транзисторів BC327 (а) та 2N3906 (б)

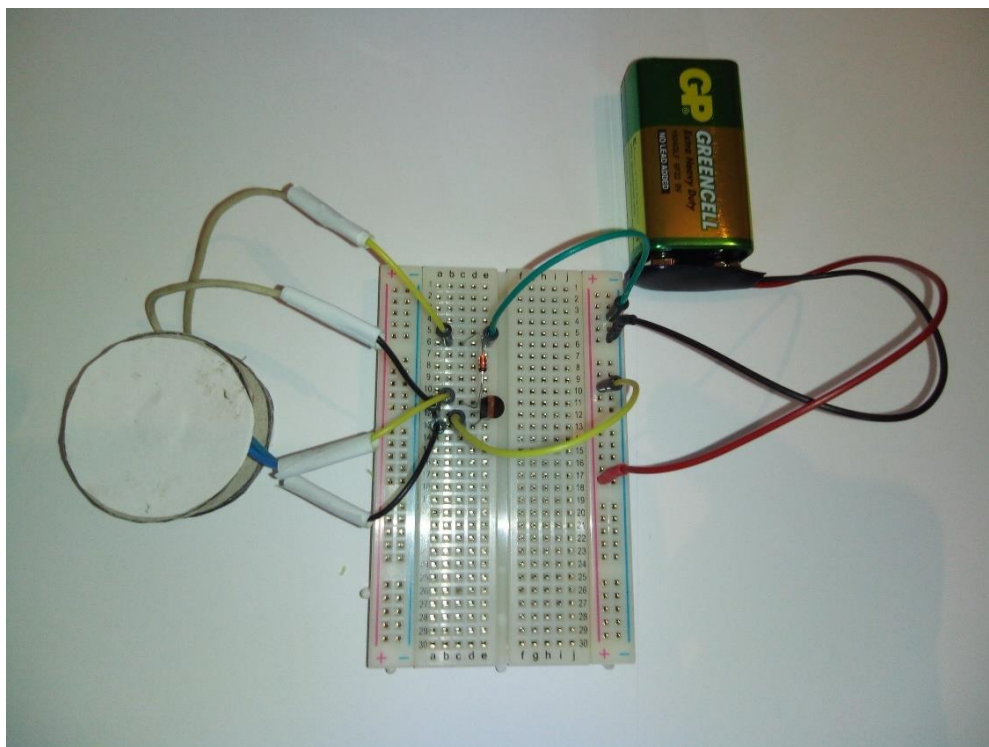


Рис. 8.28. Приклад зібраної схеми

2.7. Розмістити котушку під магнітами маятника (рис. 8.22) так щоб з'єднувальні проводи не заважали його коливанням, а відстань між магнітами і котушкою була мінімальною.

2.8. Відхилити маятник від положення рівноваги на кут близько 45° , відпустити і засікти час, або почати рахувати коливання. Якщо коливання згасають, спробувати змінити полярність підключення виводів обмоток котушки, або перевернути магніти на маятнику і знову запустити коливання. Під час правильної роботи електромагнітного маятника амплітуда його коливань через деякий проміжок часу набуває сталого значення і коливання можуть продовжуватися досить довго, до повного розряду батареї живлення. Схема при роботі споживає малі струми, тому батареї типу «Крона» може вистачити на тривалий час роботи у декілька тижнів, або навіть більше. Під час перебування маятника у стані спокою схема взагалі не споживає струму.

3. Виміряти і порівняти частоту вільних коливань маятника і частоту автоколивань системи.

4. Зробити висновки.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 4

МАГНІТНА ЛЕВІТАЦІЯ

Мета: Виготовити і випробувати прототип установки для здійснення магнітної левітації.

Матеріали та обладнання: мідний емальований дріт діаметром 0,4...0,5 мм; польовий N-канальний транзистор IRFZ44N, IRF540N, IRF3205, IRLZ44N, IRL540N або IRLZ34N; датчик Холла A3144, SS441A або TLE4905L; резистор опором 1 кОм; мідний ізольований монолітний дріт діаметром 0,5...0,6 мм; джерело живлення напругою 5...6 В; циліндричні неодимові магніти діаметром 10...15 мм; паяльник; припій; паяльний флюс (каніфоль); витратні матеріали (картон, пінопласт, пластикові стаканчики і т. п.); клей ПВА.

Левітацією називається положення стійкої рівноваги об'єкта у гравітаційному полі без безпосереднього контакту з іншими об'єктами. Для левітації необхідна вертикальна сила, яка компенсує силу тяжіння. Компенсувати силу тяжіння магнітного об'єкта можливо магнітною силою постійного або електричного магніту. Але в постійному магнітному полі, яке компенсує гравітаційне поле, левітація неможлива. Магнітний об'єкт, поміщений у постійне магнітне поле, з достатніми силовими характеристиками для компенсації сили тяжіння, буде або притягуватися безпосередньо до магніту, або падати на Землю. Для того щоб забезпечити положення стійкої рівноваги магнітного об'єкта у магнітному полі, магнітне поле треба включати і виключати з високою частотою. В такому випадку об'єкт то починає падати, то підтягується магнітом з високою частотою. За рахунок високої частоти увімкнень магнітного поля візуально спостерігається паріння об'єкта. Насправді об'єкт при цьому вібрує з частотою увімкнень магнітного поля. Але амплітуда цих вібрацій і їх частота такі, що не сприймаються людським оком.

Вмикати і вимикати магнітне поле треба своєчасно і таким чином щоб об'єкт не встигав впасти і не встигав притягнутися безпосередньо до магніту. Для того щоб забезпечити можливість увімкнення та вимкнення магнітного поля можна застосувати електромагніт. Але вмикати і вимикати його з необхідною частотою із забезпеченням необхідних інтервалів часу в увімкненому та вимкнутому стані вручну неможливо. Якщо взяти джерело імпульсної напруги для живлення електромагніту з можливістю регулювання частоти і тривалості імпульсів, налаштувати його таким чином, щоб об'єкт більш менш тривалий час знаходився у положенні стійкої рівноваги буде дуже складно, або практично неможливо. При найменшому протязі об'єкт буде падати. В процесі роботи електромагніту, його обмотка буде нагріватися, в результаті чого зростатиме її опір, а відповідно буде зменшуватися струм і магнітна сила.

Це призведе до необхідності постійного налаштування параметрів імпульсів живлення.

Щоб забезпечити тривале положення стійкої рівноваги магнітного об'єкта у магнітному полі електромагніту, для керування живленням електромагніту треба застосувати пристрій зворотного зв'язку.

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися зі схемою, принципом роботи та компонентами установки для здійснення магнітної левітації.

Зовнішній вигляд установки для здійснення магнітної левітації представлений на рис. 8.29, а її загальна схема – на рис. 8.30.



Рис. 8.29. Установка для здійснення магнітної левітації

Магнітне тіло 1 притягується електромагнітом 2, який живиться від джерела 3. Включення і відключення живлення здійснюється за допомогою ключа 4, яким керує датчик відстані 5. Датчик відстані при наближенні до нього тіла на певну відстань розмикає ключ, а при віддаленні тіла на відстань більшу на величину Δ – замикає. Тобто він може формувати лише два види сигналу – на замикання та на розмикання ключа.

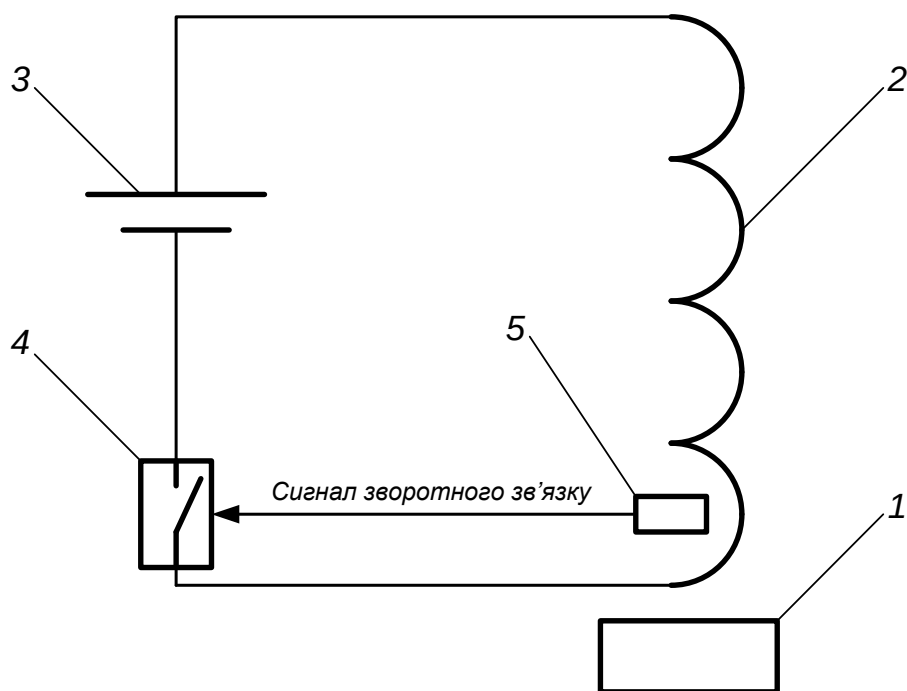


Рис. 8.30. Загальна схема установки для здійснення магнітної левітації

Коли тіло притягується до електромагніту до певного положення, спрацьовує датчик відстані, розмикаючи ключ. Тіло починає падати під дією сили тяжіння. При віддаленні тіла датчик відстані замикає ключ, в результаті чого вмикається електромагніт і тіло знову притягується електромагнітом. Сигнал, який формує датчик відстані для замикання і розмикання ключа є сигналом зворотного зв'язку.

Якщо застосувати швидкодіючий датчик з малою величиною Δ і швидкодіючий ключ, то візуально буде спостерігатися паріння магнітного тіла.

В даній практичній роботі пропонується виготовити прототип установки для здійснення магнітної левітації застосувавши в якості магнітного тіла постійний магніт, а в якості датчика відстані – мікросхему з датчиком Холла (інтегральний датчик Холла), яка реагує на магнітну індукцію, яка в свою чергу змінюється залежно від відстані між магнітом і датчиком. В якості швидкодіючого ключа доцільно застосувати потужний польовий транзистор з ізолюваним затвором. На рис. 8.31 приведена спрощена структурна схема мікросхеми з датчиком Холла.

Мікросхема, яку пропонується застосувати в даній роботі, містить у своєму складі датчик Холла (ДХ), схему формування сигналу з гістерезисом і вихідний біполярний транзистор. Коли магнітна індукція в напрямі датчику досягає певної величини $B1$, схема формування сигналу подає на базу вихідного транзистора струм, який відкриває його. Коли магнітна індукція знижується до величини $B1 - \Delta B$, схема формування сигналу обриває струм бази транзистора і він закривається.

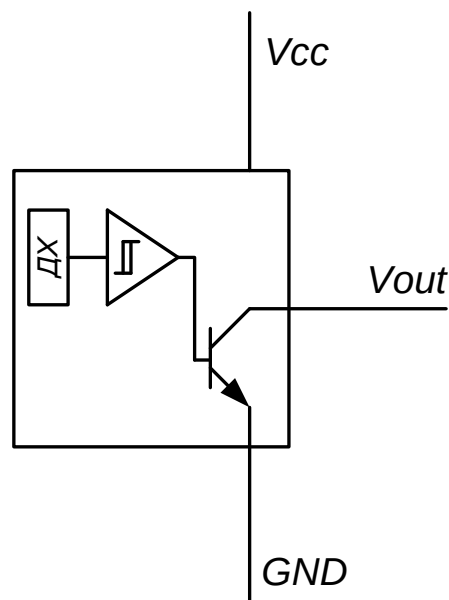


Рис. 8.31. Структурна схема інтегрального датчика Холла

Гістерезисом в даному випадку є пряме спрацювання датчику при одному значенні магнітної індукції, а зворотне – при значенні магнітної індукції меншому на величину ΔB . Величина ΔB є величиною гістерезису. Наявність гістерезису покращує стабільність роботи системи. Для забезпечення гістерезису у електронних схемах застосовується *тригер Шмітта*.

На рис. 8.32 приведена схема електрична принципова установки для здійснення магнітної левітації.

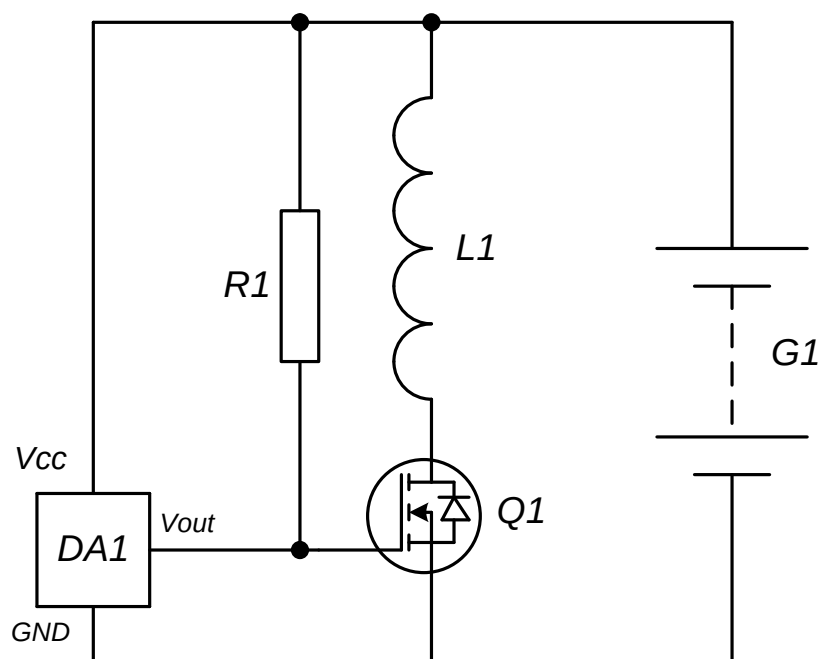


Рис. 8.32. Схема електрична принципова установки

Інтегральний датчик Холла розміщений всередині котушки електромагніту $L1$ (див. рис. 8.30). Коли поблизу котушки постійного магніту немає, вихідний транзистор датчика Холла перебуває у закритому стані (має дуже великий опір), за рахунок чого до затвору польового транзистора $Q1$ (рис. 8.32) прикладена напруга що дорівнює напрузі батареї живлення $G1$. Польовий транзистор при цьому відкритий і через котушку електромагніту проходить струм. При піднесенні до котушки постійного магніту, він починає притягуватися до неї, поки магнітна індукція, що діє на датчик Холла не досягне величини спрацювання. При спрацюванні інтегрального датчика Холла його вихідний транзистор відкривається (його опір стає значно меншим за опір резистора $R1$) і напруга на затворі польового транзистора знижується практично до 0 В. Струм через котушку електромагніту припиняється і магніт починає падати. Тільки то він віддаляється від котушки на відстань, при якій магнітна індукція знизиться до величин зворотного спрацювання, на затворі польового транзистора знову з'явиться напруга, він відкриється, через котушку $L1$ потече струм і магніт підтягнеться магнітним полем. Усі процеси відбуваються з досить високою частотою, внаслідок чого спостерігається паріння магніту під котушкою (рис. 8.29).

На рис. 8.33 представлено розміщення виводів інтегральних датчиків Холла, наведених у переліку обладнання.

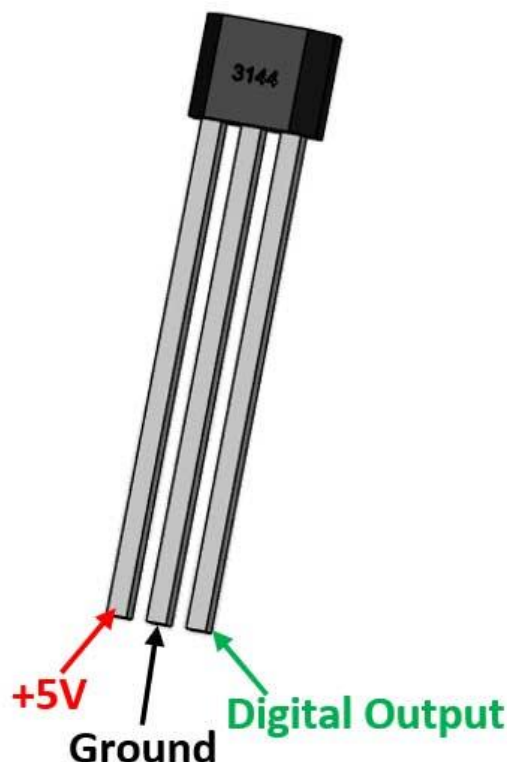


Рис. 8.33. Розміщення виводів інтегральних датчиків Холла A3144, SS441A та TLE4905L

На рис. 8.34 представлено розміщення виводів польових транзисторів, представлених у переліку обладнання.

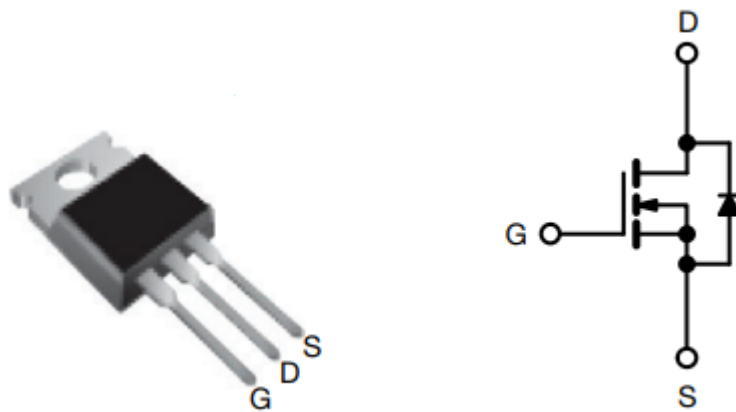


Рис. 8.34. Розміщення виводів польових транзисторів
G (gate) – затвор; D (drain) – сток; S (source) – виток

Резистор $R1$ має опір 1 кОм. Котушка електромагніту намотуються емальованим мідним дротом діаметром 0,5...0,6 мм на каркас, креслення якого представлено на рисунку 8.35. Котушка має містити 500...600 витків.

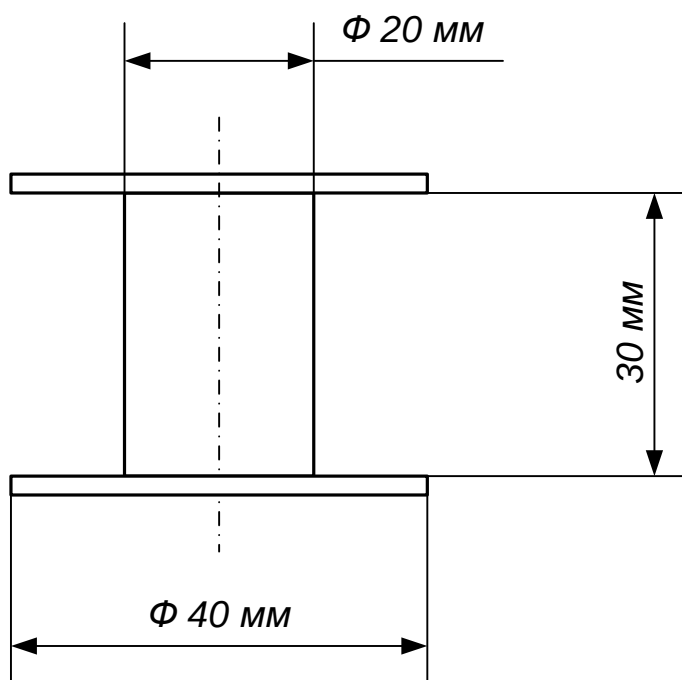


Рис. 8.35. Креслення каркасу котушки

У центрі каркасу має бути наскрізний отвір діаметром близько 15 мм для встановлення інтегрального датчика Холла і забезпечення можливості регулювання його положення.

2. Виготовлення прототипу установки для здійснення магнітної левітації.

2.1. Виготовити з картону за допомогою клею ПВА каркас котушки за кресленням, представленим на рис. 8.35. Дати час для висихання клею.

2.2. Намотати на каркас 500...600 витків мідного емальованого дроту. Перед і після намотування залишити виводи довжиною 5...10 см. Після намотування зафіксувати виводи на котушці за допомогою ізоляційної стрічки і зачистити кінці виводів котушки від емалі.

2.3. Зачистити кінці котушки та підпаяти до них два відрізки багатожильного монтажного проводу довжиною 10...15 см. Заізолювати місця пайки. Надійно зафіксувати виводи обмоток на котушці за допомогою ізоляційної стрічки, так щоб з котушки виходили кінці багатожильних монтажних проводів.

2.4. Взяти 3 відрізки ізолюваного мідного дроту та очистити їх кінці від ізоляції. Підпаяти проводи до виводів інтегрального датчика Холла та заізолювати за допомогою ізоляційної стрічки або термоусадки (рис. 8.36).

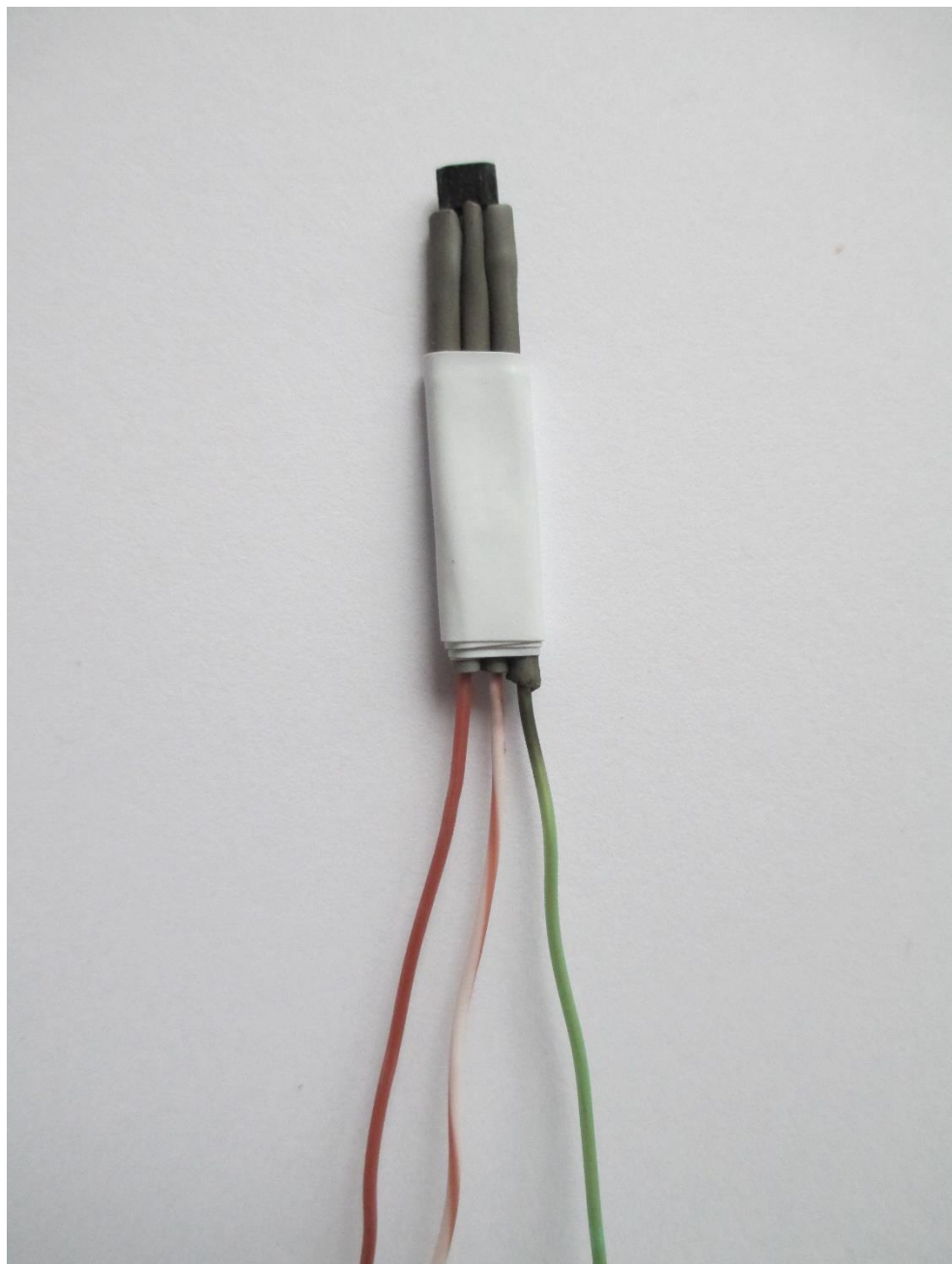


Рис. 8.36. Інтегральний датчик Холла з подовженими виводами

2.5. Скласти схему у відповідності до рисунку 8.32. Після пайки заізолювати всі оголені ділянки щоб уникнути короткого замикання (рис. 8.37).

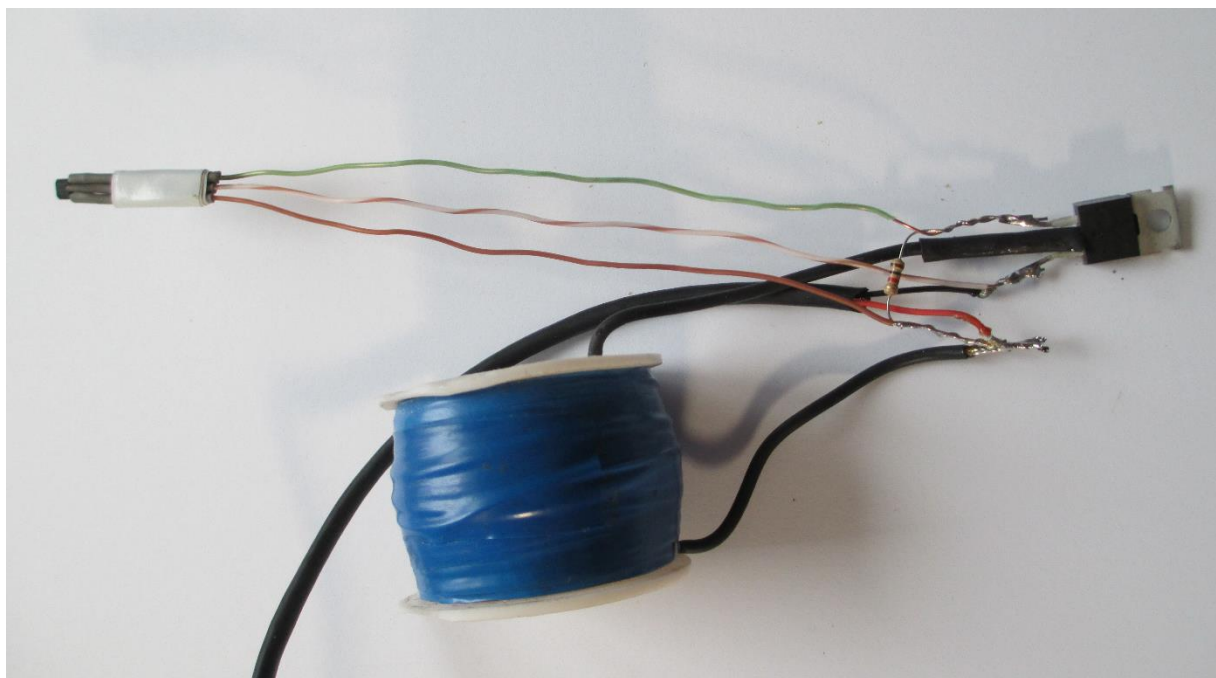


Рис. 8.37. Приклад зібраної схеми

2.6. Встановити котушку на підставку, наприклад з двох пластикових склянок (рис. 8.29). За необхідності приклеїти котушку до підставки за допомогою ізоляційної стрічки або скотчу.

3. Запуск установки.

3.1. Подати до схеми живлення напругою 5...6 В. Можна використовувати зарядний пристрій з роз'ємом USB з вихідним струмом не менше 1,5 А.

3.2. Піднести до котушки магніт так щоб він втягнувся в середину каркасу.

3.4. Повільно вводити інтегральний датчик Холла через верхній отвір котушки підбираючи його положення таким чином, щоб при введенні датчика магніт потроху опускався. За необхідності можна підігнути датчик відносно виводів у потрібний бік.

3.5. Підібрати таке положення датчика, при якому магніт буде висіти на 1...2 см нижче котушки (рис. 8.29). Зафіксувати датчик в цьому положенні.

3.6. Забрати магніт і знову повільно піднести до котушки. При правильному налаштуванні положення датчика магніт має повиснути трохи нижче котушки.

3.7. Спробувати здійснити левітацію не одного, а двох або трьох магнітів.

4. Зробити висновки.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

1. У моделювальному комп'ютерному середовищі змодельуйте схему генератора прямокутних імпульсів у відповідності до рис. 8.7. та визначте частоту його коливань.

2. Розрахуйте за формулою (8.2) частоту RC-генератору на ОП з мостом Віна, схема якого зображена на рис. 8.9.

3. У моделювальному комп'ютерному середовищі змодельуйте схему RC-генератору на ОП з мостом Віна, схема якого зображена на рис. 8.9. Визначте його частоту за осцилограмою коливань та порівняйте з результатом розрахунку за формулою (8.2).

4. Як буде змінюватися частота RC-генератору на ОП з мостом Віна, схема якого зображена на рис. 8.9 при збільшенні ємностей конденсаторів $C1$ та $C2$? При збільшенні опорів резисторів $R1$ та $R2$?

РОЗДІЛ 9

РАДІОЗВ'ЯЗОК. МОДУЛЯЦІЯ Й ДЕТЕКТУВАННЯ.

9.1. Модуляція та її види. Радіозв'язок – це бездротове передавання та приймання інформації за допомогою електромагнітних хвиль радіочастотного діапазону (радіохвиль).

Для здійснення радіозв'язку в першу чергу необхідно забезпечити можливість випромінювання електромагнітних хвиль, тобто розповсюдження електромагнітних коливань на великі відстані. Для цього застосовуються радіопередавачі.

Радіопередавачем називається електронний пристрій, призначений для формування радіосигналу, що підлягає випромінюванню. Радіопередавач має здатність самостійно генерувати змінний радіочастотний струм, який підводиться до передаючої антени, яка в свою чергу, випромінює радіохвилі.

Для того щоб передати звуковий сигнал за допомогою радіохвиль, їх треба промодулювати.

Модуляцією називається процес зміни у часі обраної величини одного змінного електричного коливання, що називається модульованим, або несучим, під впливом другого коливання, що називається модулюючим.

Несучим коливанням є коливання радіохвиль, а модулюючим – коливання звукового сигналу.

Для радіозв'язку застосовують два основні види модуляції – амплітудну та частотну.

*Несуче
немодульоване
коливання*

*Модулююче
коливання*

*Модульоване
коливання*

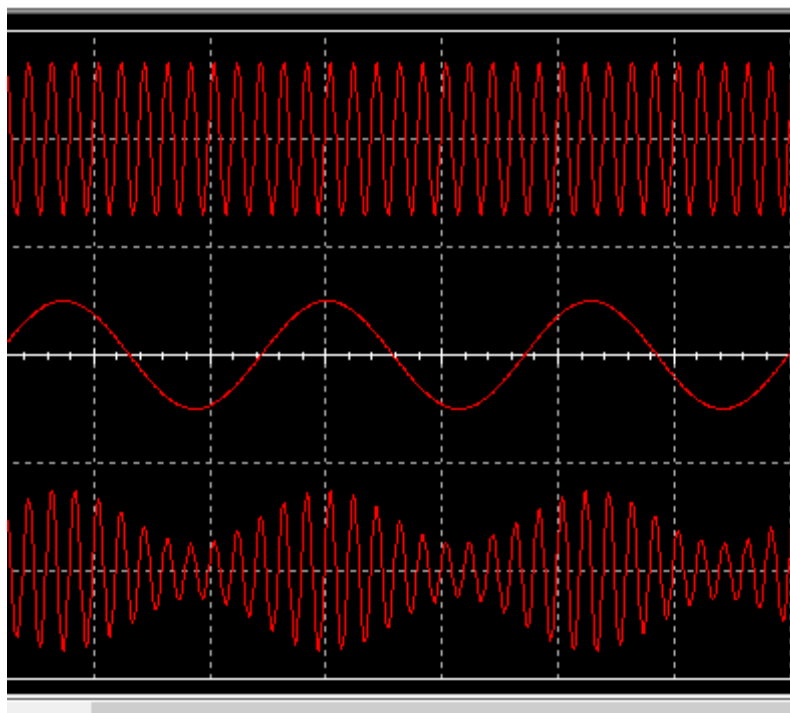


Рис. 9.1. Осцилограми коливань під час амплітудної модуляції

Амплітудна модуляція – це вид модуляції, при якій параметром модульованого коливання, що змінюється є амплітуда його коливань.

На рис. 9.1 зображені осцилограми несучого немодульованого, модулюючого та модульованого коливань під час амплітудної модуляції.

Таким чином, при амплітудній модуляції амплітуда радіохвиль змінюється в такт з коливаннями звукового сигналу, який треба передати.

Частотна модуляція полягає в тому, що несуча частота радіопередавача змінюється в такт зі звуковим сигналом, який треба передати. Така зміна несучої частоти при модуляції радіосигналу називається *девіацією частоти*.

Осцилограми коливань під час частотної модуляції зображені на рис. 9.2.

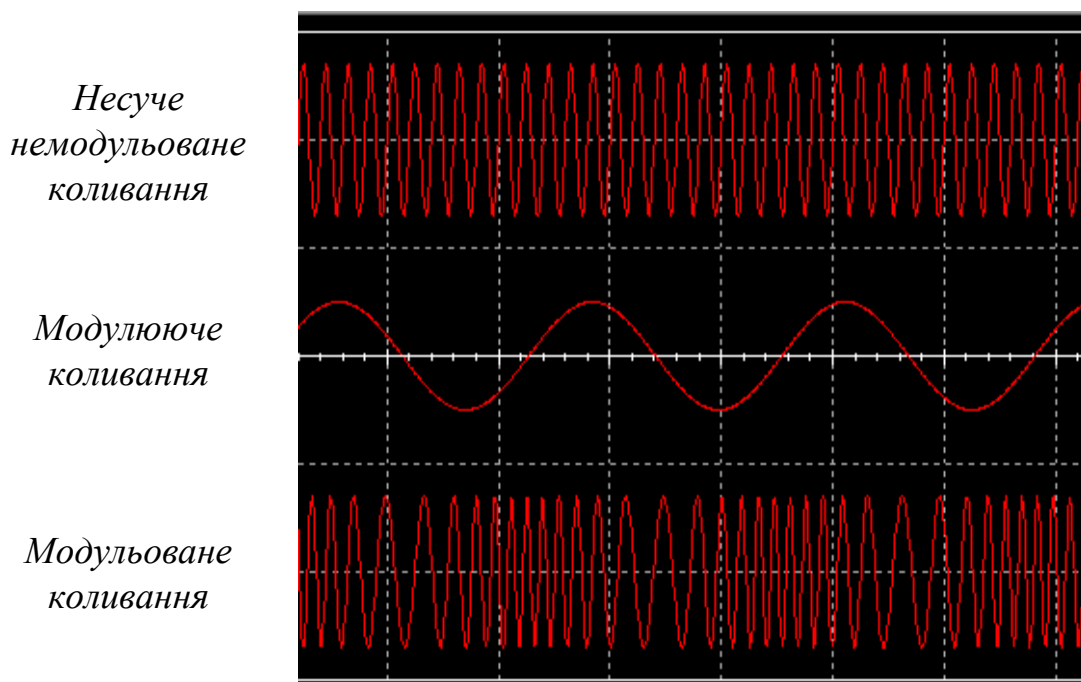


Рис. 9.2. Осцилограми коливань під час частотної модуляції

Для прийому інформації під час радіозв'язку застосовуються радіоприймачі.

Радіоприймачем називається пристрій для приймання електромагнітних хвиль радіодіапазону з наступним перетворенням інформації, яку вони несуть до вигляду, в якому вона може бути використана, зокрема до вигляду звукового мовлення.

У загальному вигляді принцип дії радіоприймача полягає в селекції (виборі), підсиленні, перетворенні, потрібних для користувача радіосигналів. Електромагнітні хвилі є сумішшю потрібного (корисного) радіосигналу, інших радіосигналів, завад різного походження, що наводять у антені мішанину змінних електричних струмів. Отримані таким чином електричні коливання обробляються (перетворюються, підсилюються, фільтруються і т. п.) для відділення необхідного сигналу від завад. У радіомовних приймачах необхідний сигнал зазвичай відбирається за допомогою коливального контуру, налаштованого на частоту необхідного сигналу (несучу частоту передавача) і з'єднаного з антеною. Потім з сигналу виділяється корисна інформація, що придатна для використання: звук, зображення на екрані

телевізора, потік цифрових даних, безперервний або дискретний сигнал для керування виконавчим пристроєм (наприклад, телетайпом або рульовою машинкою), тощо.

Для того щоб виділити звук з радіосигналу, необхідно здійснити його демодуляцію, або детектування. Залежно від того, який тип модуляції застосовується на радіостанції, сигнал якої треба прийняти, детектування у радіоприймачах здійснюється за допомогою амплітудних або частотних детекторів.

9.2. Реалізація амплітудної та частотної модуляції. Розглянемо простий варіант реалізації амплітудної модуляції для передачі сигналу звукової частоти. Для цього пригадаємо схему найпростішого генератора синусоїдального сигналу, що був розглянутий у попередньому розділі (рис. 9.3).

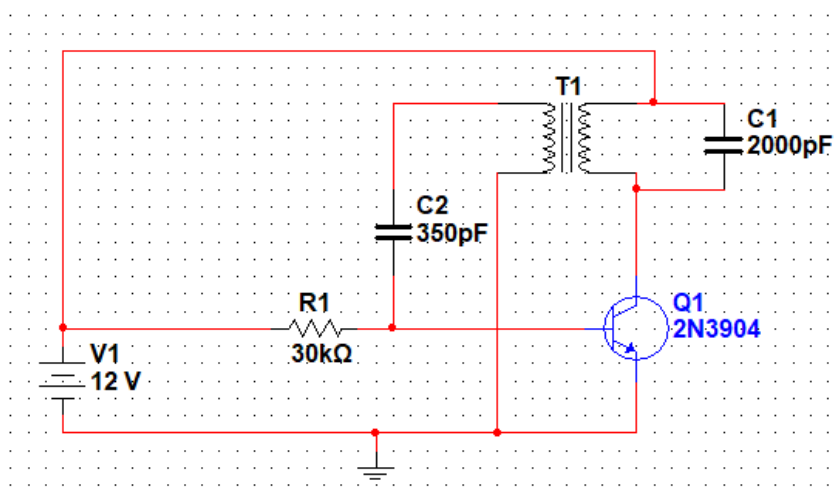


Рис. 9.3. Генератор синусоїдальних коливань

На рис. 9.4 зображена осцилограма коливань цього генератору.

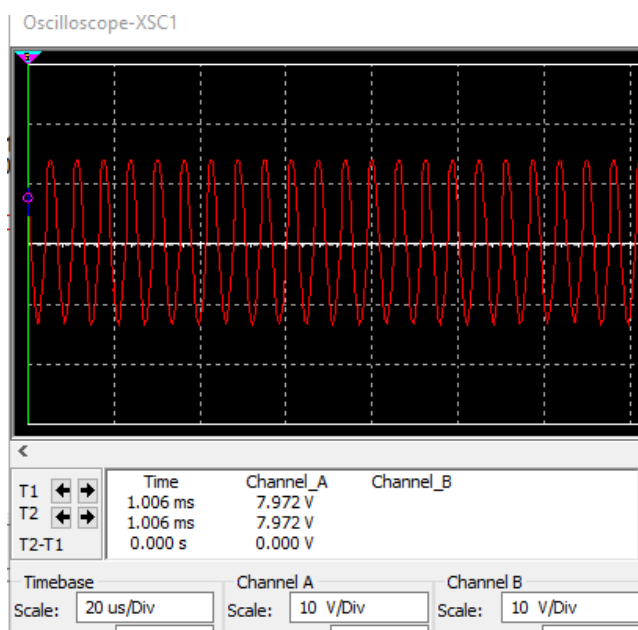


Рис. 9.4. Осцилограма коливань генератору

Частота генератору дорівнює близько 200 кГц, що відповідає радіодіапазону довгих хвиль (ДХ).

Для того щоб здійснити амплітудну модуляцію коливань генератора, треба послідовно з його коливним контуром включити вторинну котушку трансформатора, а до первинної котушки подати сигнал звукового діапазону, який треба передати (рис. 9.5).

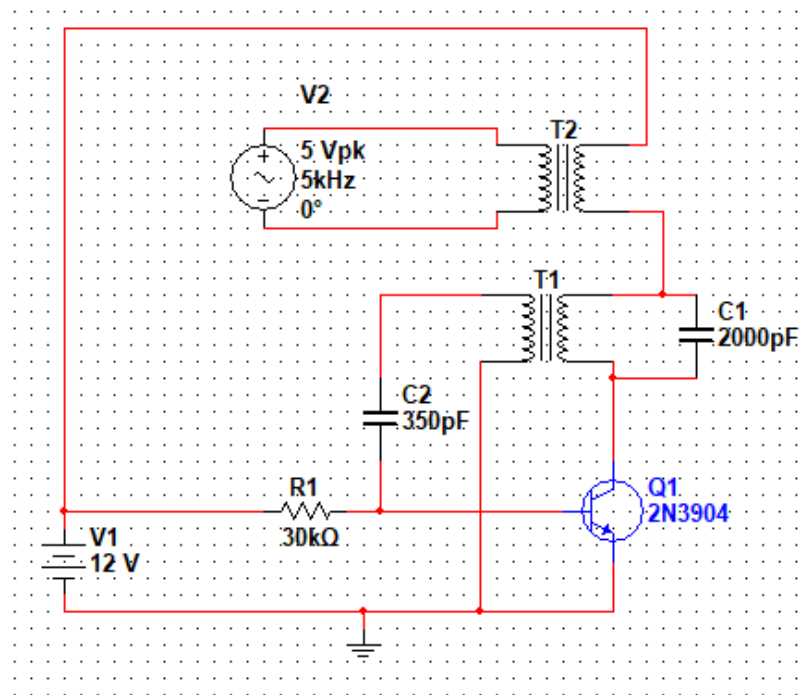


Рис. 9.5. Реалізація амплітудної модуляції

На рис. 9.6 представлена осцилограма отриманих модульованих коливань.

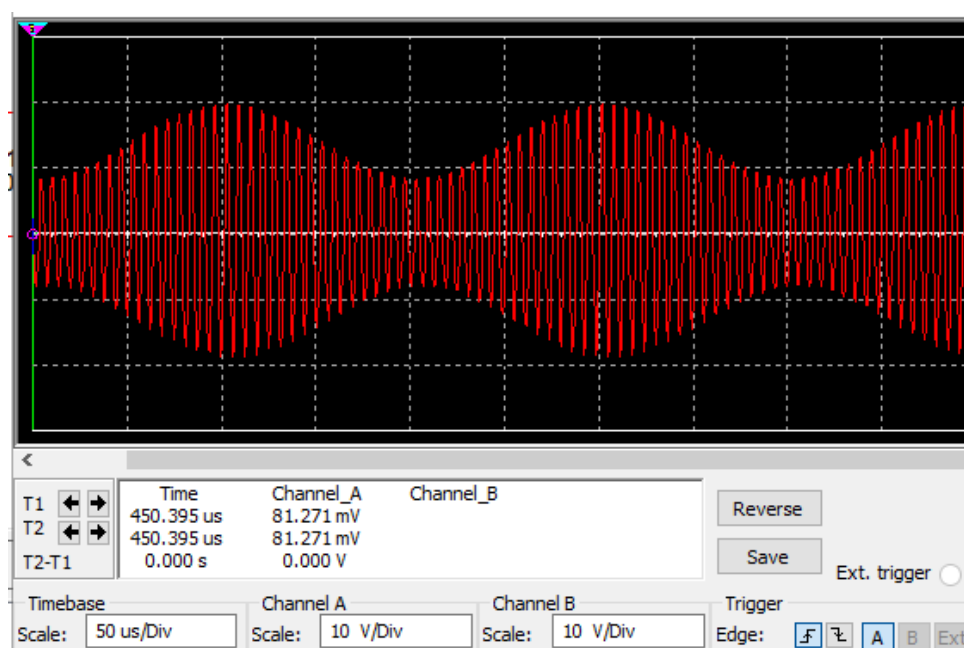


Рис. 9.6. Амплітудно-модульовані коливання генератору

Залишається передати ці коливання до ефіру для того щоб їх можна було прийняти і прослухати за допомогою радіоприймача. Для цього треба на магнітному осерді трансформатору *T1* (рис. 9.5) намотати ще одну котушку і під'єднати до неї антену.

Частотну модуляцію можна здійснити шляхом зміни ємності конденсатора або індуктивності котушки коливного контуру в такт зі звуковою частотою. Більш простою є зміна ємності за допомогою варикапів. Принцип налаштування резонансного контуру за допомогою варикапу зображено на рис. 3.10. Якщо таке налаштування здійснювати зі звуковою частотою, то і частота генератору буде змінюватися в такт зі звуковою частотою.

9.3. Детектування радіосигналів. Найпростішим детектором для демодуляції амплітудно-модульованого радіосигналу є звичайний діод з низьким прямим падінням напруги й достатньо високою робочою частотою, наприклад, діод Шоткі. Діод може підключатися безпосередньо до коливного контуру приймача, або до виходу підсилювача радіочастоти. Паралельно до детекторного діоду підключається конденсатор, який слугує для згладжування радіочастотних пульсацій.

Схема з діодним детектором представлена на рис. 9.7.

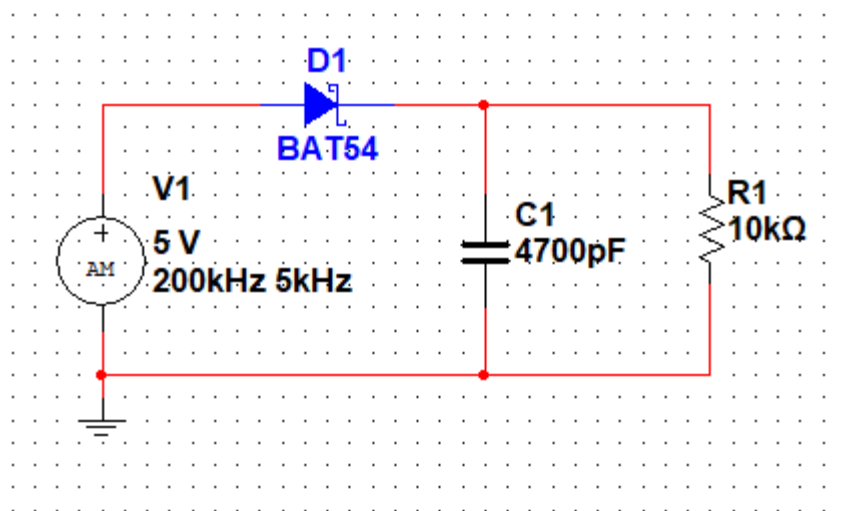


Рис. 9.7. Схема з діодним детектором

V1 на даній схемі – це джерело амплітудно-модульованого радіосигналу (коливний контур або підсилювач радіочастоти приймача). Конденсатор *C1* називається блокувальним. Він слугує для згладжування радіочастотних пульсацій. Резистор *R1* символізує опір навантаження, яким може бути вхід підсилювача звукової частоти.

На рис. 9.8 зображені осцилограми амплітудно-модульованого радіосигналу та сигналу звукової частоти, отриманого після детектування на опорі навантаження. Постійна складова вихідного сигналу відділяється від змінної за допомогою конденсатора на вході підсилювача звукової частоти.

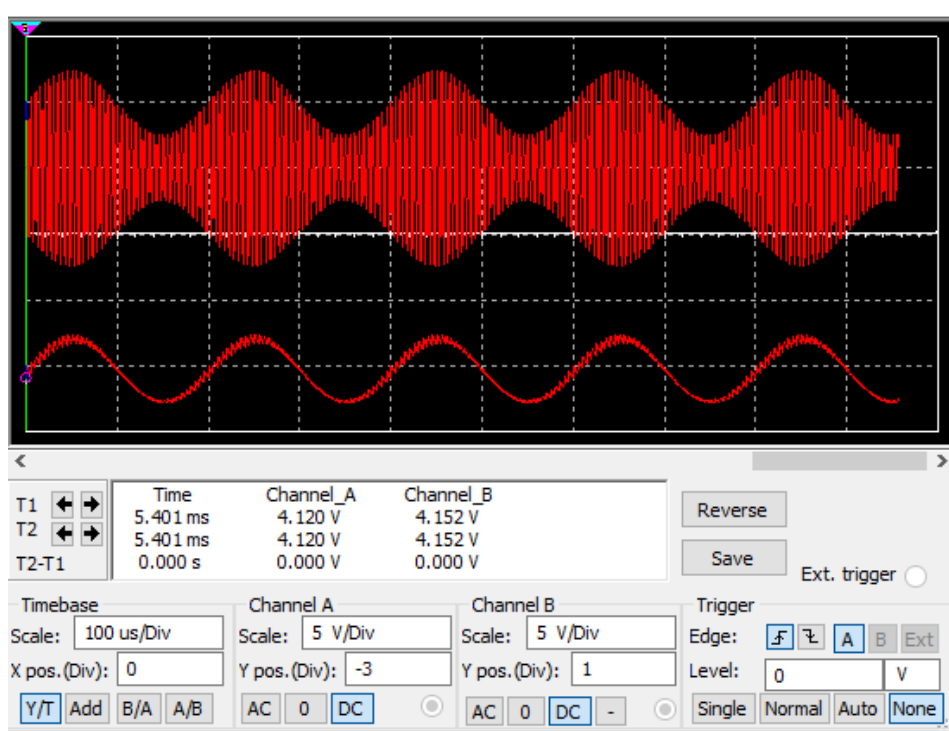


Рис. 9.8. Осцилограми вхідного (зверху) і вихідного (знизу) сигналів амплітудного діодного детектора

Найбільш простим варіантом здійснення детектування частотно-модульованого радіосигналу є робота коливного контуру радіоприймача на скаті його частотної характеристики. Для цього контур відстроюється від несучої частоти. Якщо частота радіосигналу змінюється в такт зі звуковою частотою, то й амплітуда коливань контуру також змінюється з цією частотою. При наближенні несучої частоти до резонансної частоти контуру вона збільшується, а при віддаленні – зменшується. За таких умов вихідний сигнал контуру стає амплітудно-модульованим і його можна далі детектувати за допомогою амплітудного детектора.

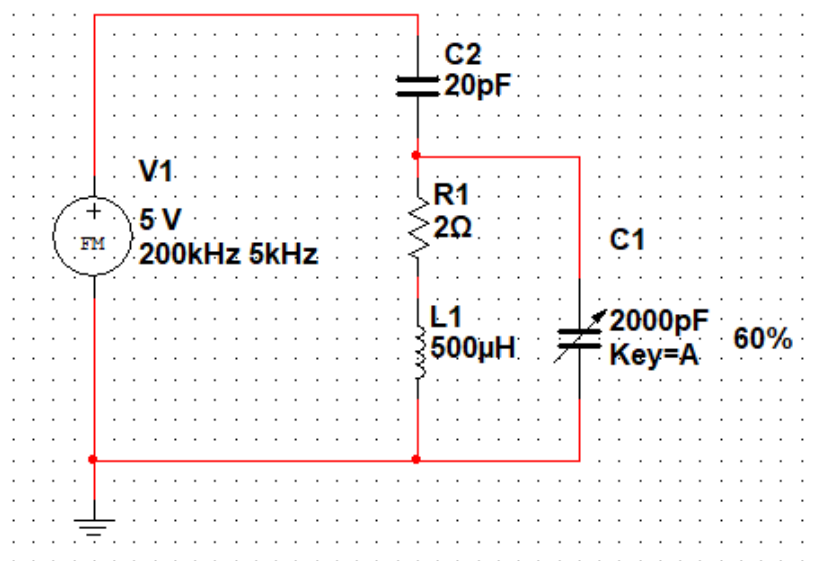


Рис. 9.9. Модель вхідного контуру приймача

На рис. 9.9 зображено схему моделі вхідного коливного контуру радіоприймача, відстроєного від несучої частоти.

V_1 на схемі символізує частотно-модульований радіосигнал у вигляді радіохвиль. Несуча частота радіосигналу дорівнює 200 кГц, а частота модуляції – 5 кГц. Кондесатор C_2 символізує ємність приймаючої антени. Котушка L_1 з власним активним опором, який символізує резистор R_1 , та конденсатор змінної ємності C_1 утворюють вхідний коливний контур радіоприймача. На рис. 9.10 зображені осцилограми вхідного частотно-модульованого сигналу і вихідного амплітудно-модульованого сигналу.

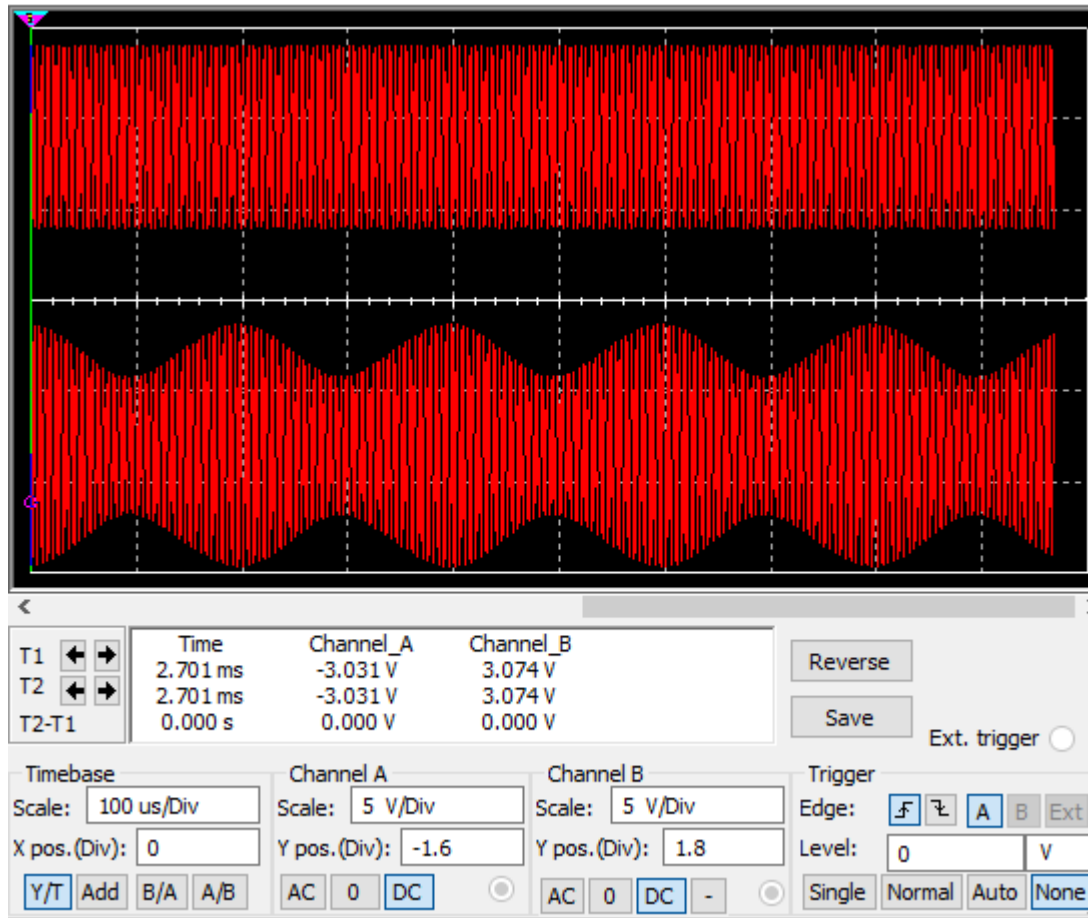


Рис. 9.10. Осцилограми вхідного частотно-модульованого сигналу (зверху) і вихідного амплітудно-модульованого сигналу (знизу) найпростішого частотного детектора.

Після отримання амплітудно-модульованого сигналу його можна детектувати за допомогою амплітудного детектора.

Ми розглянули найпростіші принципи й схеми здійснення модуляції й детектування радіосигналів. У сучасних передавачах та приймачах застосовуються більш досконалі, але в той же час і складніші схемні рішення, інформація про які міститься у більш спеціалізованих джерелах.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 1

FM-ПЕРЕДАВАЧ

Мета: Виготовити і випробувати прототип FM-передавача.

Матеріали та обладнання: макетна плата; біполярний рпн-транзистор 2п3904; резистори опором 750 Ом та 4,7 кОм, 0,25...1 Вт; конденсатори ємністю 4,7 пФ, 1 нФ і 22 нФ з робочою напругою 50 В; конденсатор змінної ємності 6...30 пФ; електретний мікрофон; емальований або ізольований монолітний дріт діаметром 0,5 мм (по міді); з'єднувальні провідники; елемент живлення «Крона», 9 В; тримач елементу живлення типу «Крона» (контактна площадка зі з'єднувальними проводами); циліндричне тіло діаметром 4...5 мм; FM-радіоприймач; джерело звуку; діелектрична викрутка.

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися зі схемою та принципом дії FM-передавача.

Принципова схема FM-передавача, прототип якого пропонується виготовити в даній роботі, представлена на рис. 9.11.

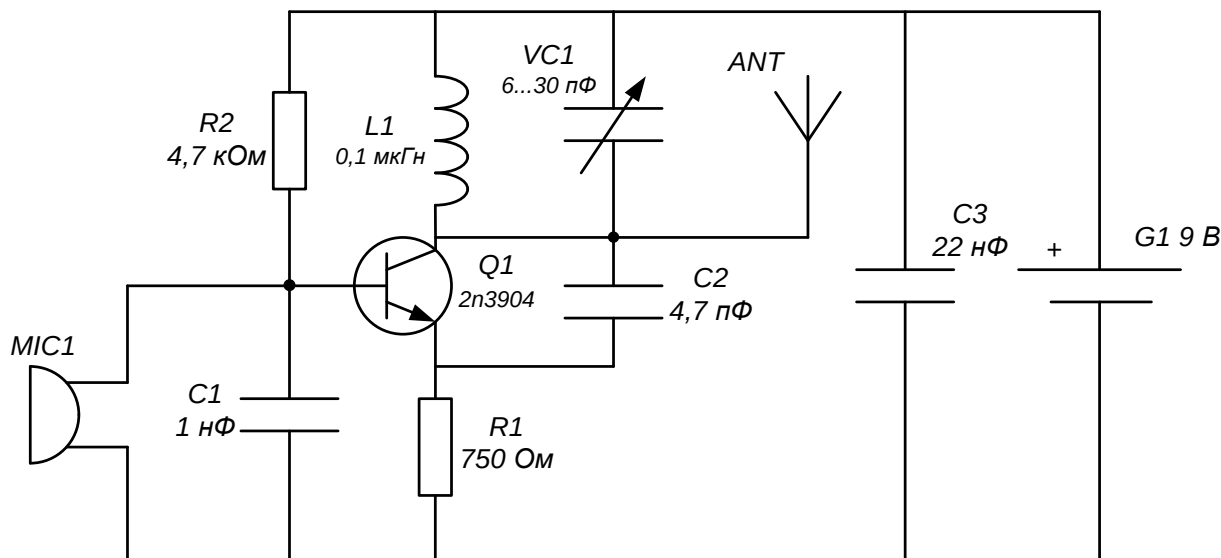


Рис. 9.11. Принципова схема FM-передавача

Усі елементи схеми крім електретного мікрофону *MIC1* та антени *ANT* утворюють високочастотний генератор за схемою Колпитця, частота якого визначається в основному індуктивністю котушки *L1* та ємністю конденсатора *VC1*, які утворюють паралельний коливний контур. Оскільки конденсатор *VC1* є конденсатором змінної ємності, він слугує для регулювання частоти генератору. Частота генератору, на яку він налаштований є несучою частотою.

У FM-передавачах та приймачах застосовується частотна модуляція. У даній схемі звуковий модулюючий сигнал подається від мікрофону до бази

транзистора Q1. При цьому в такт зі звуком змінюється колекторний струм транзистора і ємності його р-п переходів, що викликає відповідні девіації несучої частоти.

На рис. 9.12 представлено розміщення виводів для транзисторів 2n3904.

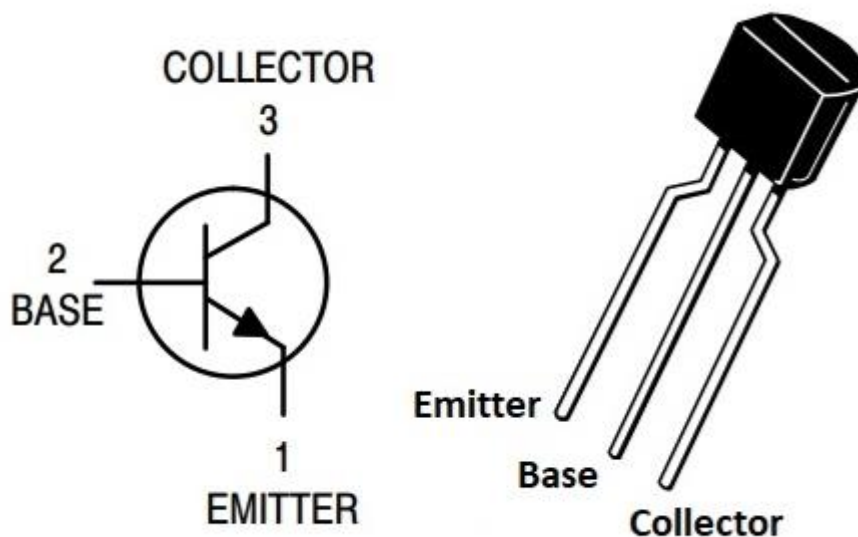


Рис. 9.12. Розміщення виводів транзисторів 2N3904

Котушка L1 безкаркасна, має 5...6 витків, намотаних на оправці (циліндричному тілі) діаметром 4...5 мм емальованим, або ізолюваним дротом діаметром близько 0,5 мм по міді.

Антену являє собою з'єднувальний провід під макетні плати, одним кінцем з'єднаним із колектором транзистора і розташовується вертикально.

2. Виготовлення прототипу передавача.

2.1. На циліндричному тілі намотати 5...6 витків емальованим, або ізолюваним дротом, залишивши 5...10 мм від обох кінців.

2.2. Очистити кінці котушки від емалі, або ізоляції.

2.3. Акуратно зняти котушку з оправки.

2.4. Скласти на макетній платі прототип FM-передавача у відповідності до схеми на рисунку 9.11. Під час складання розміщувати елементи якомога компактніше, по можливості використовувати отвори на макетній платі для розміщення одразу двох виводів елементів. Для з'єднання виводів елементів замість з'єднувальних проводів під макетні плати використовувати перемички, виготовлені з того самого дроту, яким була намотана котушка. Приклад зібраного передавача представлено на рис. 9.13.

2.5. Включити джерело звуку, наприклад музику на телефоні, або ПК.

2.6. Розмістити передавач мікрофоном до джерела звуку.

2.7. Увімкнути FM-радіоприймач і налаштувати його на частоту близько 90 МГц (90 FM), так щоб не відбувалося прийому радіостанцій. Радіоприймач розташувати динаміком від джерела звуку.

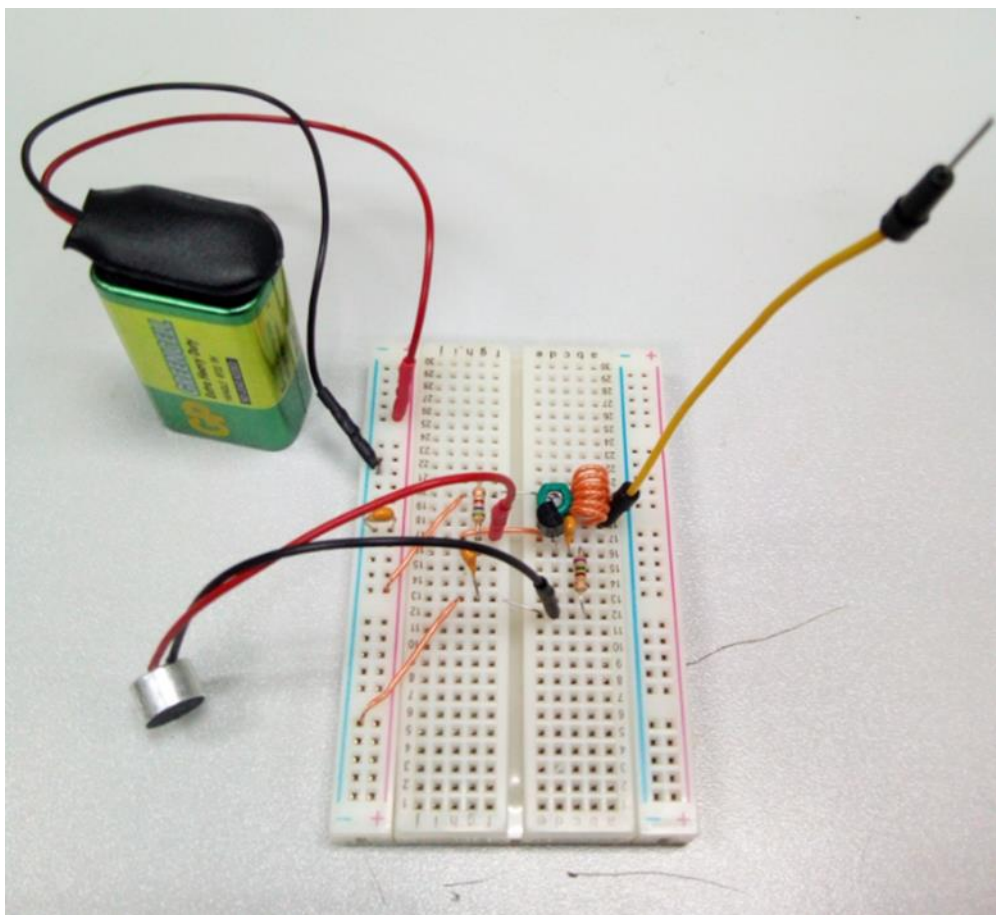


Рис. 9.13. Приклад зібраного передавача

2.8. За допомогою діелектричною викрутки дуже повільно обертати ротор конденсатору змінної ємності, намагаючись налаштувати його так, щоб звук відтворився у динаміку приймача. Якщо вдасться почути хоча б переривчасте відтворення звуку, припинити налаштування передавача, а замість цього підлаштувати приймач до чіткого відтворення звуку з якомога меншими фоном і кількістю завад.

2.9. Якщо з першого разу налаштування не вийшло, повернутися до виконання п. 2.7, змінюючи частоту приймача з кроком не більше 2 МГц, або по трохи змінювати положення ротору конденсатору змінної ємності на передавачі, а за допомогою приймача перевіряти весь частотний діапазон.

2.10. Після досягнення чіткого відтворення звуку у динаміку приймача, взяти його і віддалятися разом з ним від передавача, поки відтворення звуку не припиниться. В такий спосіб визначити радіус дії передавача.

2.11. Збільшити довжину антени до 75 см, що відповідає приблизно 0,25 довжини радіохвиль, які випромінює передавач, і знову визначити радіус його дії. Антену при цьому розташовувати вертикально.

3. Зробити висновки.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 2

FM-ПРИЙМАЧ

Мета: Виготовити і випробувати прототип FM-приймача.

Матеріали та обладнання: макетна плата; біполярний ррп-транзистор BC107; резистори опором 2,2кОм, 100 кОм, 150 кОм та 200 кОм, 0,25...1 Вт; змінний резистор 50 кОм; керамічні конденсатори ємністю 22 пФ, 50 пФ, 100 пФ з робочою напругою 50 В; електролітичний конденсатор 10 мкФ; конденсатор змінної ємності 6...30 пФ; емальований або ізольований монолітний дріт діаметром 0,5 мм (по міді); з'єднувальні провідники; елемент живлення «Крона», 9 В; тримач елементу живлення типу «Крона» (контактна площадка зі з'єднувальними проводами); циліндричне тіло діаметром 4...5 мм; активні аудіоколонки; діелектрична викрутка; гніздо під штекер аудіоколонок.

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися зі схемою та принципом роботи FM-приймача.

Загальний вигляд (варіант) прототипу FM-приймача представлено на рис. 9.14.



Рис. 9.14. Прототип FM-приймача

Принципова схема FM-приймача, представлена на рис. 9.15.

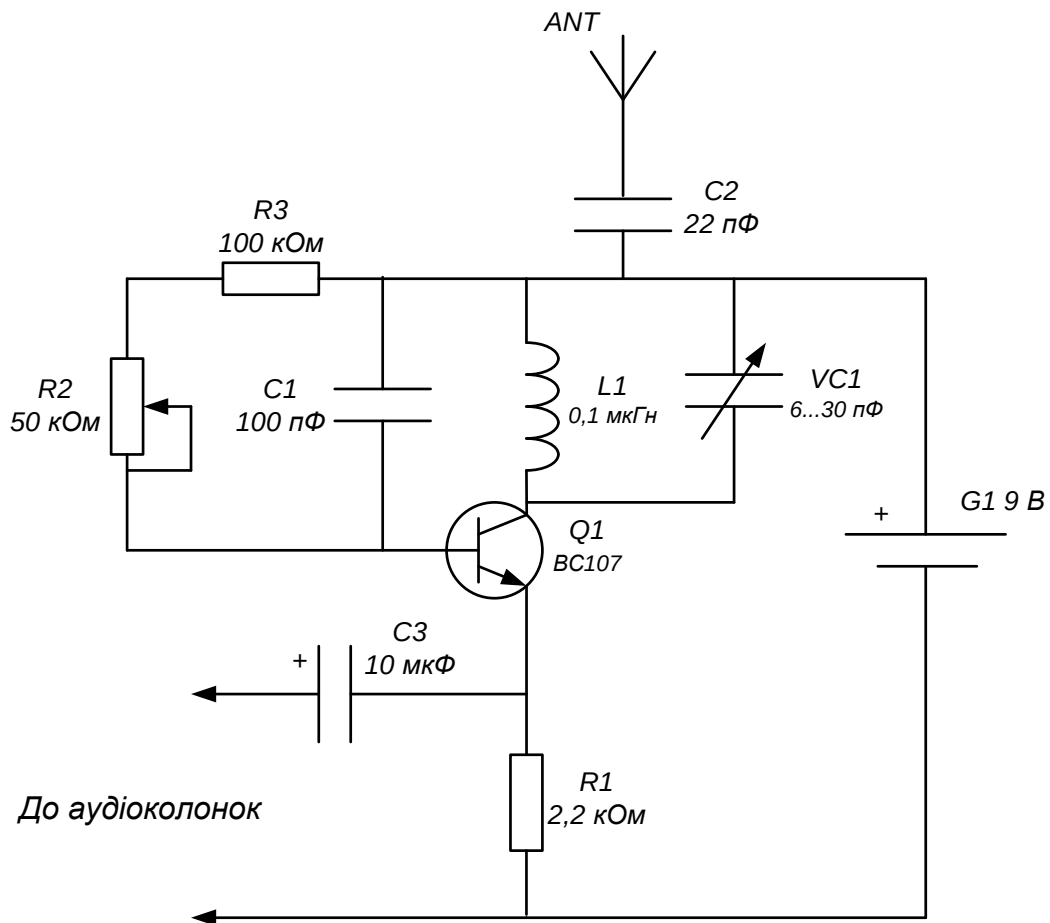


Рис. 9.15. Принципова схема FM-приймача

Даний тип приймача називається *регенеративним*. Усі елементи схеми, крім конденсаторів $C2$, $C3$ і антени ANT утворюють високочастотний генератор за схемою Колпитця, який знаходиться на порозі збудження коливань. Поріг збудження генератору підлаштовується змінним резистором $R2$. Котушка $L1$ та змінний конденсатор $VC1$ утворюють коливний контур, який через конденсатор $C2$ з'єднаний з антеною. При налаштуванні коливного контуру за допомогою змінного конденсатору на частоту радіостанції, амплітуда радіосигналу у контурі збільшується і генератор переходить у збуджений стан. Під час девіацій несучої частоти, зумовлених частотною модуляцією по звуковому сигналу, амплітуда коливань у контурі змінюється в такт з девіаціями частоти, а відповідно, і в такт зі звуковим сигналом. Дані зміни амплітуди коливань у контурі призводять до відповідних змін струму емітера транзистора $Q1$, що в свою чергу викликає відповідні зміни напруги на резисторі $R1$. Отриманий на резисторі $R1$ сигнал через конденсатор $C3$ подається до входу аудіоколонок, які містять підсилювач звукової частоти. Високочастотна складова сигналу

підсилювачем аудіоколонок не сприймається, тому вони відтворюють лише потрібний звуковий сигнал радіостанції.

На рис. 9.16 представлене розміщення виводів для транзистора BC107.



Рис. 9.16. Розміщення виводів транзисторів BC107

Котушка *L1* безкаркасна, має 5...6 витків, намотаних на оправці (циліндричному тілі) діаметром 4...5 мм емальованим, або ізольованим дротом діаметром близько 0,5 мм по міді.

Антену являє собою з'єднувальний провід, або відрізок іншого проводу довжиною близько 75 см, розташований вертикально, і з'єднаний з конденсатором *C2* з'єднувальним проводом під макетні плати.

2. Виготовлення прототипу FM-приймача.

2.1. На циліндричному тілі намотати 5...6 витків емальованим, або ізольованим дротом, залишивши 5...10 мм від обох кінців.

2.2. Очистити кінці котушки від емалі, або ізоляції.

2.3. Акуратно зняти котушку з оправки.

2.4. Скласти на макетній платі прототип FM-приймача у відповідності до схеми на рис. 9.15. Під час складання розміщувати елементи якомога компактніше, по можливості використовувати отвори на макетній платі для розміщення одразу двох виводів елементів. Для з'єднання виводів елементів замість з'єднувальних проводів під макетні плати використовувати перемички, виготовлені з того самого дроту, яким була намотана котушка. Приклад зібраного приймача без підключення живлення представлено на рис. 9.17.

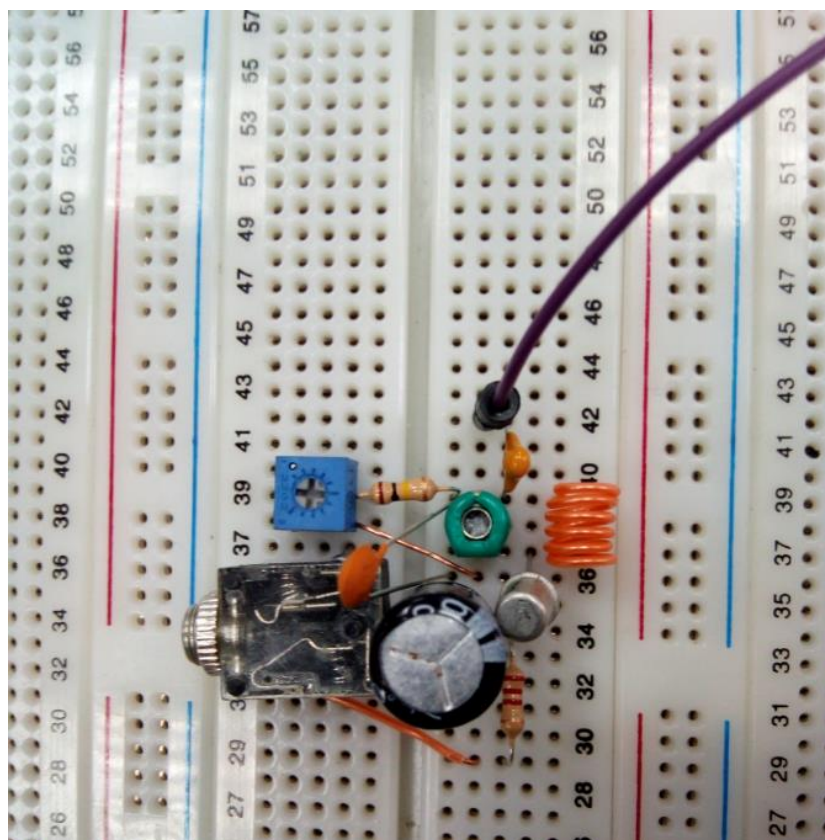


Рис. 9.17. Приклад зібраної схеми приймача

2.5. Підключити до схеми аудіоколонки.

2.6. Підключити до схеми живлення.

2.7. Підключити аудіоколонки до мережі, увімкнути їх і встановити максимальну гучність.

2.8. Встановити змінний резистор $R2$ в одне з крайніх положень.

2.9. За допомогою діелектричної викрутки дуже плавно обертати ротор змінного конденсатора намагаючись піймати якусь радіостанцію. Якщо вдалося почути хоча б переривчасте мовлення радіостанції, припинити обертати ротор змінного конденсатора і за допомогою резистору $R2$ підлаштувати приймач до максимально чіткого відтворення мовлення з якомога меншими фоном і кількістю завад.

2.10. При цьому ж положенні змінного резистора за допомогою змінного конденсатора спробувати вловити мовлення інших радіостанцій. При цьому мовлення інших радіостанцій також підлаштовувати змінним резистором.

2.11. Якщо з першого разу налаштування не вийшло, повернутися до виконання п. 2.8, встановивши змінний резистор у інше крайнє положення.

2.12. Спробувати змінювати номінал резистору $R3$ на 150 та 200 кОм замість початкового номіналу 100 кОм, та номінал конденсатору $C1$ на 50 та 22 пФ замість початкового номіналу 100 пФ.

2.13. Під час прийому радіостанцій прослуховувати їх назву та частоту та фіксувати у записнику.

3. Зробити висновки.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 3

РЕЄСТРАТОР ГРОЗИ

Мета: Виготовити і випробувати прототип реєстратора грози.

Обладнання: макетна плата; дроселі 680 мкГн та 10 мГн; керамічні конденсатори ємністю 360 пФ, 10 нФ (2 шт), 4,7 нФ з робочою напругою 50 В; електролітичний конденсатор 100...400 мкФ; резистори опором 200 кОм, 4,7 кОм, 20 кОм, 2,2 кОм, 2,7 кОм, 30 Ом та 150 Ом, 0,25...1 Вт; змінний резистор 10 кОм; біполярні рпн-транзистори BC107 та 2N3904 (2 шт); біполярний рпн-транзистор 2N3906; діод ВАТ41; червоний світлодіод; з'єднувальні провідники; елемент живлення 3 В; тримач елементу живлення зі з'єднувальними проводами; викрутка.

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися зі схемою та принципом дії реєстратора грози.

Загальний вигляд (варіант) прототипу реєстратора грози представлено на рис. 9.18.

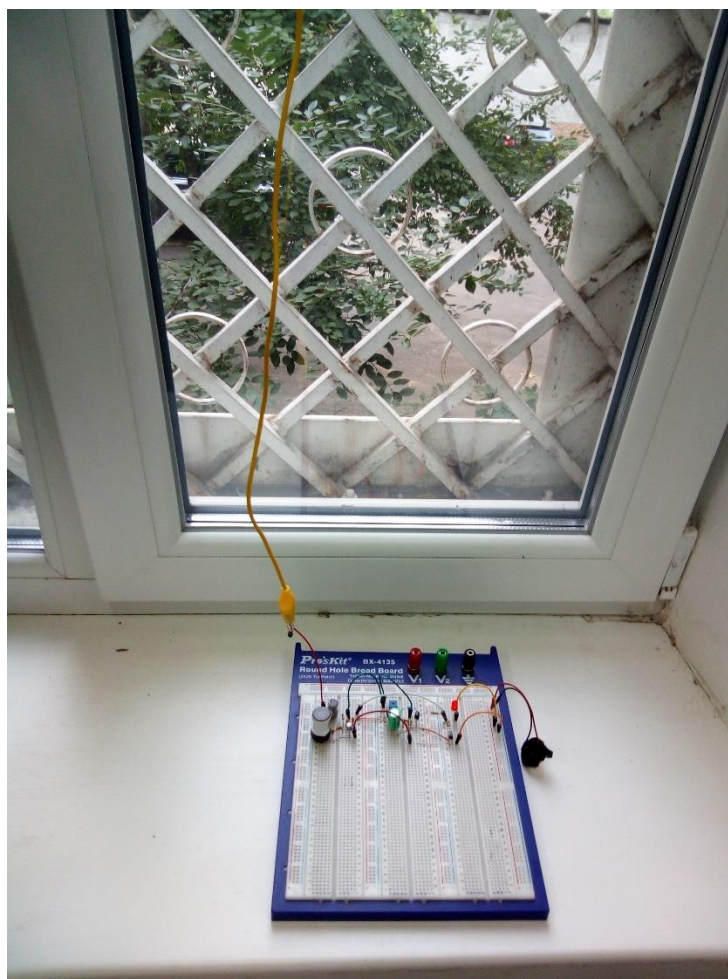


Рис. 9.18. Прототип реєстратора грози

Реєстратором грози називається електронний пристрій, який фіксує віддалені грозові розряди.

Відомі два методи реєстрації грозової активності – статичний та електромагнітний. Статичний метод ґрунтується на зміні напруженості електростатичного поля Землі від близько 100 В/м в звичайному стані до 1...40 кВ/м перед грозою.

Електромагнітний метод ґрунтується на прийомі і детектуванні електромагнітних хвиль від розрядів блискавок віддалених гроз.

У даній практичній роботі пропонується виготовити і випробувати прототип реєстратора грози, дія якого ґрунтується на електромагнітному методі.

Принципова схема реєстратора грози представлена на рис. 9.19.

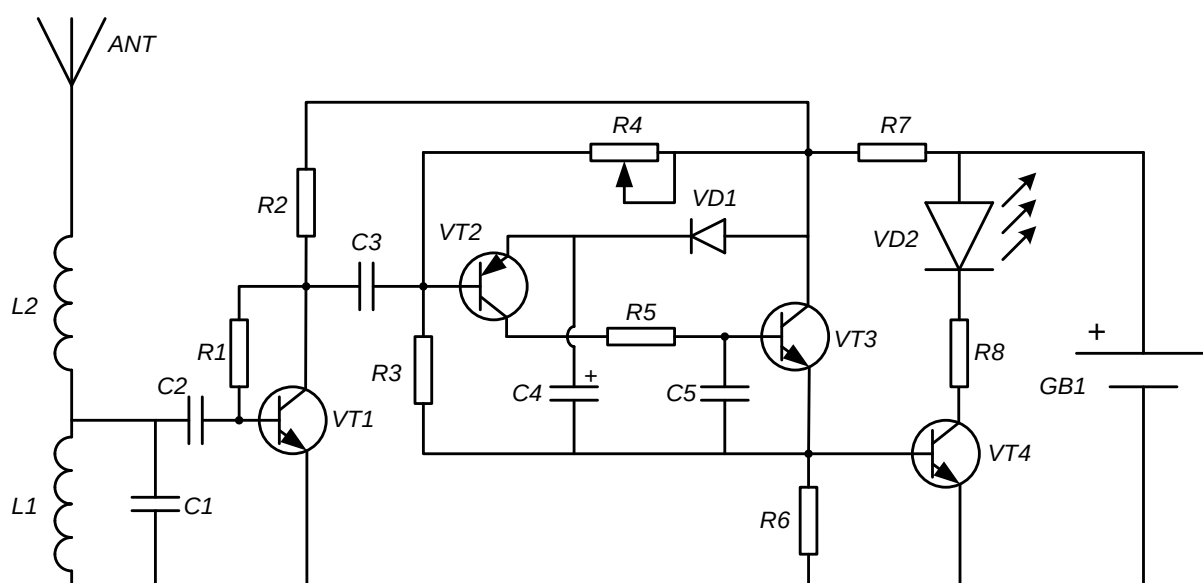


Рис. 9.19. Принципова схема реєстратора грози

Котушка індуктивності $L1$ та конденсатор $C1$ утворюють коливний контур. Сигнал з антени ANT подається до коливного контуру через котушку індуктивності $L2$. Котушка $L2$ слугує для підвищення чутливості антени. В радіотехніці таке підвищення чутливості антени за допомогою додаткової котушки називається *подовженням антени*, а котушка – *катушкою-подовжувачем*.

Коли у антені наводиться сигнал від розряду блискавки, у коливному контурі виникають коливання, які підсилюються транзистором $VT1$. Підсилений сигнал подається до реєструючого каскаду, виконаного на транзисторах $VT2 - VT4$. При відкритті транзистора $VT2$, конденсатор $C4$, який був попередньо зарядженим розряджається через транзистор $VT2$ і резистор $R5$ на базу транзистора $VT3$. При відкриванні транзистора $VT3$ відкривається і транзистор $VT4$. При розряді конденсатора $C4$, через діод $VD1$ та резистор $R6$ починає текти струм, який заряджає конденсатор $C4$ і забезпечує більш тривале відкриття транзистора $VT4$. При відкритті транзистора $VT4$ загоряється світлодіод $VD2$. Збільшення тривалості

відкриття транзистора $VT4$ необхідне для того щоб світлодіод загорявся на час, достатній для того щоб людське око його реєструвало.

Змінним резистором $R4$ регулюється поріг чутливості реєструючого каскаду.

Коливний контур реєстратора грози рекомендується налаштувати на частоту 300...350 кГц. Насправді під час грозового розряду генерується електромагнітний імпульс, який охоплює досить широкий діапазон частот. Електромагнітні хвилі більш низьких частот (більш довгі) розповсюджуються на більш далекі відстані, а більш високих частот (більш короткі) – навпаки, на менші відстані. Частота налаштування контуру на 300...350 кГц забезпечить впевнену реєстрацію грозових розрядів на відстані до 80...100 км без реєстрації дуже далеких грозових розрядів, що зазвичай і представляє інтерес для прогнозування і своєчасного захисту від грози. Крім того в даному частотному діапазоні в Україні, а також у сусідніх країнах не працюють потужні радіостанції, які могли б викликати хибні спрацьовування приладу.

Номінальні параметри (номінали) та найменування компонентів реєстратора грози представлені у таблиці 9.1.

Таблиця 9.1. Номінальні параметри та найменування електронних компонентів реєстратора грози

Елемент схеми	Номінал (найменування)	Елемент схеми	Номінал (найменування)
$L1$	720 мкГн	$R5$	2,2 кОм
$L2$	10 мГн	$R6$	2,7 кОм
$C1$	360 пФ	$R7$	30 Ом
$C2$	10 нФ	$R8$	150 Ом
$C3$	10 нФ	$VT1$	BC107
$C4$	100...400 мкФ	$VT2$	2N3906
$C5$	4,7 нФ	$VT3, VT4$	2N3904
$R1$	200 кОм	$VD1$	ВАТ41
$R2$	4,7 кОм	$VD2$	Любий, червоний
$R3$	20 кОм	$GB1$	3 В
$R4$	10 кОм	-	-

Антену являє собою відрізок проводу довжиною близько 1,5 м, розташований вертикально, і з'єднаний з дроселем $L2$ з'єднувальним проводом під макетні плати.

2. Виготовлення прототипу реєстратора грози.

2.1. Скласти на макетній платі прототип реєстратора грози у відповідності до схеми на рисунку 9.19. Під час складання розміщувати елементи якомога компактніше, по можливості використовувати отвори на макетній платі для розміщення одразу двох виводів елементів. Для з'єднання

виводів елементів коливного контуру і каскаду підсилення на транзисторі VT1 замість з'єднувальних проводів під макетні плати використовувати перемички, виготовлені з мідного дроту. Приклад зібраного реєстратора грози представлено на рисунку 9.20.

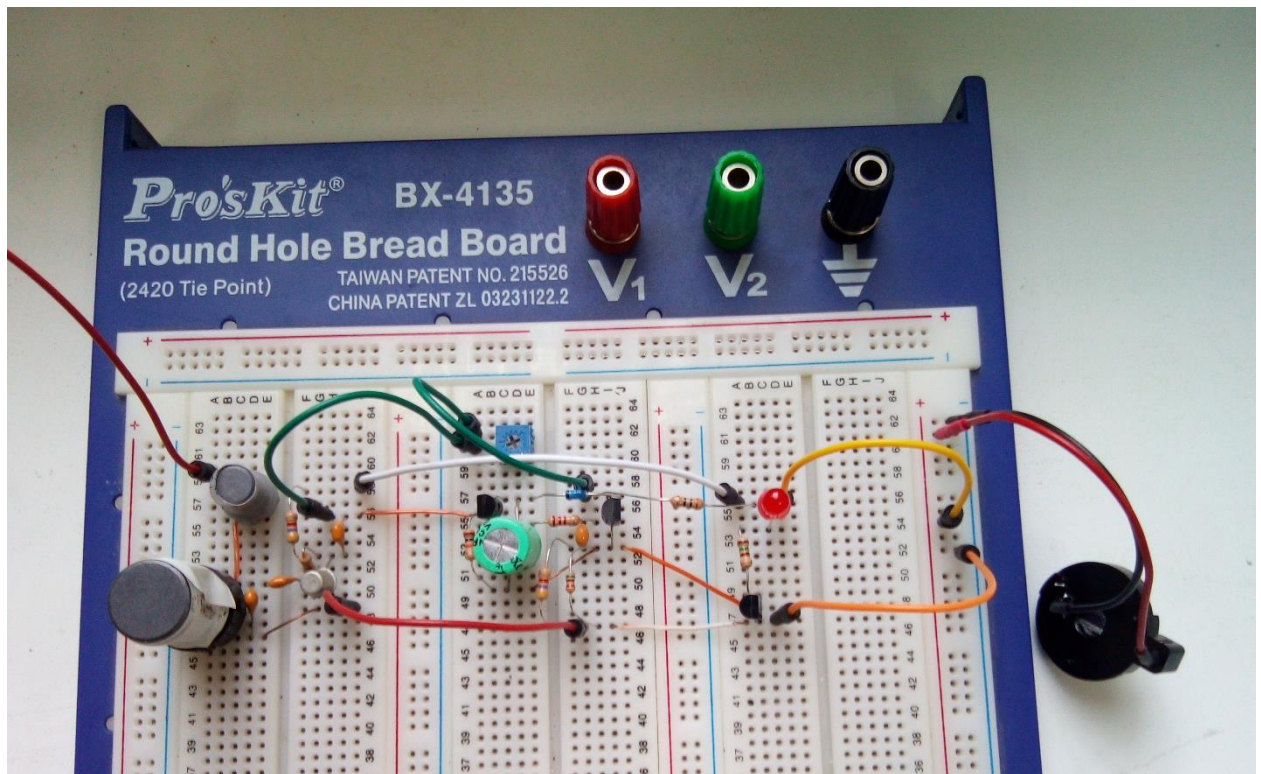


Рис. 9.20. Приклад зібраної схеми реєстратора грози

2.2. Розташувати антену вертикально, біля вікна.

2.3. Підключить реєстратор грози до антени.

2.4. Здійснити налаштування порогу чутливості реєстратора грози. Для цього експериментально встановити таке положення резистора R_4 , при якому світлодіод реєстратора буде загорятися при роботі іскрової електричної запальнички, розташованої на відстані 1,5...2 м від антени.

2.5. Приступити до реєстрації віддалених гроз. При цьому паралельно з власними спостереженнями спостерігати за даними онлайн сервісу грозопеленгації [LightningMaps.org](https://www.lightningmaps.org) за посиланням: <https://www.lightningmaps.org/#m=oss;t=3;s=200;o=0;b=;ts=0;y=41.3108;x=40.8252;z=4;d=2;dl=3;dc=0;>. Звернути увагу, що дані пеленгації гроз у даному онлайн сервісі відображаються з запізненням близько 2 с. Щоразу після спрацювання реєстратора фіксувати, в якому місці онлайн сервіс зафіксує розряд та фіксувати відстань.

3. Після набору достатньої кількості даних, дійти висновків про дальність реєстрації грозових розрядів створеним приладом.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

1. У моделювальному комп'ютерному середовищі змодельуйте схему пристрою для реалізації амплітудної модуляції, зображену на рис. 9.5. Визначте точне значення несучої частоти. Підберіть параметри коливального контуру так, щоб несуча частота стала дорівнювати 500 кГц.

2. У моделювальному комп'ютерному середовищі змодельуйте схему вхідного контуру радіоприймача, зображену на рис. 9.9 та здійсніть налаштування, так, щоб з частотно-модульованого сигналу одержати амплітудно-модульований сигнал. Змініть несучу частоту з 200 на 500 кГц, підберіть параметри коливального контуру і здійсніть аналогічне налаштування.

3. У моделювальному комп'ютерному середовищі змодельуйте схему вхідного контуру радіоприймача з налаштуванням за допомогою варикапу (рис. 9.21), та здійсніть налаштування, так, щоб з частотно-модульованого сигналу одержати амплітудно-модульований сигнал.

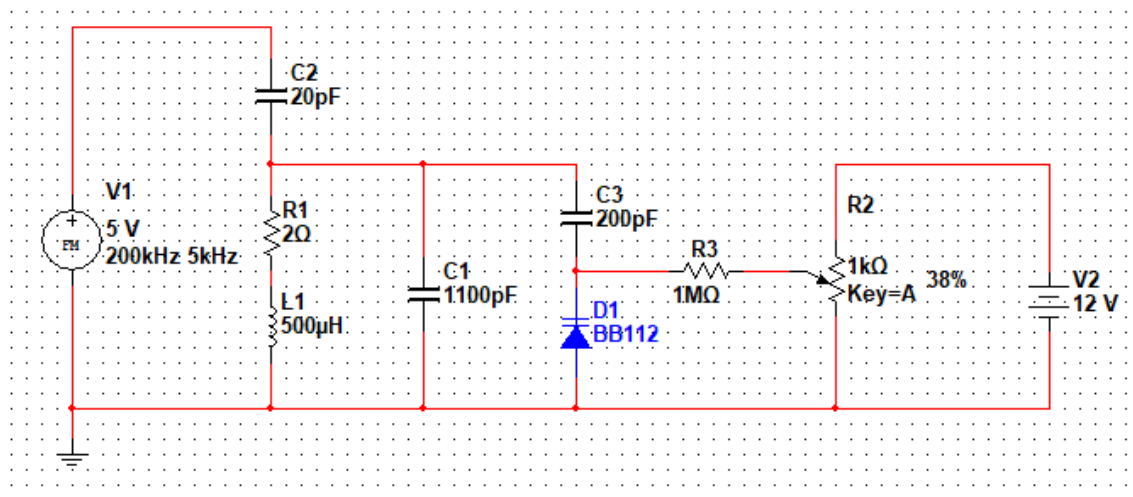


Рис. 9.21. Модель вхідного контуру приймача з налаштуванням за допомогою варикапу.

4. Знайдіть в мережі технічну документацію на варикап BB112 та визначте, в яких межах може змінюватися його ємність у схемі на рис. 9.21. Розрахуйте діапазон частот коливного контуру у схемі на рис. 9.21.

РОЗДІЛ 10

ЦИФРОВА ТЕХНІКА

10.1. Системи числення. Цифрова техніка – це галузь техніки (електроніки), в якій сигнали, що діють у схемах, на відміну від аналогової техніки, можуть мати лише два крайні (дискретні) рівні: високий та низький. Елементи схем, зокрема транзистори працюють як електронні ключі і можуть знаходитися в одному з крайніх станів – пропускання (включення) або запирання (виключення).

Головними перевагами цифрової техніки є висока надійність та завадостійкість.

Інформаційні сигнали у цифровій техніці передаються у вигляді цифр, а її основу утворює двійкова, або бінарна система виразу цифр. Математичний апарат, пов'язаний з двійковою системою числення називається булевою алгеброю.

У двійковій системі числення будь яке число вдається записати за допомогою 1 або 0. Пояснення двійкової системи числення простіше за все провести у порівнянні зі звичною десятковою системою. Як відомо, у десятковій системі для запису чисел використовується десять цифр: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9. Позиція (положення) кожної цифри у числі, записаному у десятковій системі, визначає її значення. Наприклад цифра 3 у числі 235 визначає три десятки, тобто 30, а у числі 2350 – три сотні, тобто 300. Для цих прикладів можна записати:

$$235 = 2 \cdot 10^2 + 3 \cdot 10^1 + 5 \cdot 10^0;$$

$$2350 = 2 \cdot 10^3 + 3 \cdot 10^2 + 5 \cdot 10^1 + 0 \cdot 10^0.$$

Легко помітити, що у десятковій системі кожне число записується у вигляді послідовності коефіцієнтів при послідовних степенях основи цієї системи.

У двійковій системі основа ступеню дорівнює 2 і є лише дві цифри 1 і 0. Послідовність цифр у двійковому записі числа також являє собою коефіцієнти при відповідних степенях, але двійки, замість десятки.

Наприклад:

$$0 = 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 \rightarrow 0000;$$

$$1 = 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 \rightarrow 0001;$$

$$2 = 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 \rightarrow 0010;$$

$$3 = 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 \rightarrow 0011;$$

$$4 = 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 \rightarrow 0100;$$

$$15 = 1 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 \rightarrow 1111;$$

Двійковий запис числа, утворений з чотирьох цифр називається чотирибітовим. Він дозволяє записати лише числа від 0 до 15. Щоб записати у двійковій системі більше число, можна застосувати більше цифр. Так, наприклад число 235 можна записати наступним чином:

$$235 = 1 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 \rightarrow 11101011.$$

Окрім чистої двійкової системи числення в цифровій техніці часто користуються її модифікаціями. Так, досить розповсюдженим є двійково-

десятковий код. Він заснований на тому, що кожен цифру числа, записаного у десятковій системі записують окремо за допомогою чотирибіткової двійкової системи. Пояснимо на прикладі того ж числа 235 (таблиця 10.1).

Таблиця 10.1. Запис числа 235 і двійково-десятковому коді

2				3				5			
0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1

Перевагою двійково-десяткової системи є спрощення заміни чисел, записаних в десятковій системі, числами, записаними у двійковій системі і навпаки.

Існують також інші системи числення, що будуються на аналогічних принципах, але в цифровій техніці застосовується двійкова система завдяки тому, що для подання одного розряду числа потрібен елемент з двома стійкими станами – 0 і 1, наприклад, електронний ключ.

Відносно електричних сигналів двійкова система числення відповідає двом рівням напруги – високому (більш додатному) і низькому (менш додатному, або нульовому). Якщо високий рівень розглядати як «1», а низький як «0», то маємо справу з додатною логікою.

На практиці не можливо здійснити таку умову, за якої всі цифрові сигнали точно відповідають одному з двох прийнятих рівнів, тому дозволяються певні допуски. Замість двох рівнів говорять про два інтервали, в яких знаходиться фактичний рівень сигналу.

Арифметичні дії з двійковими числами виконуються у відповідності до правил, представлених у таблиці 10.2.

Таблиця 10.2. Арифметичні дії з двійковими числами

Двійкове додавання	Двійкове віднімання	Двійкове множення
$0 + 0 = 0$	$0 - 0 = 0$	$0 \cdot 0 = 0$
$0 + 1 = 1$	$0 - 1 = 1$ (з перенесенням одиниці з наступної позиції зліва)	$1 \cdot 0 = 0$
$1 + 0 = 1$	$1 - 0 = 1$	$0 \cdot 1 = 0$
$1 + 1 = 1$ (з перенесенням одиниці на наступну позицію вліво)	$1 - 1 = 0$	$1 \cdot 1 = 1$

Ділення двійкових чисел зазвичай замінюється множенням.

10.2. Логічні елементи та операції. Схемна реалізація логічних елементів. В електроніці та обчислювальній техніці широкого застосування набули різні логічні схеми, що виконують відповідні логічні операції. Логічна операція перетворює за певними правилами вхідну інформацію у вихідну. Логічні елементи, призначені для виконання логічних операцій, як правило, будуються на базі електронних пристроїв, що працюють у ключовому режимі. Тому цифрову інформацію зазвичай подають у двійковій формі, в якій сигнали мають тільки два значення: «0» (логічний нуль) та «1» (логічна одиниця), що відповідають двом станам ключа. Логічні

перетворення двійкових сигналів містять три основні елементарні операції: АБО, І, НІ.

Логічна операція АБО – логічне додавання (диз'юнкція) полягає в тому, що вихідний сигнал відповідного логічного елемента дорівнює одиниці, якщо хоча б на один з його входів подано сигнал «1».

Логічна операція І – логічне множення (кон'юнкція) полягає в тому, що вихідний сигнал відповідного логічного елемента дорівнює одиниці лише в тому випадку, якщо сигнал «1» подано до усіх його входів.

Логічна функція НІ – логічне заперечення (інверсія), відмінює вхідний сигнал, перетворюючи його на протилежний на виході. Істинне висловлювання перетворюється в хибне або навпаки, наприклад, 1 – в 0 або 0 – в 1.

Крім найпростіших логічних операцій, можуть бути використані і більш складні, наприклад:

- логічна операція АБО-НІ – заперечення диз'юнкції (операція Пірса);
- логічна операція І-НІ – заперечення кон'юнкції (операція Шифера).

У таблиці 10.3 представлені результати основних логічних операцій для відповідних логічних елементів, що мають два входи.

Таблиця 10.3. Результати основних логічних операцій

Входи		Вихід y				
x_1	x_2	АБО	І	НІ (від $x_1 = x$)	АБО-НІ	І-НІ
0	0	0	0	1	1	1
0	1	1	0	1	0	1
1	0	1	0	0	0	1
1	1	1	1	0	0	0

На рис. 10.1 представлені умовні позначення цих логічних елементів на кресленнях електронних схем.

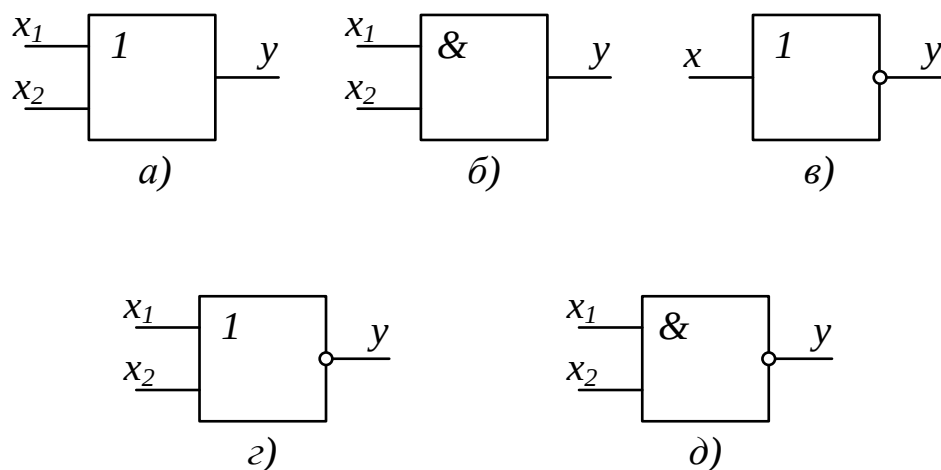


Рис. 10.1. Умовні позначення логічних елементів на кресленнях електронних схем: а – АБО; б – І; в – НІ; г – АБО-НІ; д – І-НІ.

Усі логічні елементи, крім елементу НІ можуть мати не обов'язково два входи. Їх може бути і більше.

Логічні елементи АБО та І у найпростішому варіанті можуть бути побудовані на основі діодів.

На рис. 10.2 зображено схему логічного елементу АБО, побудовану на основі діодів.

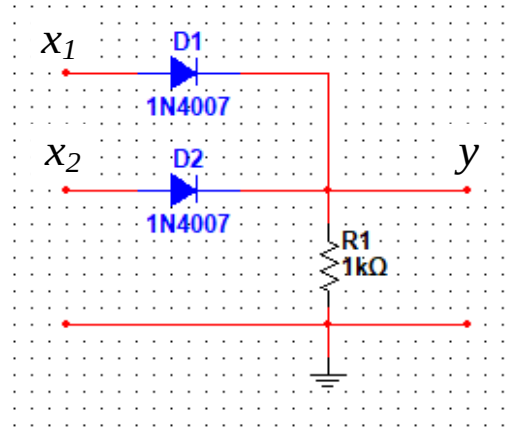


Рис. 10.2. Схема логічного елементу АБО на основі діодів

Якщо у схемі на рисунку 10.2 на одному, або на обох одразу входах з'явиться сигнал високого рівня, то він з'явиться і на виході схеми.

На рисунку 10.3 зображено схему логічного елементу І, побудованого на діодах.

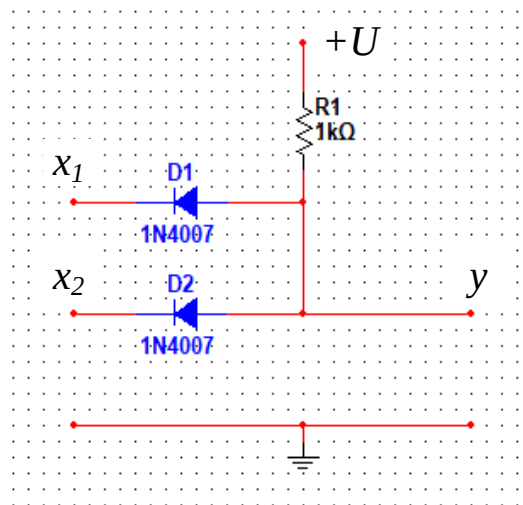


Рис. 10.3. Схема логічного елементу І на основі діодів

У схемі на рисунку 10.3 при сигналі «0» на обох входах діоди є відкритими, крізь них і резистор $R1$ протікають струми, створені джерелом $+U$. Оскільки прямий опір діодів значно менший за опір резистора $R1$, то напруга на виході виявляється близькою до нуля. Якщо напруга $U_{вх}$ на одному з входів відповідає логічній «1» ($U_{вх} > +U$), то відповідний діод закривається, проте другий діод є відкритими і на виході, як і раніше, логічний «0». Сигнал «1» з'явиться на виході тільки тоді, коли на всі входи

буде подано сигнал «1». Тоді всі діоди стають закритими, струм крізь резистор буде нульовим і $U_{вих} = +U$ ($y = 1$).

Логічна функція НІ реалізується за допомогою схеми інвертора (рис. 10.4) коли транзистор $Q1$ працює у ключовому режимі.

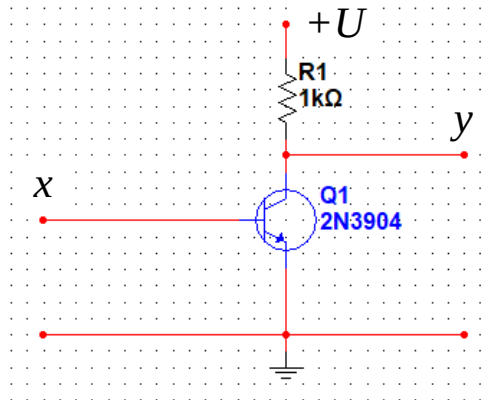


Рис. 10.4. Схема логічного елементу НІ на основі схеми інвертора

За відсутності сигналу на вході x транзистор перебуває у закритому стані. Напруга на виході y при цьому дорівнює $+U$, що відповідає логічній одиниці. При подачі сигналу логічної одиниці на базу транзистора, він відкривається і на виході встановлюється низький рівень напруги, що відповідає логічному нулю.

Логічний елемент АБО-НІ реалізується при паралельному з'єднанні транзисторів у кількості, що відповідає кількості входів. На рисунку 10.5 зображено схему логічного елементу АБО-НІ з двома входами.

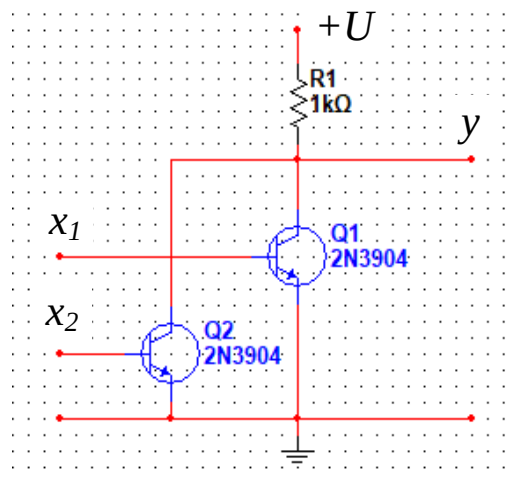


Рис. 10.5. Схема логічного елементу АБО-НІ

За відсутності сигналів на входах x_1 та x_2 транзистори перебувають у закритому стані. Напруга на виході y при цьому дорівнює $+U$, що відповідає логічній одиниці. При подачі сигналу логічної одиниці хоча б на один з виходів, відповідний транзистор відкривається і на виході встановлюється низький рівень напруги, що відповідає логічному нулю.

Схема, зображена на рис. 10.6 реалізує логічну операцію І-НІ.

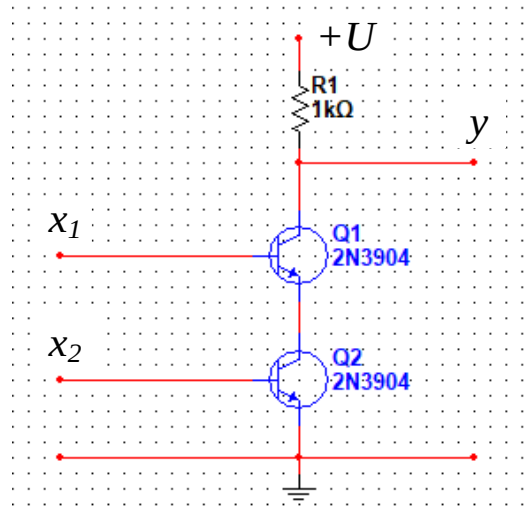


Рис. 10.6. Схема логічного елемента І-НІ

Низькій рівень напруги, що відповідає логічному нулю, з'явиться на виході схеми лише за умови одночасної подачі сигналів логічної одиниці на бази послідовно з'єднаних транзисторів Q1 та Q2.

Ми розглянули найпростіші варіанти схемної реалізації основних базових логічних елементів із застосуванням діодів та біполярних транзисторів. Логічні елементи також можуть бути реалізовані із застосуванням польових транзисторів. Перевагою логічних елементів на польових транзисторах є значно більш високий вхідний опір і краща навантажувальна здатність. Зазвичай логічні елементи на дискретних компонентах не використовуються. Їх виготовляють у вигляді інтегральних мікросхем, кожна з яких може містити один або декілька однакових або різних логічних елементів.

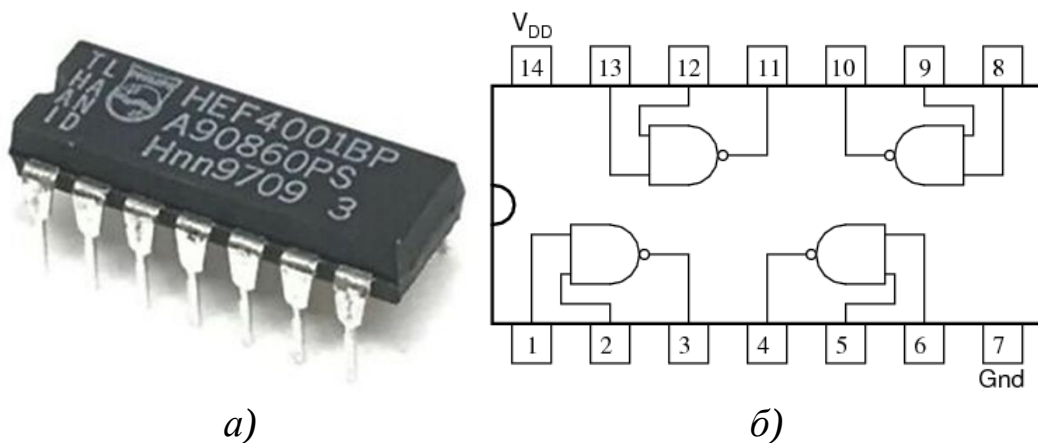


Рис. 10.7 Зовнішній вигляд (а) та внутрішні з'єднання (б) в інтегральній мікросхемі HEF4001BP.

На рис. 10.7 зображено зовнішній вигляд та будову внутрішніх з'єднань інтегральної мікросхеми HEF4001BP.

Дана мікросхема містить чотири незалежні логічні елементи АБО-НІ з двома входами (2АБО-НІ).

На рис. 10.8 зображено схему одного логічного елементу даної мікросхеми.

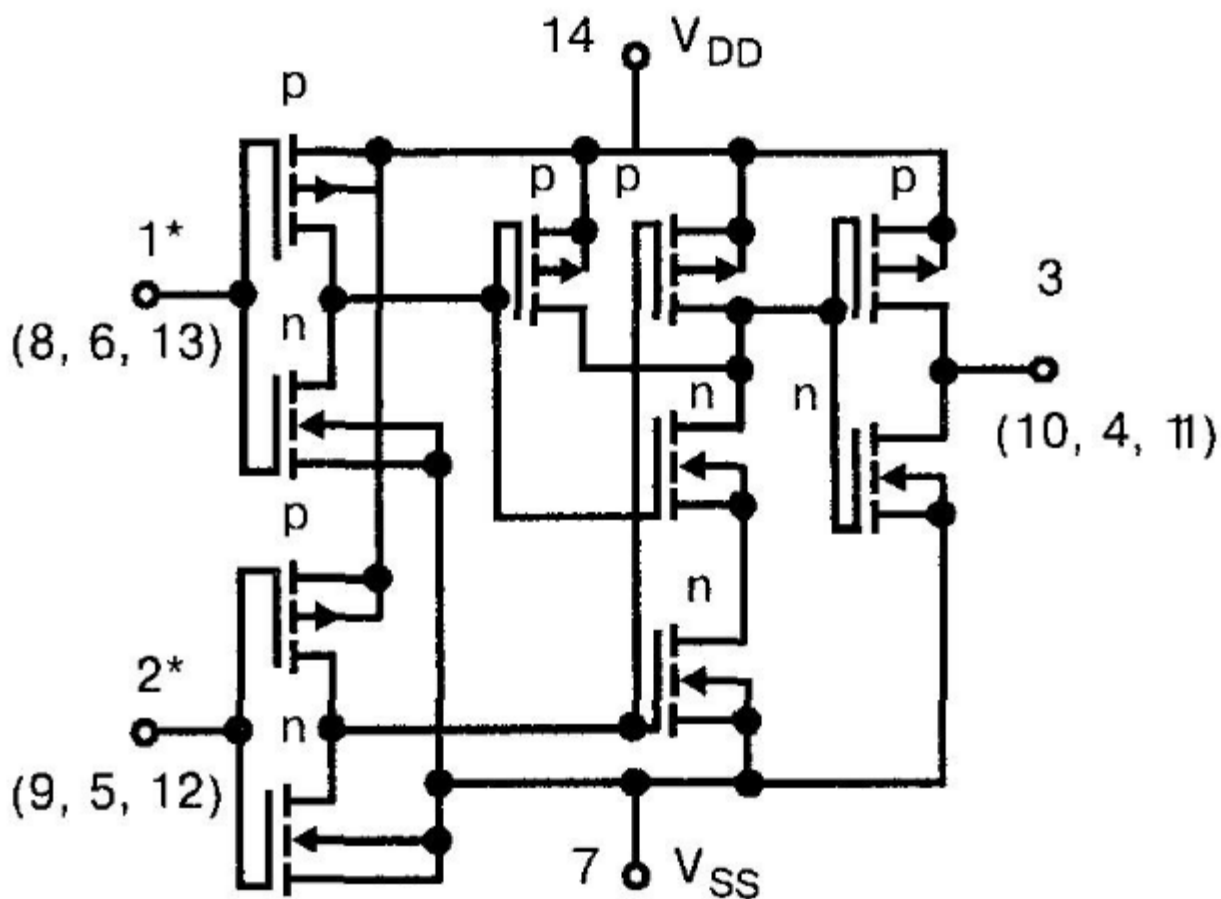


Рис. 10.8. Схема одного логічного елементу мікросхеми HEF4001BP

З рис. 10.8 видно, що логічні елементи мікросхеми HEF4001BP побудовані із застосуванням польових транзисторів, а їх загальна схема дещо складніша від найпростіших схем, розглянутих вище. Ускладнення схеми зумовлено відмовою від резисторів, але за рахунок цього вона має високі ККД і навантажувальну здатність.

10.3. Тригери. Тригером називають пристрій, який має два стани стійкої рівноваги і властивість стрибком переходити з одного стану в інший під впливом зовнішнього керуючого сигналу. Кожний з цих станів може зберігатися будь-який тривалий час, який не залежить від тривалості вхідного керуючого сигналу.

Перепади вихідної напруги або стійкі стани тригера можна взяти за логічні «0» та «1». В такому випадку тригер можна використовувати як запам'ятовувальний пристрій, який зберігає один розряд числа, поданого в

двійковому коді. В електроніці застосовуються тригери типів RS , D , T , JK та інші.

Тригери можуть бути утворені з окремих логічних елементів, або виготовляються у вигляді інтегральних мікросхем.

Асинхронний тригер типу RS може бути утвореним з двох логічних елементів АБО-НІ, або І-НІ.

На рисунку 10.9 зображено схему RS -тригера, утвореного з двох логічних елементів АБО-НІ (а) та його умовне позначення (б).

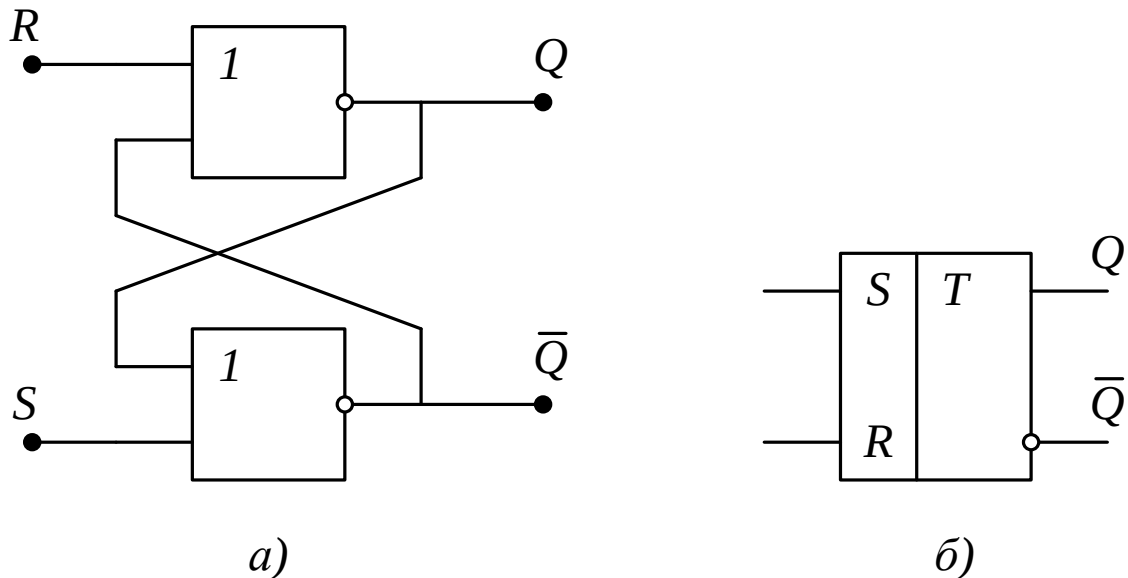


Рис. 10.9. Схема RS -тригера, утвореного з двох логічних елементів АБО-НІ (а) та його умовне позначення (б).

RS -тригер має два перемикаючих входи: вхід S (set), що називається установчим, або записуючим; та вхід R (reset), що називається входом скидання, або стираючим. Ці входи називаються асинхронними, оскільки стани на кожному з них одразу ж впливають на зміну стану виходів. Тригер має два виходи: Q та $\bar{Q}$, що приймають протилежні логічні значення.

Розглянемо роботу RS -тригера у чотирьох можливих випадках:

1. Якщо на обох входах стан, що відповідає логічному «0», то стан виходів залежить від логічних величин, що мали місце у попередньому стані, або є випадковим. Виходи Q та $\bar{Q}$ мають протилежні логічні значення.

2. Якщо на вхід S подати сигнал «1», а на вході R залишити «0», то стан виходу $Q = 1$, а $\bar{Q} = 0$. Такий стан збережеться після переходу входу S у стан «0».

3. Якщо після переходу входу S у стан «0» на вхід R подати сигнал «1», то стан виходів зміниться: $Q = 0$, а $\bar{Q} = 1$. Такий стан збережеться після переходу входу R у стан «0».

4. Якщо $S = 1$ та $R = 1$, то на виходах мало б бути $Q = 0$ та $\bar{Q} = 0$, однак такий стан виходів не можливий. І такий стан тригеру в цілому є забороненим або невизначеним. Таким чином RS -тригер не може

застосовуватися у схемах, в яких можуть з'являтися сигнали «1» на обох входах.

Роботу RS-тригера можна представити у вигляді таблиці станів (таблиці істинності, таблиці переходів).

Таблиця 10.4. Таблиця станів RS-тригера на логічних елементах АБО-НІ

S	R	Q	$\bar{Q}$
0	0	Попередній або випадковий стан	
1	0	1	0
0	1	0	1
1	1	Заборонений стан	

Якщо для побудови RS-тригера застосувати логічні елементи І-НІ замість АБО-НІ, то заборонений стан буде відповідати умовам $S = 0$ та $R = 0$, а попередній, або випадковий стан – $S = 1$ та $R = 1$. Умовне позначення RS-тригера побудованого на логічних елементах І-НІ представлено на рис. 10.10, а таблиця 10.5 є його таблицею станів.

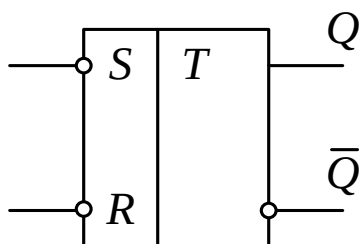


Рис. 10.10. Умовне позначення RS-тригера, утвореного з двох логічних елементів І-НІ.

Таблиця 10.5. Таблиця станів RS-тригера на логічних елементах І-НІ

S	R	Q	$\bar{Q}$
1	1	Попередній або випадковий стан	
0	1	1	0
1	0	0	1
0	0	Заборонений стан	

RS-тригери використовують як комірки пам'яті в оперативних запам'ятовувальних пристроях (ОЗП) статичного типу.

Варіант тригера на елементах І-НІ є більш розповсюдженим завдяки більш низькій вартості відповідних логічних елементів.

Синхронними тригерами називаються тригери, що мають два типи входів: синхронні й тактові. Синхронні входи називають також інформаційними. Вони самі по собі не викликають миттєвої зміни стану виходів. Для того щоб ця зміна відбулася, необхідна присутність тактового імпульсу на спеціальному тактовому вході. Інформаційних входів може бути

декілька, а тактовий – завжди один. Тактовий вхід дозволяє тригеру працювати синхронно з іншими схемами електронного пристрою.

Інші види тригерів утворюються з більшої кількості логічних елементів у більш складних комбінаціях.

Синхронним тригером типу *D* називається тригер, що має один інформаційний вхід *D* і один тактовий вхід *C*. Умовне позначення синхронного *D*-тригера представлено на рисунку 10.11.

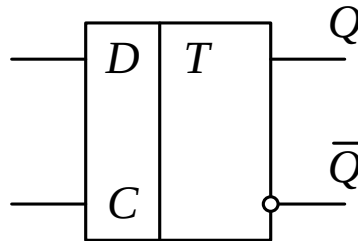


Рис. 10.11. Умовне позначення синхронного *D*-тригера

D-тригер передає інформацію з інформаційного входу *D* на виходи, в тому випадку, коли на тактовому вході *C* присутній сигнал логічної одиниці. Коли на тактовому вході логічний «0», інформаційний вхід заблокований, а на виходах зберігається попередня інформація.

Тригер типу *T* змінює свій стан на протилежний при кожній зміні стану на вході з «0» на «1» (при подачі на вхід *T* кожного запускаючого імпульсу). Він є тригером з рахунковим входом.

T-тригер можливо утворити на базі синхронного *D*-тригера (рис. 10.12 (а)). Умовне позначення *T*-тригера зображено на рис. 10.12 (б)

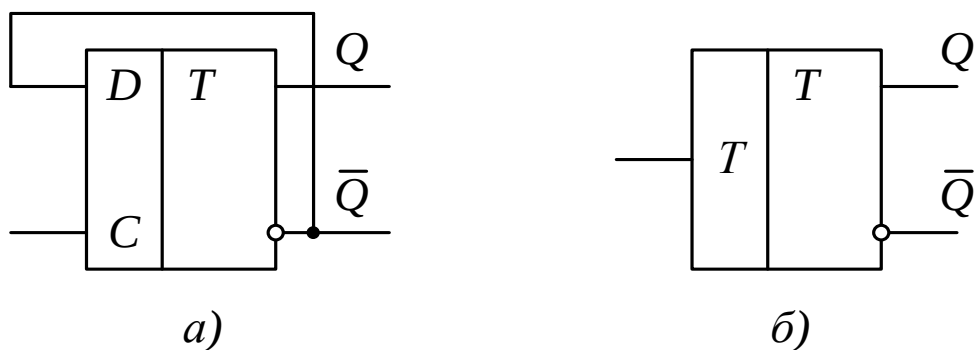


Рис. 10.12. Схема *T*-тригера, утвореного на базі *D*-тригера (а) та умовне позначення *T*-тригера (б)

JK-тригер функціонує так само, як і *RS*-тригер, з тією лише різницею, що він не має забороненої комбінації входних сигналів. Вхід *J* виконує роль входу *S*, а вхід *K* – роль входу *R*.

Умовне позначення *JK*-тригера представлено на рис. 10.13.

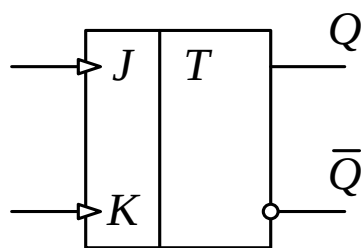


Рис. 10.13. Умовне позначення JK-триггеру.

При вхідній комбінації, що еквівалентна забороненій комбінації для RS-триггера, стан JK-триггера просто змінюється на протилежний.

Ми розглянули основні типи тригерів, що застосовуються в електроніці. Існують також інші види та різновиди тригерів. Так, наприклад RS-тригери бувають як асинхронними, так і синхронними. Також можливі варіанти комбінованих тригерів, коли синхронні тригери можуть мати й асинхронні входи, які зазвичай слугують для установки триггера в належний початковий стан.

Прикладом тригерів у вигляді інтегральних мікросхем є мікросхема CD4013 (рис. 10.14).

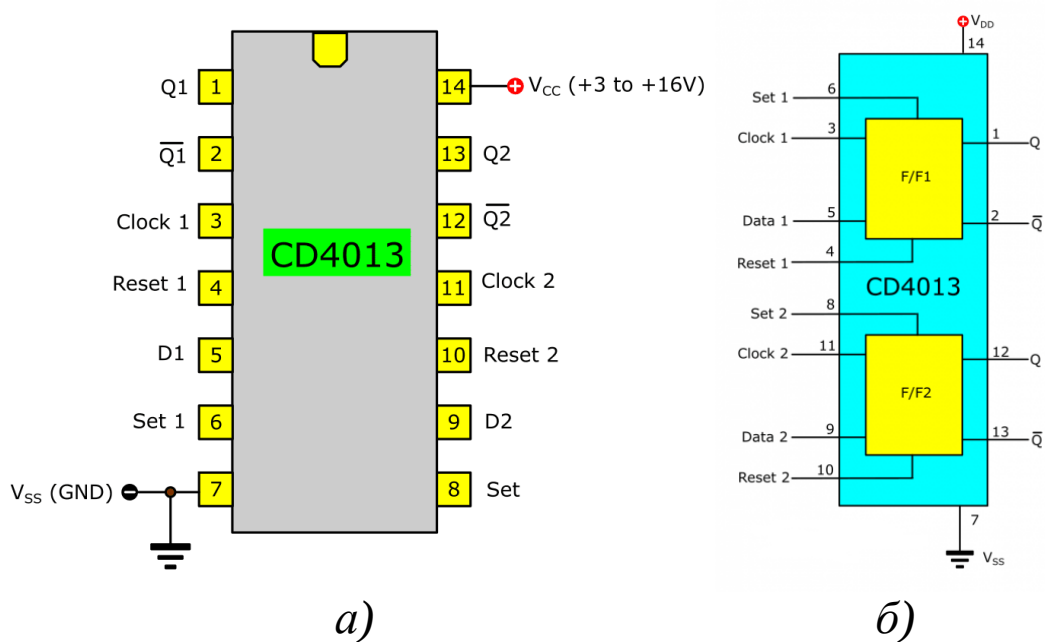


Рис. 10.14. Розміщення виводів (а) та схема (б) ІМС CD4013

Дана мікросхема містить два незалежні синхронні D-тригери з додатковими асинхронними входами S та R для установки в потрібний початковий стан.

10.4. Регістри. Регістри – це пристрої, побудовані на основі тригерів і призначені для прийому, передачі та зберігання інформації, поданої у вигляді двійкового коду. Кількість тригерів, що застосовується в регістрі визначає його розрядність. Розглянемо простий приклад побудови регістра для запам'ятовування та зберігання інформації (рис. 10.15).

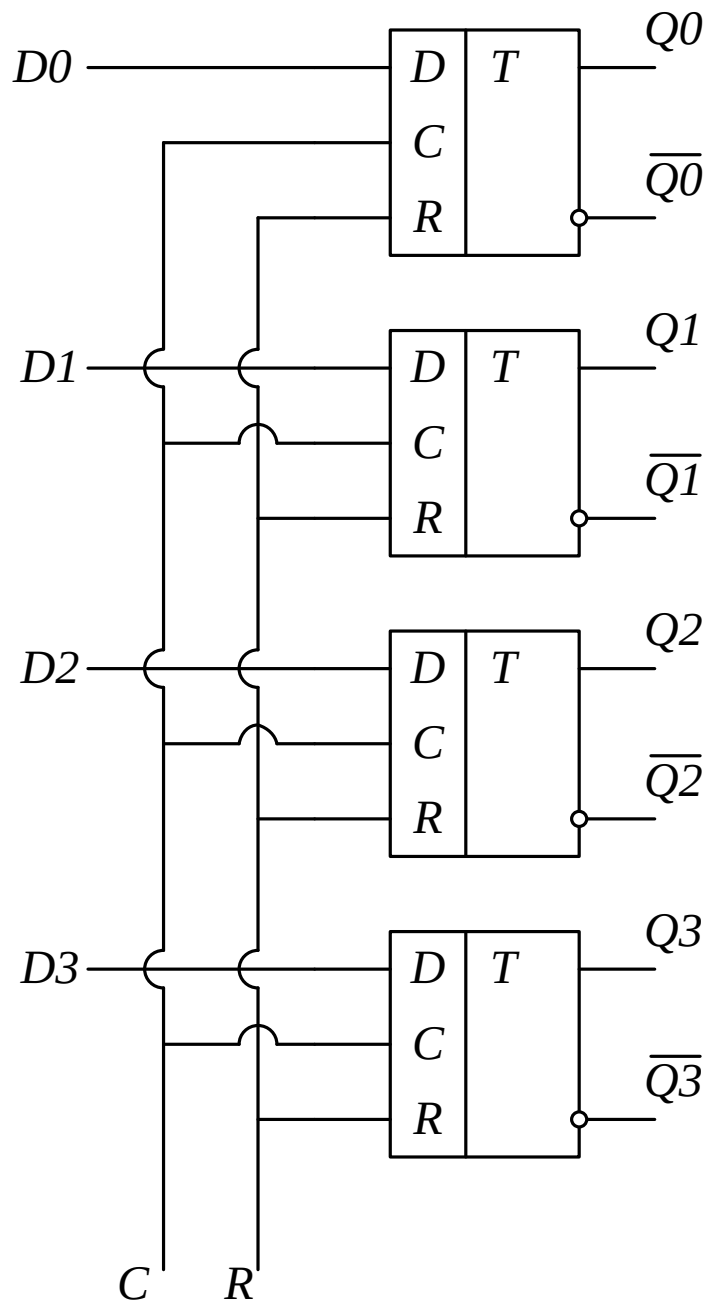


Рис. 10.15. Приклад побудови регістру

Регістр, схема якого представлена на рис. 10.15 складається з чотирьох тригерів, і відповідно має чотири розряди. На входи $D0 \dots D3$ подається число у двійковій системі, яке необхідно зберегти. Як тільки на вхід C подається імпульс синхронізації, число записується у тригери, змінюючи їх стан. Якщо на входи $D0 \dots D3$ подати наприклад число $1001_2 = 9_{10}$, то одразу після подачі імпульсу синхронізації, воно з'явиться і збережеться на прямих виходах $Q1 \dots Q3$ відповідних тригерів. Сигналом на вході R тригери можуть бути встановлені в нульовий стан.

Зазвичай використовуються регістри, що складаються з 4, 8 або 16 тригерів.

У розглянутому прикладі регістра запис числа здійснюється одночасно у всі розряди, тобто паралельним кодом. Відповідно такий регістр називається паралельним.

На рис. 10.16 зображено приклад позначення паралельного регістра на кресленнях електронних схем.

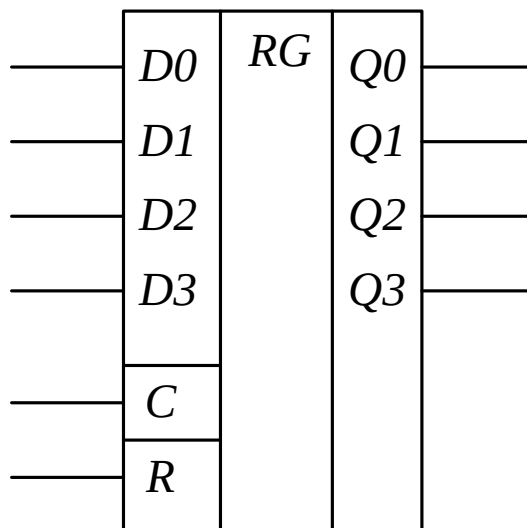


Рис. 10.16. Умовне позначення паралельного регістра на кресленнях електронних схем (варіант)

Окрім паралельних регістрів бувають також послідовні регістри, або регістри зміщення. Вони складаються з декількох послідовно з'єднаних тригерів, кількість яких визначає їх розрядність. На рисунку 10.17 зображено схему послідовного регістру.

Коли на інформаційний вхід *D* подається перший біт інформації, на вхід *C* подається тактовий імпульс синхронізації. При цьому рівень, що знаходиться на вході *D* записується до першого тригера і з'являється на вході другого тригера. Однак запису до другого тригера не відбувається, оскільки тактовий імпульс вже закінчився.

При надходженні другого тактового імпульсу рівень, присутній на вході другого тригера запам'ятовується у ньому і подається на вхід третього тригера. Разом з цим другий біт інформації запам'ятовується у першому тригері. Після надходження четвертого тактового імпульсу, у чотирьох тригерах регістру будуть записані логічні рівні, які послідовно подавалися на вхід *D*.

Таким чином розглянутий приклад регістру зміщення перетворює послідовний двійковий код у паралельний. Застосування послідовного коду для передачі інформації має важливу перевагу, що полягає в можливості передавати інформацію у вигляді багаторозрядних двійкових чисел по одній лінії. Така передача інформації реалізована зокрема в універсальній послідовній шині – USB.

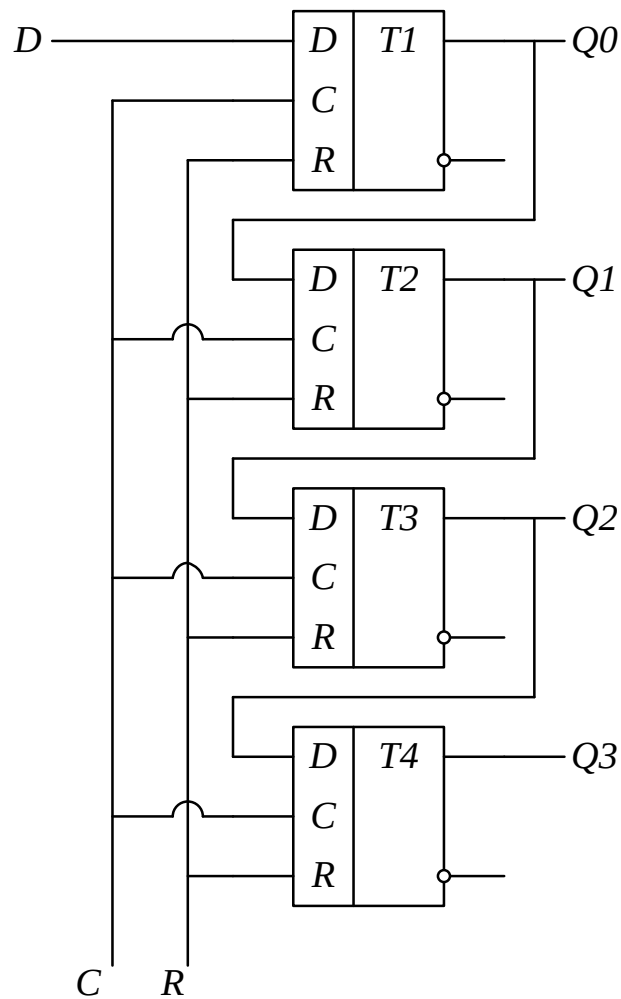


Рис. 10.17. Схема послідовного регістра

На рис. 10.18 зображено позначення послідовних регістрів на кресленнях електронних схем.

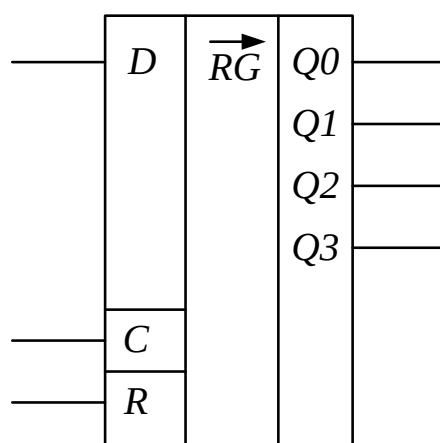


Рис. 10.18. Умовне позначення послідовного регістру на кресленнях електронних схем

Зазвичай регістри виготовляються у вигляді інтегральних мікросхем. Прикладом може бути мікросхема SN7495N, що являє собою універсальний чотирьохрозрядний регістр зміщення. Дана мікросхема окрім перетворення

послідовного коду у паралельний має змогу здійснювати також зворотне перетворення паралельного коду у послідовний і працювати як паралельний регістр. Для такого розширення можливостей у даній та подібних мікросхемах окрім тригерів застосовуються додаткові логічні елементи.

10.5. Цифрові лічильники імпульсів. Властивість тригерів знаходиться у певному сталому стані, що змінюється лише при подачі тактового імпульсу, використовується також для створення лічильників, які здійснюють лічення числа входних імпульсів і фіксують це число в будь якому коді.

На рис. 10.19 представлена схема двійкового лічильника, побудованого з чотирьох тригерів типу T , з'єднаних послідовно.

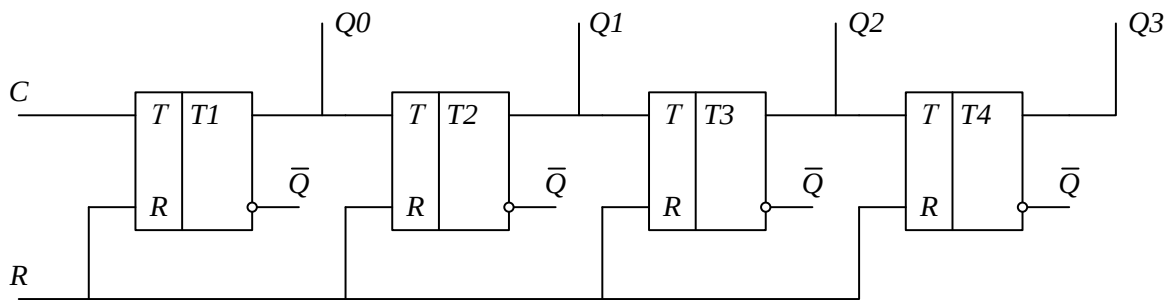


Рис. 10.19. Схема двійкового лічильника імпульсів

При подачі імпульсу на вхід R усі тригери встановлюються у нульовий стан – відбувається обнуління лічильника. Імпульси, кількість яких необхідно підрахувати подаються на вхід C .

Зрізом кожного входного імпульсу перемикається перший тригер. Зрізом імпульсу з виходу $Q0$ першого тригера перемикається другий тригер, і так до четвертого тригера.

На рис. 10.20 представлені часові діаграми роботи двійкового лічильника, які пояснюють принцип його роботи.

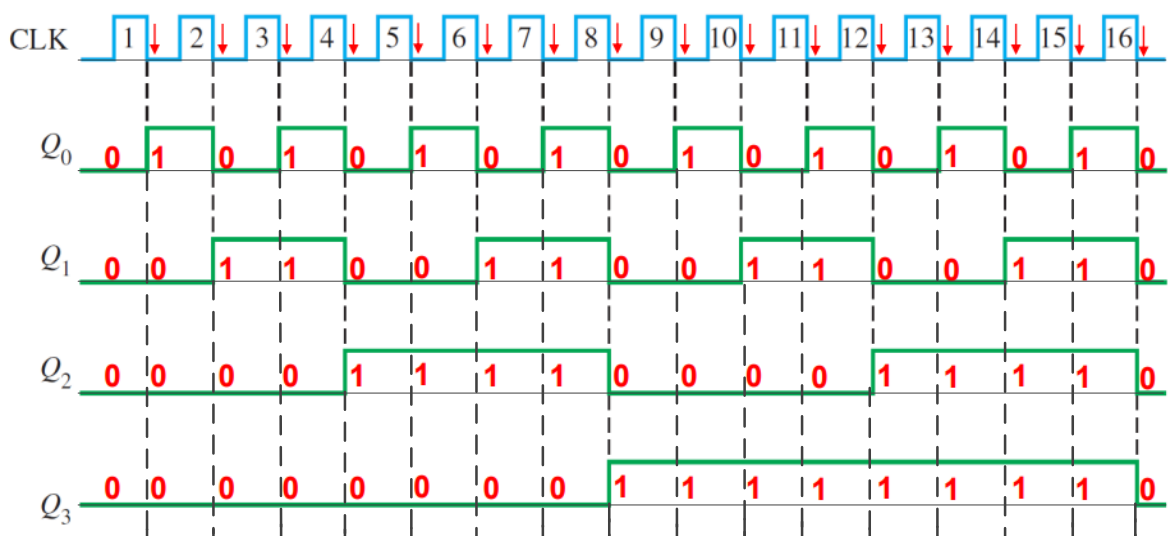


Рис. 10.20. Часові діаграми роботи двійкового лічильника

При надходженні 16-го імпульсу лічильник обнулюється.
Зведемо стани лічильника, приведені на діаграмах до таблиці станів.

Таблиця 10.4. Таблиця станів двійкового лічильника

Число вхідних імпульсів	Стан виходів тригерів			
	Q3	Q2	Q1	Q0
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
...	...	...	...	...
15	1	1	1	1
16	0	0	0	0

Можна легко помітити, що стани тригерів, записані у послідовності Q3 – Q2 – Q1 – Q0, являють собою число вхідних імпульсів, записаних у двійковому коді 8-4-2-1.

Позначення такого лічильника на кресленнях електронних схем представлено на рис. 10.21.

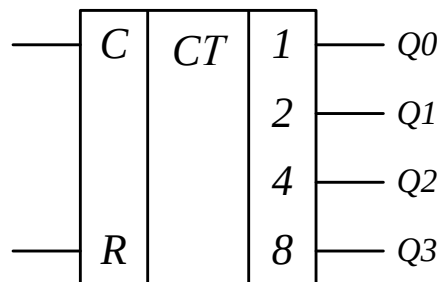


Рис. 10.21. Позначення двійкових лічильників на кресленнях електронних схем.

Застосовуються також інші системи лічильників, у тому числі з більшою кількістю тригерів, що зчитують імпульси у різноманітних кодах.

Лічильники імпульсів також виготовляються у вигляді інтегральних мікросхем.

10.6. Шифратори й дешифратори. Процес обробки сигналів за допомогою електронних пристроїв часто починають з кодування цих сигналів. У цифрових пристроях використовуються двійкові і двійково-десяткові коди, в яких сигнали подаються у вигляді логічних «0» і «1». Двійкову цифру, що приймає значення «0» або «1», називають бітом. Шифратор (кодер) – це пристрій, що здійснює кодування сигналів. Він може бути реалізований на основі матричної діодної схеми. На рисунку 10.22 представлена схема матричного шифратора, за допомогою якого можна виконати кодування будь-якої десяткової цифри від 0 до 9 у відповідне їй чотирирозрядне двійкове число.

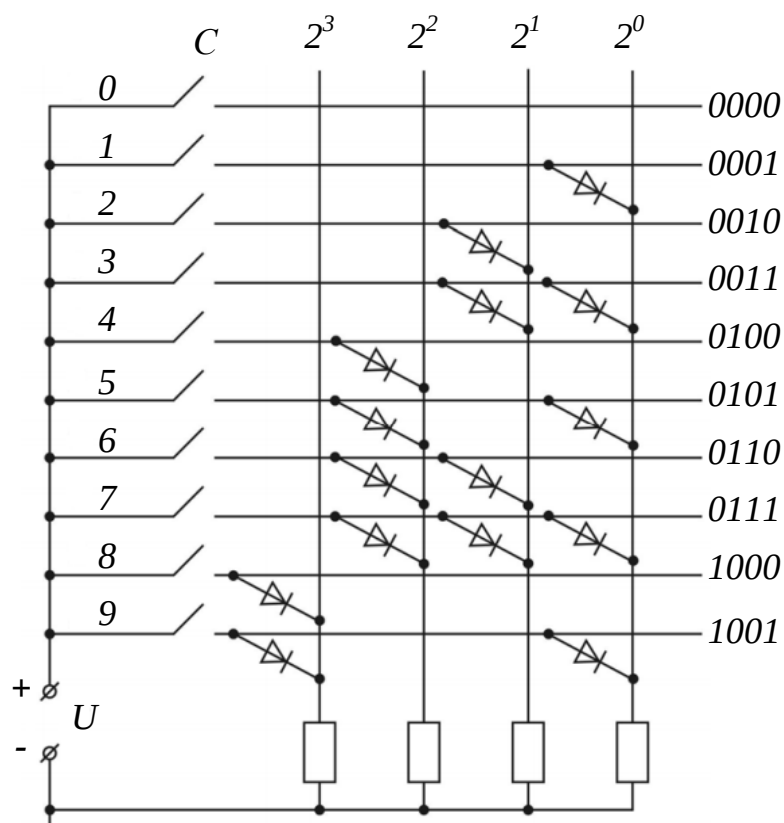


Рис. 10.22. Схема матричного шифратора

Кодування здійснюється вмиканням кнопок C , що відповідають десятковим цифрам. Наприклад, при натисканні кнопки 3 до джерела живлення U через два діоди стають підключені дві вертикальні шини 2^0 і 2^1 . На вертикальних шинах 2^2 і 2^3 при цьому напруга дорівнює нулю. В результаті утворюється двійкове число 0011, яке відповідає десятковому числу 3. Умовне позначення шифратора на кресленнях електронних схем показано на рис. 10.23.

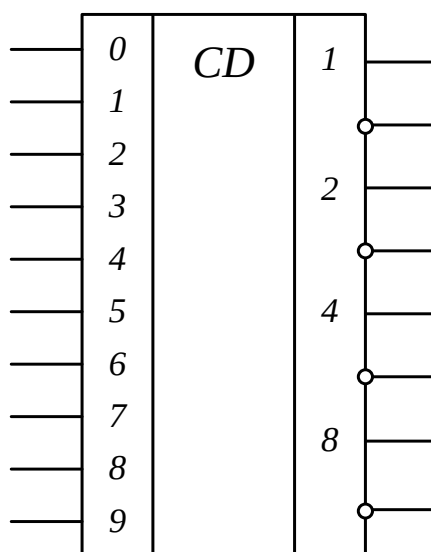


Рис. 10.23. Умовне позначення шифратора на кресленнях електронних схем

Дешифратором називається пристрій, що перетворює код числа на вході у сигнал на визначеному виході.

Умовне позначення дешифратора представлено на рис. 10.24.

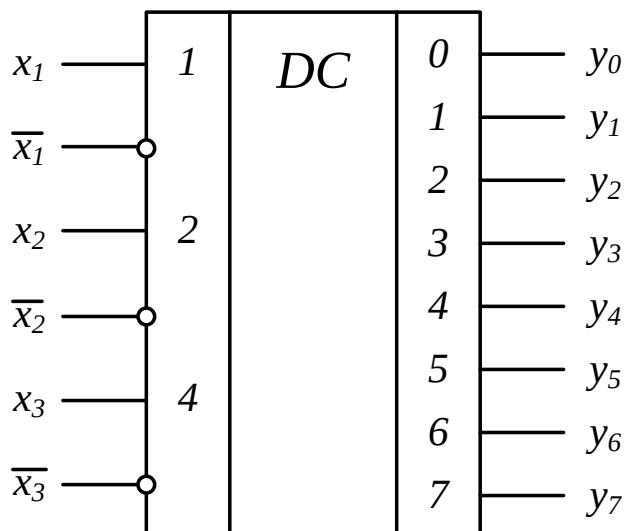


Рис. 10.24. Умовне позначення дешифратора

Входи дешифратора, як правило, підключаються до виходів розрядів регістру або лічильника, на яких формується двійковий код числа. При подачі на входи x_1 , x_2 та x_3 певного двійкового числа, на відповідному виході з'являється сигнал логічної одиниці. Номер цього виходу відповідає тому ж самому числу у десятичному коді (таблиця 10.5).

Таблиця 10.5. Таблиця станів дешифратора

Входи			Виходи							
x_1/x_1	x_2/x_2	x_3/x_3	y_0	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7
0/1	0/1	0/1	1	0	0	0	0	0	0	0
0/1	0/1	1/0	0	1	0	0	0	0	0	0
0/1	1/0	0/1	0	0	1	0	0	0	0	0
0/1	1/0	1/0	0	0	0	1	0	0	0	0
1/0	0/1	0/1	0	0	0	0	1	0	0	0
1/0	0/1	1/0	0	0	0	0	0	1	0	0
1/0	1/0	0/1	0	0	0	0	0	0	1	0
1/0	1/0	1/0	0	0	0	0	0	0	0	1

На рис. 10.25 представлена схема такого трьохрозрядного дешифратора, реалізована на тривходових логічних елементах.

Шифратори й дешифратори можуть мати різну розрядність і виготовляються у вигляді інтегральних мікросхем.

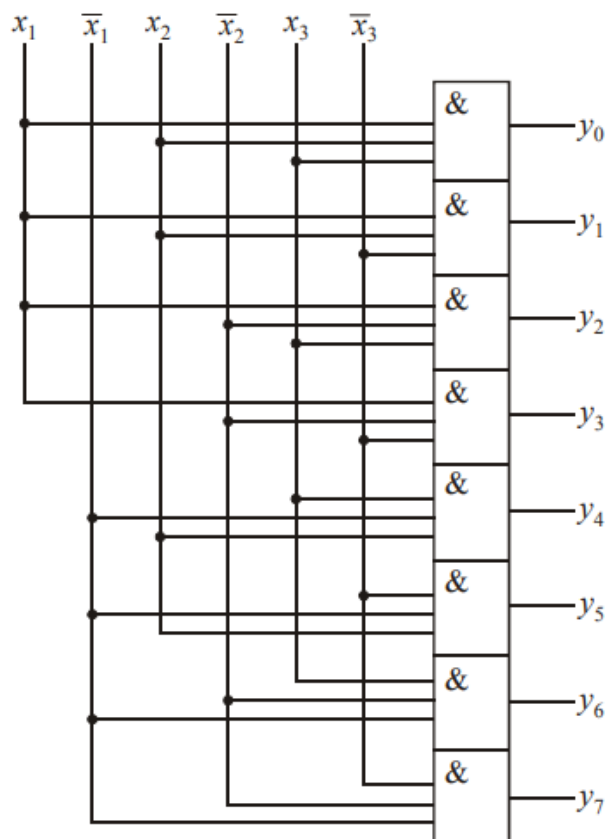


Рис. 10.25. Схема дешифратора

10.7. Запам'ятовуючі пристрої. Запам'ятовуючими пристроями називаються пристрої, що слугують для запам'ятовування та зберігання цифрової інформації, закодованої у двійковому коді і дозволяють відтворювати цю інформацію. Найпростішими запам'ятовуючими пристроями є тригери з двома стійкими станами, які утворюють однобітову комірку пам'яті. Більшу ємність пам'яті можна отримати, якщо у одному корпусі об'єднати більшу кількість тригерів. Розроблено досить багато інтегральних мікросхем, що виконують функції запам'ятовуючих пристроїв. Типові інтегральні мікросхеми із застосуванням тригерів на польових транзисторах мають ємність пам'яті до 64 біт.

Запам'ятовувальні елементи на базі тригерів є елементами інтегральної мікроелектроніки, розвиток яких пов'язаний з виготовленням на одному кристалі напівпровідника великої кількості електронних приладів, з'єднань між ними та ізолюючих шарів. В останні роки проводяться дослідження нових фізичних принципів і ефектів з метою створення принципово нових електронних пристроїв. Цей напрям отримав назву функціональної електроніки. Робота приладів функціональної електроніки заснована на використанні для обробки і зберігання інформації динамічних неоднорідностей в однорідному об'ємі твердого тіла, наприклад електричних або магнітних доменів. Тривалість існування динамічних неоднорідностей може бути як короткочасною так і довготривалою. Такі неоднорідності

утворюються за допомогою фізичних методів та зникають при знятті зовнішнього фактора збудження.

Пристрої зберігання інформації, реалізовані у вигляді електронних схем, відрізняються швидким доступом до даних, але не дозволяють зберігати великі об'єми інформації.

Накопичувачі інформації у вигляді магнітних, оптичних носіїв, або носіїв з флеш-пам'яттю навпаки, дають можливість зберігати великі об'єми інформації, але час її запису і зчитування триваліший.

Відносно новими у порівнянні з магнітними та оптичними носіями є носії з флеш-пам'яттю. Принцип роботи флеш-пам'яті заснований на зміні й реєстрації електричного заряду в ізольованій області напівпровідникової структури. Зчитування інформації здійснюється польовим транзистором, для якого ця ізольована область є затвором. Тобто коміркою пам'яті в даному випадку є фактично спеціальний польовий транзистор.

10.8. АЦП та ЦАП. Аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП) називається електронний пристрій, що слугує для перетворення аналогового сигналу у цифровий.

Аналоговий сигнал перетворюється на цифровий за допомогою трьох операцій:

- дискретизація;
- квантування;
- кодування.

Дискретизація – це вибірка з неперервного в часі аналогового сигналу окремих (дискретних) значень з певним кроком у часі. Частота здійснення цих вибірок називається частотою дискретизації.

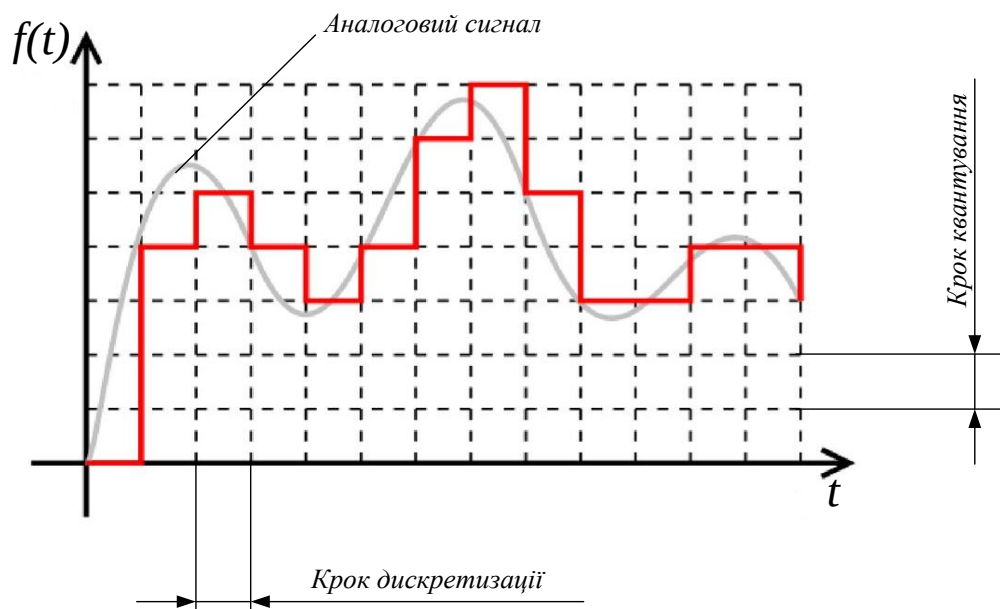


Рис. 10.26. Дискретизація і квантування аналогового сигналу

Квантування являє собою округлення значення аналогового сигналу, обраного в ході дискретизації до найближчого рівня квантування. Сусідні рівні квантування відрізняються між собою на величину кроку квантування.

На рисунку 10.26 зображено результат дискретизації і квантування аналогового сигналу у вигляді червоної лінії.

Таким чином дискретизація – це процес представлення неперервної функції у вигляді ряду дискретних значень, а квантування – це розбиття значень функції на рівні.

Отриманий після дискретизації і квантування сигнал подається на вхід пріоритетного шифратора, на виході з якого отримується цифровий сигнал у вигляді послідовності двійкових чисел.

Пріоритетний шифратор на відміну від звичайного, розглянутого вище, кодує лише старшу одиницю на його вході, тобто найвищий рівень квантованого сигналу, ігноруючи його нижчі рівні.

Варіант загальної схеми АЦП представлений на рис. 10.27. Такий АЦП називається АЦП прямого перетворення, або паралельним АЦП.

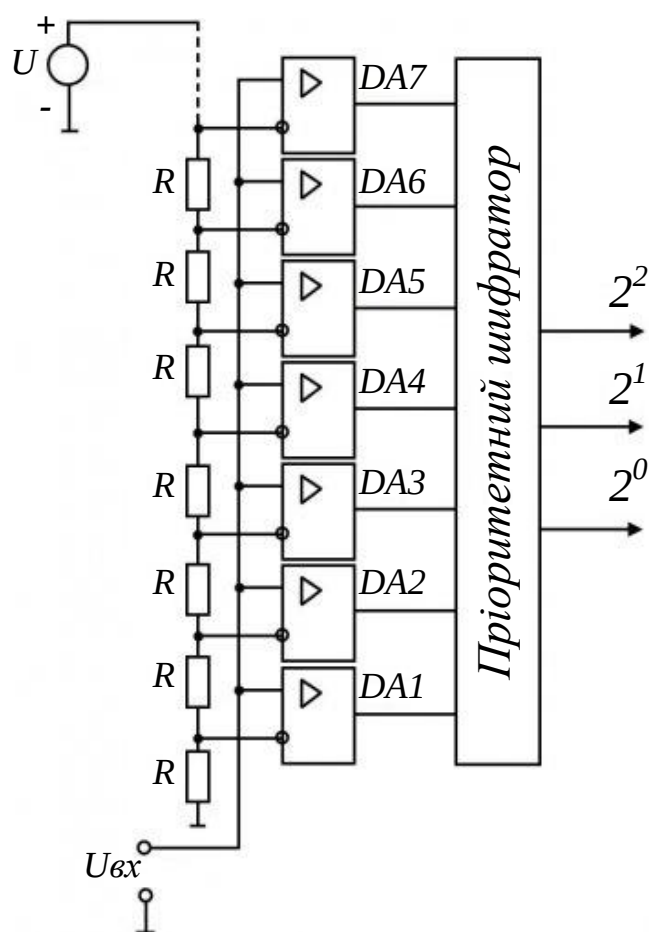


Рис. 10.27. Загальна схема АЦП

Вхідний сигнал $U_{вх}$ подається на інвертуючі входи компараторів $DA1 \dots DA7$. На неінвертуючі входи компараторів подається опорна напруга, що задається резисторами R . Значення опорної напруги сусідніх компараторів відрізняється на крок квантування. Як тільки напруга вхідного аналогового сигналу перевищує опорну напругу на кожному компараторі, їх виходи будуть послідовно перемикатися в стан «1». Пріоритетний шифратор

при цьому перетворює одиницю на виході найвищого компаратора у двійковий код.

Цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП) називається електронний пристрій, призначений для перетворення цифрового сигналу в аналоговий.

Найпростіший ЦАП можна отримати застосувавши схему аналогового суматора (рис. 10.28).

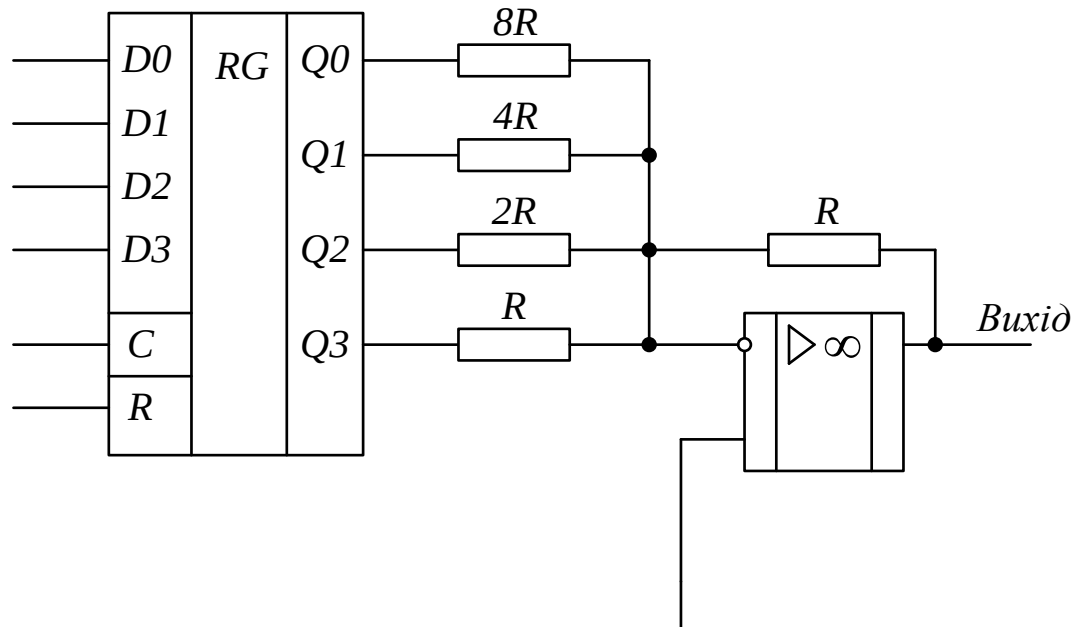


Рис. 10.28. Схема простого ЦАП

Цифровий сигнал з виходу регістру RG подається на вхід аналогового суматора. Опори вхідних сусідніх резисторів суматора відрізняються у два рази і відповідають певному розряду двійкового числа. Так, наприклад, якщо на виході $Q0$ регістра присутня логічна одиниця, а на решті виходів – «0», що відповідає десятковому числу 1, то рівень вихідного сигналу суматора буде дорівнювати: $U_{вих} = U_0 \cdot R / 8R = U_0 / 8$. Якщо логічна одиниця буде присутня лише на виході $Q3$, що відповідає десятковому числу 8, то рівень вихідного сигналу суматора буде дорівнювати: $U_{вих} = U_0 \cdot R / R = U_0$, що рівно у 8 разів більше за сигнал, що відповідає десятковому числу 1. U_0 – це максимальна вихідна напруга операційного підсилювача, яка зазвичай є дещо меншою за напругу живлення.

Якщо здійснити подібний аналіз для інших комбінацій вихідних сигналів регістра, що відповідають різним двійковим числам, то виявиться, що вихідна напруга суматора буде пропорційною до цих чисел, виражених у десятковій формі.

Окрім розглянутих схем АЦП та ЦАП існують інші їх різновиди, з якими можна ознайомитися в спеціальній літературі.

10.9. Загальні відомості про мікропроцесори та мікроконтролери.

Мікропроцесор – це мікроелектронний програмований пристрій, призначений для обробки інформації та керування процесами обміну цією інформацією у складі мікропроцесорної системи.

Конструктивно мікропроцесор виготовляється у вигляді однієї, або іноді декількох мікросхем.

Основними компонентами мікропроцесора є регістри, арифметико-логічний пристрій (АЛП), та блок керування. Регістри призначені для тимчасового зберігання даних, арифметико-логічний пристрій – для виконання арифметичних і логічних операцій (тобто, для обробки даних). Блок керування відповідає за послідовне виконання команд програми та правильне спрямування потоків даних.

Мікропроцесор не може працювати сам по собі. Він є центральною ланкою мікропроцесорної системи, до якої також входять пристрої постійної та оперативної пам'яті, пристрої введення та виведення інформації, накопичувачі інформації у вигляді магнітних, оптичних носіїв, або носіїв з флеш-пам'яттю, тощо. Такі мікропроцесорні системи називають комп'ютерами.

Комп'ютер може мати багато застосувань і виконувати найрізноманітніші операції від математичних обчислень до керування технологічними процесами, але він має досить велику вартість та розміри. У зв'язку з цим для автоматизації спеціалізованої техніки розроблені та виготовляються спеціальні процесорні пристрої, що отримали назву «мікроконтролери».

Мікроконтролер – це спеціалізований мікроелектронний програмований прилад, призначений для використання у керуючих пристроях, системах передачі даних та системах керування технологічними процесами.

Мікроконтролери використовують у побутовій техніці, медичних приладах, системах керування технологічними процесами, засобах зв'язку, автомобільній електроніці і в багатьох інших сферах.

Основна відмінність мікроконтролера від мікропроцесора полягає у тому, що у складі мікроконтролера є усі елементи для побудови відносно простої системи керування. Так, всередині мікроконтролера є оперативна та постійна пам'ять, генератор тактових імпульсів, таймери, лічильники, паралельні та послідовні порти. Таким чином система мінімальної конфігурації на основі мікроконтролера може складатися з блока живлення, мікроконтролера у вигляді мікросхеми та невеликої кількості допоміжних елементів (резисторів, конденсаторів, кварцового резонатора, тощо). Така система являє собою спеціалізований мінікомп'ютер, призначений для виконання певного, відносно вузького кола задач і придатний для вбудовування до об'єкту керування.

Процесорна частина мікроконтролера має значно меншу на відміну від мікропроцесора продуктивність, якої вистачає для виконання спеціалізованих завдань, пов'язаних зазвичай з керуванням різноманітними фізичними процесами. Отже основна сфера застосувань мікропроцесорів – це комп'ютерна техніка, а мікроконтролерів – інша техніка, що потребує програмного керування за одним і тим самим алгоритмом.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

RS-ТРИГЕР НА ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТАХ

Мета: Виготовити схему з RS-тригером на логічних елементах та дослідити її роботу.

Матеріали та обладнання: макетна плата; резистори опором 330 Ом та 10 кОм, 0,25...1 Вт по 2 шт; червоний та зелений світлодіоди; DIP-перемикач (мінімум 2 групи контактів); мікросхема цифрова 74НС02 з'єднувальні провідники та перемички; батарея, або інше джерело живлення напругою 4,5...6 В.

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися з завданням.

В даній лабораторній роботі пропонується виготовити схему з RS-тригером на логічних елементах АБО-НІ (рис. 10.9) застосувавши інтегральну мікросхему 74НС02, яка містить 4 незалежні логічні елементи АБО-НІ (рис. 10.29).

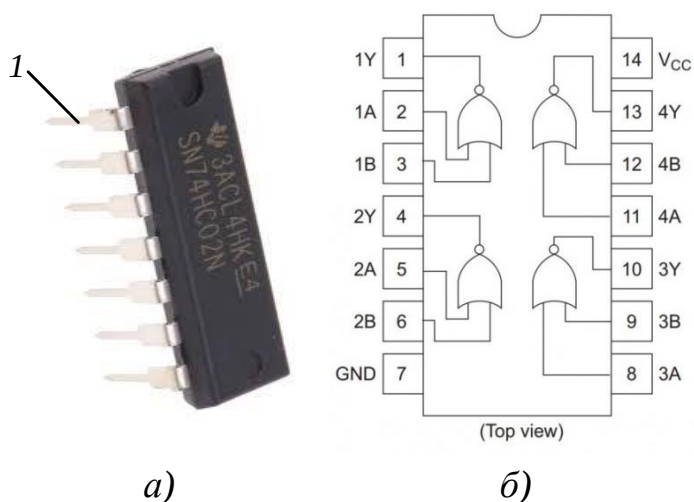


Рис. 10.29. Зовнішній вигляд (а) та внутрішні з'єднання (б) інтегральної мікросхеми 74НС02.

Схема з RS-тригером, яку пропонується зібрати в даній лабораторній роботі представлена на рис. 10.30, а її загальний вигляд – на рис. 10.31.

RS-тригер будується на двох логічних елементах мікросхеми DD1. Для подачі сигналів високого або низького рівнів (логічної одиниці або нуля) на входи тригера використовується DIP-перемикач SA1. Стан відповідної групи контактів перемикача «увімкнено» відповідає сигналу логічної одиниці на відповідному вході тригера, а стан «вимкнено» – сигналу логічного нуля. Для індикації станів виходів тригера застосовуються червоний та зелений

світлодіоди. Світіння відповідного світлодіоду відповідає стану логічної одиниці на відповідному виході тригера.

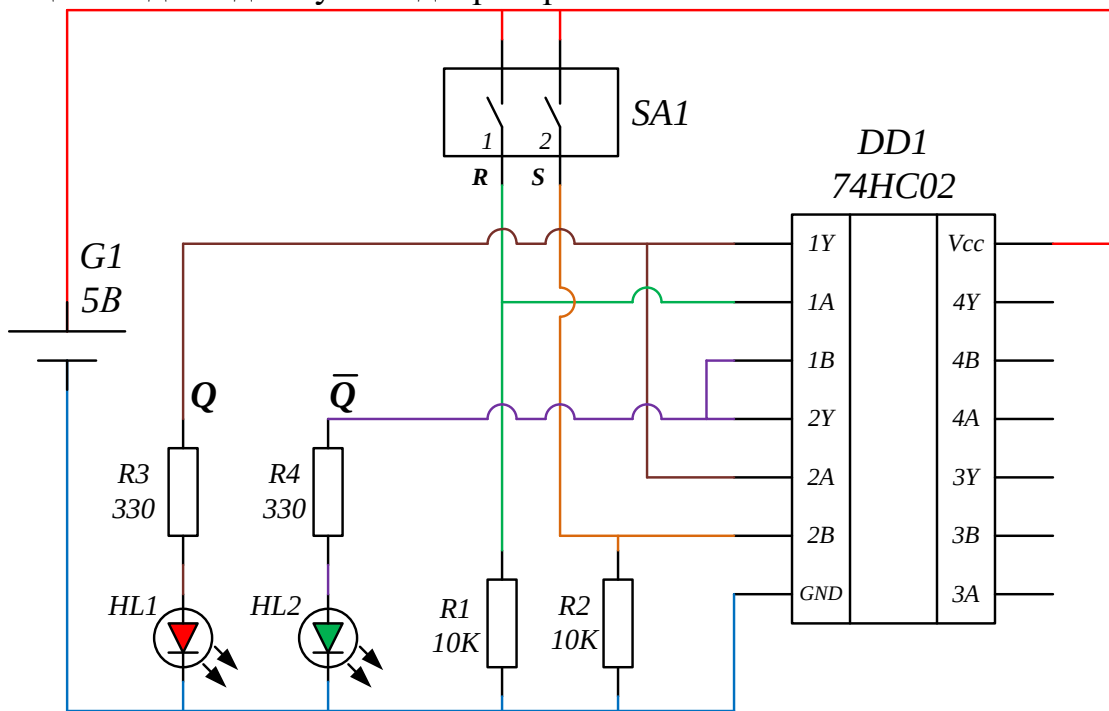


Рис. 10.30. Схема з RS-тригером

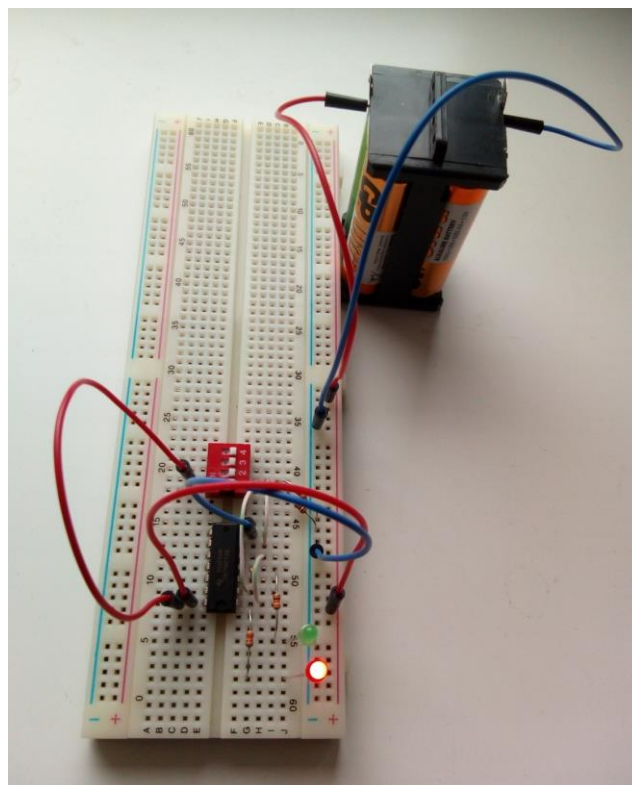


Рис. 10.31. Загальний вигляд схеми з RS-тригером

2. Складання схеми.

2.1. Скласти на макетній платі схему з RS-тригером відповідно до схеми на рис. 10.30. При складанні керуватися розміщенням виводів мікросхеми 74HC02 (рис. 10.29), а також схемою RS-тригера на логічних

елементах (рис. 10.9). Приклад зібраної схеми без підключення живлення зображено на рис. 10.32.

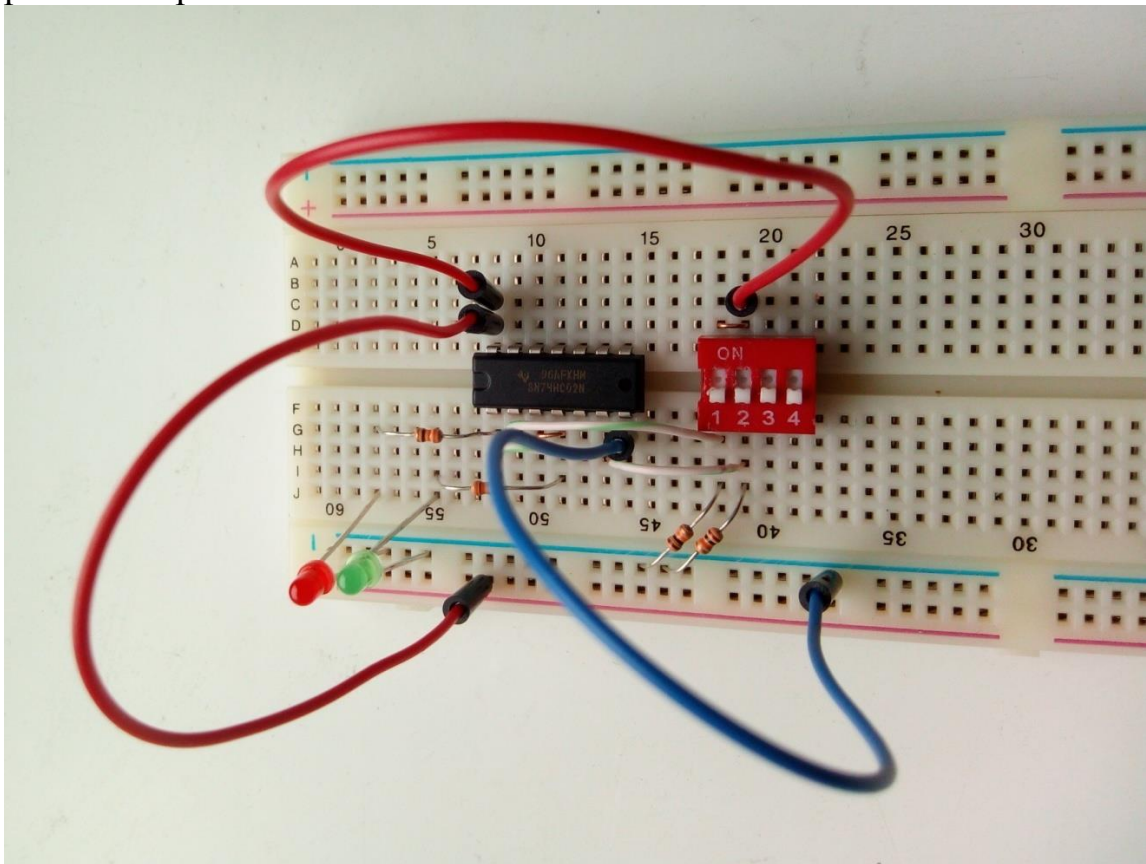


Рис. 10.32. Приклад зібраної схеми з RS-тригером

2.2. Підключити до схеми джерело живлення (Рис. 10.31).

Після підключення живлення має засвітитися один зі світлодіодів, червоний, що відповідає логічній одиниці на виході Q , або зелений, що відповідає логічній одиниці на виході $\bar{Q}$.

3. Дослідження роботи схеми.

3.1. За допомогою DIP-перемикача подати сигнал логічної одиниці на вхід S . При цьому незалежно від початкового стану має засвітитися червоний світлодіод.

3.2. Перевести DIP-перемикач у положення «вимкнено». Червоний світлодіод при цьому має продовжувати світитися.

3.3. За допомогою DIP-перемикача подати сигнал логічної одиниці на вхід R . При цьому має засвітитися зелений світлодіод.

3.4. Перевести DIP-перемикач у положення «вимкнено». Зелений світлодіод при цьому має продовжувати світитися.

3.5. Відключити джерело живлення на декілька секунд.

3.6. Підключити джерело живлення і повторити кроки за п. 3.1...3.4. Якщо RS-тригер працює за алгоритмом, описаним у розділі 10.3, а його стани відповідають даним таблиці 10.4, то схема зібрана вірно.

4. Зробити висновки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2

ДВІЙКОВИЙ ЛІЧИЛЬНИК

Мета: Виготовити схему двійкового лічильника та дослідити її роботу.

Матеріали та обладнання: макетна плата; резистори опором 330 Ом та 10 кОм, 0,25...1 Вт по 3 шт; червоні світлодіоди – 3 шт.; DIP-перемикач (мінімум 2 групи контактів); кнопка (2 контакти на замикання); мікросхема цифрова 74НС193; з'єднувальні провідники та перемички; батарея, або інше джерело живлення напругою 4,5...6 В.

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися з завданням.

В даній лабораторній роботі пропонується виготовити схему з двійковим лічильником, застосувавши інтегральну мікросхему 74НС193 (рис. 10.33).

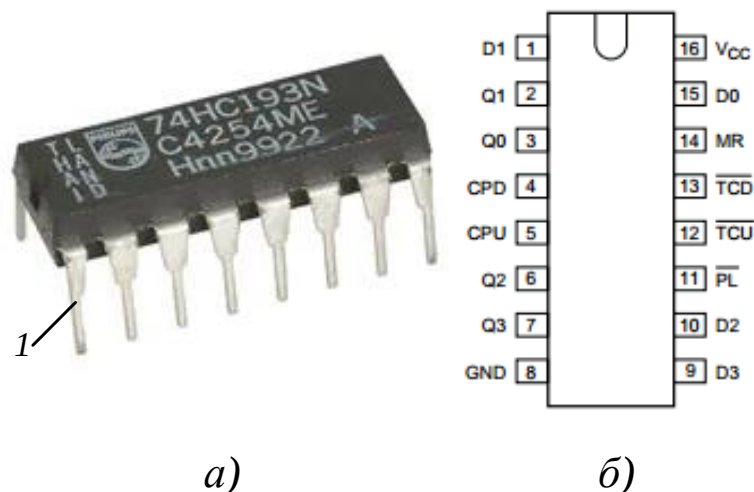


Рис. 10.33. Зовнішній вигляд (а) та позначення виводів (б) інтегральної мікросхеми 74НС193.

Мікросхема 74НС193 являє собою чотирьох-розрядний двійковий лічильник і відповідно має чотири виходи – Q0...Q3. Підрахунок імпульсів може відбуватися як на збільшення, так і на зменшення. При подачі імпульсів на вхід CPU і встановленні логічної одиниці на вході CPD лічильник рахуватиме на збільшення, а при подачі імпульсів на вхід CPD і встановлення логічної одиниці на вході CPU – на зменшення.

Мікросхема також має чотири входи D0...D3, призначені для завантаження числа в двійковому коді, з якого треба починати відлік. Керуючий вхід MR призначений для обнуління лічильника при подачі на нього сигналу логічної одиниці. Керуючий інверсійний вхід PL призначений для завантаження до лічильника числа, встановленого на входах D0...D3 і

передачі його до виходів Q0...Q3. Для цього на цей вхід подається логічний нуль.

На інверсійних виходах TCU та TCD логічний сигнал змінюється тоді, коли лічильник дораховує до одного з крайніх значень.

Схема з двійковим лічильником, яку пропонується зібрати в даній лабораторній роботі представлена на рис. 10.34.

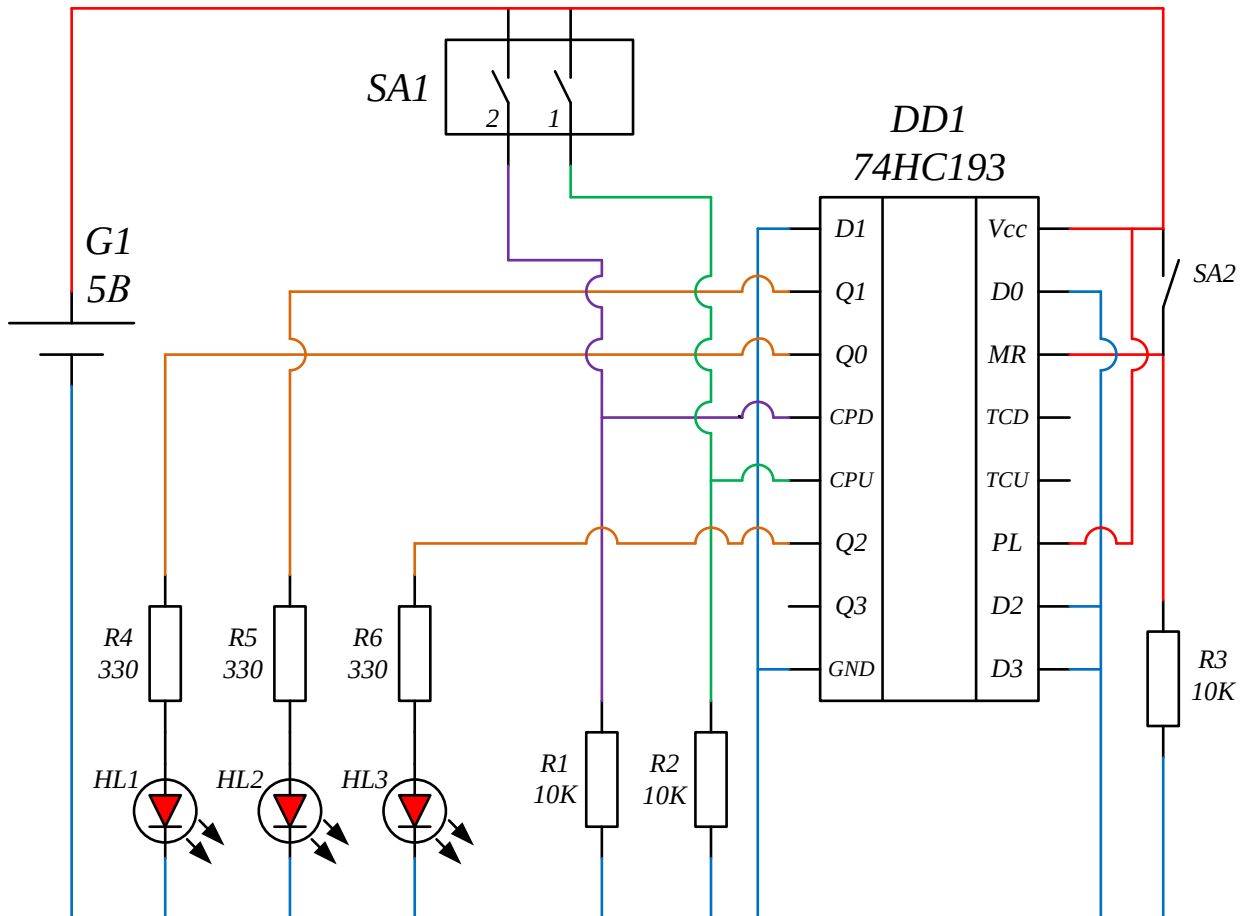


Рис. 10.34. Схема з двійковим лічильником

Дана схема являє собою трьох-розрядний двійковий лічильник зі світлодіодною індикацією. Оскільки лічильник трьох-розрядний, вихід Q3 не застосовується. Світлодіоди HL1...HL3 підключені до виходів лічильника Q0...Q2 відповідно. Лічильник може рахувати вхідні імпульси від 0 до 7, або навпаки, без встановлення початкового значення. Тому на входах D0...D3 постійно перебуває сигнал логічного нуля, а на вході PL – логічна одиниця. Виходи TCU та TCD в даній роботі не використовуються. Встановлення режиму роботи лічильника (рахунок на збільшення, або зменшення) і формування вхідних імпульсів здійснюється за допомогою DIP-перемикача SA1. Обнуління лічильника здійснюється натисканням на кнопку SA2, при якому на вхід MR подається сигнал логічної одиниці.

Загальний вигляд (варіант) схеми з двійковим лічильником представлено на рис. 10.35.

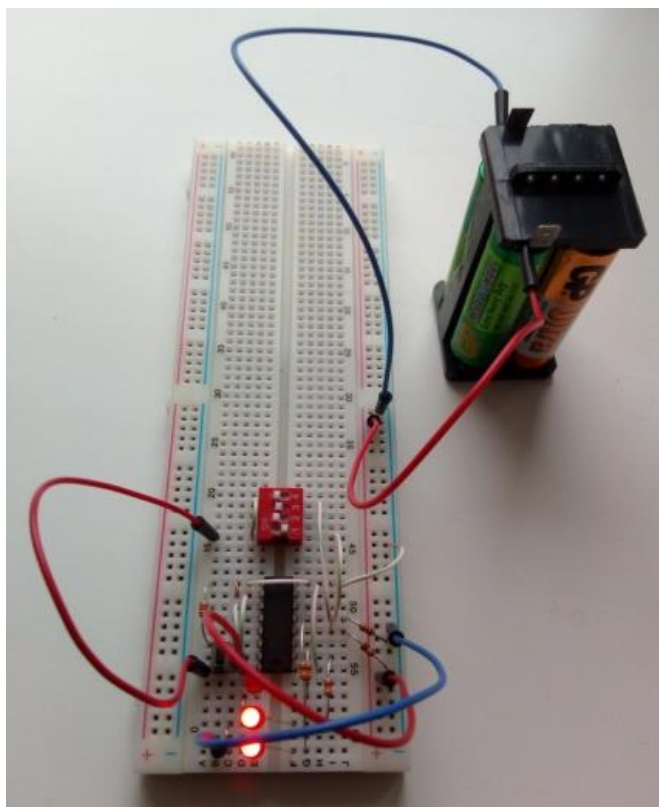


Рис. 10.35. Загальний вигляд схеми з двійковим лічильником

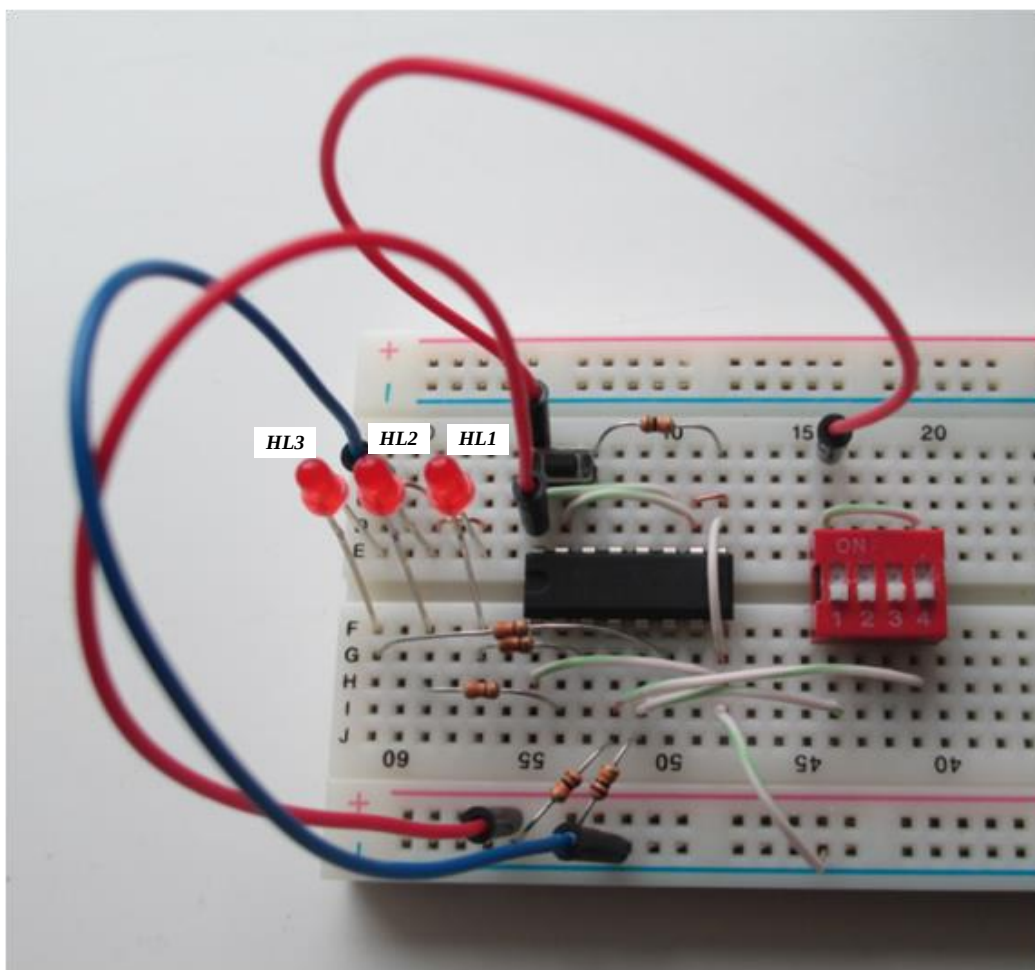


Рис. 10.36. Приклад зібраної схеми з двійковим лічильником

2. Складання схеми з лічильником.

2.1. Скласти на макетній платі схему з двійковим лічильником відповідно до схеми на рис. 10.34. При складанні керуватися розміщенням виводів мікросхеми 74НС193 (рис. 10.33). Приклад зібраної схеми без підключення живлення зображено на рис. 10.36.

2.2. Підключити до схеми джерело живлення (рис. 10.35).

Після підключення живлення може засвітитися будь яка комбінація світлодіодів, що відповідає деякому числу у двійковій формі.

3. Дослідження роботи лічильника.

3.1. Натиснути кнопку SA2. Лічильник має обнулитися, а всі світлодіоди – згаснути.

3.2. За допомогою тумблера 2 DIP-перемикача подати сигнал логічної одиниці на вхід CPD, а за допомогою тумблера 1 подавати до входу CPU імпульси. При цьому на світлодіодах HL1...HL3 має засвічуватися комбінація, що відповідає номеру імпульсу у двійковому коді (таблиця 10.4) від 1 до 7 (підрахунок на збільшення). Після надходження 8-го імпульсу лічильник має обнулитися.

3.3. За необхідності обнулити лічильник за допомогою кнопки SA2.

3.4. За допомогою тумблера 1 DIP-перемикача подати сигнал логічної одиниці на вхід CPU, а за допомогою тумблера 2 подавати до входу CPD імпульси. При цьому на світлодіодах HL1...HL3 має засвічуватися комбінація, що відповідає номеру імпульсу у двійковому коді (таблиця 10.4) від 7 до 1 (підрахунок на зменшення). Після надходження 8-го імпульсу лічильник має обнулитися.

3.5. Переконатися, що комбінації світлодіодів HL1...HL3 під час підрахунку імпульсів відповідають даним таблиці 10.4.

4. Зробити висновки.

Не розбирати виготовлену схему!!!

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3 ДЕШИФРАТОР

Мета: Виготовити схему двійкового лічильника з дешифратором та дослідити її роботу.

Матеріали та обладнання: макетна плата; резистори опором 330 Ом 0,25...1 Вт – 8 шт.; резистори опором 10 кОм, 0,25...1 Вт – 3 шт.; червоні світлодіоди – 8 шт.; DIP-перемикач (мінімум 2 групи контактів); кнопка (2 контакти на замикання); мікросхема цифрова 74НС193; мікросхема цифрова 74НС238; з'єднувальні провідники та перемички; батарея, або інше джерело живлення напругою 4,5...6 В.

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися з завданням до лабораторної роботи.

В даній лабораторній роботі пропонується до схеми двійкового лічильника, виготовленої під час виконання попередньої роботи, додати схему дешифратора на інтегральній мікросхемі 74НС238 та дослідити роботу двійкового лічильника з дешифратором.

На рис. 10.37 зображено зовнішній вигляд та позначення виводів мікросхеми 74НС238.

Мікросхема 74НС238 має 3 входи – A_0 , A_1 та A_2 , на які подається число у двійковому коді, і 8 виходів $Y_0...Y_7$, на одному з яких з'являється сигнал логічної одиниці, залежно від комбінації входних сигналів. Номер виходу відповідає числу у десятковій системі числення, яке подане до входів у двійковому коді.

Мікросхема має також входи $E_1...E_3$. Вони використовуються для задання режиму її роботи: дешифратор, або демультиплексор. Для роботи мікросхеми в режимі дешифратора на вхід E_3 подається сигнал логічної одиниці, а на входи E_1 та E_2 – логічного нуля.

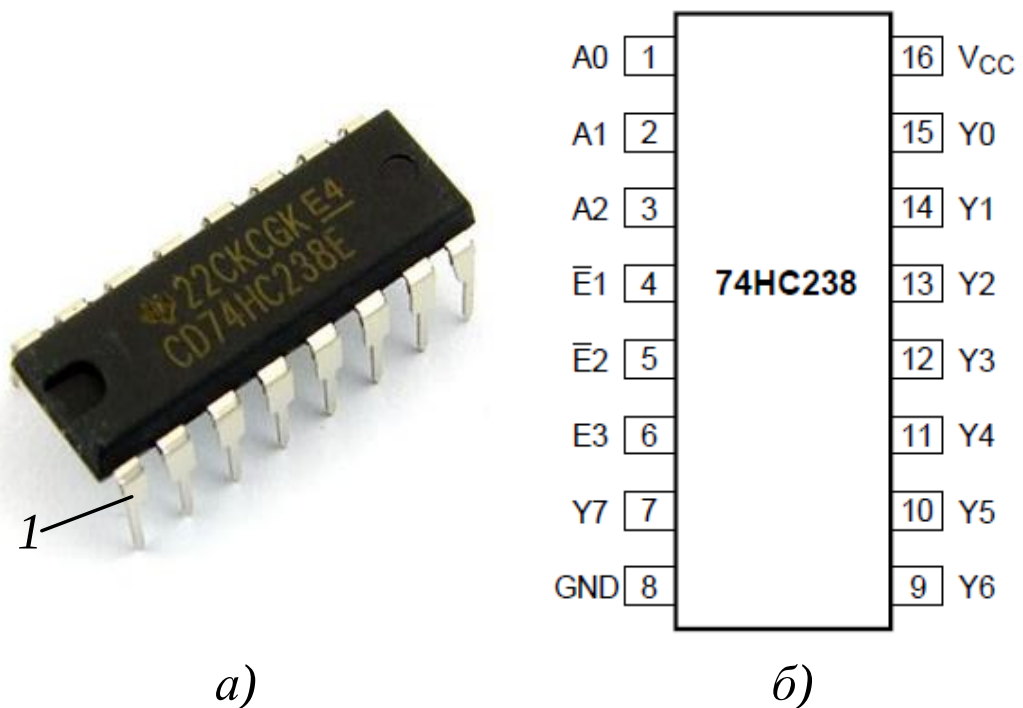


Рис. 10.37. Зовнішній вигляд (а) та позначення виводів (б) інтегральної мікросхеми 74НС238.

Схема з двійковим лічильником, яку пропонується зібрати в даній лабораторній роботі представлена на рис. 10.38.

Дана схема складається з трьох-розрядного двійкового лічильника на мікросхемі 74НС193, виготовленого під час виконання попередньої лабораторної роботи та дешифратора на мікросхемі 74НС238. Сигнали з виходів лічильника подаються на відповідні входи дешифратора. Сигнали з виходів дешифратора подаються на світлодіоди HL1...HL8. При формуванні лічильником двійкового числа, що відповідає номеру підрахованого імпульсу у двійковому коді, загоряється світлодіод, з'єднаний з виходом дешифратора, номер якого відповідає цьому числу у десятковій системі зчислення.

Загальний вигляд схеми двійкового лічильника з дешифратором (варіант) представлений на рис. 10.39.

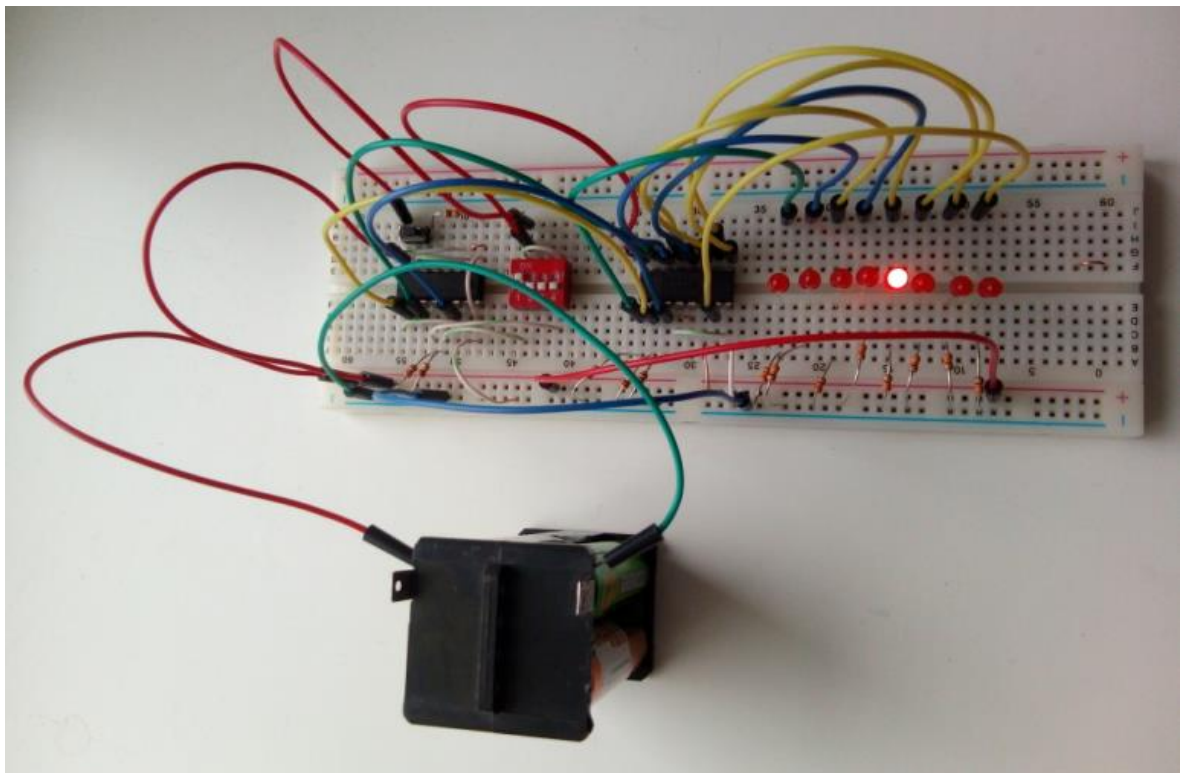


Рис. 10.39. Загальний вигляд схеми двійкового лічильника з дешифратором

2. Виготовлення схеми.

2.1. Скласти на макетній платі схему двійкового лічильника з дешифратором відповідно до схеми на рис. 10.38. При складанні керуватися розміщенням виводів мікросхеми 74НС238, зображеному на рис. 10.37. Світлодіоди розміщувати в один ряд і підключати їх до виходів дешифратора по порядку. Приклад зібраної схеми без підключення живлення зображено на рис. 10.40.

2.2. Підключити до схеми живлення (рис. 10.39).

Після підключення живлення може засвітитися будь який світлодіод.

3. Дослідження роботи лічильника з дешифратором.

3.1. Натиснути кнопку SA2. Лічильник має обнулитися, а світлодіод HL1 – засвітитися.

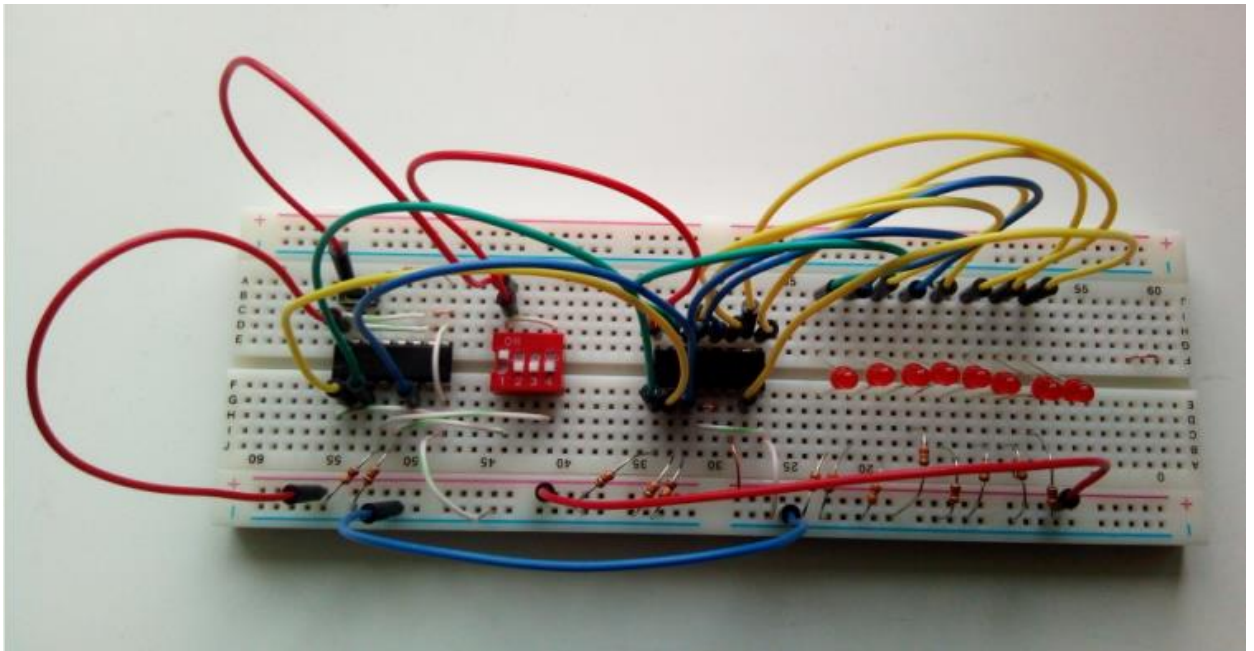


Рис. 10.40. Приклад зібраної схеми

3.2. За допомогою тумблера 2 DIP-перемикача подати сигнал логічної одиниці на вхід CPD, а за допомогою тумблера 1 подавати до входу CPU імпульси. При цьому світлодіоди мають засвічуватися по черзі від HL1 до HL8 у порядку слідування імпульсів здійснюючі їх рахунок на збільшення. Після надходження 8-го імпульсу лічильник має обнулитися а світлодіод HL1 – засвітитися.

3.3. За необхідності обнулити лічильник за допомогою кнопки SA2.

3.4. За допомогою тумблера 1 DIP-перемикача подати сигнал логічної одиниці на вхід CPU, а за допомогою тумблера 2 подавати до входу CPD імпульси. При цьому світлодіоди мають засвічуватися по черзі від HL8 до HL1 у порядку слідування імпульсів здійснюючі їх рахунок на зменшення. Після надходження 8-го імпульсу лічильник має обнулитися а світлодіод HL1 – засвітитися.

4. Зробити висновки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4

МЕТЕОСТАНЦІЯ НА ARDUINO З ДАТЧИКОМ DHT-11

Мета: Зібрати і випробувати метеостанцію на Arduino з датчиком DHT11.

Матеріали та обладнання: платформа Arduino UNO; датчик температури й вологості DHT11; модуль HC-05; макетна плата; з'єднувальні провідники; USB блок живлення (5 В); смартфон з ОС Android; ПК.

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися з завданням.

В даній лабораторній роботі пропонується на базі платформи Arduino UNO зібрати метеостанцію з датчиком температури й вологості повітря DHT11. Дані температури й вологості пропонується передавати на смартфон за допомогою Bluetooth модуля HC-05. Загальний вигляд (варіант) метеостанції представлено на рис. 10.41.

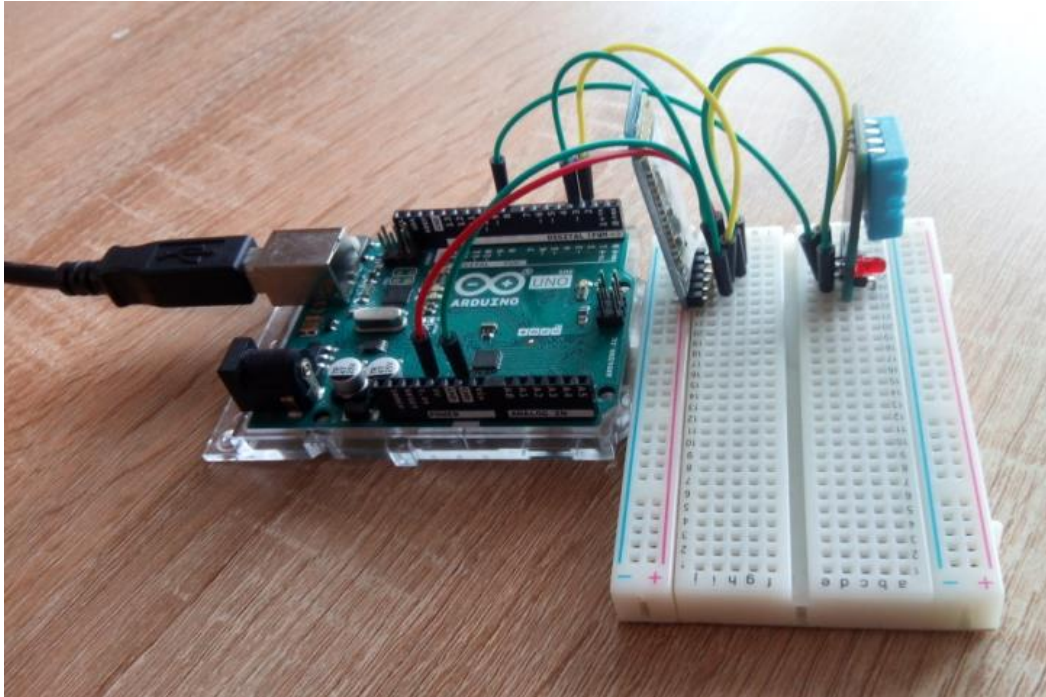


Рис. 10.41. Прототип метеостанції

2. Ознайомитися з обладнанням.

2.1. Платформа Arduino UNO.

Arduino – це сімейство платформ для швидкої розробки електронних пристроїв, що відрізняється зручністю та відносно простою мовою програмування. Програмування здійснюється через USB порт ПК без застосування програматорів. Для програмування Arduino використовується програмне забезпечення Arduino IDE. На базі Arduino можна збирати сумісні між собою електронні і механічні компоненти в єдиний пристрій, а потім через звичайний комп'ютер запрограмувати поведінку цих складових, як потрібно.

На рис. 10.42 зображено зовнішній вигляд плати Arduino UNO.

Плата Arduino UNO побудована на базі мікроконтролера ATmega328P. До її складу входить все необхідне для зручної роботи з мікроконтролером: 14 цифрових входів/виходів (з них 6 можуть використовуватися в якості ШІМ-виходів), 6 аналогових входів, кварцовий резонатор на 16 МГц, роз'єм USB, додатковий роз'єм живлення, роз'єм для програмування всередині схеми (ICSP) і кнопка скидання. Для початку роботи з пристроєм

достатньо просто подати живлення від AC/DC-адаптера або батарейки, або підключити його до комп'ютера за допомогою USB-кабелю.

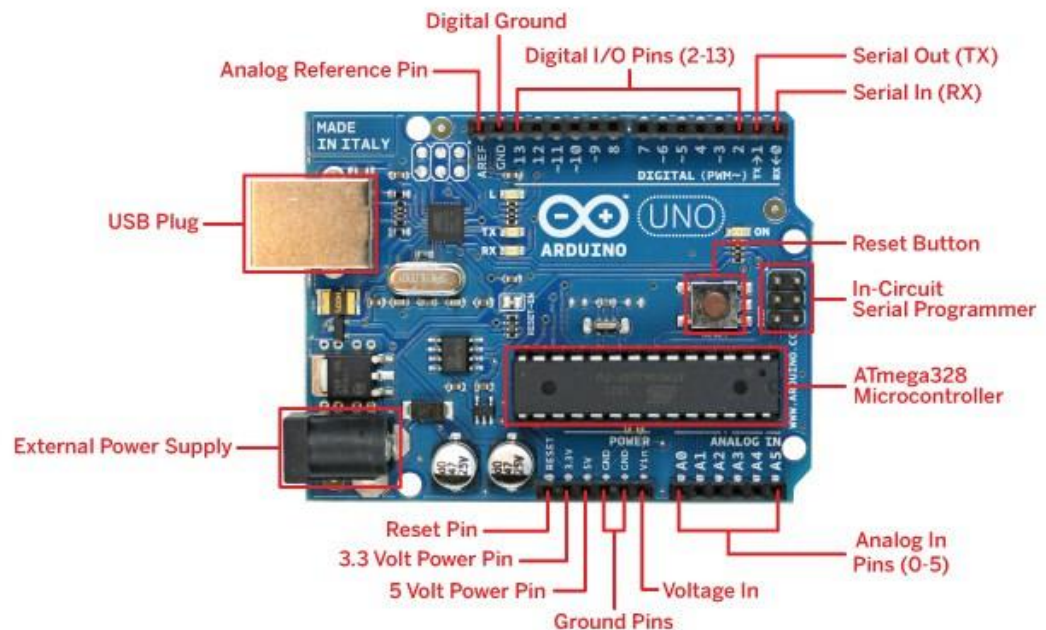


Рис. 10.42. Плата Arduino UNO

Програма Arduino IDE, доступна для скачування на офіційному сайті Arduino, є безкоштовною. На рис. 10.43 зображено робоче вікно програми, в якому здійснюється написання програми для плати Arduino.

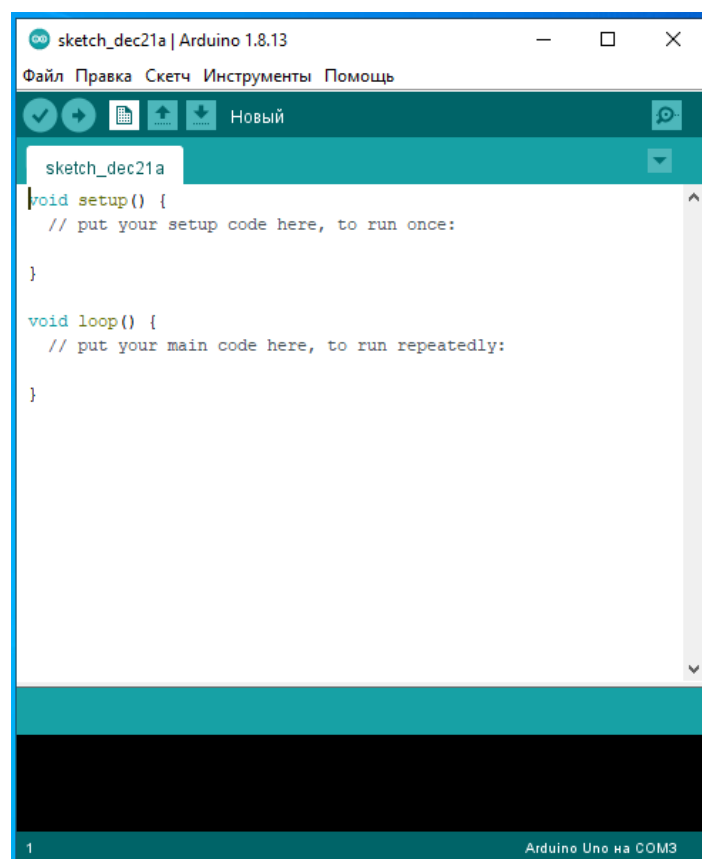


Рис. 10.43. Вікно програми Arduino IDE

Програму в Arduino IDE, яка вже готова до роботи з платою, називають скетчем. Після того як програма складена вона завантажується (прошивається) на плату. Для програмування Arduino використовується USB-кабель. Відразу після завантаження програма готова виконувати різні команди. Для завантаження програми на плату у вікні програми треба



натиснути кнопку «Завантаження». Після завантаження програми і від'єднання USB-кабелю від ПК, програма лишається збереженою на платі Arduino і починає працювати при подачі живлення на плату без ПК.

2.2. Датчик температури й вологості повітря DHT11.

Датчик DHT11 (рис. 10.44) є недорогим датчиком температури і відносної вологості повітря з цифровим виходом. Діапазон вимірювання температури – від 0 до 50 градусів Цельсія з точністю 2 градуси, відносної вологості повітря – від 20 % до 90 % з точністю 5 %. Для живлення датчика необхідна постійна напруга від 3 до 5,5 вольт. Споживання струму становить до 2,5 мА. Для роботи з датчиком розроблені кілька готових бібліотек, одна з яких буде використовуватися в даній роботі.

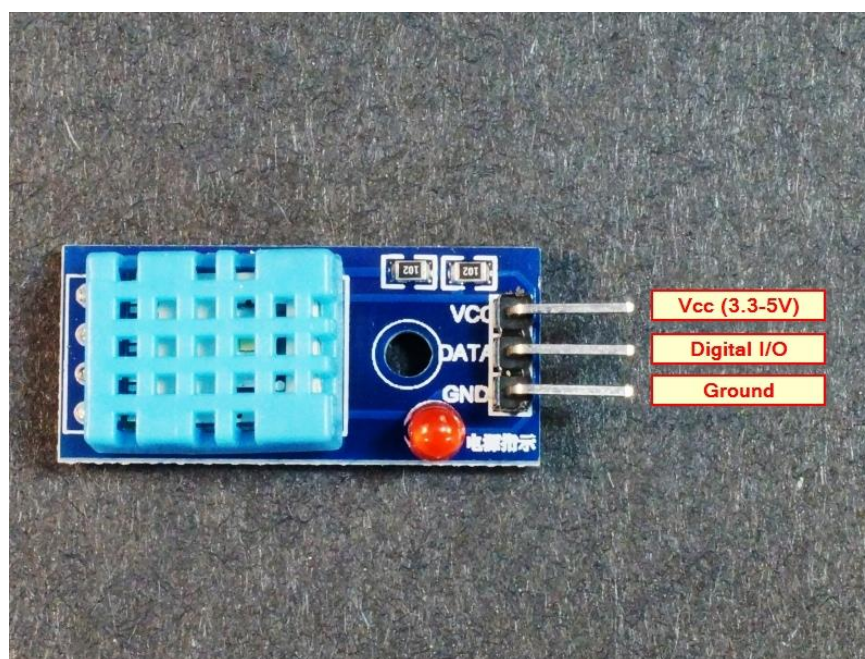


Рис. 10.44. датчик DHT11

2.3. Bluetooth-модуль HC-05.

Модуль HC-05 (рис. 10.45) призначений для передачі даних з Arduino за допомогою технології Bluetooth на інші пристрої, зокрема телефон або смартфон, що мають Bluetooth-приймач.

Модуль має 6 виводів:

VCC – живлення 3,6...6 В;

GND – земля;

TXD – відправка даних;

RXD – приймання даних;

STATE – індикатор стану;

EN – вмикання/вимикання модуля.

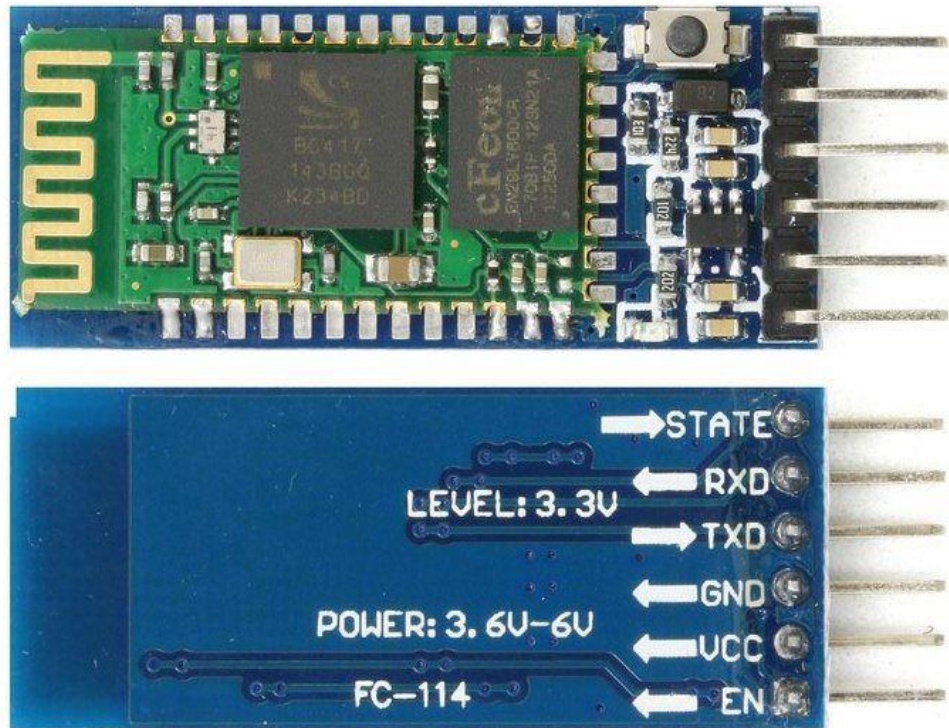


Рисунок 10.45. Bluetooth модуль HC-05.

2.4. Загальна схема метеостанції.

Схема підключення датчику DHT11 та модуля HC-05 до платформи Arduino представлена на рис. 10.46.

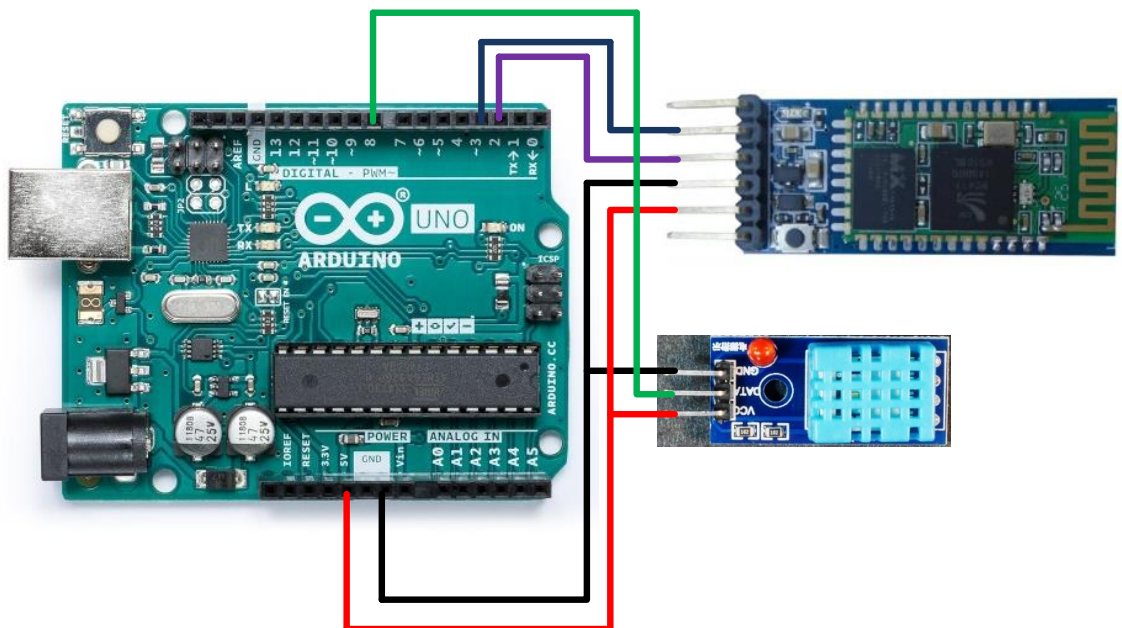


Рис. 10.46. Схема метеостанції

3. Виготовлення метеостанції.

3.1. Скласти прототип метеостанції у відповідності до її схеми на рисунку 10.45.

3.2. Встановити на смартфон застосунок Bluetooth Terminal HC-05 <https://play.google.com/store/apps/details?id=project.bluetoothterminal&hl=ru&gl=US>.

3.3. Відкрити програму Arduino IDE.

3.4. Встановити бібліотеки **SoftwareSerial**; **DHT sensor library**, для чого зайти Інструменти – Керувати бібліотеками. У вікні що з'явиться за допомогою інструменту пошуку знайти і встановити дані бібліотеки. ПК при цьому має бути підключеним до мережі Інтернет.

3.5. Написати у робочому вікні програми Arduino IDE наступний скетч (жовтим виділені коментарі до команд, які не вплинуть на роботу програми, оскільки відділені від команд символом «//»):

```
#include <SoftwareSerial.h> // підключення бібліотеки SoftwareSerial.h
SoftwareSerial mySerial(2, 3); // вказуємо контакти rx и tx відповідно

#include "DHT.h" // підключаємо бібліотеку для датчику
DHT dht(8, DHT11); // повідомляємо порт, до якого під'єднано датчик

String stringT = String("");
String stringH = String("");

void setup() {
  Serial.begin(9600); // запуск апаратного послідовного порту
  mySerial.begin(9600); // запуск програмного послідовного порту
  dht.begin(); // запуск датчика DHT11
}

void loop() {
  float h = dht.readHumidity(); // зчитуємо значення температури
  float t = dht.readTemperature(); // зчитуємо значення вологості

  Serial.println(t + stringT); // відправляємо значення температури на
монітор
  Serial.println(h + stringH); // відправляємо значення вологості на
монітор
  Serial.println("");
  mySerial.print(millis()/1000);
  mySerial.print("; ");
  mySerial.print(t); // відправляємо значення температури на телефон
  mySerial.print("; ");
  mySerial.println(h); // відправляємо значення вологості на телефон
```



```
delay(2000); // встановлюємо затримку на 2 секунди  
}
```

3.6. За допомогою USB кабелю під'єднати плату Arduino до ПК та натиснути кнопку  «Завантаження». Дочекатися завершення процесу.

3.7. Відкрити на смартфоні застосунок Bluetooth Terminal HC-05 та здійснити сканування для того, щоб знайти Bluetooth модуль.

3.8. У вікні застосунку натиснути на позначку модуля. Має з'явитися вікно (рис. 10.47), у якому будуть відображатися час (у с) з моменту подачі живлення на метеостанцію, температура у (°C) та відносна вологість повітря у (%).

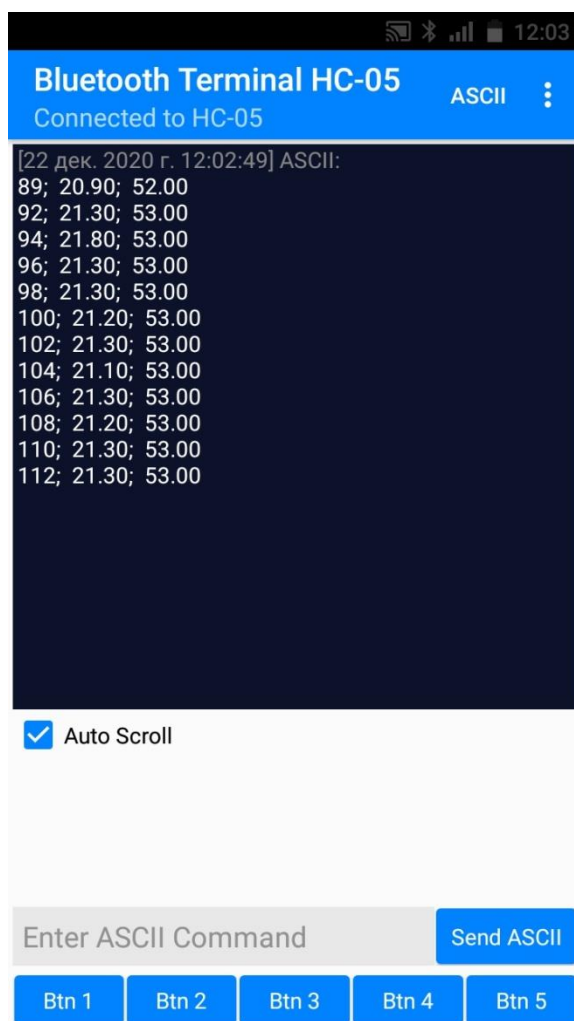


Рис. 10.47. Вікно відображення даних додатку Bluetooth Terminal HC-05

3.9. Відключитися від Bluetooth-модуля HC-05 та закрити застосунок.

3.10. Від'єднати метеостанцію від ПК і подати на неї живлення від іншого джерела з USB виходом, наприклад від зарядного пристрою для смартфона.

3.12. Повторити п. 3.7, 3.8, та переконатися що створена метеостанція працює без підключення до ПК.

У застосунку *Bluetooth Terminal HC-05* є функція «Send Log file», за допомогою якої можна створити і передати електронною поштою текстовий документ з результатами вимірів. Якщо даний текстовий документ зберегти з розширенням «.csv», то буде отримано файл у вигляді таблиці Excel, в якому можна побудувати графіки за результатами вимірів, а також здійснити інші види обробки експериментів.

4. Зробити висновки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5

ЦИФРОВИЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС НА ARDUINO NANO 33 BLE SENSE

Мета: Створення цифрового вимірювального комплексу на Arduino Nano 33 BLE Sense.

Матеріали та обладнання: платформа Arduino Nano 33 BLE Sense; Кабель USB – micro-USB; USB блок живлення (5 В); смартфон з ОС Android; ПК.

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися з обладнанням.

Платформа Arduino Nano 33 BLE Sense (рис. 10.48) є новітньою компактною платформою з вбудованою групою сенсорів, призначеною для побудови пристроїв з Bluetooth інтерфейсом, що працюють на невеликій відстані. Платформа побудована на базі модуля U-blox NINA B306.

Бездротовий модуль U-blox NINA-B306 включає в себе 32-бітний мікроконтролер Nordic nRF52840 на архітектурі ARM Cortex-M4 з тактовою частотою 64 МГц, 1 МБ флеш-пам'яті і 256 КБ оперативної пам'яті. Модуль NINA-B306 також забезпечує зв'язок Bluetooth v5.0 в діапазоні 2,4 ГГц і підтримує енергозберігаючий протокол.

На борту плати Arduino Nano 33 BLE є наступні вбудовані сенсори:

- **IMU-сенсор** на 9 ступенів свободи включає в себе акселерометр, компас і магнітометр. Збірка виконана на чіпі LSM9DS1 за технологією System-in-Package (система в корпусі);
- **Метеосенсор HTS221**, що визначає температуру і відносну вологість повітря в навколишньому просторі і видає їх значення в 16-бітному форматі;
- **барометр LPS22HB**, призначений для вимірювання тиску повітря;
- **сенсор APDS-9960** використовує чотири фотодіода з ІЧ-випромінювачами для вимірювання відстані і розпізнавання базових жестів: помаху руки вліво або вправо, вгору-вниз і вперед-назад.

Також він вміє розпізнавати кольори за інтенсивністю каналів RGB і загальний рівень освітленості;

- **цифровий мікрофон MP34DT05**, призначений для визначення рівня шуму, вимірювання частоти звуку, розпізнавання голосових команд або запису звуку.

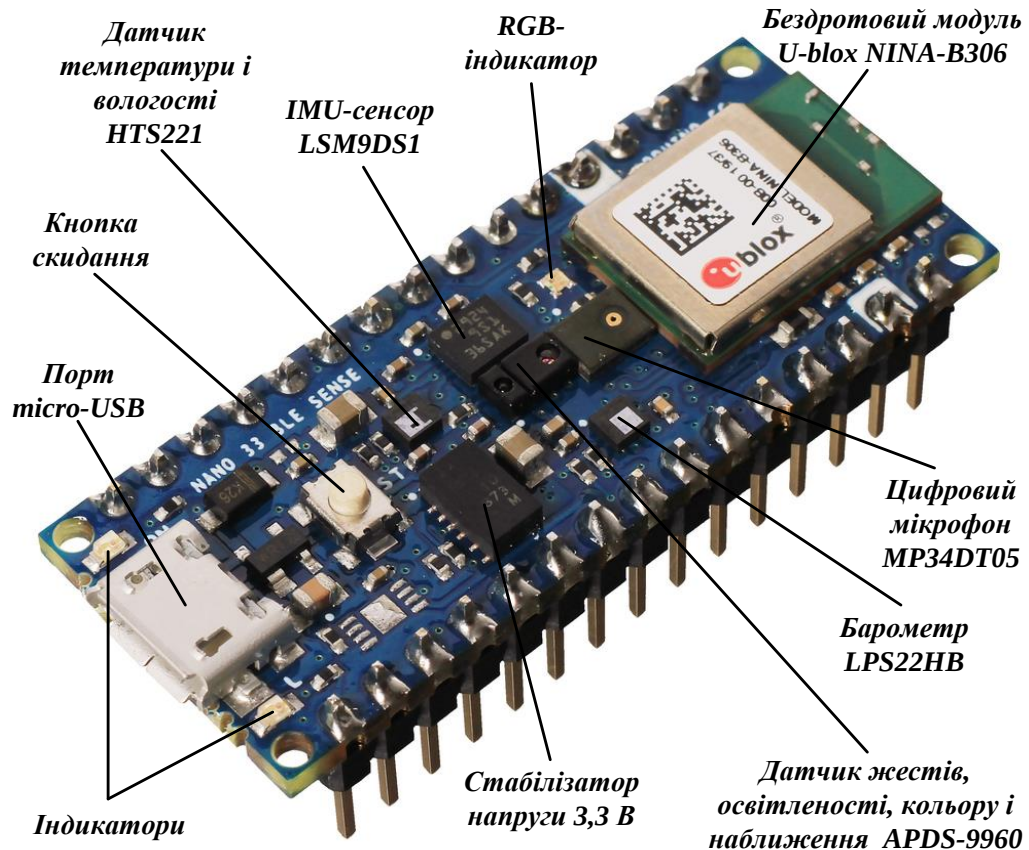


Рис. 10.48. Платформа Arduino Nano 33 BLE Sense

Плата Arduino Nano 33 BLE Sense має 30 контактів (рис. 10.49), частина з яких можуть виконувати декілька різних функцій.

Призначення контактів наступні:

Vin – контакт для підключення зовнішнього джерела напруги від 5 до 18 вольт;

5V – контакт для зворотної сумісності з проектами Arduino Nano, до якого за необхідності підводиться напруга 5 В від зовнішнього джерела живлення через перемичку;

3,3V – вихід стабілізатора напруги на 3,3 вольт з максимальним струмом 1,2 А, який забезпечує живлення модуля U-blox NINA-B306 та інших допоміжних елементів плати;

GND – загальна шина;

D0...D21 – цифрові входи/виходи. Логічний рівень одиниці – 3,3 В, нуля – 0 В. Максимальний струм виходу – 15 мА;

A0...A7 – аналогові входи;

I2C – контакти для спілкування з периферією за інтерфейсом I²C;

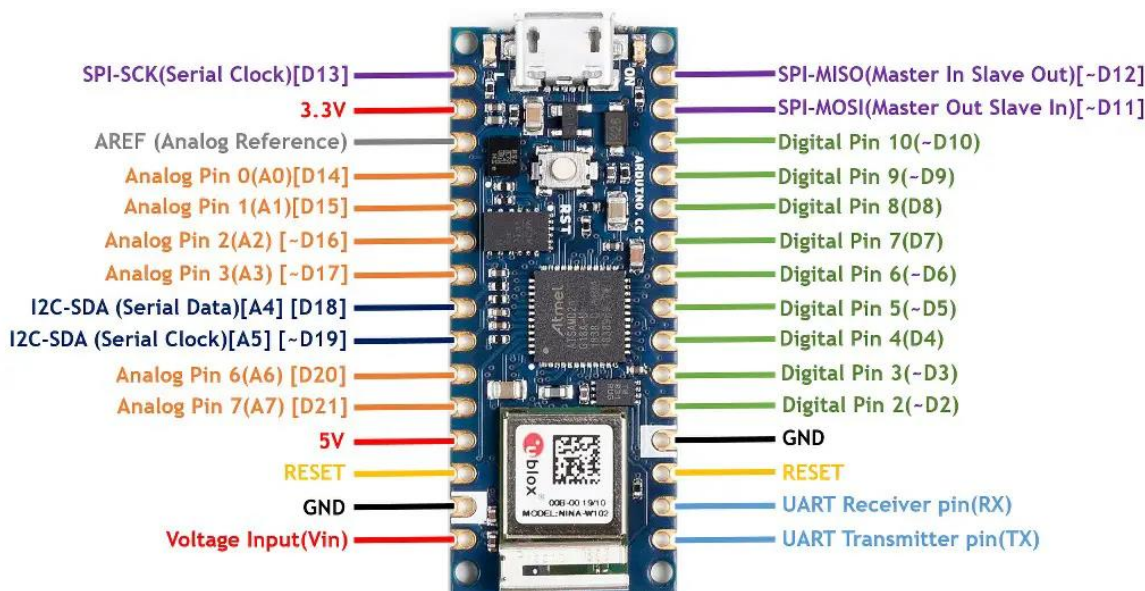


Рис. 10.49. Контакти (піни) плати Arduino Nano 33 BLE Sense

I²C – контакти для спілкування з периферією за інтерфейсом I²C;
SPI – контакти для спілкування з периферією за інтерфейсом SPI;
UART/Serial – контакти для комунікації плати з іншими платами розширення та сенсорами за послідовним інтерфейсом.

2. Ознайомитися з завданням.

В даній лабораторній роботі пропонується на базі платформи Arduino Nano 33 BLE Sense створити цифровий вимірювальний комплекс із застосуванням вбудованих до плати сенсорів. Дані, отримані з сенсорів пропонується передавати на смартфон за допомогою Bluetooth і працювати з ними через мобільний застосунок Arduino Science Journal, який дозволяє збирати і запам'ятовувати ці дані.

3. Програмування платформи Arduino Nano 33 BLE Sense.

3.1. Відкрити програму Arduino IDE.

3.2. За допомогою інструменту керування бібліотеками встановити (або перевірити наявність) наступні бібліотеки:

- Arduino Science Journal;
- Arduino_HTS221;
- Arduino_LSM9DS1;
- Arduino_LSM6DS3;
- Adafruit_Zero_PDM_Library;
- Arduino_LPS22HB;
- Arduino_APDS9960
- ArduinoBLE.

3.3. Встановити пакет для роботи з платою. Зайти в меню Інструменти – Плата – Менеджер плат. У вікні що з'явилося у стрічці пошуку ввести: Arduino Mbed OS. Після появи результатів, прокрутити стрічку униз, знайти

пакет «[DEPRECATED - Please install standalone packages] Arduino Mbed OS Boards», обрати версію 1.3.2 та встановити.

3.4. Встановити на смартфон застосунок Arduino Science Journal.

3.5. За допомогою USB кабелю під'єднати плату Arduino до ПК.

3.6. Зайти в меню Інструменти – Порт та обрати COM3 (Arduino Nano 33 BLE).

3.7. Зайти в меню Файл – Приклади – Arduino Science Journal – Nano33BLESenseFirmware. У вікні програми має з'явитися скетч для роботи з сенсорами Arduino Nano 33 BLE Sense, у тому числі передачі даних по Bluetooth.

3.8. Натиснути кнопку  «Завантаження» і дочекатися завершення завантаження скетчу на плату.

3.9. Включити на смартфоні Bluetooth та відкрити застосунок Arduino Science Journal. Дозволити застосунку доступ до геоданих.

3.10. Натиснути у вікні застосунку кнопку «Додати експеримент».

3.11. У вікні що з'явилося натиснути кнопку «Датчики».

3.12. У вікні що з'явилося натиснути «Налаштування» (рис. 10.50).

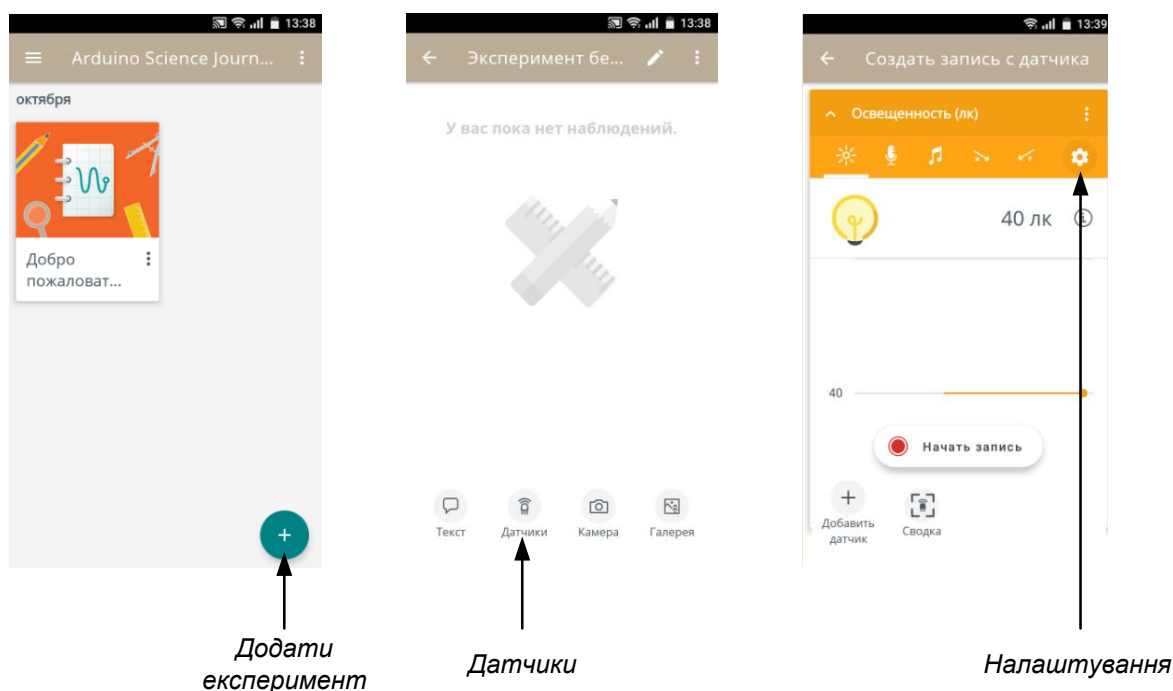


Рис. 10.50. Кроки 3.10; 3.11; 3.12 у додатку Arduino Science Journal

3.13. У вікні що з'явилося згорнути «Внутрішні датчики» і у розділі «Доступні пристрої» натиснути «BLE Sense - ...». Має з'явитися перелік датчиків плати Arduino Nano 33 BLE Sense (рис. 10.51).

3.14. Встановити маркери біля датчиків температури і вологості.

3.15. Розгорнути «Внутрішні датчики» і прибрати всі маркери.

3.16. Натиснути «Налаштування датчиків» у верхній частині вікна додатку.

3.17. Має з'явитися вікно з графіком вологості та його поточним значенням. Натиснути в цьому вікні іконку датчика температури і має з'явитися аналогічне вікно з показами температури (рис. 10.52).

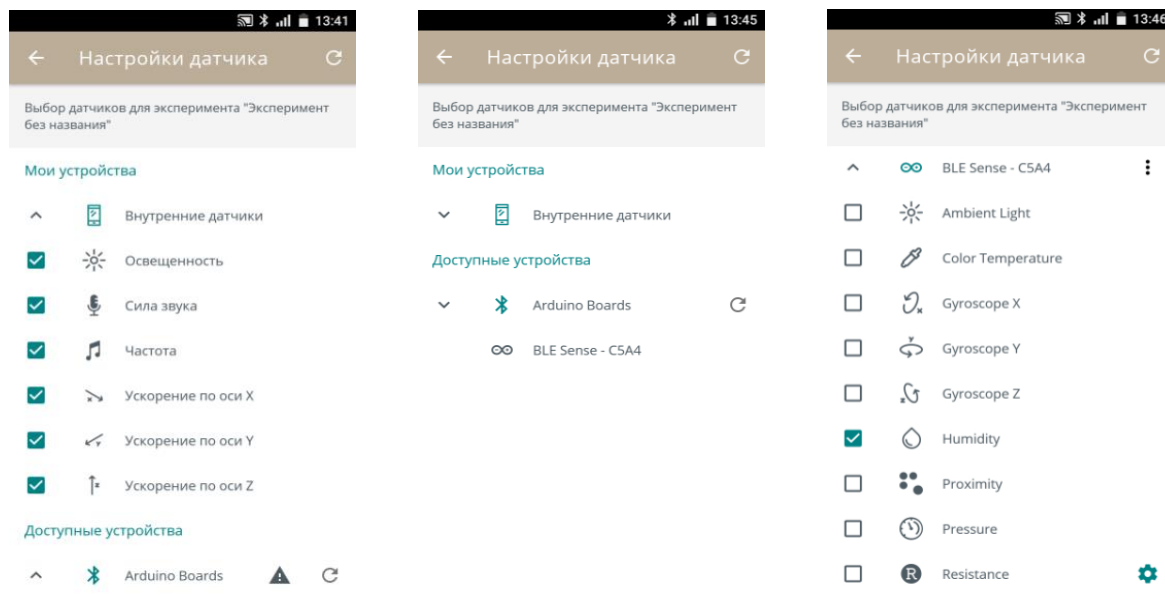


Рис. 10.51. Кроки 3.13 та 3.14 у застосунку Arduino Science Journal

3.18. Натиснути «Додати датчик» і в одному вікні будуть відображатися і покази температури і відносної вологості.

3.19. Натиснути «Почати запис».

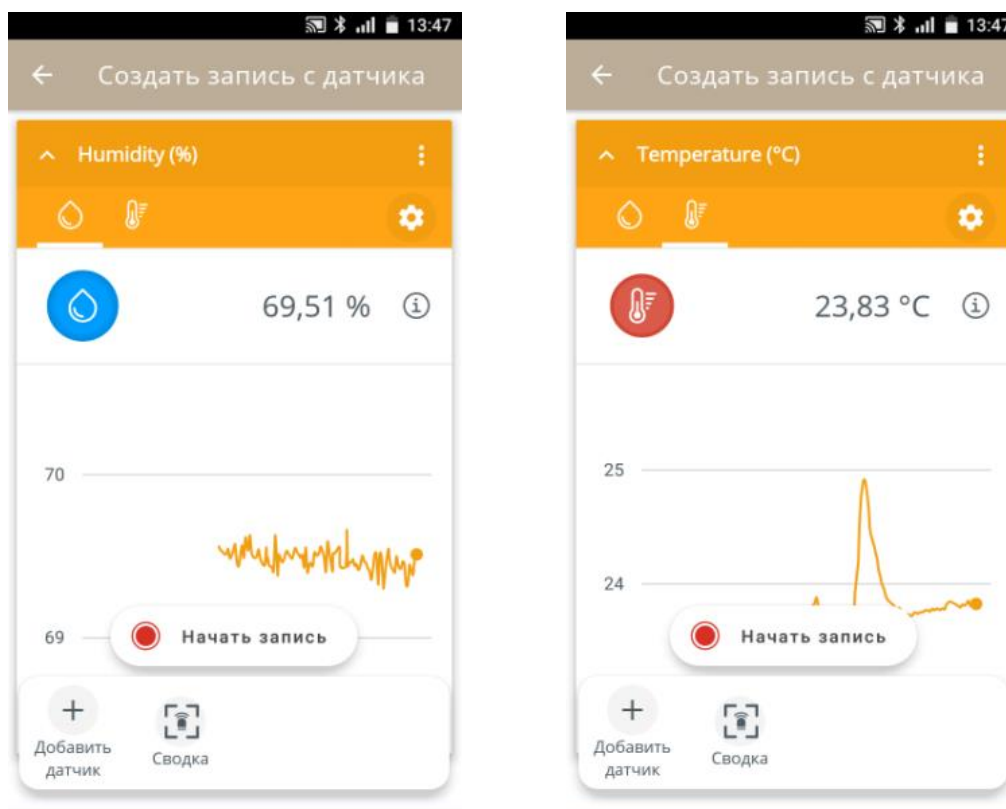


Рис. 10.52. Крок 3.17 у додатку Arduino Science Journal

- 3.20. Зачекати пару хвилин і натиснути «Стоп».
- 3.21. Дані експерименту можна зберегти у застосунку і проаналізувати. Аналіз дозволяє зчитувати показання з датчиків у потрібний момент часу.
- 3.22. Від'єднати плату від ПК і подати на неї живлення від іншого джерела з USB виходом, наприклад від зарядного пристрою для смартфона, або Power bank.
- 3.23. Переконалися, що створений вимірювальний комплекс працює без під'єднання до ПК.
4. Зробити висновки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6

ЦИФРОВИЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС НА ARDUINO NANO 33 BLE SENSE (ВАРІАНТ 2)

Мета: Створення цифрового вимірювального комплексу на Arduino Nano 33 BLE Sense.

Матеріали та обладнання: платформа Arduino Nano 33 BLE Sense; кабель USB – micro-USB; USB блок живлення (5 В); смартфон з ОС Android; ПК.

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися з завданням.

В даній лабораторній роботі пропонується на базі платформи Arduino Nano 33 BLE Sense створити цифровий вимірювальний комплекс із застосуванням вбудованих до плати сенсорів. Дані, отримані з сенсорів пропонується передавати на смартфон за допомогою Bluetooth і працювати з ними через мобільний застосунок Phyphox (Physical Phone Experiments), який дозволяє збирати і запам'ятовувати ці дані.
2. Програмування платформи Arduino Nano 33 BLE Sense.
 - 2.1. Відкрити програму Arduino IDE.
 - 2.2. За допомогою інструменту керування бібліотеками знайти і встановити бібліотеку **phyphoxBle.h**. ПК при цьому має бути підключеним до мережі Інтернет.
 - 2.3. За допомогою інструменту керування бібліотеками встановити, або перевірити наявність, наступних бібліотек:
 - Arduino_HTS221;
 - Arduino_LSM9DS1;
 - Arduino_LSM6DS3;
 - Adafruit_Zero_PDM_Library;
 - Arduino_LPS22HB;

- Arduino_APDS9960;
- ArduinoBLE.

2.3. Встановити пакет для роботи з платою. Зайти в меню Інструменти – Плата – Менеджер плат. У вікні що з'явилося у стрічці пошуку ввести: Arduino Mbed OS. Після появи результатів, прокрутити стрічку униз, знайти пакет «[DEPRECATED - Please install standalone packages] Arduino Mbed OS Boards», обрати версію 1.3.2 та встановити.

2.4. Закрити програму Arduino IDE.

2.5. Завантажити до ПК архів з файлом програмного коду (скетчу) за посиланням: https://hebergement.universite-paris-saclay.fr/phyphox/nano_phyphox_v1.zip та розпакувати його.

2.6. Відкрити файл програмного коду (скетчу). При цьому дати згоду на створення окремої папки для цього файлу.

2.7. За допомогою USB кабелю під'єднати плату Arduino до ПК.

2.8. Зайти в меню Інструменти – Порт та обрати COM3 (Arduino Nano 33 BLE).

2.9. Натиснути кнопку  «Завантаження» і дочекатися завершення завантаження скетчу на плату.

2.10. Встановити на смартфон застосунок Phyphox.

2.11. Зі смартфона перейти за посиланням: http://hebergement.universite-paris-saclay.fr/supraconductivite/projet/arduino_nano/?lang=en. Прокрутити до нижньої частини сторінки та завантажити пакет експериментів натиснувши на посилання: **Phyphox Experiments (if you are on a smartphone)**.

2.12. Включити на смартфоні Bluetooth та передачу геоданих.

2.13. Відкрити застосунок Phyphox і в розділі Arduino Nano 33 BLE Sense обрати який не будь датчик (рис. 10.53).

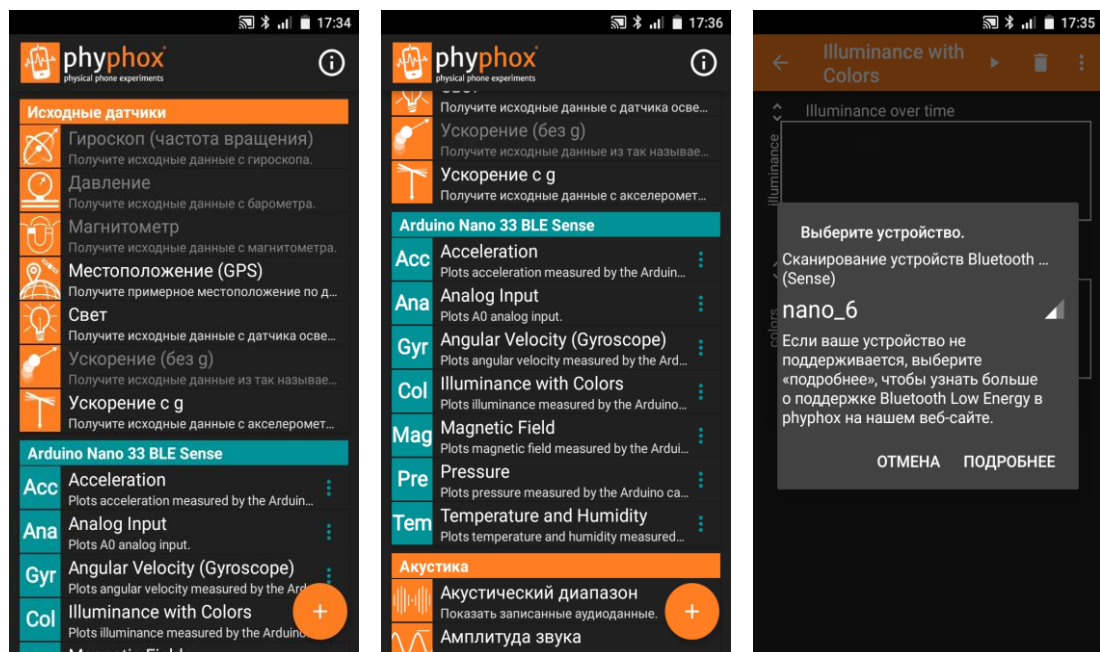


Рис. 10.53. Налаштування застосунку Phyphox

2.14. У останньому вікні обрати пристрій – папо_6.

На рис. 10.54 представлені приклади зчитування даних з зовнішніх датчиків у застосунку *Rhyrphox*. Даний програмний код дозволяє зчитувати у застосунку також дані вимірювань напруги на аналогових входах плати A0, A1 та A2. Але слід не забувати, що при цих вимірюваннях напруга на аналогових входах **не має перевищувати 3,3 В!** Дані експерименту можна зберегти у застосунку, здійснити їх експорт і проаналізувати. Аналіз дозволяє зчитувати показання з датчиків у потрібний момент часу.



Рис. 10.54. Приклади зчитування даних із зовнішніх датчиків застосунку *Rhyrphox*

2.15. Від'єднати плату від ПК і подати на неї живлення від іншого джерела з USB виходом, наприклад від зарядного пристрою для смартфона, або Power bank.

2.16. Переконатися, що створений вимірювальний комплекс працює без під'єднання до ПК.

4. Зробити висновки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 7 ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ БІО-САВАРА-ЛАПЛАСА

Мета: Здійснити експериментальну перевірку закону Біо-Савара-Лапласа.

Обладнання: плата Arduino Nano 33 BLE Sense; джерело живлення; реостат; вимикач; амперметр, або мультиметр; лабораторні штативи;

з'єднувальні проводи; кабель USB – micro-USB; смартфон з ОС Android з встановленим додатком Phyphox; ПК з встановленою програмою Arduino ID.

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями.

Закон Біо-Савара-Лапласа визначає магнітну індукцію навколо провідника, в якому протікає електричний струм.

Магнітна індукція B є силовою характеристикою магнітного поля. Одиницею вимірювання магнітної індукції в системі СІ є Тл (Тесла). Якщо магнітне поле має магнітну індукцію 1 Тл, то це означає, що на провідник довжиною 1 м зі струмом 1 А у цьому полі діятиме сила 1 Н. Тобто $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н/А}\cdot\text{м}$.

Навколо провідника, по якому протікає електричний струм утворюється магнітне поле, силові лінії якого показані на рис. 10.55.

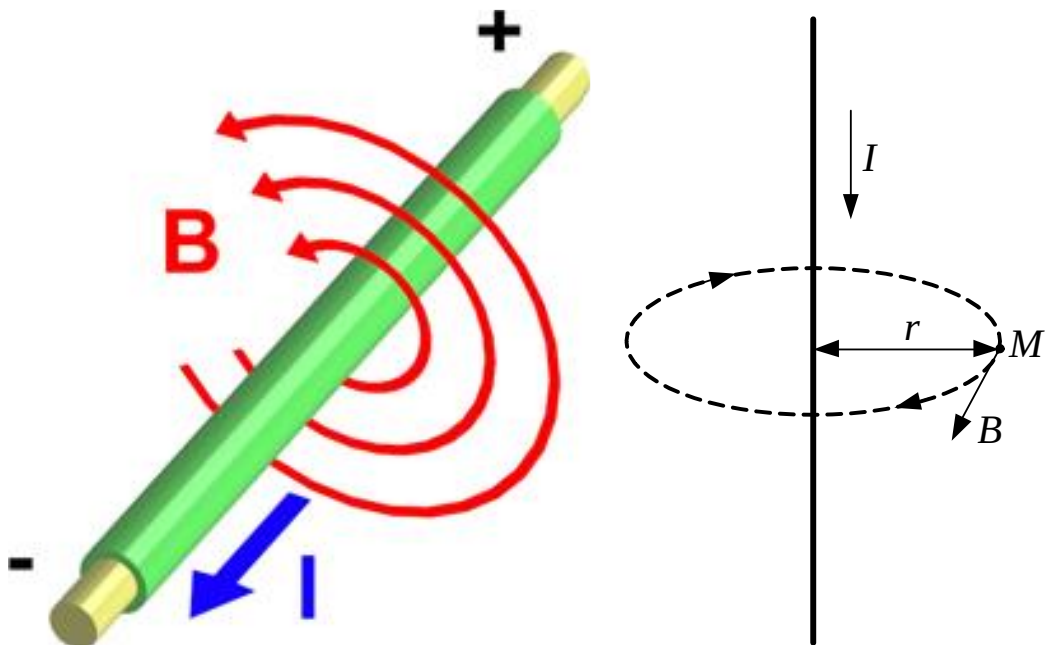


Рис. 10.55. Магнітна індукція провідника зі струмом

За законом Біо-Савара-Лапласа магнітна індукція B у точці M , що знаходиться на відстані r від нескінченно довгого прямолінійного провідника, по якому тече струм I визначається за формулою, Тл:

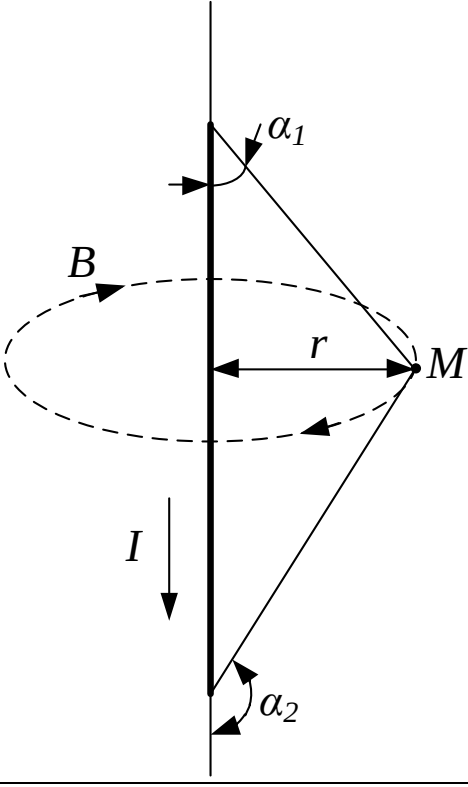
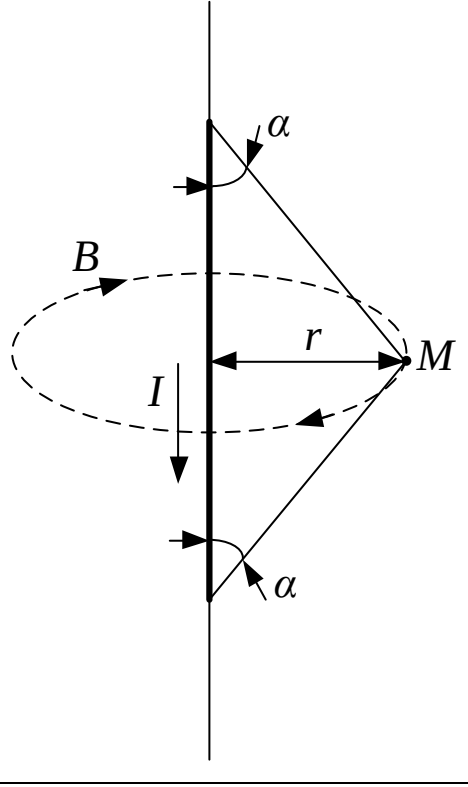
$$B_M = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot r}, \quad (10.1)$$

де μ_0 – магнітна стала, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$.

Якщо провідник має кінцеву довжину, то для розрахунку значення магнітної індукції застосовуються формули, представлені в таблиці 10.6.

На практиці, для симетричного провідника, якщо співвідношення його довжини до відстані r перевищує 10, розрахунок можна з достатньою точністю проводити за формулою (10.1).

Таблиця 10.6. Розрахункові формули для провідників кінцевої довжини

Загальний випадок:	Симетричний провідник:
	
$B_M = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot r} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$	$B_M = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot r} \cos \alpha$

2. Ознайомитися з завданням та схемою експерименту.

В даній роботі пропонується здійснити вимірювання магнітної індукції прямолінійного провідника зі струмом за допомогою цифрового вимірювального комплексу (ЦВК) на Arduino Nano 33 BLE Sense та порівняти результати вимірювань з результатами розрахунків. Загальна схема експерименту представлена на рис. 10.56.

3. Складання експериментальної установки.

3.1. Створити цифровий вимірювальний комплекс у відповідності до методики попередньої лабораторної роботи.

3.2. Скласти електричне коло у відповідності до рис. 10.55, розмістивши ділянку проводу довжиною не менше 1 м на штативах.

3.3. Навпроти середини проводу розмістити і зафіксувати плату Arduino Nano 33 BLE Sense, на відстані 20...50 мм від нього, дотримуючись орієнтації, показаної на рис. 10.56.

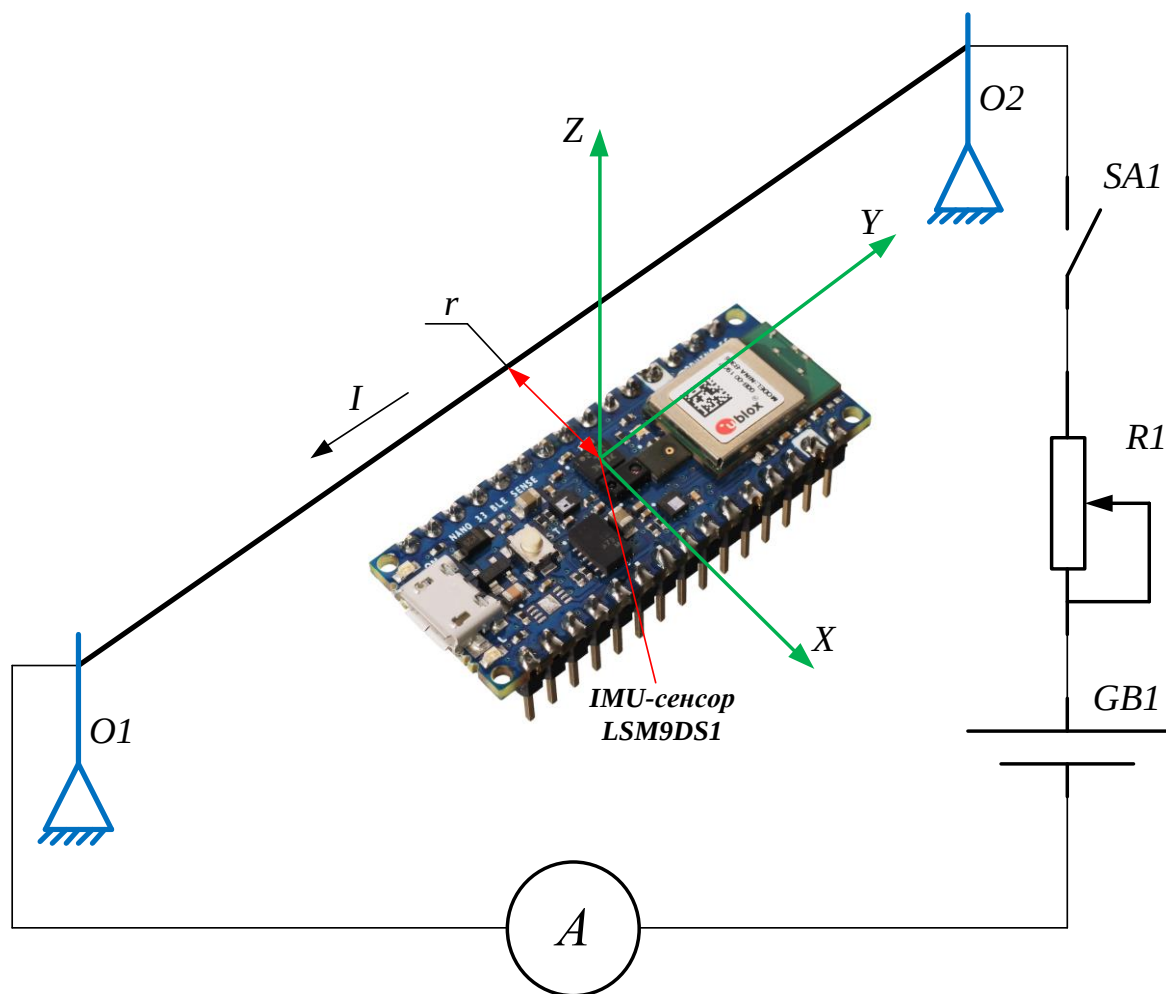


Рис. 10.56. Загальна схема експерименту

4. Проведення вимірювань.

4.1. Виміряти та зафіксувати точне значення відстані від датчику магнітного поля до проводу.

4.2. Замкнути електричне коло за допомогою вимикача та встановити за допомогою реостату силу струму 1...2 А. Розімкнути коло.

4.3. На смартфоні у додатку Phyphox у розділі Arduino Nano 33 BLE Sense обрати Magnetic Field та здійснити підключення до плати Arduino по Bluetooth.

4.3. Натиснути «Запис», зачекати 5...10 с, замкнути електричне коло, зафіксувати точне значення струму і розімкнути коло.

4.4. Припинити запис і зберегти експеримент.

На рис. 10.57 зображено приклад отриманого графіку по вісі Z.

Нижні ділянки графіку відповідають наявності струму у проводі, а верхні – відсутності. При відсутності струму значення індукції не дорівнює 0. Крім того обидва графіки мають коливання. Це зумовлено наявністю фонового природного й техногенного магнітного полів. Результатом вимірювання магнітної індукції провідника зі струмом буде різниця між значеннями верхньої та нижньої ділянок.

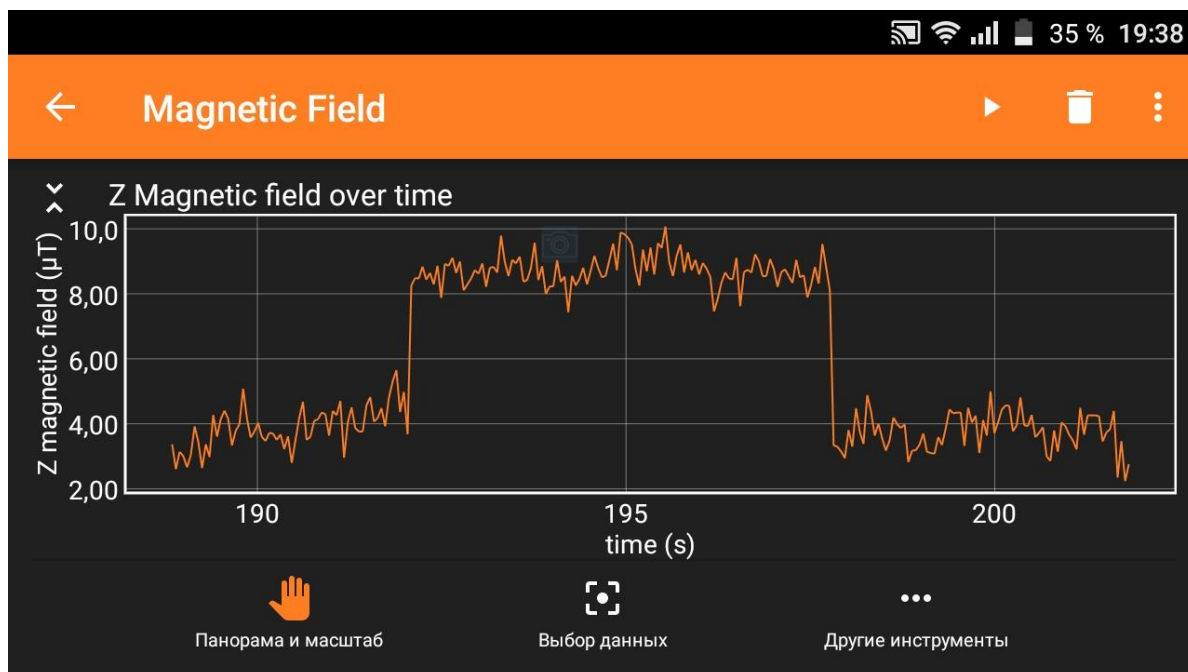


Рис. 10.57. Приклад отриманого графіку

5. Аналіз результатів.

5.1. Залежно від умов експерименту розрахувати теоретичне значення магнітної індукції за формулою (10.1), або за більш точними формулами, поданими в таблиці 1. Перевести це значення у мкТл.

5.2. Відкрити у застосунку Phyphox збережений експеримент.

5.3. Відкрити запис по вісі Z.

5.4. Натиснути «Вибір даних».

5.5. Визначити різницю між середніми значеннями магнітної індукції верхньої та нижньої ділянок графіку, встановивши маркери на відповідних його ділянках, (рис. 10.58). Ця різниця і буде дорівнювати значенню магнітної індукції проводу зі струмом.

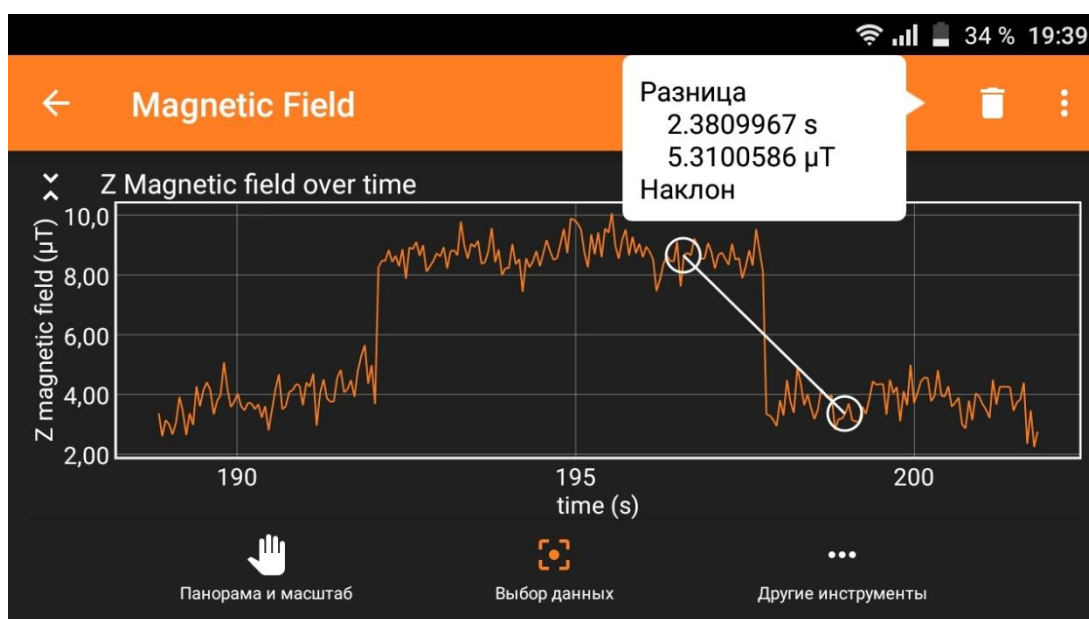


Рис. 10.58. Приклад визначення магнітної індукції у застосунку Phyphox

5.7. Порівняти розрахункове і експериментальне значення магнітної індукції.

Для більш точної обробки результатів, дані з додатку Phyrphox можна експортувати до Excel і здійснити більш точний розрахунок середніх значень кожної з ділянок.

6. Зробити висновки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 8

ВИЗНАЧЕННЯ ЄМНОСТІ ТА ЕНЕРГІЇ ЗАРЯДЖЕНОГО КОНДЕНСАТОРА

Мета роботи: Визначити ємність зарядженого конденсатора та порівняти її з номінальним значенням. Визначити енергію зарядженого конденсатора.

Обладнання: плата Arduino Nano 33 BLE Sense; макетна плата; перемички та з'єднувальні дроти; перемикач; гальванічні елементи живлення; тримач елементів живлення; кабель USB – micro-USB; смартфон з ОС Android з встановленим додатком Phyrphox; ПК з встановленою програмою Arduino ID; конденсатор з номінальною ємністю 100...1000 мкФ; резистор опором 5...50 кОм; мультиметр.

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями.

Основною характеристикою конденсатора є його електрична ємність, що характеризує властивість конденсатора нагромаджувати електричний заряд. У позначенні конденсатора фігурує значення номінальної ємності, у той час як реальна ємність може значно відрізнятися, залежно від багатьох факторів. Реальна ємність конденсатора визначає його електричні властивості. За означенням ємності, заряд на обкладинці пропорційний напрузі між обкладинками:

$$q = C \cdot U, \quad (10.2)$$

де C – електрична ємність конденсатора, Ф;

U – напруга між обкладинками конденсатора, В.

Заряд конденсатора може бути визначений як інтеграл сили струму розряду через зовнішній опір, що й буде використано у даній роботі. Визначивши величину заряду, що проходить у цьому процесі, можна обчислити його ємність.

Конденсатор може накопичувати електричну енергію. Енергія зарядженого конденсатора визначається за формулою:

$$W = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{q \cdot U}{2} = \frac{q^2}{2C}. \quad (10.3)$$

2. Ознайомитися з обладнанням та вимірювальною схемою.

Загальний вигляд обладнання представлений на рис. 10.59, а вимірювальна схема – на рис. 10.60.

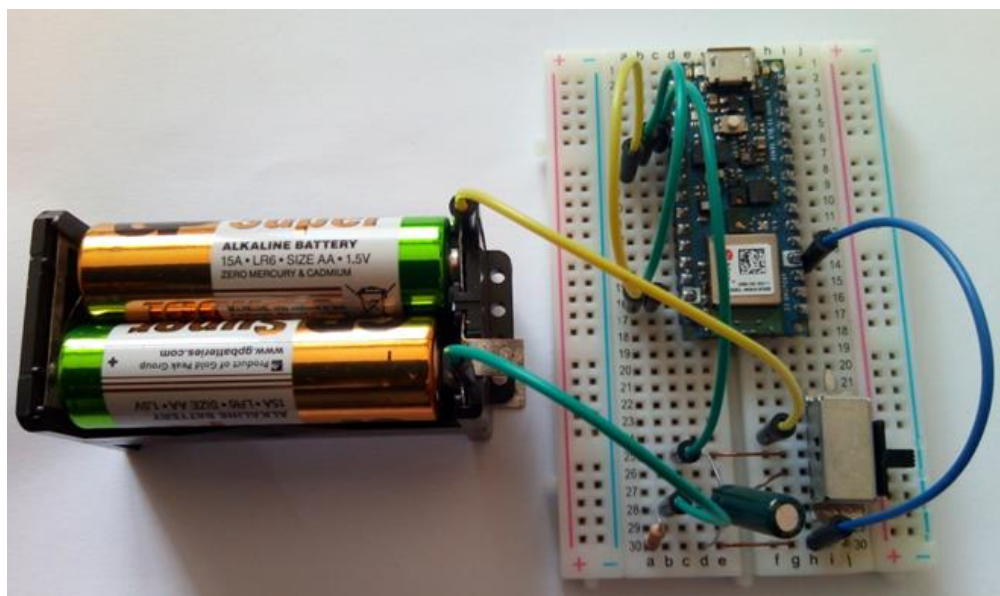


Рис. 10.59. Загальний вигляд обладнання

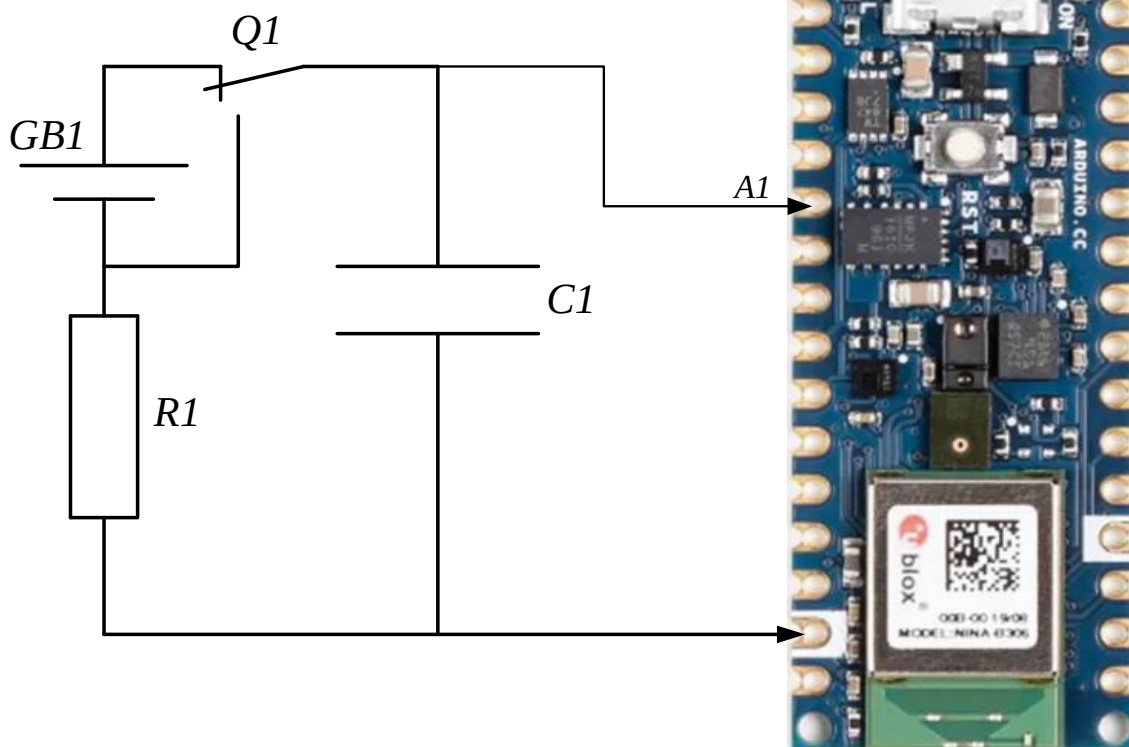


Рис. 10.60. Вимірювальна схема

3. Підготувати таблицю для занесення результатів розрахунків та вимірювань.

Таблиця 10.7. Результати розрахунків та вимірювань

Параметри	C, мкФ	Q, Кл	W, Дж
Розрахункові (номінальні)			
Експериментальні			

4. Складання вимірювальної схеми.

4.1. Створити цифровий вимірювальний комплекс у відповідності до методики лабораторної роботи 6. При цьому перед завантаженням програмного коду на плату Arduino встановити частоту вимірювань 10 замірів на секунду. Для цього в останньому рядку коду змінити delay(2) на delay(100), що відповідає вимірам через кожні 100 мс, тобто 10 вимірам на секунду.

4.2. Скласти вимірювальну схему у відповідності до рис. 10.59 керуючись також рис. 10.58. **Напруга батареї GB1 не повинна перевищувати 3,3 В!** При підборі номінальних значень ємності конденсатора та опору резистора керуватися даними таблиці 10.8.

Таблиця 10.8. Рекомендації щодо номінальних значень ємності конденсатора та опору резистора

C1, мкФ	R1, кОм
100	47...51
220	20...22
330	13...16
470	9,1...12
560	7,5...10
680	6,8...7,5
820	5,6...6,8
1000	4,7...6,2

4.3. Після підбору резистора виміряти фактичне значення його опору за допомогою мультиметра та зафіксувати це значення.

5. Проведення вимірювань.

5.1. На смартфоні у застосунку Phyphox у розділі Arduino Nano 33 BLE Sense обрати Analog Input.

5.2. Перевести перемикач у положення, що відповідає заряду конденсатору від батареї та зачекати 1...2 хв, поки конденсатор зарядиться.

5.3. У застосунку Phyphox натиснути «Запис» та перевести перемикач у положення, що відповідає розряду конденсатору. Приклад отриманого графіку представлено на рис. 10.60. Дані напруги у Phyphox відображаються у одиницях, що дорівнюють 3,3 мВ.

Графік на рисунку 10.61 відповідає напрузі на обкладинках конденсатора та на резисторі. Напруга на резисторі є пропорційною до сили струму розряду конденсатора. Отже резистор у даній схемі слугує ще й в якості вимірювального струмового шунта.

5.4. Коли значення напруг на графіках наблизяться до $0 \times 3,3$ мВ, припинити запис.

5.5. Зберегти експеримент і здійснити експорт даних у форматі Excel. Експорт можна здійснити на власну електронну пошту, або на пошту колеги.

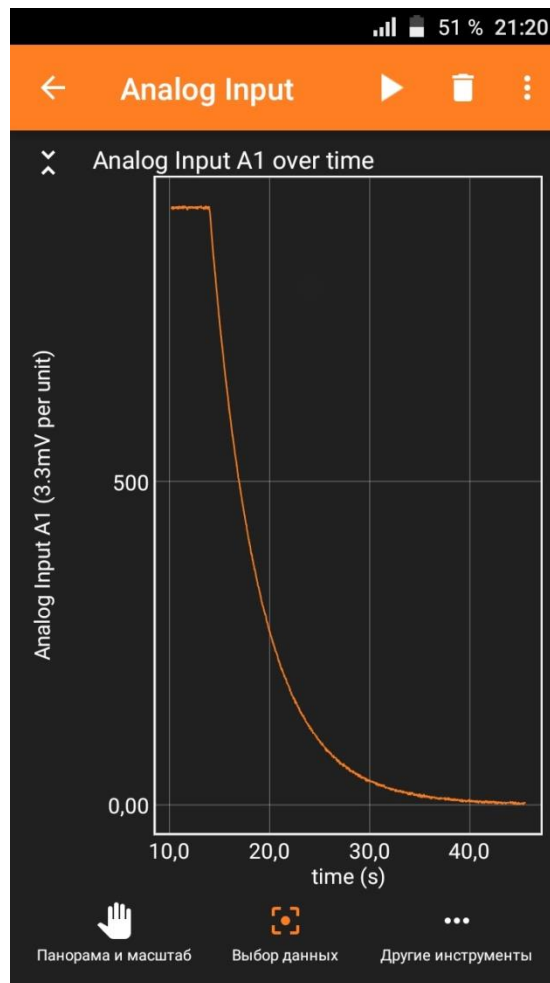


Рис. 10.61. Приклад отриманого графіку

6. Аналіз результатів.

6.1. За допомогою інструментів Excel обчислити значення напруги на конденсаторі у В. Для цього, дані, отримані з аналогового входу A1 помножити на 3,3 та поділити на 1000.

6.2. У стовпці даних напруги знайти значення, що відповідає початку розряду конденсатора.

6.3. У наступному стовпчику розрахувати значення розрядного струму поділивши напругу (починаючи зі значення, що відповідає початку розряду) на фактичний опір резистора. В усіх інших клітинках, що знаходяться вище ввести значення 0, оскільки конденсатор в цей час не розряджався.

6.4. Побудувати графіки напруги та розрядного струму конденсатору, приклади яких зображені на рис. 10.62.

6.5. Здійснити інтегрування графіку струму розряду конденсатору методом трапецій у Excel. (Про метод трапецій: <https://www.mathros.net.ua/obchyslennja-vyznachenyh-integraliv-metodom-trapecij.html>.) Результатом інтегрування всього графіку буде значення заряду конденсатору Q , Кл.

6.6. Розрахувати ємність конденсатора за формулою:

$$C = \frac{Q}{U}, \quad (10.4)$$

Де U – напруга, до якої був заряджений конденсатор.

6.7. Порівняти отримане значення ємності з номінальним.

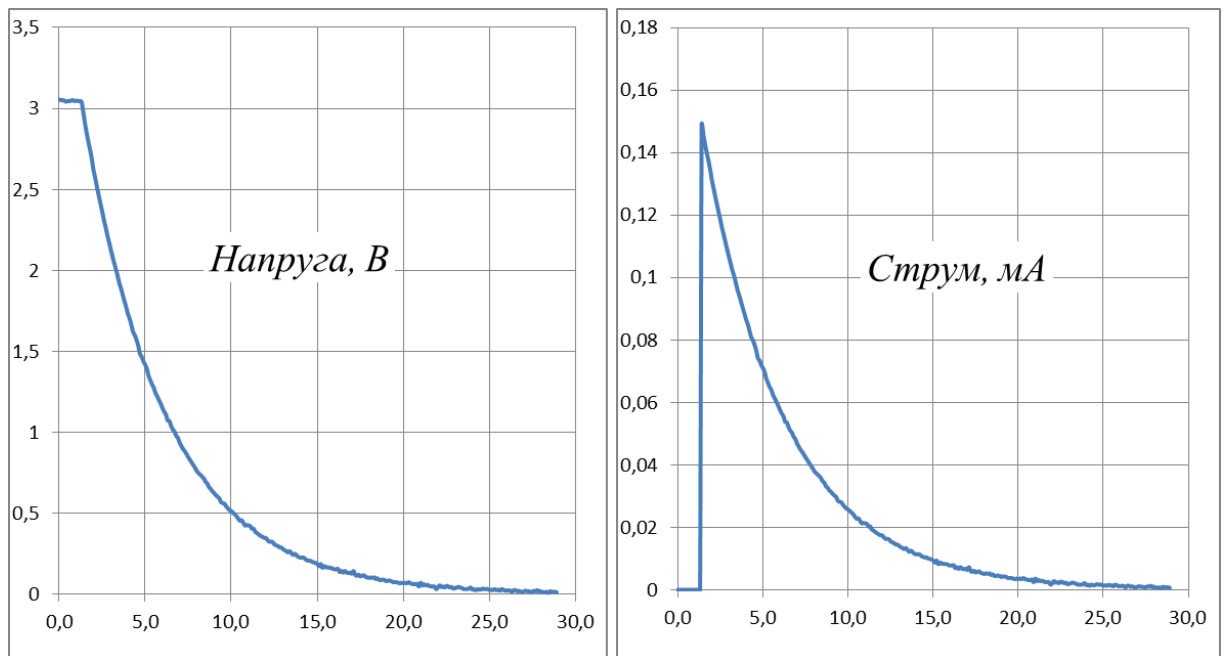


Рис. 10.62. Приклади графіків, побудованих у Excel

6.8. За формулою (10.3) розрахувати енергію зарядженого конденсатора.

6.9. У Excel здійснити перемноження значень напруги й струму розряду конденсатора. В результаті буде отримано значення миттєвої потужності розряду.

6.10. Здійснити інтегрування залежності миттєвої потужності розряду конденсатора від часу методом трапецій у Excel. В результаті інтегрування буде отримано значення енергії зарядженого конденсатора.

6.11. Порівняти це значення зі значенням, розрахованим у п. 6.8.

7. Зробити висновки.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

1. Перевести числа 85, 9, 67 та 124 з десяткової у двійкову та двійково-десяткову системи числення.
2. Перевести числа 0010111, 011011101, 011101, 10001110 з двійкової у десяткову систему числення.
3. У моделювальному комп'ютерному середовищі змодельуйте основні логічні елементи (рис. 10.2...10.6) та дослідіть їхню роботу.
4. Напишіть по 2...3 найменування мікросхем, що містять основні логічні елементи.
5. Наведіть 3...5 прикладів мікросхем регістрів. Чим вони відрізняються між собою?
6. У моделювальному комп'ютерному середовищі змодельуйте матричний шифратор та дослідіть його роботу.
7. У моделювальному комп'ютерному середовищі змодельуйте схему ЦАП (рис. 10.28) та дослідіть її роботу.

РОЗДІЛ 11

ХЕМОТРОНІКА ТА БІОЕЛЕКТРОНІКА

11.1 Провідність іонних розчинів. Хемотроніка. Як було зазначено на самому початку, електроніка – це галузь науки й техніки, що займається використанням явищ, пов'язаних проходженням електричного струму у вакуумі, газах та твердих тілах. Але електричний струм може проходити не лише у зазначених середовищах. Іонні розчини солей, кислот та лугів також мають електричну провідність і в них може протікати електричний струм. Провідність іонних розчинів зумовлена дисоціацією молекул на додатні та від'ємні іони і можливістю руху цих іонів під дією прикладеного електричного поля.

Науково-технічний напрям, що виник на стику електрохімії та електроніки отримав назву хемотроніки. Хемотроніка займається питаннями дослідження, розробки та застосування приладів і пристроїв автоматики, вимірювальної та обчислювальної техніки, дія яких заснована на електрохімічних процесах та явищах, що мають місце на межі електрод – електроліт при пропусканні електричного струму. Теоретичною основою хемотроніки в значній мірі стали роботи академіка АН СРСР Олександра Наумовича Фрумкіна.

Одним з найпростіших хемотронних приладів є так званий содовий випрямляч, який до середини минулого століття активно застосовувався у радіолюбительській практиці. Схема будови содового випрямляча зображена на рис. 11.1.

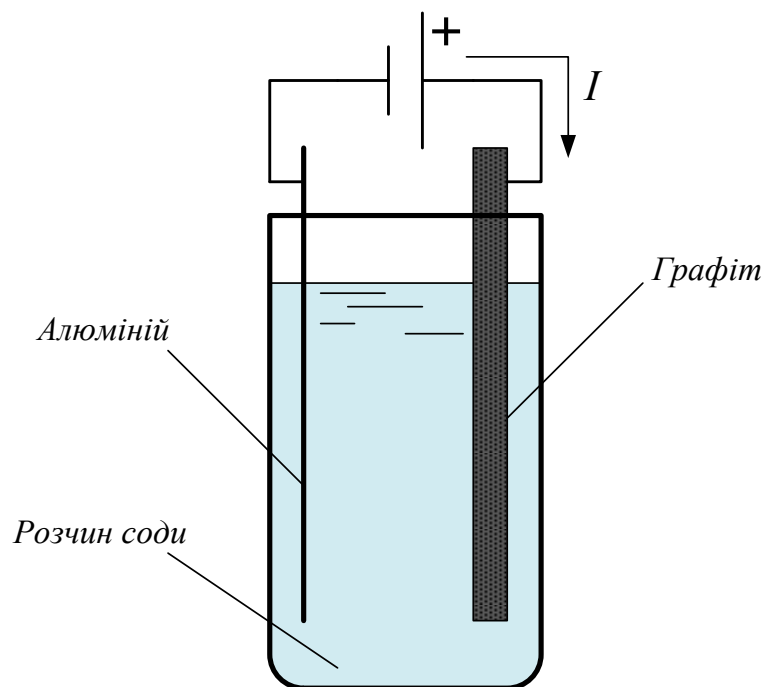


Рис. 11.1. Будова содового випрямляча

На рис. 11.1 зображено також полярність джерела живлення, при якій через випрямляч протікає електричний струм. Якщо полярність джерела

живлення змінити на протилежну, то струм протікати не буде. Однобічна провідність содового випрямляча зумовлена процесами окиснення та відновлення алюмінію. При підключенні алюмінієвого електроду до додатного полюсу джерела живлення, він окислюється, в результаті чого струм припиняється. При підключенні алюмінієвого електроду до від'ємного полюсу джерела живлення окисна плівка алюмінію відновлюється до металевого алюмінію і випрямляч гарно проводить струм.

Таким чином содовий випрямляч можна розглядати як електрохімічний діод, який можна застосувати для випрямлення змінного струму, так само, як і інші типи діодів.

Наступним прикладом хемотронного приладу є електрохімічний керований опір – мімістор. Принцип дії мімістора ґрунтується на зміні опору провідника при його анодному розчиненні або при катодному осадженні на нього металу. Схема будови мімістора представлена на рис. 11.2.

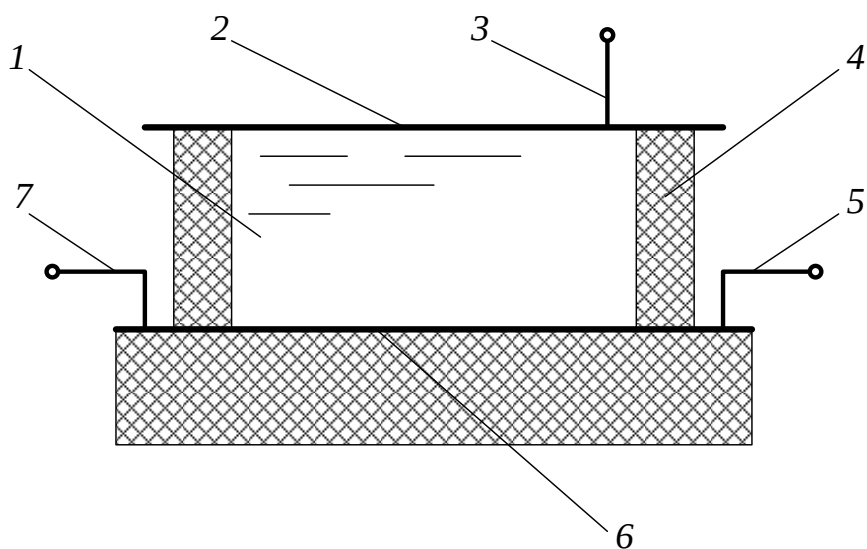


Рис. 11.2. Схема будови мімістора

Мімістор складається з діелектричного корпусу 4, заповненого електролітом 1 (зазвичай розчин сульфату міді й сірчаної кислоти). На одній зі стінок герметично закритого корпусу нанесена електропровідна підкладка 6, що має струмовиводи 5 та 7, які знаходяться поза корпусом. Електроліт омиває також електрод 2, який має струмовивід 3. Керуючий сигнал подається на електроди 2 та 6. Залежно від полярності керуючого сигналу, метал з підкладки 6 буде або анодно розчинятися, або катодно осаджуватися на неї. Тим самим буде відповідно збільшуватися або зменшуватися електричний опір металевої плівки, присутньої на підкладці 6 між струмовиводами 5 та 7.

Прилади подібного типу мають діапазон зміни опорів від декількох МОм до 1000 Ом, діапазон струмів керування від 0,05 до 1 мА, низьку споживану потужність (в межах 1 мВт) та вагу в декілька грам. Вони можуть

працювати в досить широких температурних межах і є стійкими до ударних та вібраційних навантажень.

Мімістор можна розглядати як електрохімічний аналог транзистора або тріода.

Схема будови хемотронної комірки пам'яті зображена на рис. 11.3

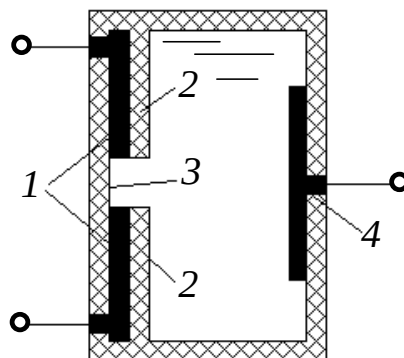


Рис. 11.3. Схема будови хемотронної комірки пам'яті

В герметичному діелектричному корпусі, заповненому електролітом, розміщені два електрода 1, виготовлені з золота або платини. Електрода з внутрішньої сторони ізолювані діелектричним покриттям 2 за винятком вузького зазору 3, ширина якого не перевищує 0,1 мм. На протилежній стінці корпусу, навпроти зазору розташовано мідний електрод 4. Відстань між електродами 2 і 4 складає близько 0,5 мм. Опір між електродами 1 залежить від наявності металу між ними у зазорі 3. При подачі на електрода 1 напруги, від'ємної відносно електроду 4, в зазорі 3 починається процес осадження міді. Через деякий час – час запису, зазор між електродами 1 буде замкнений осадженою міддю і опір між ними різко зменшиться. Якщо на електрода 1 подати напругу додатну, відносно електроду 4, то осаджена у зазорі 3 мідь розчиниться, і опір між електродами 1 збільшиться.

Таким чином, комірка має два стійких стани, що дозволяє записувати інформацію у двійковому коді.

Дослідження показали, що рідинні системи мають деякі важливі переваги у порівнянні з системами на основі твердих тіл. До основних переваг хемотронних приладів відносяться:

- низькі робочі напруги (до 1 В) та малі струми споживання (в межах 1 мА), що дозволяє створювати досить економічні прилади;
- поява нелінійності ВАХ при малих прикладених напругах (5...50 мВ), що дозволяє досягнути високої чутливості;
- протікання фізико-хімічних процесів у тонкому шарі, аж до одиниць мкм, що дозволяє створювати мікромініатюрні прилади.

Недоліком хемотронних приладів є обмежений зверху діапазон робочих частот, що зумовлено відносно невеликою рухливістю носіїв заряду.

Механізми роботи хемотронних приладів мають загальні риси з електрохімічними механізмами сприйняття, перетворення та зберігання інформації у складних системах живих організмів, в тому числі – нейронах

людського мозку, що дозволяє розраховувати на створення в майбутньому штучних біоперетворювачів інформації на хемотронній основі.

До хемотронних приладів також можна віднести суперконденсатори, або іоністори, які являють собою конденсатори, діелектричним шаром яких слугує подвійний електричний шар (ПЕШ), утворений на межі електроду та електроліту. Суперконденсатори характеризуються значно більш високими ємностями у порівнянні зі звичайними конденсаторами. За своїми характеристиками вони займають проміжне положення між конденсатором та електрохімічним акумулятором.

Електроди суперконденсаторів зазвичай виготовляються з використанням пористих матеріалів, таких як активоване вугілля, або спінений метал. Електроди з таких матеріалів мають дуже велику питому поверхню на одиницю маси, а відповідно і велику площу ПЕШ, за рахунок чого суперконденсатори мають велику електричну ємність.

Схема будови симетричного суперконденсатора представлена на рис. 11.4.

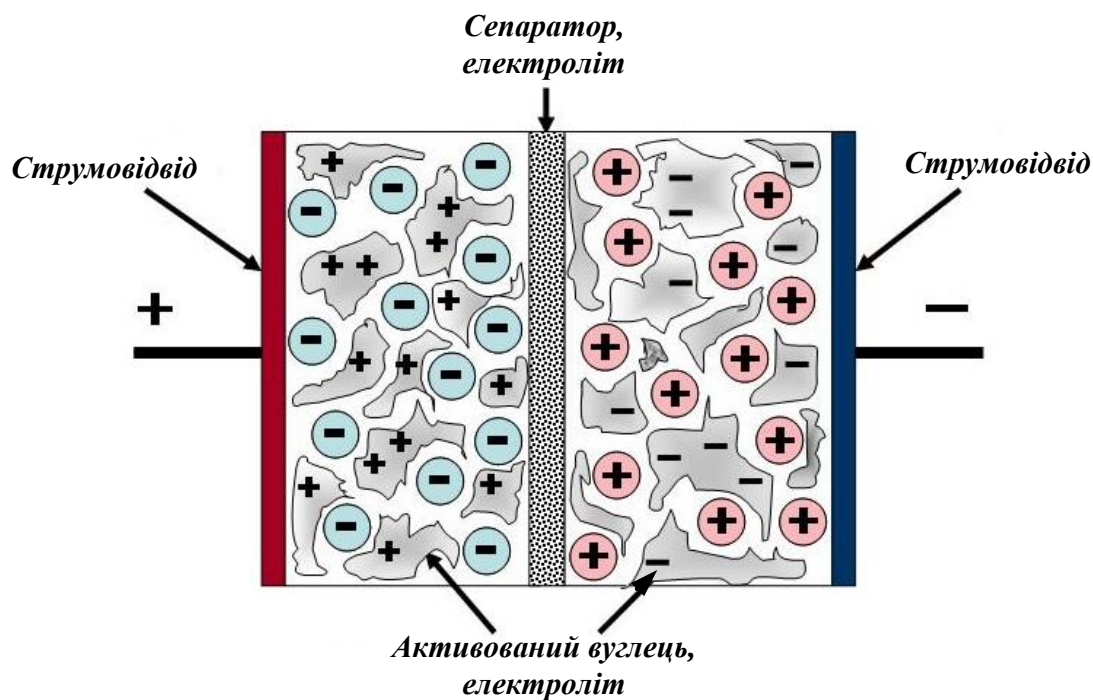


Рис. 11.4. Схема будови суперконденсатора

З рис. 11.4 видно, що ПЕШ формується на кожному електроді, отже фактично суперконденсатор складається з двох ПЕШ, які можуть заряджатися подібно до обкладинок звичайного конденсатора. У суперконденсаторі два ПЕШ електрично з'єднані між собою послідовно через рідкий провідний електроліт, який має певний опір. Крім того суперконденсатори мають струм витоку, або струм саморозряду, зумовлений особливостями його будови та неідеальністю електрохімічних процесів.

Таким чином реальний суперконденсатор можна представити у вигляді схеми на рис. 11.5.

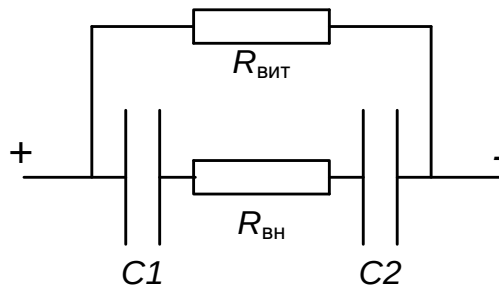


Рис. 11.5. Еквівалентна схема реального суперконденсатора

$C1$ – ємність подвійного електричного шару додатного електроду;

$C2$ – ємність подвійного електричного шару від’ємного електроду;

$R_{ВН}$ – внутрішній опір, що є опором електроліту;

$R_{ВИТ}$ – опір витoku струму, або опір саморозряду.

Ємності ПЕШ обох електродів практично дорівнюють одна одній та дорівнюють подвійній електричній ємності всього суперконденсатора, що витікає з особливостей послідовного з’єднання конденсаторів:

$$C1 = C2 = 2 \cdot C. \quad (11.1)$$

11.2. Провідність й електронні властивості живих тканин.

Біоелектроніка. У живих тканинах також можуть протікати електричні струми. Ці струми можуть бути зумовленими як зовнішньою підведеною постійною або змінною напругою, або зовнішнім змінним електричним полем, так і внутрішніми біоелектричними процесами у живому організмі.

Біоелектроніка – це галузь науки й техніки, що досліджує принципи й методи обробки інформації живими організмами з метою створення у майбутньому високопродуктивних та надійних обчислювальних засобів з елементами штучного інтелекту.

Своєрідною логічною ІМС є нервова клітина – нейрон, унікальні можливості якої використовує біоелектроніка. Останнім часом все більше й більше наукових досліджень присвячується моделюванню нервової системи живих організмів (нейронів та нейронних мереж) з метою подальшого удосконалення електронних приладів та пристроїв. Розглядаються навіть можливості включення цих біологічних об’єктів до електронних пристроїв з метою збільшення їх мініатюризації та швидкодії.

Будова окремого нейрона представлена на рис. 11.6.

Нейрон складається з тіла з ядром (соми) розміром у декілька десятків мікрон і відростків, що відходять від нього – дендритів і аксона. Місце контакту аксона одного нейрона з дендритом іншого називається синапсом.

Дендрити призначені для сприйняття вхідних сигналів, а аксон передає імпульси назовні. Тіло клітини – це місце збору інформації нейроном крізь велику кількість синаптичних з’єднань. Надходження сигналів до нейрона відбувається від рецепторів, або від інших нейронів, а коли сумарний сигнал сягає деякого порогового значення, в сомі створюється електричний імпульс,

що надходить в аксон, проходить по ньому і потрапляє або до наступних нейронів, або до інших клітин живого організму через синапси.

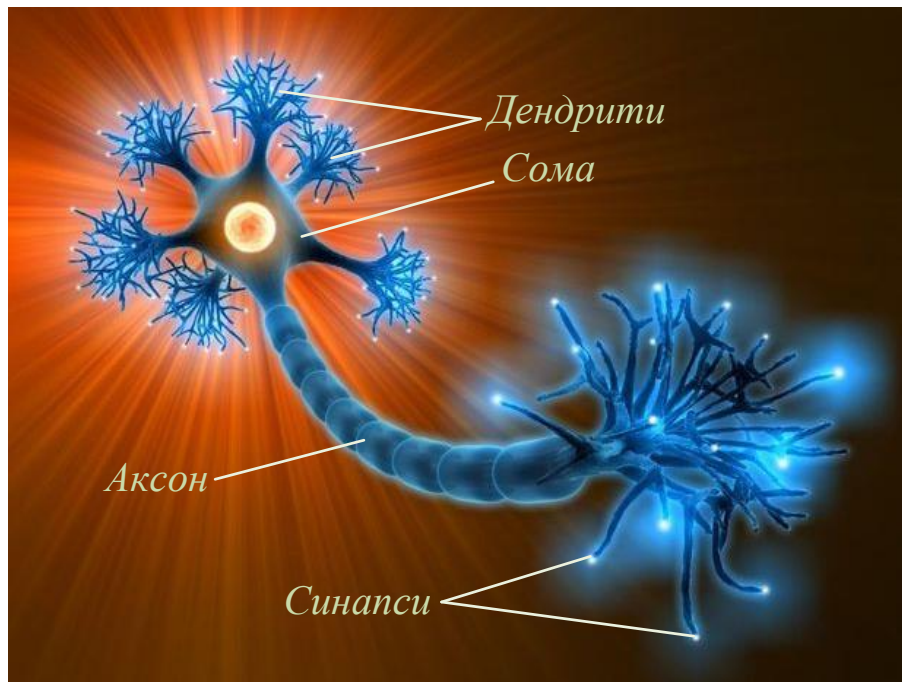


Рис. 11.6. Загальна будова нейрона

Таким чином у живому організмі нейрони створюють систему, здатну сприймати і перетворювати як зовнішні, так і внутрішні сигнали, накопичувати й обробляти отриману інформацію і передавати потрібні імпульси на внутрішні органи, наприклад м'язи. Завдяки нейронам забезпечується керування всіма життєвими функціями організму.

Надзвичайні можливості такої системи (велика ємність інформації на одиницю об'єму, низькі енергетичні витрати, проходження логічних та інтуїтивних операцій, тощо) обумовлюють інтерес як до моделювання нейронів і нейронних мереж різного рівня складності на електронних та хемотронних приладах, так і до використання живих нервових клітин в електронних обчислювальних комплексах. Обидва напрями з одного боку відкривають великі перспективи, а з іншого боку – значне занепокоєння, оскільки можуть мати місце непередбачувані наслідки, пов'язані з втратою контролю людини над такими системами.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

ДОСЛІДЖЕННЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРА ТА ПОБУДУВАННЯ ЙОГО ЕКВІВАЛЕНТНОЇ СХЕМИ

Мета: визначення параметрів суперконденсатора та побудова його еквівалентної схеми.

Матеріали та обладнання: зразки суперконденсаторів; плата Arduino Nano 33 BLE Sense; макетна плата; перемички та з'єднувальні дроти; перемикач; гальванічні елементи живлення; тримач елементів живлення; кабель USB – micro-USB; смартфон з ОС Android з встановленим додатком Phyphox; ПК з встановленою програмою Arduino ID; резистори опором 2...5 Ом; мультиметр; мікроамперметр або мультиметр.

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися з методикою вимірювань.

Ємність суперконденсатору визначається за методикою лабораторної роботи «Визначення ємності та енергії зарядженого конденсатору», методика якої описана у розділі 10.

Для визначення внутрішнього опору необхідно на графіку струму розряду визначити максимальне значення, яке відповідає початку розряду та визначити значення напруги суперконденсатору, яке відповідає максимальному значенню струму.

Внутрішній опір суперконденсатору визначається за формулою:

$$R_{вн} = \frac{U_{max}}{I_{max}} - R_n, \quad (11.2)$$

де R_n – опір навантаження іоністора, Ом.

Для визначення опору витоку необхідно підключити заряджений суперконденсатор через мікроамперметр, або мультиметр у режимі вимірювання струму, до джерела живлення і дочекатись моменту коли струм перестане зменшуватись і набуде сталого значення. Це і буде струм витоку $I_{вит}$ при напрузі джерела живлення U . Опір витоку визначається за формулою:

$$R_{вит} = \frac{U}{I_{вит}}. \quad (11.3)$$

2. Підготувати таблицю результатів.

Таблиця 11.1. Результати дослідів

C, Φ	I_{max}, A	U_{max}, B	$R_{вн}, Ом$	$I_{вит}, A$	U, B	$R_{вит}, Ом$

3. Проведення дослідів.

3.1. Визначити ємність суперконденсатору за методикою лабораторної роботи «Визначення ємності та енергії зарядженого конденсатору», описаної у розділі 10. Під час досліду врахувати робочу напругу суперконденсатору. Результати занести до таблиці.

3.2. За отриманими даними визначити максимальний струм під час розряду та напругу, що йому відповідає. Результати занести до таблиці.

3.3. Підключити заряджений суперконденсатор через мікроамперметр, або мультиметр у режимі вимірювання струму, до джерела живлення.

3.4. Дочекатися, моменту коли струм перестане зменшуватись і набуде сталого значення. Зафіксувати струм витоку $I_{\text{вит}}$ і напругу джерела живлення U .

4. Обробка даних.

4.1. Визначити ємності ПЕШ обох електродів за формулою (11.1).

4.2. Визначити внутрішній опір суперконденсатору за формулою (11.2).

4.3. Визначити опір витоку суперконденсатору за формулою (11.3).

4.4. Накреслити еквівалентну схему суперконденсатору за рис. 11.5 та вказати на ній фактичні значення параметрів, отриманих у ході роботи.

5. Зробити висновки.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 1

ВИМІРЮВАННЯ НАПРУЖЕНОСТІ ЗМІННОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ПРОМИСЛОВОЇ ЧАСТОТИ.

Мета: Провести вимірювання напруженості змінного електричного поля промислової частоти у приміщенні та порівняти отримане значення з нормативом.

Обладнання: макетна плата; польовий транзистор з керуючим р-п переходом, п-канальний J108, J109, J110, J111, або J112; резистор опором 100...220 кОм, 0,25...1 Вт; конденсатор ємністю 1...2,2 мкФ; з'єднувальні провідники; елемент живлення «Крона», 9 В; тримач елемента живлення типу «Крона» (контактна площадка зі з'єднувальними проводами); пластина двостороннього фольгованого текстоліту товщиною 1...2 мм, з орієнтовними розмірами 10×10 см; мідний монолітний ізольований провід діаметром близько 0,5 мм по міді; паяльник, припій паяльний флюс, або каніфоль; мультиметр.

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями.

Весь оточуючий нас простір пронизаний електромагнітними полями, які розповсюджуються від їх джерела у вигляді електромагнітних хвиль. Існують природні і техногенні джерела електромагнітних полів.

До природних джерел електромагнітних полів відносяться: атмосферна електрика (блискавки, статичні розряди, тощо), радіовипромінювання Сонця та галактик, електричне та магнітне поле Землі.

До техногенних джерел електромагнітних полів належать: електричні мережі, різноманітне промислове і побутове обладнання, антени різноманітних радіопередавачів, тощо.

Електромагнітні поля характеризуються напруженістю змінних електричного та магнітного полів.

2. Ознайомитися з завданням.

В даній лабораторній роботі пропонується провести вимірювання напруженості змінного електричного поля промислової частоти (50 Гц), джерелом якого є електромережа.

3. Ознайомитися з методикою вимірювань та обладнанням.

Якщо в змінному електричному полі розмістити плоский конденсатор перпендикулярно до силових ліній поля, то на його обкладинках буде наводитися змінна напруга U , пропорційна до напруженості поля. Якщо виміряти цю напругу і поділити її значення на відстань між обкладинками конденсатору, то ми отримаємо значення напруженості електричного поля (у В/м), діючого перпендикулярно до вимірювального конденсатору.

Для зручності вимірювань вимірювальний конденсатор має бути більш менш компактним. При цьому його ємність буде не великою (десятки, або сотні пФ), а струм, який може протікати через вимірювальний прилад, буде істотно обмеженим. Звичайні цифрові мультиметри в режимі вимірювання напруг мають вхідний опір близько 1 або близько 10 МОм, залежно від класу приладу. Фактично, напруга виміряна за допомогою мультиметра є пропорційною до струму, який проходить через вхідний опір приладу, і якщо струм матиме істотне зовнішнє обмеження, вимірювання напруги будуть не коректними. Для коректного вимірювання змінної напруги на компактному вимірювальному конденсаторі потрібен прилад з надвисоким вхідним опором.

Задачу збільшення вхідного опору мультиметра можливо вирішити застосувавши витоковий повторювач на польовому транзисторі, відповідно до схеми, представленої на рис. 11.7.

У схемі на рис. 11.7 витоковий повторювач складається з польового транзистору $Q1$, резистору $R1$ та конденсатору $C1$. Сигнал з вимірювального конденсатору подається до затвору польового транзистору. Конденсатор $C1$ слугує для відокремлення постійної складової від вихідного сигналу. З нього знімається вихідний сигнал і подається до мультиметру, увімкненого у режимі вимірювання змінної напруги (VAC).

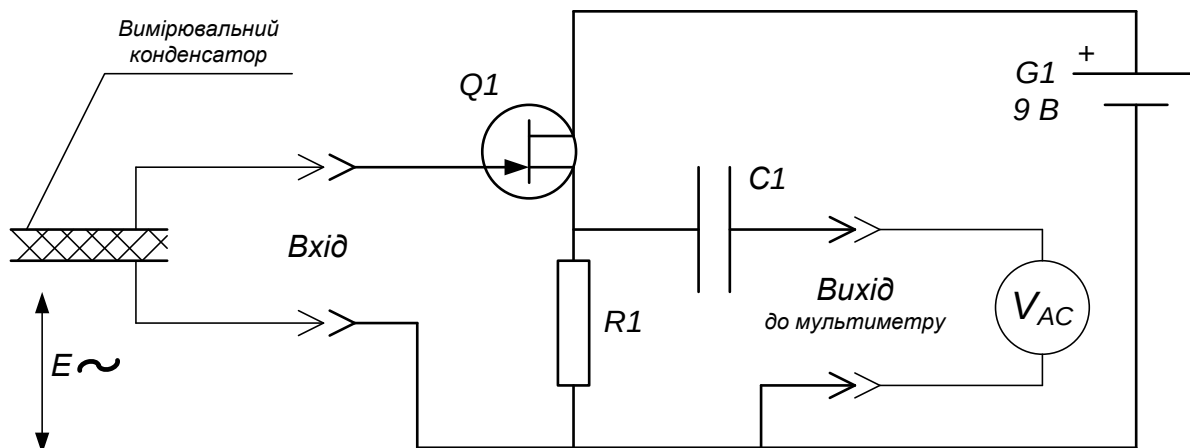


Рис. 11.7. Схема вимірювання напруженості змінного електричного поля промислової частоти

У схемі витокового повторювача для вимірювань напруженості змінного електричного поля за допомогою вимірювального конденсатора з розмірами обкладинок близько 10×10 см та відстанню між ними $1 \dots 2$ мм можна застосувати резистор опором $100 \dots 220$ кОм і конденсатор ємністю $1 \dots 2,2$ мкФ.

В якості вимірювального конденсатора зручно використовувати пластину двостороннього фольгованого текстоліту з вказаними розмірами.

Назви і розміщення електродів польових транзисторів J108, J109, J110, J111 та J112 у корпусі TO-92 представлені на рисунку 4.19.

Загальний вигляд обладнання (приклад) зображено на рис. 11.8.

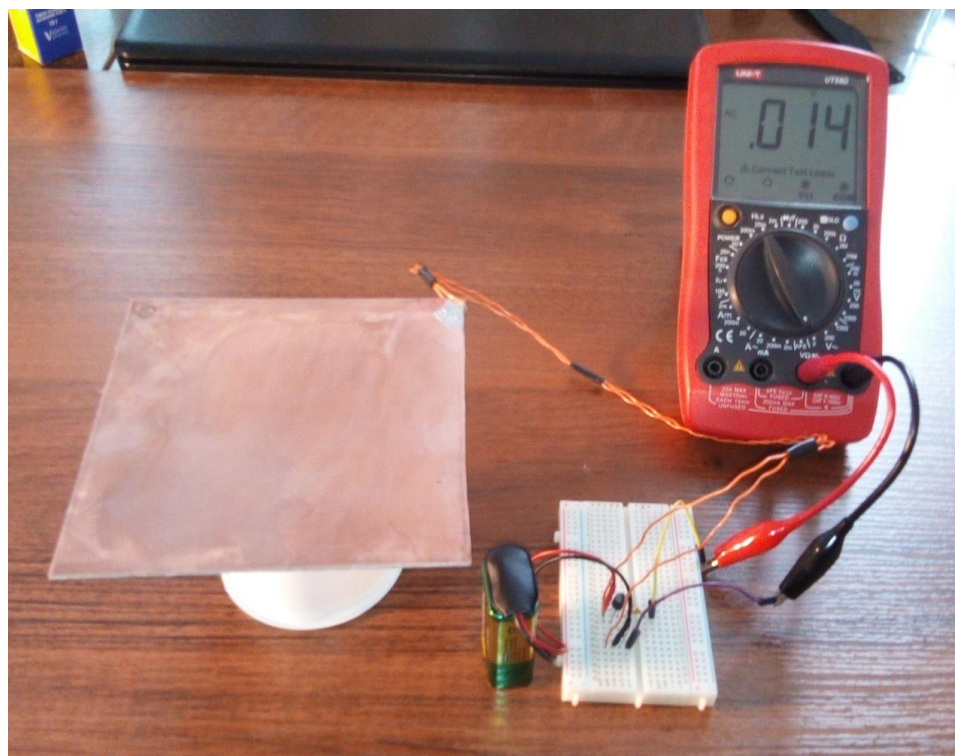


Рис. 11.8. Обладнання для вимірювання напруженості змінного електричного поля промислової частоти

4. Підготовка вимірювального обладнання.

4.1. Взяти два відрізки мідного монолітного проводу довжиною близько 50 см та зняти по краях ізоляцію. Провід діаметром 0,5 мм по міді зручно використовувати при роботі з макетними платами.

4.2. Підпаяти кінці проводів до кутів фольги текстоліту. Один провід до верхньої обкладинки, а інший – до нижньої.

4.3. На макетній платі скласти схему витокового повторювача у відповідності до схеми на рисунку 11.7 з урахуванням даних про розміщення електродів польових транзисторів на рис. 4.19. Підключити до схеми живлення і мультиметр. Приклад зібраної схеми приведено на рис. 11.9.

4.4. Підключити до схеми вимірювальний конденсатор (рис. 11.8). Вимірювальний конденсатор розмістити на деякій відстані від стола на діелектричну підставку (наприклад пластиковий стаканчик).

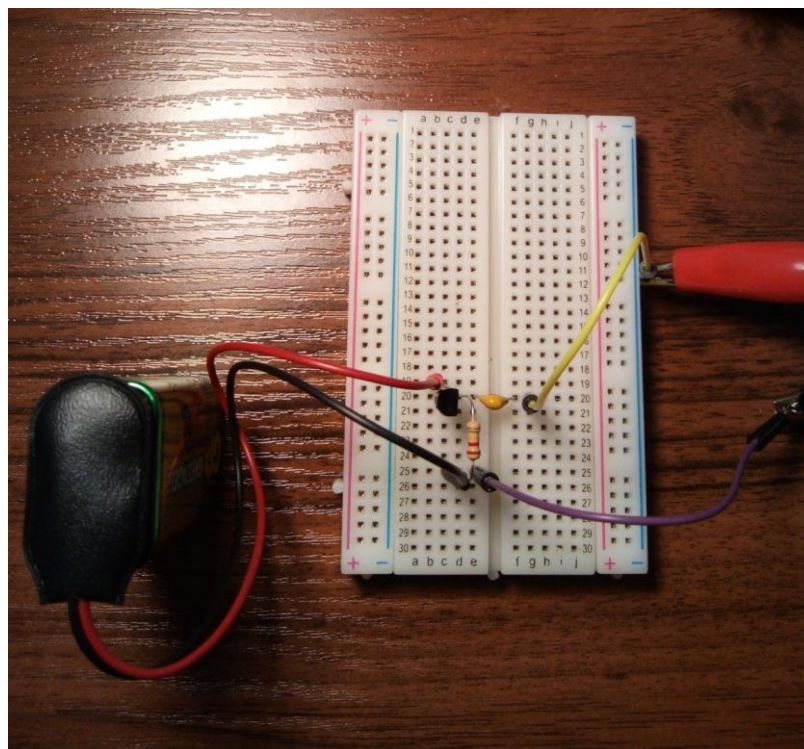


Рис. 11.9. Приклад зібраної схеми витокового повторювача

5. Проведення вимірювань.

5.1. Увімкнути мультиметр на режим вимірювання змінної напруги VAC.

5.2. За допомогою металевого пінцету або з'єднувального проводу з'єднати обкладинки вимірювального конденсатора між собою. При цьому мультиметр має показати 0 В.

5.3. Забрати пінцет або провід від вимірювального конденсатора, зчитати і зафіксувати показання мультиметра та просторову орієнтацію конденсатора.

5.4. Обчислити значення напруженості електричного поля промислової частоти поділивши показання мультиметра у В на відстань між обкладинками конденсатора у м.

5.5. Провести аналогічні вимірювання при різних просторових орієнтаціях вимірювального конденсатора.

6. Аналіз даних.

6.1. Серед результатів вимірювань знайти максимальне значення напруженості електричного поля. З урахуванням просторової орієнтації вимірювального конденсатора, яка відповідає максимальному значенню напруженості поля, дійти висновків про його джерело.

6.2. Знайти в мережі інформацію щодо максимально допустимої напруженості електричного поля промислової частоти у житлових приміщеннях або навчальних закладах, та порівняти отримане максимальне значення з нормативом.

7. Зробити висновки.

ПРАКТИЧНА РОБОТА 2

ВИМІРЮВАННЯ ЗМІННОГО ПОТЕНЦІАЛУ, НАВЕДЕНОГО НА ТІЛІ ЛЮДИНИ ЕЛЕКТРИЧНИМ ПОЛЕМ ПРОМИСЛОВОЇ ЧАСТОТИ.

Мета: Провести вимірювання змінного потенціалу, наведеного на тілі людини електричним полем промислової частоти.

Обладнання: макетна плата; польовий транзистор з керуючим р-п переходом, п-канальний J108, J109, J110, J111, або J112; резистор опором 100...220 кОм, 0,25...1 Вт; конденсатор ємністю 1...2,2 мкФ; конденсатор ємністю 5...10 нФ; з'єднувальні провідники; елемент живлення «Крона», 9 В; тримач елементу живлення типу «Крона» (контактна площадка зі з'єднувальними проводами); мультиметр.

ХІД РОБОТИ

1. Ознайомитися з теоретичними відомостями.

Змінні електричні поля, які нас оточують наводять змінний електричний потенціал на усіх тілах, що мають електричну провідність. Людське тіло також має електричну провідність і на ньому також може наводитися змінний електричний потенціал.

2. Ознайомитися з завданням.

В даній роботі пропонується провести вимірювання змінного потенціалу, наведеного на тілі людини електричним полем промислової частоти (50 Гц), джерелом якого є електромережа.

3. Ознайомитися з методикою вимірювань та обладнанням.

В попередній практичній роботі було запропоновано провести вимірювання напруженості змінного електричного поля промислової частоти. Для цього використовувалася схема витокового повторювача, до якої підключався вимірювальний конденсатор і мультиметр. Необхідність застосування витокового повторювача з надвисоким входним опором зумовлена істотним обмеженням струму через малу ємність вимірювального конденсатора – десятки або сотні пФ. Електрична ємність людського тіла, змінний потенціал якого ми хочемо виміряти, також невелика і складає в середньому 80 пФ. Тому для його вимірювання нам також знадобиться схема з витоковим повторювачем. Схема для вимірювання змінного потенціалу, наведеного на тілі людини електричним полем промислової частоти представлена на рис. 11.10.

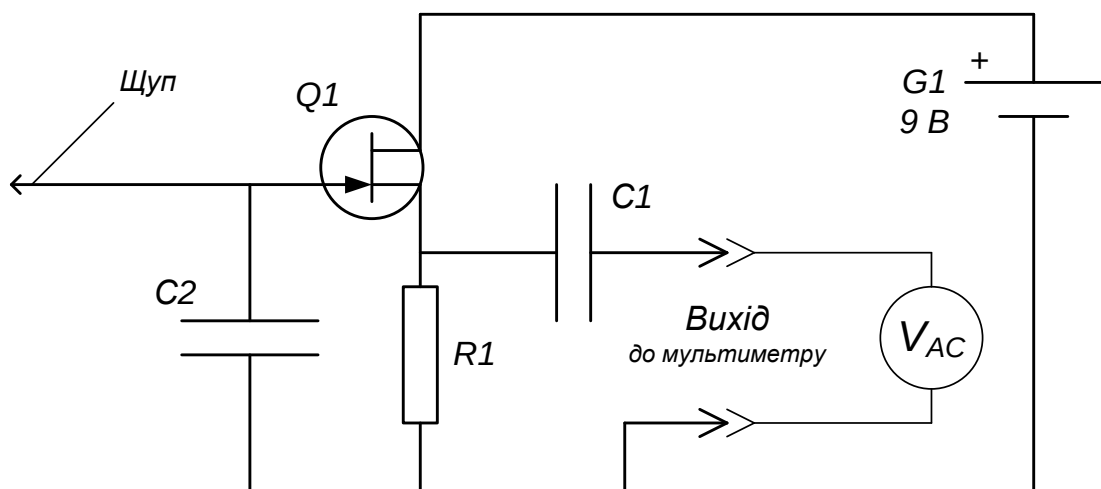


Рис. 11.10. Схема вимірювання змінного потенціалу, наведеного на тілі людини електричним полем промислової частоти

У схемі на рис. 11.10 витоковий повторювач складається з польового транзистору $Q1$, резистору $R1$ та конденсатору $C1$.

Під час вимірювання змінного потенціалу, наведеного на вашому тілі, треба взятися рукою за щуп (рис. 11.11). Сигнал з щупу подається до затвору польового транзистору. Конденсатор $C1$ слугує для відокремлення постійної складової від вихідного сигналу. З нього знімається вихідний сигнал і подається до мультиметру, увімкненого у режимі вимірювання змінної напруги (VAC). Конденсатор $C2$ номінальною ємністю 5...10 нФ разом з електричною ємністю вашого тіла утворює ємнісний дільник змінної напруги. Застосування ємнісного дільника необхідно, оскільки дуже часто наведений змінний потенціал на тілі людини значно перевищує напругу живлення витокового повторювача.

Для визначення змінного електричного потенціалу, наведеного на тілі людини, за результатами вимірів за схемою на рисунку 11.8 необхідно скористатися формулою:

$$\varphi = U_{AC} \cdot \frac{C_T + C_2}{C_T}, \quad (11.4)$$

де U_{AC} – показання мультиметра у режимі вимірювання змінної напруги;

C_T – ємність людського тіла – у середньому $80 \text{ пФ} = 80 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$;

C_2 – ємність конденсатору C_2 к вашій схемі – $5 \dots 10 \text{ нФ} = 5 \cdot 10^{-9} \dots 10 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$.

У схемі витокового повторювача для вимірювань змінного електричного потенціалу, наведеного на тілі людини можна застосувати резистор опором $100 \dots 220 \text{ кОм}$ і конденсатор ємністю $1 \dots 2,2 \text{ мкФ}$.

Назви і розміщення електродів польових транзисторів J108, J109, J110, J111 та J112 на позначенні в електричних схемах та у виробках у корпусі TO-92 представлені на рисунку 4.19.

Вимірний змінний електричний потенціал, наведений на вашому тілі дорівнює напрузі, наведеній на тілі відносно «-» живлення витокового повторювача. Якщо «-» джерела живлення з'єднати з заземленням, то ви виміряєте змінну напругу, наведену на вашому тілі відносно землі, потенціал якої дорівнює 0 В .

В якості щупу застосовується з'єднувальний провід під макетні плати.

Загальний вигляд обладнання (приклад) зображено на рис. 11.11.

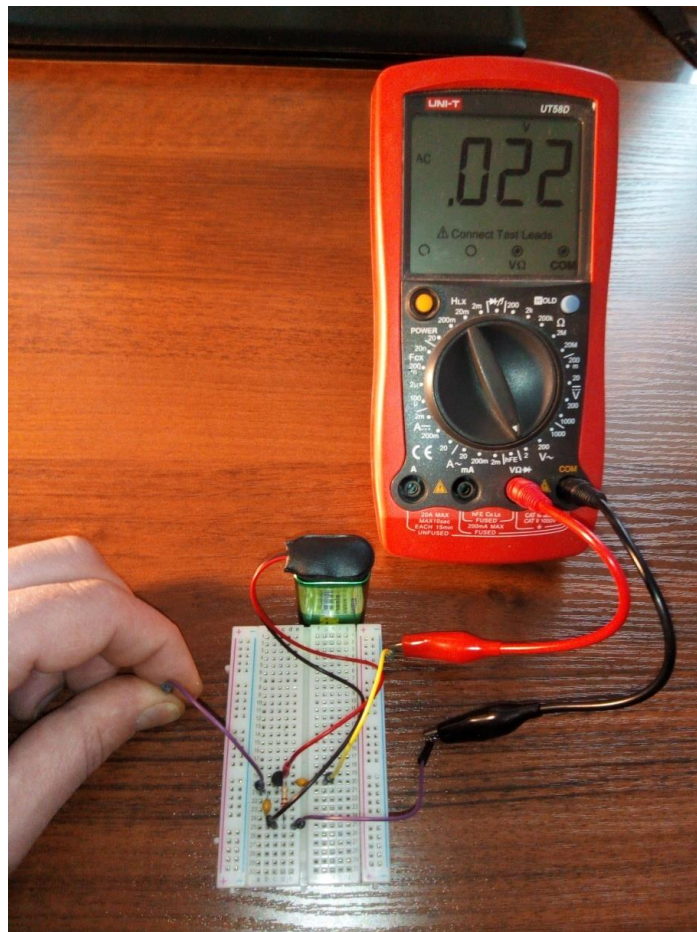


Рис. 11.11. Обладнання для вимірювання змінного потенціалу, наведеного на тілі людини електричним полем промислової частоти.

4. Підготовка вимірювального обладнання.

4.1. На макетній платі скласти вимірювальну схему у відповідності до схеми на рис. 11.10 з урахуванням даних про розміщення електродів польових транзисторів на рис. 4.19.

4.2. Підключити до схеми живлення і мультиметр. Приклад зібраної схеми приведено на рис. 11.12.

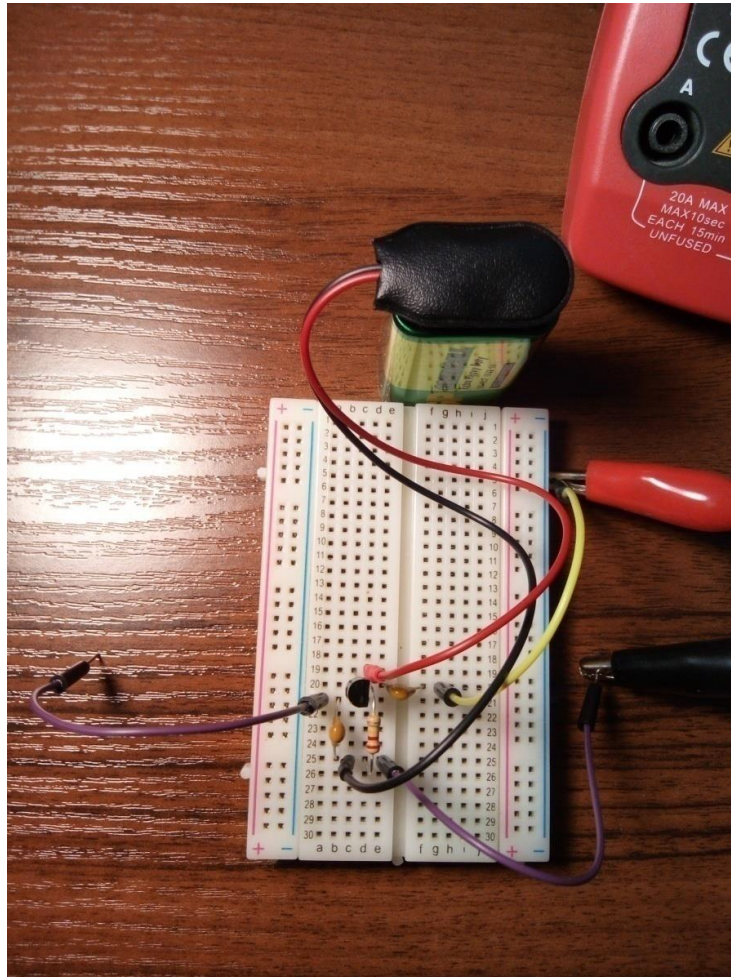


Рис. 11.12. Приклад зібраної схеми

5. Проведення вимірювань.

5.1. Увімкнути мультиметр на режим вимірювання змінної напруги VAC.

5.2. Взятися пальцями за щуп і зафіксувати покази мультиметра.

5.3. За формулою (11.4) обчислити значення змінного електричного потенціалу, наведеного на тілі змінним електричним полем промислової частоти.

5.4. За можливості з'єднати «-» джерела живлення вимірювальної схеми з заземлюючим проводом і визначити змінну напругу наведену на тілі по відношенню до землі.

6. Зробити висновки щодо рівня змінного потенціалу і змінної напруги по відношенню до землі, які наводяться на тілі людини електричним полем промислової частоти.

ДОСЛІДНИЦЬКА РОБОТА

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ ФАРАДЕЯ

Мета: Експериментально перевірити відтворення закону Фарадея на катоді й аноді.

Матеріали та обладнання: хлорид або сульфат міді; відрізки листової міді, хімічна склянка, електронні терези, секундомір, регульоване джерело живлення з індикацією напруги та струму, з'єднувальні провідники.

ХІД РОБОТИ

1. Постановка проблеми.

Осадження металу на катоді та його розчинення на аноді під час електролізу кількісно описується законом Фарадея. При цьому кількості металу, осажденного на катоді та розчиненого з аноду теоретично дорівнюють одне одному.

В даній дослідницькій роботі пропонується дослідити, чи дорівнюють кількості металу, осажденного на катоді та розчиненого з аноду одне одному в реальних умовах.

2. Теоретичне дослідження.

2.1. Ознайомитися з теоретичними відомостями. Електроліз – це розклад речовин (наприклад, води, розчинів кислот, лугів, розчинених або розплавлених солей, тощо) постійним електричним струмом.

Електроліз полягає в електрохімічних процесах окиснення та відновлення на електродах. При електролізі позитивно заряджені іони (катіони) рухаються до катода, на якому електрохімічно відновлюються. Негативно заряджені іони (аніони) рухаються до анода, де електрохімічно окислюються.

Хімічні зміни, спричинювані пропусканням електричного струму через розплавлену іонну сполуку або через розчин, який містить іони. Їх зумовлює сукупність хімічних реакцій, що протікають під дією електричного струму на електродах, занурених в електроліт, при цьому на катоді відбувається відновлення, а на аноді окиснення іонів електроліту.

В результаті електролізу на електродах виділяються речовини в кількостях, пропорційних кількості пропущеного струму. Електроліз застосовується для одержання багатьох речовин (металів, водню, хлору та ін.), при гальваностегії (нанесенні металічних покриттів), гальванопластиці (відтворенні форми предметів), а також у хімічному аналізі (полярографія).

На рис. 11.13 показана схема електролізу на прикладі хлориду міді. При пропусканні електричного струму на катоді буде відновлюватися та осаджуватися мідь, а на аноді буде відновлюватися хлор, окислюючи при цьому метал, з якого зроблений анод. Анод при цьому буде розкладатися в електроліті. Маса катода буде збільшуватися, а маса анода – зменшуватися,

пропорційно до кількості електрики, що пройшла через електролітичну комірку.

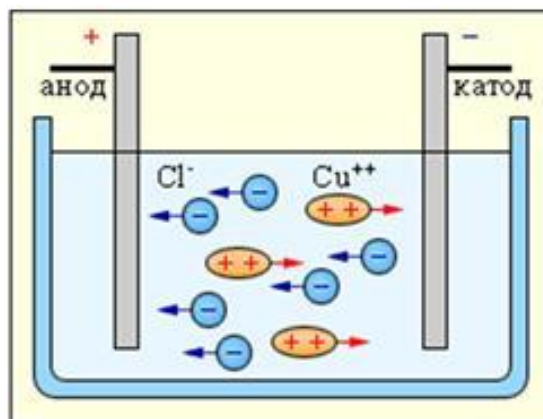


Рис. 11.13. Схема електролізу на прикладі хлориду міді

Кількісно електроліз описується законом Фарадея, рівняння якого має наступний вигляд:

$$m = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n} \cdot I \cdot t, \quad (11.5)$$

де m – маса речовини, осадженої на катоді, г;

F – стала Фарадея, $F = 96485,33$ Кл/моль;

M – молярна вага речовини, яка осаджується на катоді, г/моль;

n – валентне число іонів речовини (кількість електронів на один іон).

Наприклад для таких металів, як цинк і мідь $n = 2$.

I – сила струму під час електролізу, А;

t – час електролізу, с.

Якщо у електролітичній комірці за рис. 11.13 анод буде зроблений з міді, то під час електролізу кількість міді, яка буде осаджуватись на катоді буде дорівнювати кількості міді, що розчиниться з аноду. Якщо анод буде зроблений з іншого металу, наприклад, цинку, а в якості електроліту буде використовуватися сіль цього металу, то на катоді буде осаджуватися саме цей метал з такою ж закономірністю.

В реальних умовах під час проведення електролізу, наприклад при гальванічному нанесенні металів, кількість металу, яка виділиться на катоді не завжди буде чітко визначатися законом Фарадея. Це відбувається через неідеальність чистоти поверхні катода, додаткового виділення інших речовин (водню та кисню, які містяться у воді), тощо.

2.2. За рівнянням закону Фарадея (11.5) визначити теоретичну кількість міді, що має розчинятися на аноді та осаджуватися на катоді у г/А·с

3. Підготовка експерименту.

3.1. Підготувати таблицю результатів.

Таблиця 11.1. Результати експерименту

I, A	$t, \text{с}$	$m_{к1}, \text{г}$	$m_{a1}, \text{г}$	$m_{к2}, \text{г}$	$m_{a2}, \text{г}$	$\Delta m_{к}, \text{г}$	$\Delta m_{a}, \text{г}$	$m, \text{г}$

3.2. Вирізати з листової міді дві приблизно однакові смужки та зачистити їх за допомогою шліфувальної шкурки або ножа.

3.3. Вибрати, яка з них буде анодом, а яка катодом та нанести на них відповідні помітки за допомогою голки або цвяха.

3.4. За допомогою електронних терезів визначити первинну вагу катоду та аноду – $m_{к1}$ та m_{a1} та занести ці значення до таблиці результатів.

3.5. Приготуйте розчин сульфату або хлориду міді з концентрацією 20...25 % у хімічній склянці.

3.6. Встановіть анод та катод до хімічної склянки так, щоб вони не дотикалися.

3.7. Підключити джерело живлення до отриманої комірки: «мінус» – на катод, «плюс» – на анод.

4. Проведення експерименту.

4.1. Увімкнути джерело живлення, встановити певне значення сили струму у межах 0,1...0,2 А та увімкнути секундомір.

4.2. Зачекати 10...30 хв. У ході експерименту підтримувати сталі значення сили струму за допомогою регуляторів джерела живлення.

4.3. Вимкнути джерело живлення, витягти та промити електроди.

4.4. Після підсихання знову визначити маси катоду та аноду – $m_{к2}$ та m_{a2} . Результати занести до таблиці.

5. Аналіз даних.

5.1. Визначити теоретичну масу m міді що мала розчинятися на аноді та осісти на катоді за умов експерименту. Результат розрахунку занести до таблиці.

5.2. Визначити масу міді, осадженої на катоді та масу міді розчиненої з аноду за формулами:

$$\Delta m_{к} = m_{к2} - m_{к1}, \Delta m_{a} = m_{a1} - m_{a2} \quad (11.6)$$

5.3. Порівняти теоретичну масу міді з масою міді осадженої на катоді та масою міді розчиненої з аноду за результатами експерименту.

6. Зробити висновки щодо відтворення закону Фарадея за обома електродами.

ЗАВДАННЯ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

1. Розрахуйте запас енергії у мВт·год та електричну ємність мА·год суперконденсаторів, які були досліджені під час виконання лабораторної роботи.

2. У моделювальному комп'ютерному середовищі змодельуйте еквівалентну схему одного з суперконденсаторів, що були досліджені у лабораторній роботі. Дослідіть залежності напруги від часу при заряді суперконденсатора постійним струмом та від джерела постійної напруги через резистор. Чим вони відрізняються?

3. За результатами практичної роботи 2 розрахуйте струм між тілом людини та заземленням, зумовлений наведеннями від електричного поля промислової частоти.

4. Виконайте дослідницьку роботу «Модель збудження нервової клітини», що розміщена на електронному ресурсі [9].

ЛІТЕРАТУРА

1. Болюх В. Ф., Данько В. Г. Основи електроніки і мікропроцесорної техніки: Навч. посібник. – Харків: НТУ «ХП», 2011. – 257 с.

2. Загальна електротехніка і основи електроніки: навчальний посібник / Співак В.М., Гуржий А.М., Нельга А.Т., Ітякін О.С.– Київ: КПІ, 2020. – 266 с., 155 рис., 10 табл., 17 бібл.

3. Основи електроніки : навч. посіб. / А. С. Васюра, Г. Д. Дорощенко, В. П. Кожем'яко, Г. Л. Лисенко. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 197 с.

4. Матвієнко М. П. Основи електроніки. Підручник. Вид. 2-ге перероб. та доп.– К.: Видавництво Ліра-К, 2017. – 364 с.

5. Електроніка та мікросхемотехніка. Електронний посібник. Режим доступу: http://elib.tsatu.edu.ua/dep/enf/etem_1/index.html.

6. Kurniawan A. IoT Projects with Arduino Nano 33 BLE Sense. Step-By-Step Projects for Beginners. Berkeley, CA : Apress, 2021. 161 p.

7. Мустецов Т. М. Функціональна електроніка: навчальний посібник / Т. М. Мустецов. – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2018. – 164 с.

8. Євсєєва, М. В. Електрохімічні процеси. Теорія та практикум : навчальний посібник / М. В. Євсєєва, А. П. Ранський, О. А. Гордієнко. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 111 с.

9. Conway, B.E., Electrochemical supercapacitors. Scientific fundamentals and technological applications, Kluwer Academic Plenum Publishers, New York, 1999, 698.

10. Віртуальний STEM-центр Малої академії наук України [Електронний ресурс] URL: <https://stemua.science/>.

11. Science buddies. Hands-on Science Resources for Home and School. [Електронний ресурс] URL: <https://www.sciencebuddies.org/>.

СПИСОК ІЛЮСТРАЦІЙ

С. 10	Рис. 1.1. Рисунок Артема Атамася.
С. 11	Рис. 1.2. Рисунок Артема Атамася.
С. 12	Рис. 1.3. Рисунок Артема Атамася.
С. 12	Рис. 1.4. Рисунок Артема Атамася.
С. 14	Рис. 1.5. Рисунок Артема Атамася.
С. 14	Рис. 1.6. Рисунок Артема Атамася.
С. 15	Рис. 1.7. Рисунок Артема Атамася.
С. 16	Рис. 1.8. Рисунок Артема Атамася.
С. 18	Рис. 1.9. Рисунок Артема Атамася.
С. 20	Рис. 1.10 (а). Рисунок Артема Атамася.
С. 20	Рис. 1.10 (б). Entryphone Carbon Microphone for 65AMP/LS Loudspeaker and Amplifier. URL: https://dooretrydirect.com/entryphone-carbon-microphone (дата звернення: 06.04.2023).
С. 21	Рис. 1.11. Рисунок Артема Атамася.
С. 21	Рис. 1.12. Рисунок Артема Атамася.
С. 22	Рис. 1.13. Рисунок Артема Атамася.
С. 26	Рис. 1.14. Адаптовано з Цифровий мультиметр UNI-T UT58D. URL: https://uni-t.ua/uk/catalog/digital-multimeter-uni-t-ut58d/ (дата звернення: 06.04.2023).
С. 27	Рис. 1.15. Адаптовано з Gratten GA1102CAL 100MHz Digital Oscilloscope. URL: https://www.jprelec.co.uk/categories/tools-and-equipment/test-measurement-and-instrumentation/oscilloscopes/gratten-ga1102cal-100mhz-digi/product/ga1102cal-digital-oscilloscope/375-905~375-905 (дата звернення: 06.04.2023)/
С. 28	Рис. 1.16. Адаптовано з Hantek / Головна / Генератори / Генератор RIGOL DG1022. URL: https://hantek.com.ua/dg1022 (дата звернення: 06.04.2023).
С. 29	Рис. 1.17. Фото Артема Атамася.

С. 30	Рис. 1.18. Знімок Артема Атамася.
С. 31	Рис. 1.19. Знімок Артема Атамася.
С. 31	Рис. 1.20. Знімок Артема Атамася.
С. 32	Рис. 1.21. Фото Артема Атамася.
С. 33	Рис.1.22. Рисунок Артема Атамася.
С. 35	Рис. 1.23. Фото Артема Атамася.
С. 35	Рис. 1.24. Фото Артема Атамася.
С. 36	Рис. 1.25. Фото Артема Атамася.
С. 39	Рис. 2.1. Рисунок Артема Атамася.
С. 40	Рис. 2.2. Рисунок Артема Атамася.
С. 41	Рис. 2.3. Madisound 2.7 Ohm, 25 Watt Wirewound Resistor. URL: https://www.madisoundspeakerstore.com/wirewound-25-watt/2.7-ohm-25-watt-wirewound-resistor/ (дата звернення: 06.04.2023).
С. 42	Рис. 2.4 (а). 51 ком CF-1/2W 5% вуглецевий резистор. URL: https://radio-magazin.com.ua/51-kom-cf-12w-5-uglerodistyj-rezistor (дата звернення: 06.04.2023).
С.42	Рис. 2.4 (б). Резистори та збірки постійні. URL: https://www.sea.com.ua/ua/elektronnye-komponenty/rezistory-i-sborki-postoannye/ (дата звернення: 06.04.2023).
С. 44	Рис. 2.5. Резистор ППБ-50Г13 150 Ом±10% змінний, дрововий, регулювальний. URL: https://led-stars.com.ua/ua/p608071227-rezistor-ppb-50g13.html (дата звернення: 06.04.2023).
С. 44	Рис. 2.6 (а). Резистор змінний 500 кОм з вимикачем S16KN1-B 500K L-15 KC / N = 6.5 URL: https://3v3.com.ua/product_5865.html (дата звернення: 06.04.2023).
С. 44	Рис. 2.6 (б). Резистор підбудовний горизонтальний 500 Ом WH06-2 (RM065) URL: https://arduino-geek.pp.ua/product/wh06-2-rm065-500r-%d1%80%d0%b5%d0%b7%d0%b8%d1%81%d1%82%d0%be%d1%80-%d0%bf%d0%be%d0%b4%d1%81%d1%82%d1%80%d0%be%d0%b5%d1%87%d0%bd%d1%8b%d0%b9-%d0%b3%d0%be%d1%80%d0%b8%d0%b7%d0%be%d0%bd%d1%8

	2%d0%b0/?lang=uk (дата звернення: 06.04.2023).
С. 45	Рис. 2.7. Резистор змінний з вимикачем маркування. Змінні резистори і їх пристрій. URL: https://electrikhelp.com/electrical-equipment/resistor-variable-with-switch-labeling-variable-resistors-and-their-device/ (дата звернення: 06.04.2023).
С. 45	Рис. 2.8. Рисунок Артема Атамася.
С. 45	Рис. 2.9. Рисунок Артема Атамася.
С. 46	Рис. 2.10 (а). ПАПЕРОВІ КОНДЕНСАТОРИ PME264NC5220MR30. URL: https://e-comps.com.ua/uk/kemet-pme264nc5220mr30/ (дата звернення: 06.04.2023).
С. 46	Рис. 2.10 (б). Конденсатор плівковий 200nF 204J 400V. URL: https://radiostore.ua/products/kondensator-plenochnyy-200nf-204j-400v-2 (дата звернення: 06.04.2023).
С. 46	Рис. 2.10 (в). Конденсатор електролітичний 3300 мкФ х 50В(105*). URL: https://erg.com.ua/ua/p1350838196-kondensator-elektroliticheskij-3300.html (дата звернення: 06.04.2023).
С. 47	Рис. 2.11. Адаптовано з Керамічний конденсатор. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B5%D1%80%D0%B0%D0%BC%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D1%81%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80 (дата звернення: 06.04.2023).
С. 47	Рис. 2.12. Конденсатор. URL: https://corelamps.com/elektronika/kondensator/ (дата звернення: 06.04.2023).
С. 48	Рис. 2.13 (а). sourcingmap 3pcs 224pF 4 Linear PCB Trimmer Tuning Variable Capacitors. URL: https://www.amazon.co.uk/Sourcingmap-Linear-Trimmer-Variable-Capacitors/dp/B019K2ARHO (дата звернення: 06.04.2023).
С. 48	Рис. 2.13 (б). Trimmer Capacitor. URL: https://www.indiamart.com/proddetail/trimmer-capacitor-21686651455.html (дата звернення: 06.04.2023).
С.48	Рис. 2.14. Рисунок Артема Атамася.
С. 49	Рис. 2.15. Рисунок Артема Атамася.
С. 49	Рис. 2.16. Рисунок Артема Атамася.

С. 50	Рис. 2.17. Рисунок Артема Атамася.
С. 51	Рис. 2.18 (а). Inductor: air coil; 1.5mH; 0.7Ω; Ø: 58mm; H: 18mm; Øcore: 1mm. URL: https://www.tme.eu/en/details/sp-1.5mh58-vs/audio-coils/visaton/5017/ (дата звернення: 06.04.2023).
С. 51	Рис. 2.18 (б). Inductor. URL: https://www.bcae1.com/inductor.htm (дата звернення: 06.04.2023).
С. 52	Рис. 2.19. Variable Adjustable IFT Inductor Coilsr. URL: https://www.exportersindia.com/jinanemishieldingtechnologyco-ltd/variable-adjustable-ift-inductor-coils-4282086.htm (дата звернення: 06.04.2023).
С. 52	Рис. 2.20. Рисунок Артема Атамася.
С. 53	Рис. 2.21. Рисунок Артема Атамася.
С. 53	Рис. 2.22. Рисунок Артема Атамася.
С. 54	Рис. 2.23. Рисунок Артема Атамася.
С. 55	Рис. 2.24. Рисунок Артема Атамася.
С. 58	Рис. 2.25. Фото Артема Атамася.
С. 62	Рис. 2.26. Знімок Артема Атамася.
С. 62	Рис. 2.27. Знімок Артема Атамася.
С. 64	Рис. 2.28. Рисунок Артема Атамася.
С. 65	Рис. 2.29. Рисунок Артема Атамася.
С. 66	Рис. 2.30. Рисунок Артема Атамася.
С. 67	Рис. 2.31. Фото Артема Атамася.
С. 69	Рис. 2.32. Рисунок Артема Атамася.
С. 70	Рис. 2.33. Рисунок Артема Атамася.
С. 71	Рис. 3.1. Рисунок Артема Атамася.
С. 72	Рис. 3.2. Рисунок Артема Атамася.
С. 73	Рис. 3.3. Рисунок Артема Атамася.
С. 74	Рис. 3.4. Рисунок Артема Атамася.
С. 75	Рис. 3.5 (а). Рисунок Артема Атамася.

С. 75	Рис. 3.5 (б). Chapter 4. Diodes. URL: https://www.oreilly.com/library/view/electronics-cookbook/9781491953396/ch04.html (дата звернення: 19.04.2023).
С. 76	Рис. 3.6. Рисунок Артема Атамася.
С. 77	Рис. 3.7. Рисунок Артема Атамася.
С. 78	Рис. 3.8. Рисунок Артема Атамася.
С. 79	Рис. 3.9. Рисунок Артема Атамася.
С. 80	Рис. 3.10. Рисунок Артема Атамася.
С. 80	Рис. 3.11. Рисунок Артема Атамася.
С. 81	Рис. 3.12. Рисунок Артема Атамася.
С. 81	Рис. 3.13. Рисунок Артема Атамася.
С. 82	Рис. 3.14. Якими бувають світлодіоди? URL: https://5watt.ua/uk/blog/statti/yakimi-buvayut-svitlodiodi (дата звернення: 19.04.2023).
С. 83	Рис. 3.15. Fast-Response Si Photodiodes. URL: https://www.excelitas.com/product-category/fast-response-si-photodiodes (дата звернення: 19.04.2023).
С. 85	Рис. 3.16. Рисунок Артема Атамася.
С. 86	Рис. 3.17. Фото Артема Атамася.
С. 86	Рис. 3.18. Фото Артема Атамася.
С. 87	Рис. 3.19. Фото Артема Атамася.
С. 89	Рис. 3.20. Рисунок Артема Атамася.
С. 89	Рис. 3.21. Фото Артема Атамася.
С. 91	Рис. 3.22. Знімок Артема Атамася.
С. 93	Рис. 3.23. Знімок Артема Атамася.
С. 93	Рис. 3.24. Знімок Артема Атамася.
С. 95	Рис. 3.25. Фото Артема Атамася.
С. 96	Рис. 3.26. Фото Артема Атамася.
С. 99	Рис. 4.1. Електроніка та мікросхемотехніка. Електронний посібник.

	Тема 4. Біполярні транзистори. URL: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/enf/etem_1/4/index4.html (дата звернення: 27.04.2023).
С. 99	Рис. 4.2. Рисунок Артема Атамася.
С. 100	Рис. 4.3. Адаптовано з: 3. Біполярний транзистор (принцип дії та характеристики). URL: https://radfiz.org.ua/share/radioelektronika/beh_kol1_fullteor/3_bipol_transistor.html (дата звернення: 27.04.2023).
С. 101	Рис. 4.4. Адаптовано з: 3. Біполярний транзистор (принцип дії та характеристики). URL: https://radfiz.org.ua/share/radioelektronika/beh_kol1_fullteor/3_bipol_transistor.html (дата звернення: 27.04.2023).
С. 101	Рис. 4.5. Рисунок Артема Атамася.
С. 102	Рис. 4.6. Польовий транзистор. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9_%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B7%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80 (дата звернення: 27.04.2023).
С. 103	Рис. 4.7. Адаптовано з: Електроніка та мікросхемотехніка. Електронний посібник. Тема 5. Польові транзистори. URL: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/enf/etem_1/5/index5.html (дата звернення: 27.04.2023).
С. 103	Рис. 4.8. Адаптовано з: Електроніка та мікросхемотехніка. Електронний посібник. Тема 5. Польові транзистори. URL: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/enf/etem_1/5/index5.html (дата звернення: 27.04.2023).
С. 104	Рис. 4.9. Адаптовано з: Електроніка та мікросхемотехніка. Електронний посібник. Тема 5. Польові транзистори. URL: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/enf/etem_1/5/index5.html (дата звернення: 27.04.2023).
С. 105	Рис. 4.10. Рисунок Артема Атамася.
С. 105	Рис. 4.11. Phototransistor. URL: https://www.luckylight.cn/en/products/infrared-led/phototransistor/?series_code=503ptx2e-series (дата звернення: 27.04.2023).
С. 106	Рис. 4.12. Рисунок Артема Атамася.

С. 107	Рис. 4.13. Р ECC83 - 12AX7B dual triode vacuum tube with high voltage gain. URL: https://www.axiomedialit/en/small-signal-tubes/35/ecc83-12ax7b-dual-triode-vacuum-tube-with-high-voltage-gain.html (дата звернення: 27.04.2023).
С. 107	Рис. 4.14. Адаптовано з: MARSHALL JCM900 4100-Е Гітарний підсилювач. URL: https://muztorg.ua/uk/usiliteli--kombiki--kabineti/marshall_jcm900_4100-e_gitarnij_usilitel_50733/ (дата звернення: 28.04.2023).
С. 108	Рис. 4.15. Рисунок Артема Атамася.
С. 109	Рис. 4.16. Фото Артема Атамася.
С. 110	Рис. 4.17. Знімок Артема Атамася.
С. 112	Рис. 4.18. Рисунок Артема Атамася.
С. 114	Рис. 4.19 (а). Рисунок Артема Атамася.
С. 114	Рис. 4.19 (б). Адаптовано з: J112 Transistor Pinout, Equivalents, Applications and Other Details. URL: https://www.componentsinfo.com/j112-transistor-pinout-equivalent/ (дата звернення: 28.04.2023).
С. 114	Рис. 4.20. Фото Артема Атамася.
С. 115	Рис. 4.21. Фото Артема Атамася.
С. 116	Рис. 4.22 Електрометр. URL: https://corelamps.com/zahalne/elektrometr/ (дата звернення: 28.04.2023).
С. 117	Рис. 4.23. Рисунок Артема Атамася.
С. 118	Рис. 4.24. Фото Артема Атамася.
С. 119	Рис. 4.25. Фото Артема Атамася.
С. 120	Рис. 4.26. Знімок Артема Атамася.
С. 120	Рис. 4.27. Знімок Артема Атамася.
С. 121	Рис. 4.28. Рисунок Артема Атамася.
С. 122	Рис. 5.1. Рисунок Артема Атамася.
С. 123	Рис. 5.2. Corelamps / Блог / Електроніка / Варистор. URL: https://corelamps.com/elektronika/varystor/ (дата звернення: 30.04.2023).

С. 123	Рис. 5.3. Як правильно перевірити варистор або інший тип резистора мультиметром? URL: https://radio-shop.com.ua/uk/index.php?route=octemplates/blog/oct_blogarticle&blogarticle_id=99 (дата звернення: 30.04.2023).
С. 124	Рис. 5.4. Адаптовано з: Болюх В. Ф., Данько В. Г. Основи електроніки і мікропроцесорної техніки: Навч. посібник. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – 257 с. С. 25.
С. 125	Рис. 5.5. Терморезистор. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%80%D0%BC%D0%BE%D1%80%D0%B5%D0%B7%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80 (дата звернення: 30.04.2023).
С. 125	Рис. 5.6. SEMICONDUCTOR STRAIN GAUGES. URL: https://www.hapticasensing.com/wp-content/uploads/2018/10/Datasheet_Semiconductor_Strain_Gauges.pdf (дата звернення: 30.04.2023).
С. 126	Рис. 5.7. Адаптовано з: Датчик ваги (тензодатчик) 2 кг. URL: https://arduino.ua/prod4528-datchik-vesa-tenzodatchik-2-kg (дата звернення: 30.04.2023).
С. 126	Рис. 5.8. Фоторезистор GL5506 5мм приймач випромінювання. URL: https://blackchip.com.ua/optoelektronika/fotorezistor-gl5506/ (дата звернення: 30.04.2023).
С. 127	Рис. 5.9. GL55 Series Photoresistor. URL: https://blackchip.com.ua/image/catalog/pdf/fotoresustor/GL55.pdf (дата звернення: 30.04.2023).
С. 129	Рис. 5.10. Адаптовано з: Електроніка та мікросхемотехніка. Електронний посібник. Тема 3. Перемикаючі прилади. URL: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/enf/etem_1/3/index3.html (дата звернення: 30.04.2023).
С. 130	Рис. 5.11. Адаптовано з: Електроніка та мікросхемотехніка. Електронний посібник. Тема 3. Перемикаючі прилади. URL: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/enf/etem_1/3/index3.html (дата звернення: 30.04.2023).
С. 131	Рис. 5.12 (а). Рисунок Артема Атамася.
С. 131	Рис. 5.12 (б). Адаптовано з: Електроніка та мікросхемотехніка. Електронний посібник. Тема 3. Перемикаючі прилади. URL: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/enf/etem_1/3/index3.html (дата звернення: 30.04.2023).

С. 131	Рис. 5.13 (а). Рисунок Артема Атамася.
С. 131	Рис. 5.13 (б). Адаптовано з: Електроніка та мікросхемотехніка. Електронний посібник. Тема 3. Перемикаючі прилади. URL: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/enf/etem_1/3/index3.html (дата звернення: 30.04.2023).
С. 132	Рис. 5.14. Рисунок Артема Атамася.
С. 133	Рис. 5.15. Рисунок Артема Атамася.
С. 133	Рис. 5.16 (а). DB3, Динистор, 32V, STM. URL: https://3v3.com.ua/product_1659.html (дата звернення: 30.04.2023).
С. 133	Рис. 5.16 (б). Адаптовано з: 5pcs BTA225-800B TO220 BTA225 BTA225-600B BTA225-600 TO-220 BTA225-800. URL: https://aliexpress.ru/item/1005004145693095.html?sku_id=12000028183597785&spm=a2g2w.productlist.search_results.0.48c858a4j5w9J7 (дата звернення: 30.04.2023).
С. 135	Рис. 5.17. Адаптовано з: Основи електроніки та схемотехніки. Електронний ресурс. Режим доступу: http://moodle.ipk.kpi.ua/moodle/mod/resource/index.php?id=129 (дата звернення: 30.06.2021).
С. 137	Рис. 5.18 (а). Адаптовано з: Single Supply Dual Operational Amplifiers LM258, LM358, LM358A, LM358E, LM2904, LM2904A, LM2904E, LM2904V, NCV2904. URL: https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/lm358-d.pdf (дата звернення: 30.04.2023).
С. 137	Рис. 5.18 (б). Адаптовано з: Single Supply Dual Operational Amplifiers LM258, LM358, LM358A, LM358E, LM2904, LM2904A, LM2904E, LM2904V, NCV2904. URL: https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/lm358-d.pdf (дата звернення: 30.04.2023).
С. 137	Рис. 5.18 (в). LM358 - здвоєний операційний підсилювач. URL: https://1wire.com.ua/lm358-operacionnij-usilitel.html (дата звернення: 30.04.2023).
С. 138	Рис. 5.19 (а). Адаптовано з: CD4001BC/CD4011BC. URL: https://www.circuits-diy.com/wp-content/uploads/2021/01/CD4011.pdf (дата звернення: 30.04.2023).
С. 138	Рис. 5.19 (б). Адаптовано з: CD4001BC/CD4011BC. URL: https://www.circuits-diy.com/wp-content/uploads/2021/01/CD4011.pdf

	(дата звернення: 30.04.2023).
С. 138	Рис. 5.19 (в). #22: CD4011BE LOGIC IC (QUAD 2-INPUT NAND GATE). URL: https://leobot.net/viewproduct.aspx?id=22 (дата звернення: 30.04.2023).
С. 141	Рис. 5.20. Фото Артема Атамася.
С. 142	Рис. 5.21. Знімок Артема Атамася.
С. 142	Рис. 5.22. Знімок Артема Атамася.
С. 143	Рис. 5.23. Знімок Артема Атамася.
С. 143	Рис. 5.24. Знімок Артема Атамася.
С. 144	Рис. 5.25. Адаптовано з: LM555 Timer datasheet (Rev. D). URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm555.pdf (дата звернення: 04.05.2023).
С. 145	Рис. 6.1. Рисунок Артема Атамася.
С. 146	Рис. 6.2. Рисунок Артема Атамася.
С. 147	Рис. 6.3. Рисунок Артема Атамася.
С. 148	Рис. 6.4. Рисунок Артема Атамася.
С. 149	Рис. 6.5. Рисунок Артема Атамася.
С. 150	Рис. 6.6. Рисунок Артема Атамася.
С. 150	Рис. 6.7. Рисунок Артема Атамася.
С. 151	Рис. 6.8. Рисунок Артема Атамася.
С. 152	Рис. 6.9. Рисунок Артема Атамася.
С. 153	Рис. 6.10. Рисунок Артема Атамася.
С. 154	Рис. 6.11. Рисунок Артема Атамася.
С. 154	Рис. 6.12. Рисунок Артема Атамася.
С. 156	Рис. 6.13. Рисунок Артема Атамася.
С. 156	Рис. 6.14 (а). Адаптовано з: LM317T Adjustable Voltage Regulator. URL: https://www.dcart.pk/product/lm317-adjustable-voltage-regulator/ (дата звернення: 17.05.2023).
С. 156	Рис. 6.14 (б). Адаптовано з: LM317 3-Terminal Adjustable Regulator.

	URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf (дата звернення: 17.05.2023).
С. 157	Рис. 6.15. Рисунок Артема Атамася.
С. 157	Рис. 6.16. Рисунок Артема Атамася.
С. 158	Рис. 6.17. Рисунок Артема Атамася.
С. 159	Рис. 6.18. Рисунок Артема Атамася.
С. 161	Рис. 6.19. Знімок Артема Атамася.
С. 162	Рис. 6.20. Знімок Артема Атамася.
С.162	Рис. 6.21. Знімок Артема Атамася.
С. 163	Рис. 6.22. Знімок Артема Атамася.
С. 165	Рис. 6.23. Знімок Артема Атамася.
С. 166	Рис. 6.24. Знімок Артема Атамася.
С. 169	Рис. 7.1. Адаптовано з: Електроніка та мікросхемотехніка. Електронний посібник. Тема 6. Підсилювачі електричних сигналів. URL: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/enf/etem_1/6/index6.html (дата звернення: 26.05.2023).
С. 170	Рис. 7.2. Рисунок Артема Атамася.
С. 172	Рис. 7.3. Рисунок Артема Атамася.
С. 174	Рис. 7.4. What Is Class-D Amplification? URL: https://www.soundonsound.com/techniques/what-class-d-amplification (дата звернення: 26.05.2023).
С. 175	Рис. 7.5 (а). Рисунок Артема Атамася.
С. 175	Рис. 7.5 (б). Адаптовано з: What Is Class-D Amplification? URL: https://www.soundonsound.com/techniques/what-class-d-amplification (дата звернення: 26.05.2023).
С. 176	Рис. 7.6. Рисунок Артема Атамася.
С. 177	Рис. 7.7. Адаптовано з: Електроніка та мікросхемотехніка. Електронний посібник. Тема 6. Підсилювачі електричних сигналів. URL: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/enf/etem_1/6/index6.html (дата звернення: 26.05.2023).
С. 177	Рис. 7.8. Адаптовано з: Електроніка та мікросхемотехніка.

	Електронний посібник. Тема 6. Підсилювачі електричних сигналів. URL: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/enf/etem_1/6/index6.html (дата звернення: 26.05.2023).
С. 178	Рис. 7.9. Адаптовано з: Електроніка та мікросхемотехніка. Електронний посібник. Тема 6. Підсилювачі електричних сигналів. URL: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/enf/etem_1/6/index6.html (дата звернення: 26.05.2023).
С. 179	Рис. 7.10. Адаптовано з: Електроніка та мікросхемотехніка. Електронний посібник. Тема 6. Підсилювачі електричних сигналів. URL: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/enf/etem_1/6/index6.html (дата звернення: 26.05.2023).
С. 179	Рис. 7.11. Адаптовано з: Електроніка та мікросхемотехніка. Електронний посібник. Тема 6. Підсилювачі електричних сигналів. URL: https://elib.tsatu.edu.ua/dep/enf/etem_1/6/index6.html (дата звернення: 26.05.2023).
С. 180	Рис. 7.12. Рисунок Артема Атамася.
С. 181	Рис. 7.13. Адаптовано з: Болюх В. Ф., Данько В. Г. Основи електроніки і мікропроцесорної техніки: Навч. посібник. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – 257 с.
С. 181	Рис. 7.14. Адаптовано з: Болюх В. Ф., Данько В. Г. Основи електроніки і мікропроцесорної техніки: Навч. посібник. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – 257 с.
С. 183	Рис. 7.15. Знімок Артема Атамася.
С. 184	Рис. 7.16. Знімок Артема Атамася.
С. 185	Рис. 7.17. Рисунок Артема Атамася.
С. 186	Рис. 7.18. Адаптовано з: 2N2222A Transistor: Datasheet, Pinout, Equivalents [Video&FAQ]. URL: https://www.apogeeweb.net/circuitry/2n2222a-transistor-datasheet-pinout-equivalents.html (дата звернення: 26.05.2023).
С. 186	Рис. 7.19. Фото Артема Атамася.
С. 187	Рис. 7.20. Фото Артема Атамася.
С. 188	Рис. 7.21. Знімок Артема Атамася.
С. 189	Рис. 7.22. Знімок Артема Атамася.
С. 189	Рис. 7.23. Знімок Артема Атамася.

С. 190	Рис. 8.1. Рисунок Артема Атамася.
С. 191	Рис. 8.2. Адаптовано з: Фізика (рівень стандарту, за навчальною програмою авторського колективу під керівництвом Локтева В. М.): підруч. для 11 кл. закл. загал. серед. освіти / [Бар'яхтар В. Г., Довгий С. О., Божинова Ф. Я., Кірюхіна О. О.] ; за ред. Бар'яхтара В. Г., Довгого С. О. – Харків : Вид-во «Ранок», 2019. – 272 с. : іл., фот.
С. 193	Рис. 8.3. Рисунок Артема Атамася.
С. 194	Рис. 8.4. Рисунок Артема Атамася.
С. 195	Рис. 8.5. Знімок Артема Атамася.
С. 195	Рис. 8.6. Рисунок Артема Атамася.
С. 196	Рис. 8.7. Знімок Артема Атамася.
С. 196	Рис. 8.8. Знімок Артема Атамася.
С. 197	Рис. 8.9. Знімок Артема Атамася.
С. 197	Рис. 8.10. Знімок Артема Атамася.
С. 200	Рис. 8.11. Знімок Артема Атамася.
С. 201	Рис. 8.12. Знімок Артема Атамася.
С. 203	Рис. 8.13. Рисунок Артема Атамася.
С. 204	Рис. 8.14. Рисунок Артема Атамася.
С. 205	Рис. 8.15. Фото Артема Атамася.
С. 205	Рис. 8.16. Фото Артема Атамася.
С. 206	Рис. 8.17. Фото Артема Атамася.
С. 208	Рис. 8.18. Фото Артема Атамася.
С. 209	Рис. 8.19. Фото Артема Атамася.
С. 210	Рис. 8.20. Фото Артема Атамася.
С. 211	Рис. 8.21. Фото Артема Атамася.
С. 212	Рис. 8.22. Фото Артема Атамася.
С. 213	Рис. 8.23. Рисунок Артема Атамася.

С. 214	Рис. 8.24. Рисунок Артема Атамася.
С. 214	Рис. 8.25. Рисунок Артема Атамася.
С. 215	Рис. 8.26. Фото Артема Атамася.
С. 215	Рис. 8.27 (а). BC327 Transistor BJT PNP TO-92. URL: https://www.direnc.net/bc327-500ma-45v-pnp-si-small-signal-transistor-to-92-en (дата звернення: 08.06.2023).
С. 215	Рис. 8.27 (б). Адаптовано з: PNP Transistor 2N3906. URL: https://guitarpcb.com/product/2n3904-pnp/ (дата звернення: 08.06.2023).
С. 216	Рис. 8.28. Фото Артема Атамася.
С. 218	Рис. 8.29. Фото Артема Атамася.
С. 219	Рис. 8.30. Рисунок Артема Атамася.
С. 220	Рис. 8.31. Рисунок Артема Атамася.
С. 220	Рис. 8.32. Рисунок Артема Атамася.
С. 221	Рис. 8.33. A3144 Hall effect Sensor. URL: https://components101.com/sensors/a3144-hall-effect-sensor (дата звернення: 08.06.2023).
С. 222	Рис. 8.34. Адаптовано з: IRF540. URL: https://www.vishay.com/docs/91021/irf540.pdf (дата звернення: 08.06.2023).
С. 222	Рис. 8.35. Рисунок Артема Атамася.
С. 223	Рис. 8.36. Фото Артема Атамася.
С. 224	Рис. 8.37. Фото Артема Атамася.
С. 226	Рис. 9.1. Рисунок Артема Атамася.
С. 227	Рис. 9.2. Рисунок Артема Атамася.
С. 228	Рис. 9.3. Рисунок Артема Атамася.
С. 228	Рис. 9.4. Знімок Артема Атамася.
С. 229	Рис. 9.5. Знімок Артема Атамася.
С. 229	Рис. 9.6. Знімок Артема Атамася.
С. 230	Рис. 9.7. Знімок Артема Атамася.

С. 231	Рис. 9.8. Знімок Артема Атамася.
С. 231	Рис. 9.9. Знімок Артема Атамася.
С. 232	Рис. 9.10. Знімок Артема Атамася.
С. 233	Рис. 9.11. Рисунок Артема Атамася.
С. 234	Рис. 9.12. Адаптовано з: 2N3904 NPN General Purpose Transistor (10-Pack). URL: https://protosupplies.com/product/2n3904/ (дата звернення: 03.07.2023).
С. 235	Рис. 9.13. Фото Артема Атамася.
С. 236	Рис. 9.14. Фото Артема Атамася.
С. 237	Рис. 9.15. Рисунок Артема Атамася.
С. 238	Рис. 9.16. Адаптовано з: Introduction to BC107. URL: https://www.theengineeringprojects.com/2018/04/introduction-to-bc107.html (дата звернення: 03.07.2023).
С. 239	Рис. 9.17. Фото Артема Атамася.
С. 240	Рис. 9.18. Фото Артема Атамася.
С. 241	Рис. 9.19. Рисунок Артема Атамася.
С. 243	Рис. 9.20. Фото Артема Атамася.
С. 244	Рис. 9.21. Знімок Артема Атамася.
С. 247	Рис. 10.1. Рисунок Артема Атамася.
С. 248	Рис. 10.2. Знімок Артема Атамася.
С. 248	Рис. 10.3. Знімок Артема Атамася.
С. 249	Рис. 10.4. Знімок Артема Атамася.
С. 249	Рис. 10.5. Знімок Артема Атамася.
С. 250	Рис. 10.6. Знімок Артема Атамася.
С. 250	Рис. 10.7 (а). Адаптовано з: HEF4001BP. URL: https://leedscart.com/index.php?route=product/product&product_id=2924 (дата звернення: 03.07.2023).
С. 250	Рис. 10.7 (б). 4011B DIP-14 Quad 2-Input NAND Gate. URL: https://www.electrokit.com/en/product/4011b-dip-14-quad-2-input-nand-gate-2/ (дата звернення: 03.07.2023).

С. 251	Рис. 10.8. Адаптовано з: CD4001 View Datasheet(PDF) - Intersil. URL: https://www.datasheetbank.com/datasheet-download/111241/1/Intersil/CD4001 (дата звернення: 03.07.2023).
С. 252	Рис. 10.9. Рисунок Артема Атамася.
С. 253	Рис. 10.10. Рисунок Артема Атамася.
С. 254	Рис. 10.11. Рисунок Артема Атамася.
С. 254	Рис. 10.12. Рисунок Артема Атамася.
С. 255	Рис. 10.13. Рисунок Артема Атамася.
С. 255	Рис. 10.14. Адаптовано з: CD4013 Datasheet / Dual D-type Flip-flops / Example Circuits. URL: https://www.eleccircuit.com/cd4013-dual-d-type-flip-flops-datasheet/ (дата звернення: 03.07.2023).
С. 256	Рис. 10.15. Рисунок Артема Атамася.
С. 257	Рис. 10.16. Рисунок Артема Атамася.
С. 258	Рис. 10.17. Рисунок Артема Атамася.
С. 258	Рис. 10.18. Рисунок Артема Атамася.
С. 259	Рис. 10.19. Рисунок Артема Атамася.
С. 259	Рис. 10.20. Адаптовано з: CHAPTER 8: COUNTERS AND SHIFT REGISTERS. URL: https://people.utm.my/saifulazimi/files/2021/03/Chapter-8-Counters-Shift-Registers.pdf (дата звернення: 03.07.2023).
С. 260	Рис. 10.21. Рисунок Артема Атамася.
С. 261	Рис. 10.22. Адаптовано з: Болюх В. Ф., Данько В. Г. Основи електроніки і мікропроцесорної техніки: Навч. посібник. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – 257 с.
С. 261	Рис. 10.23. Рисунок Артема Атамася.
С. 262	Рис. 10.24. Рисунок Артема Атамася.
С. 263	Рис. 10.25. Адаптовано з: Болюх В. Ф., Данько В. Г. Основи електроніки і мікропроцесорної техніки: Навч. посібник. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – 257 с.
С. 264	Рис. 10.26. Адаптовано з: Аналого-цифровий перетворювач. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%BE-

	%D1%86%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9 %D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%82%D0%B2%D0%BE%D1%80%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D1%87 (дата звернення: 03.07.2023).
С. 265	Рис. 10.27. Рисунок Артема Атамася.
С. 266	Рис. 10.28. Рисунок Артема Атамася.
С. 268	Рис. 10.29. Адаптовано з: SN74HC02N. URL: https://cb-electronics.com/products/74hc02/ (дата звернення: 03.07.2023).
С. 269	Рис. 10.30. Рисунок Артема Атамася.
С. 269	Рис. 10.31. Фото Артема Атамася.
С. 270	Рис. 10.32. Фото Артема Атамася.
С. 271	Рис. 10.33 (а). Адаптовано з: IC 74HC193 4-bit Binary up/down counter. URL: https://www.jameco.com/z/74HC193-Major-Brands-IC-74HC193-4-bit-Binary-up-down-counter_45559.html (дата звернення: 03.07.2023).
С. 271	Рис. 10.33 (б). Адаптовано з: 74HCT193 PDF – 4-bit Binary Up/Down Counter (Datasheet). URL: https://www.datasheetcafe.com/74hct193-datasheet-pdf/ (дата звернення: 03.07.2023).
С. 272	Рис. 10.34. Рисунок Артема Атамася.
С. 273	Рис. 10.35. Фото Артема Атамася.
С.273	Рис. 10.36. Фото Артема Атамася.
С. 275	Рис. 10.37 (а). Адаптовано з: 74HC238 3-to-8 Line Decoder / Demultiplexer. URL: https://www.microjpm.com/products/a74hc238-3-to-8-line-decoder-demultiplexer/ (дата звернення: 03.07.2023).
С. 275	Рис. 10.37 (б). Адаптовано з: How to Build a 74HC238 3-to-8 Decoder Circuit. URL: http://www.learningaboutelectronics.com/Articles/74HC238-3-to-8-decoder-demultiplexer-circuit.php (дата звернення: 03.07.2023).
С. 276	Рис. 10.38. Рисунок Артема Атамася.
С. 277	Рис. 10.39. Фото Артема Атамася.
С. 278	Рис. 10.40. Фото Артема Атамася.

С. 279	Рис. 10.41. Фото Артема Атамася.
С. 280	Рис. 10.42. Control Voltage / DIY / Arduino Uno R3 Development Board. URL: https://www.controlvoltage.net/arduino-arduino-uno-r3-development-board.html (дата звернення: 03.07.2023).
С. 280	Рис. 10.43. Знімок Артема Атамася.
С. 281	Рис. 10.44. DHT11 Humidity / Temperature Sensor Module. URL: https://protosupplies.com/product/dht11-humidity-and-temp-sensor-module/ (дата звернення: 03.07.2023).
С. 282	Рис. 10.45. Адаптовано з: Bluetooth Module HC-05, Serial TTL "Most Popular". URL: https://ram-e-shop.com/product/kit-bluetooth-hc05/ (дата звернення: 03.07.2023).
С. 282	Рис. 10.46. Рисунок Артема Атамася.
С. 284	Рис. 10.47. Знімок Артема Атамася.
С. 286	Рис. 10.48. Адаптовано з: Arduino Nano 33 BLE Sense. URL: https://mikronika.net/product/arduino-nano-33-ble-sense (дата звернення: 03.07.2023).
С. 287	Рис. 10.49. Arduino Nano 33 IoT Pinout, Specs, Schematic[Detail Board Layout]. URL: https://www.etechnophiles.com/arduino-nano-33-iot-pinout-spec-board-layout/ (дата звернення: 03.07.2023).
С. 288	Рис. 10.50. Знімки Артема Атамася.
С. 289	Рис. 10.51. Знімки Артема Атамася.
С. 289	Рис. 10.52. Знімки Артема Атамася.
С. 291	Рис. 10.53. Знімки Артема Атамася.
С. 292	Рис. 10.54. Знімки Артема Атамася.
С. 293	Рис. 10.55. Адаптовано з: Магнітне поле. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D1%96%D1%82%D0%BD%D0%B5_%D0%BF%D0%BE%D0%B%D0%B5 (дата звернення: 03.07.2023).
С. 295	Рис. 10.56. Рисунок Артема Атамася.
С. 296	Рис. 10.57. Знімок Артема Атамася.
С. 296	Рис. 10.58. Знімок Артема Атамася.
С. 298	Рис. 10.59. Фото Артема Атамася.

С. 298	Рис. 10.60. Рисунок Артема Атамася.
С. 300	Рис. 10.61. Знімок Артема Атамася.
С. 301	Рис. 10.62. Знімок Артема Атамася.
С. 303	Рис. 11.1. Рисунок Артема Атамася.
С. 304	Рис. 11.2. Рисунок Артема Атамася.
С. 305	Рис. 11.3. Рисунок Артема Атамася.
С. 306	Рис. 11.4. Адаптовано з: Energy Systems and Energy Storage Lab / Supercapacitors. URL: http://eseslab.com/ESsensePages/Supercaps-page (дата звернення: 03.07.2023).
С. 307	Рис. 11.5. Рисунок Артема Атамася.
С. 308	Рис. 11.6. Адаптовано з: Нейрон - основа основ (в рамках шкільної програми). URL: https://natabiology.blogspot.com/2016/11/blog-post_81.html (дата звернення: 04.07.2023).
С. 312	Рис. 11.7. Рисунок Артема Атамася.
С. 312	Рис. 11.8. Фото Артема Атамася.
С. 313	Рис. 11.9. Фото Артема Атамася.
С. 315	Рис. 11.10. Рисунок Артема Атамася.
С. 316	Рис. 11.11. Фото Артема Атамася.
С. 317	Рис. 11.12. Фото Артема Атамася.
С. 319	Рис. 11.13. Тема 10 Основи електрохімії. URL: https://elearning.sumdu.edu.ua/free_content/lectured:c025ee0d1cacd40c9b6db4f8ec2bad8c5184bb2c/latest/472133/index.html (дата звернення: 04.07.2023).

ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК

Б

Бардін Дж. – 8

Братейн У. – 8

Браун К. – 8

Г

Герц Г. – 8

Е

Едісон Т. – 8

І

Іоффе А.Ф. – 17

М

Максвел Дж. – 8

Т

Томсон Дж. – 8

Ф

Флемінг Дж. – 8

Форест Л. де – 8

Фрумкін О. У. – 303

Ш

Шоклі У. – 8.

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

А

Arduino – 279

Arduino IDE – 279, 280

Arduino Nano 33 BLE Sense – 285

Arduino Science Journal – 287

Arduino UNO – 279, 280

Автоколивальна система – 190

Аксон – 307

Амплітудна модуляція – 226, 228

Амплітудна характеристика – 169

Амплітудне значення напруги – 145

Амплітудно-частотна

характеристика – 169

Аналогова ІМС – 136

Аналоговий комутатор – 137

Аналого-цифровий перетворювач – 136, 137, 264

Аніон – 318

Антена – 113, 226

Активні електронні компоненти – 38

Акцепторні домішки – 16, 72

Анод – 71, 318

Анодне розчинення – 304

Асинхронний тригер – 252

Атом – 9, 10, 11

Б

База – 98

Біоелектроніка – 307

Біо-Савара-Лапласа закон – 293

Блокінг-генератор – 194

В

Варикап (варакторний діод) – 79, 230

Варистор – 122

Вбудований канал – 102

Випромінювання – 23

Випрямний діод – 77

Вакуумний тріод – 106

Від’ємний зворотний зв’язок – 176

Віна міст – 197

Вимушені коливання – 190

Випрямляч – 145

Виток – 98, 102

Витоковий повторювач – 311, 315

Вихідна характеристика
біполярного транзистора – 101

Вихідна характеристика польового транзистора – 104
Вихідний опір – 168
Внутрішній опір – 38, 65, 307, 309
Вузькосмуговий підсилювач – 180
Вхідна характеристика біполярного транзистора – 100
Вхідний опір – 168

Г

Газорозрядний діод – 71, 72, 85
Гальванічний елемент – 63
Генератор сигналів – 25, 28, 190
Генератор синусоїдального сигналу – 192, 199
Гібридна ІМС – 134

Д

Двійкова система числення – 138, 245
Двійковий лічильник – 259, 271
Двійково-десятковий код – 245
Двопівперіодний випрямляч – 145
Демодуляція – 228
Дендрит – 307
Детектування – 228, 230
Дешифратор – 262, 274
Діелектрик – 9, 12, 13
Діод – 8, 71
Діодний детектор – 230
Дірка – 13, 16, 83
Динамік – 21, 22, 34
Динамічний діапазон – 168
Диністор – 128
Дискретизація – 264
Диференціатор – 179, 196
Додатний зворотний зв'язок – 192, 195
Донорні домішки – 15, 72
Дросель – 52

Е

Електричне коло – 34, 39
Електричні коливання – 19
Електровакуумний діод – 71

Електроліз – 318
Електроліт – 303
Електромагнітне випромінювання – 23
Електромагнітні хвилі – 23, 24
Електрометр – 115
Електрон – 8, 9...19
Електроніка – 7, 8
Електронна емісія – 17
Електронно-дірковий перехід – 72
Емітер – 98
Енергетичні рівні – 9, 12

Є

Ємність електрична – 46, 297
Ємнісний опір – 50
Ємнісний фільтр – 149
Єсакі діод (тунельний діод) – 78

З

Замикаючий триністор – 130
Запам'ятовуючий пристрій – 263
Затвор – 98, 102
Зворотний зв'язок – 190
Згладжуючий конденсатор – 147
Згасаючі коливання – 190
Зенера діод (стабілітрон) – 77

І

Іон – 18, 303
Іонізація – 18
Іоністор – 306
Інвертуючий підсилювач – 177, 197
Індукований канал – 102
Індуктивний опір – 54
Індуктивний фільтр – 149, 151
Інтегратор – 179
Інтегральна мікросхема (ІМС) – 133
Інтегральний стабілізатор – 156

К

Катіон – 318
Катод – 71, 318
Катодне осадження – 304

Квазірезонанс – 198
 Квантування – 264
 Кірхгофа правила – 39...41, 58
 Клас роботи підсилювача – 173
 Кодування – 264
 Коефіцієнт корисної дії підсилювача – 168
 Коефіцієнт підсилення за струмом – 100
 Коефіцієнт передачі струму – 100
 Коефіцієнт об'єднання на вході m – 139
 Коефіцієнт підсилення за напругою – 168
 Коефіцієнт підсилення за потужністю – 168
 Коефіцієнт підсилення за струмом – 168
 Коефіцієнт пульсацій – 148
 Коефіцієнт розгалуження на виході n – 139
 Колектор – 98
 Коливальна система – 190
 Коливальний контур – 55...57, 59
 Колпитця генератор – 233, 237
 Комбінаційні схеми – 139
 Комбінований фільтр – 149, 152
 Компаратор напруги – 137, 180
 Компенсаційний стабілізатор – 154
 Конденсатор – 38, 46
 Конденсатор змінний – 47
 Котушка індуктивності – 51

Л

Лінійні викривлення – 168
 Логічний елемент – 138, 246
 Логічний нуль – 246
 Логічна одиниця – 246
 Логічна операція – 138, 246

М

Макетна плата – 25, 29
 Матричний шифратор – 261
 МДН-транзистор – 102
 Механічні коливання – 190

Мікроконтролер – 267
 Мікропроцесор – 266
 Мікрофон – 20, 21, 32
 Мімістор – 304
 Модуляція – 226
 МОН-транзистор – 102
 Мостова схема – 117, 146
 Мостовий випрямляч – 146, 160
 Мультиметр – 25, 26

Н

Напівпровідник – 9, 12...17
 Напівпровідникова ІМС – 134
 Напівпровідниковий діод – 71, 72...76
 Напівпровідниковий резистор – 122
 Незгасаючі коливання – 190
 Неінвертуючий підсилювач – 178
 Нейрон – 307
 Нейронна мережа – 307
 Нелінійні викривлення – 169
 Несуче коливання – 226

О

Однопівперіодний випрямляч – 145
 Опір – 9
 Ома закон – 9, 55
 Оперативний запам'ятовувальний пристрій – 253
 Операційний підсилювач – 136, 175
 Освітленість – 94
 Осцилограф – 25, 27

П

Phyrphox – 290
 р-і-п діод – 80
 Параметричний стабілізатор – 154
 Пасивні електронні компоненти – 38
 Паралельний подвоювач напруги – 157
 Паралельний регістр – 246
 Передатна характеристика біполярного транзистора – 101

Передатна характеристика
польового транзистора – 103
Перетворювач напруги – 202
Підсилювальний каскад – 170
Підсилювач – 136, 168
Підсилювач класу D – 174
Площинний діод – 75, 76
Повний опір – 54
Подвійний електричний шар – 306
Позистор – 124
Помножувач напруги – 157, 164
Послідовні схеми – 139
Послідовний подвоювач напруги –
158
Послідовний потроювач напруги –
158
Послідовний регістр – 257
Пріоритетний шифратор – 265
Провідність – 9
Провідник – 9, 12, 13
Ппульсації випрямлячів – 148

Р

Радіозв'язок – 226
Радіопередавач – 226
Радіоприймач – 227
Реактивний опір – 50
Регістр – 245
Реєстратор грози – 240
Резистор – 41
Резистор змінний – 44
Резонанс – 55
Резонансний підсилювач – 180
Робочий діапазон частот – 168
Ряди номіналів – 42

С

Світлова характеристика – 127
Світлодіод – 82
Сітка (вакуумного триоду) – 106
Середній час затримки сигналу –
140
Сигнал – 19
Симетричний диністор – 131
Симетричний триністор – 131

Симісторний регулятор потужності
– 132
Синапс – 307
Синхронний тригер – 253
Содовий випрямляч – 303
Сома – 307
Стабілітрон (діод Зенера) – 77
Стабілізатор напруги – 137, 153
Стабілізатор струму – 153, 156
Статична завадостійкість – 140
Сток – 98, 102
Струм – 9
Ступінь інтеграції ІМС – 134
Суматор – 178, 266
Суперконденсатор – 306

Т

Тензорезистор – 125
Термістор – 124
Термоелектронна емісія – 17, 71
Терморезистор – 124
Тверде тіло – 9, 11
Тиристор – 127
Точковий діод – 75, 84
Транзистор – 98, 108, 110
Транзистор біполярний – 98, 99
Транзистор польовий – 98, 102
Трансформатор – 52
Тригер – 251
Тригер типу D – 254
Тригер типу RS – 252
Тригер типу JK – 254
Триністор – 130
Тунельний діод (діод Єсакі) – 78

Ф

Фарадея закон – 318, 319
Флеш-пам'ять – 264
Фазо-частотна характеристика –
169
Фотодіод – 83
Фоторезистор – 126
Фототранзистор – 104
Фільтр (електричний) – 148, 149
Функціональна електроніка – 263

Х

Хемотронна комірка пам'яті – 305

Хемотроніка – 303

Холла датчик – 219

Ц

Цифрова ІМС – 136, 138

Цифрова техніка – 245

Цифро-аналоговий перетворювач –
136, 137, 266

Цифровий лічильник імпульсів –
259

Ч

Частотна модуляція – 227, 230

Ш

Широтно-імпульсна модуляція –
174

Шифратор – 260

Шотткі діод – 80, 230

Щ

Щільність пакування ІМС – 134