

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УЖГОРОДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
КАФЕДРА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

ПОСІБНИК

Навчальні матеріали з дисципліни «Електронні кола»
(бакалаврській рівень)

Ужгород – 2025

ВСТУП

У нашій країні досить актуальним є питання створення сучасної навчальної технічної літератури на українській мові. Нажаль, підручники і навчальні посібники з основ електроніки, які видані останнім часом, наприклад [1, 2], на думку авторів не в повній мірі відповідають сучасним вимогам. Тому в даному виданні автори намагалися наблизити викладення матеріалу технічної електроніки до умов сьогодення. На нашу думку, серед основних із них слід відмітити:

1. Інтенсивне збільшення потоку інформації як за видами інформаційних джерел, так і за обсягом. Тому перед молодими людьми стоїть не легка задача не «потонути» в інформаційному «смітті». Їм слід навчитися вибрати з інформаційного простору «золоті» крупинки тих знань, які можуть стати теоретичною основою майбутньої професійної діяльності. Тому автори уклали даний посібник для студентів як початковий путівник у світ сучасної електроніки. Він надає найпростішу вступну інформацію, яка є необхідною для подальшого отримання фундаментальних знань в області електроніки в рамках вивчення інших фахових дисциплін.

2. Електроніка в наш час дуже інтенсивно розвивається і стає все більш інтегрованою з іншими найрізноманітнішими галузями діяльності. І фахівець, який збирається працювати в цій галузі, повинен опанувати значний обсяг саме сучасних знань не тільки електроніки, але й багатьох суміжних дисциплін. А термін навчання у вузах за останнє століття практично не змінився. Тому важливе завдання будь-якого сучасного навчального посібника з електроніки – викристалізувати в концентрованому стислому вигляді лише ту інформацію з даної конкретної дисципліни, яка стане фундаментом для свідомого засвоєння майбутнім фахівцем інтегрованих знань з відповідної «своєї» фахової діяльності. Відповідно, у даному виданні всі питання основ електроніки кіл викладені лаконічно стисло, але без особливих втрат інформативної достатності наявного матеріалу. При цьому зроблено акцент на чисто прикладні аспекти сучасної практичної електроніки без заглиблення в її теоретичні основи.

Одночасно також намічаються зв'язки сучасної електроніки з найбільш близькими суміжними дисциплінами.

3. Навчальні матеріали мають відповідати принципам логічної системності та взаємозумовленості з попередніми вивченими дисциплінами. Оскільки предмет «Електронні кола» планується для вивчення на першому курсі циклу вищої освіти, то автори вважали за доцільне опиратися переважно на знання студентами відповідних дисциплін програми середньої загальноосвітньої школи. При цьому також ставилося за мету узагальнити ці знання та прив'язати й сфокусувати їх до фахової діяльності майбутнього спеціаліста з автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технічних систем.

4. Автори свідомо мінімізували використання апарату вищої математики. Для першого знайомства з електронікою в ньому нема особливої необхідності. У той же час, у багатьох підручниках і навчальних посібниках застосування складних математичних викладок не тільки не сприяє засвоєнню відповідних знань, а й суттєво «затінює» фізико-технічну сутність розуміння базових понять та законів електроніки.

5. Матеріал посібника має бути детально структурованим. Тому в даному виданні для кожного окремого питання електроніки виділяється свій підрозділ або пункт. Іноді це буде всього два-три абзаци, але їх зміст є достатнім для початкового розуміння суті розглядуваного поняття електроніки.

6. Видання на сучасній поліграфічній базі дозволяє легко застосовувати різноманітні стилі оформлення інформації: підкреслення; виділення шрифтом найголовніших моментів, понять, правил, законів; використання максимальної кількості рисунків (у тому числі й кольорових) тощо. Всі ці поліграфічні елементи використані в даному посібнику. Зокрема:

- жирним шрифтом виділені базові визначення та закони;
- підкресленим шрифтом – основні поняття, властивості та висновки;
- курсивом – підказки, примітки, позначення фізичних і технічних величин (автори позначали великими літерами переважно ті фізичні та технічні величини, які описують постійні в часі електричні та електронні процеси; відповідно, малими літерами позначались величини, які описують змінні в часі процеси).

7. Суттєвою частиною навчально-методичної літератури з електроніки є практичні завдання та задачі. На нашу думку, доцільно розміщати такі матеріали безпосередньо в посібнику, структуруючи їх з відповідними питаннями теоретичної підготовки. При цьому метою розв'язку практичних завдань, у першу чергу, ставилося закріплення розуміння студентами основних законів і правил електротехніки та електроніки з усвідомленням меж їхнього практичного використання. При цьому зміст задач та завдань прив'язаний до фахової діяльності майбутніх спеціалістів у галузі автоматизації технічних систем. При проведенні практичних занять увага також акцентується на отриманні студентами умінь і навичок дотримання основних правил наближених обчислень та коректного представлення інформації у графічному і табличному вигляді. Більша частина практичних завдань посібника спрямована і на мотивацію роздумів та на створення студентами власних знань щодо майбутньої професійної діяльності.

8. У тексті посібника зустрічаються «повторення» у вигляді варіацій викладення певної інформації в різних підрозділах. Такий підхід авторами використано свідомо і ставить за мету більш поглиблене і різностороннє засвоєння студентами знань.

9. Посібник доповнений кількома додатками. Схемні позначення найпростіших базових елементів електричних та електронних кіл, які розглядаються в посібнику, наведені в додатку А. Це сприяє освоєнню студентами перших кроків щодо фахової роботи з конструкторськими документами.

У додатку Б стисло викладений матеріал з такого розділу «Фізики» як «Електрика». Він дозволить студентам у стислій формі згадати базові, переважно теоретичні основи фізики електричних і електронних процесів, які вивчаються в межах навчальної програми середньої школи.

Додаток В містить невеликий українсько-англійський словник деяких технічних термінів та понять з галузі електрики та електроніки, які використовуються в посібнику.

1 ЕЛЕКТРИЧНИЙ ЗАРЯД ТА ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ЕЛЕКТРИКИ І ЕЛЕКТРОНІКИ

1.1 Основні поняття електрики та електроніки

Вивчення електроніки необхідно починати з основних понять такого розділу фізики як «Електрика». Без освоєння такої інформації неможливо усвідомлено розуміти ту різноманітність процесів, які протікають при функціонуванні електронних систем.

Розуміння сучасної електрики та електроніки ґрунтується на кількох фундаментальних поняттях фізики.

Одним із таких фундаментальних понять фізики і першим модельним базисом електроніки є поняття електричного заряду. Воно визначає важливу особливість нашого всесвіту. Ця особливість полягає в тому, що весь наш матеріальний світ побудований із трьох елементарних частинок. Цими частинками є: електрон, протон та нейтрон. Основні їхні фундаментальні властивості такі:

- маса – для електрона наближено рівна $m_e \approx 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, для протона $m_p \approx 1,7 \cdot 10^{-27}$ кг і для нейтрона $m_n \approx 1,7 \cdot 10^{-27}$ кг;
- електричний заряд, наближено рівний для електрона $e \approx -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, для протона $e \approx +1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл і для нейтрона $e = 0$;
- спін для всіх трьох частинок рівний $s = 1/2$.

Зверніть увагу на оформлення наведеного вище тексту – згідно зі стандартами, у технічній літературі позначення фізичних величин виконують курсивом. Однак літери грецької абетки пишуться звичайним прямим шрифтом.

Як бачимо, дві з трьох елементарних частинок мають особливу властивість - наявність у них електричного заряду, який може бути позитивним або негативним. Саме ця властивість елементарних частинок і визначає перший модельний базис електрики та електроніки, назви яких й пішли від назви негативно зарядженої елементарної частинки - електрона.

Слід відмітити, що формування із елементарних частинок різних матеріальних об'єктів відбувається за рахунок так званих трьох видів загальних взаємодій або сил :

- ядерні взаємодії (сильні та слабкі), які відповідають за утворення ядер атомів і за протікання різних процесів у них;
- електромагнітні взаємодії, які діють лише між зарядженими частинками і тілами;
- гравітаційні взаємодії, які діють між тими любими матеріальними частинками і тілами, які мають певну масу.

Відстані дії ядерних сил дуже малі і лежать біля величини 10^{-15} м. Практично відчутні електромагнітні взаємодії поширюються на віддалі до десятків метрів. Гравітаційні ж взаємодії охоплюють космічні масштаби всього Всесвіту.

Другий фундаментальний базис електроніки слідує із характеру побудови атомів нашого світу. Кожен атом складається із ядра, яке містить кілька протонів і нейтронів, та системи електронів, які розміщуються навколо ядра на можливих для даного атома електронних оболонках та орбітах (на рис. 1.1 наведено дуже спрощену модель атома).

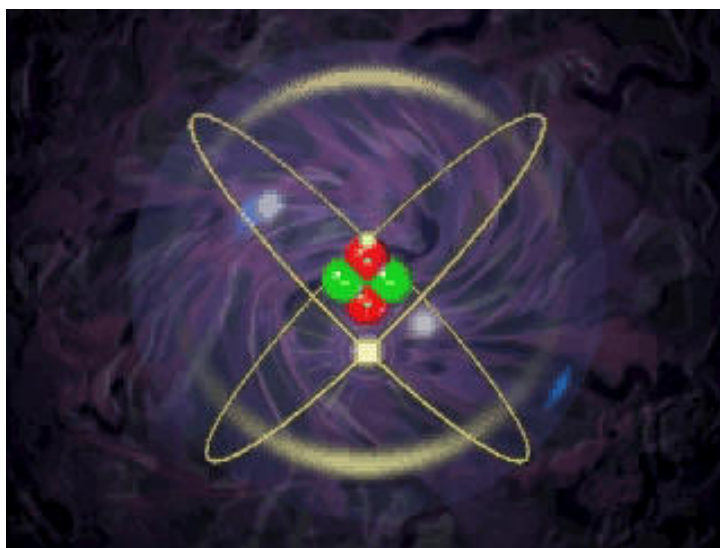


Рисунок 1.1 - Спрощена модель будови атома гелію

Важливим у будові атомів є те, що розмір ядра складає біля 10^{-15} м, а розміри електронних оболонок, на яких розміщуються електрони, більші 10^{-10} м. Тобто, **практично весь простір в атомі зайнятий електронними оболонками з розміщеними на них електронами** (рис. 1.1), тоді як розміри ядра в ньому можна не брати до уваги при розгляді задач електроніки. Крім того, внаслідок великої різниці мас електронів та протонів і нейтронів **практично вся маса**

атома зосереджена в ядрі (рис. 1.1). Саме до таких геометричних та масових параметрів будови атомів призводять кількісні величини трьох вказаних вище фундаментальних властивостей-параметрів елементарних частинок та констант трьох різних взаємодій між цими частинками.

Оскільки всі оточуючі нас речовини та матеріали побудовані із атомів, то відмічені вище загальні властивості атомів переносяться і на речовини. Зокрема, практично весь простір у них наданий електронним оболонкам електронів. При цьому **електрони інтенсивно «переміщуються» по своїх електронних орбітах в атомному просторі**. Практично ж **безрозмірні ядра можна вважати нерухомими**. У результаті, в електроніці переважна більшість процесів зумовлені рухомими негативними зарядженими частинками - електронами, а позитивно заряджені протони та нейтральні нейтрони, зосереджені в ядрах, безпосередньої участі в них не беруть. Тому переважна більшість процесів, які протікають з участю заряджених частинок у речовинах та відповідних пристроях електроніки, називають електронними процесами.

У результаті другий модельний базис електрики й електроніки вказує на постійне **вільне переміщення електронів по своїх орбітах та на можливість переходів електронів з однієї своєї орбіти на іншу у просторі в середині речовин**.

Експерименти показують, що **в електронних процесах переважно проявляються лише електромагнітні взаємодії**. Зокрема, результатом прояву цих взаємодій є й відомі нам властивості заряджених частинок і тіл:

- частинки із однойменними зарядами відштовхуються між собою;
- частинки із різнойменними зарядами притягуються між собою.

Дослідження характеру взаємодії між собою електричних зарядів також показали існування в нашому матеріальному світі крім речовини ще одного виду матерії – електромагнітних полів та електромагнітних хвиль. Наявність таких полів та хвиль є третім базисом електроніки.

Четвертим базисом електроніки є ще одна унікальність нашого світу - він наповнений інформацією або знаннями про все, що нас

оточує. І основне завдання сучасної електроніки - це створювати різні пристрої, призначені для виконання різноманітних операцій з інформацією.

Із останнього твердження слідує головна відмінність між електрикою та електронікою. **Електрика – розділ науки та галузь практичної діяльності людини, які пов’язані із застосуванням електронних процесів для виробництва, передачі, розподілу та використанням електричної енергії. Електроніка - розділ науки та галузь практичної діяльності людини, які пов’язані з використанням електронних процесів для виконання різних операцій з інформацією у вигляді сигналів.** Таким чином, обидва ці розділи ґрунтуються на однакових електронних процесах. Але терміни електрика та електричний відносяться до всіх тих елементів і систем, які «працюють» з електричною енергією. Терміни ж електроніка та електронний переважно охоплює ті елементи і системи, які «працюють» із сигналами або інформацією.

1.2 Електрично заряджені тіла. Два види заряду. Кулон

Причиною появи електричних зарядів у матеріальних тіл є прояв фундаментальних властивостей елементарних частинок. Це обумовлено тим, що атоми різних хімічних елементів складаються із елементарних частинок, які містять як позитивні (протони ядер), так і негативні (електрони) заряди. **У звичайному стані сумарний негативний заряд електронів кожного атома рівний позитивному заряду ядра (кількість електронів атома рівна кількості протонів у його ядрі).** Оскільки всі матеріальні тіла складаються із даних атомів, то у звичайних умовах у матеріальних тілах величини зарядів протилежних знаків однакові і тому говорять, що вони взаємно скомпенсовані. Такі тіла називають незарядженими або електрично нейтральними.

Досліди з електризації показують, що в деяких фізичних явищах певна кількість електронів може переходити від одного тіла до іншого. У таких тілах елементарних частинок з електричним зарядом одного знаку може стати більше, ніж частинок із зарядом протилежного знаку. Тоді говорять, що **відбувається порушення**

умови електричної нейтральності тіла і такі тіла набувають електричного заряду.

Якщо в тілі електронів на електронних оболонках більше, ніж протонів в ядрах, то говорять, що таке **тіло має надлишок електронів і його називають негативно зарядженим**. У таких тілах надлишок електронів утворився за рахунок їхнього переходу з іншого тіла. Якщо ж у тілі електронів менше ніж протонів (**є надлишок протонів в ядрах**), то тіло називають **позитивно зарядженим**. Недостача електронів утворилася за рахунок того, що частина електронів вийшла з цього тіла.

Порушення електричної нейтральності може відбуватися і в окремих атомах або групах атомів та молекулах. У результаті такі об'єкти перетворюються на позитивно або негативно заряджені іони.

Для вимірювання величини електричного заряду різних тіл у системі СІ використовують похідну одиницю вимірювання заряду – кулон (позначають Кл). Дана одиниця є похідною від основної електричної одиниці системи СІ ампер (для вимірювання сили струму). Відповідно, **одному кулону відповідає електричний заряд, який проходить через поперечний переріз провідника за одну секунду при протіканні у провіднику електричного струму силою в один ампер.**

1.3 Носії заряду в електроніці. Вільні та зв'язані носії заряду

Матеріальне тіло будь-якої природи, яке несе на собі певний електричний заряд, називають носієм заряду. Прикладами носіїв електричного заряду є: електрон, протон, позитрон, іони, заряджені кластери (частинки речовини розмірами в десятки чи сотні атомів), заряджені кульки, протонні зорі і т.д.

У сучасній електриці та електроніці поняття носія заряду вживають у більш вузькому смислі і називають так лише заряджені об'єкти, які забезпечують протікання різних електричних явищ у різноманітних середовищах. Основними із них є електрони та іони. Електрон - це розглянута вище елементарна частинка. Іон - це нейтральний атом, від якого забрали або добавили один чи кілька електронів.

Для зручності опису в деяких матеріалах (переважно напівпровідники) формально вводять наявність особливих носіїв позитивного заряду – дірок. Вони не є реальними об'єктами, а лише позначають ті просторові області у структурі речовини, де електрони можуть перебувати, але на даний час відсутні (виникає пуста від електрона місце – дірка). Такі модельні уявлення дозволяють суттєво спростити опис електронних процесів у напівпровідниках.

У русі носіїв заряду в речовинах існує два важливі для електроніки випадки:

- носії, які тісно ув'язані у структуру матеріалу електроніки (наприклад, у кристалічну ґратку) і не можуть переміщуватись у просторі на віддалі суттєво більші атомних, називають зв'язаними (рис. 1.2);

- носії, які здатні переміщуватися у просторі матеріалу електроніки на віддалі значно більші розмірів атомів, називають вільними (рис. 1.2).

У більшості матеріалів та приладів електроніки вільними носіями є лише електрони та дірки. Іони в більшості із приладів сучасної електроніки зв'язані між собою у кристалічну ґратку речовини, як правило, не можуть бути вільними.

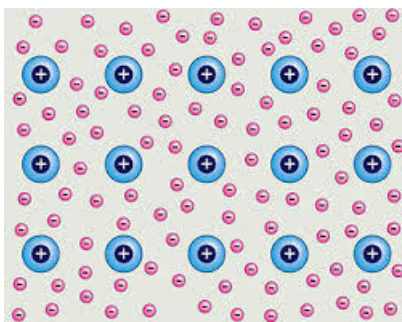


Рисунок 1.2- Умовна схема атомної будови металів із вільними (рожеві) та зв'язаними (сині області) електронами як носіями заряду

Однак, багато рідин у вигляді розчинів та розплавів мають значну кількість вільних як позитивно, так і негативно заряджених іонів. Дані іони відіграють суттєву роль у протіканні різних електричних процесів у таких речовинах. Яскравим прикладом таких процесів є функціонування сучасних гальванічних елементів та різного типу акумуляторних батарей.

Якщо розміри заряджених тіл набагато менші віддалі між ними, то з високою ступінню точності ці тіла і заряди можна розглядати як точкові. Саме для точкових зарядів характерні найпростіші закони електромагнітної взаємодії. І саме в такому наближенні ми будемо розглядати заряджені тіла в даному посібнику.

1.4 Квантування електричних зарядів. Закон збереження електричного заряду

Величина електричного заряду є дискретною. Це обумовлено тим, що елементарні частинки мають мінімальний електричний заряд величиною e , який фіксований і не може бути змінений. Відповідно, **любий носій заряду в матеріальному світі буде мати на собі електричний заряд, який буде кратний величині e** . Таку універсальну властивість називають **законом квантування електричного заряду**. Сучасна теорія електромагнітних взаємодій не може пояснити факт квантування електричних зарядів, виходячи із початкових фундаментальних принципів, і приймає його як постулат.

Фундаментальною властивістю електромагнітної взаємодії в системах, які складаються із заряджених тіл і частинок є **закон збереження електричного заряду**. Відповідно із ним, **у ізольованій системі повний електричний заряд лишається постійним**. Під ізольованою тут розуміють таку систему, через межі якої не проникають заряджені тіла із оточуючого цю систему середовища, і навпаки, заряджені тіла самої системи не покидають її через ці межі. Із закону збереження заряду слідує досить важлива для електронних процесів закономірність: **у ізольованій системі позитивний і негативний заряди можуть виникати або зникати лише парами**. При цьому виникають два носії заряду, один з яких містить позитивний, а другий негативний заряд однакової величини.

1.5 Сила взаємодії точкових електричних зарядів. Закон Кулона

Кількісний закон для визначення величини сил, які діють між зарядженими тілами, встановив експериментально відомий фізик Кулон. Проводячи свої досліди він показав, що сила взаємодії двох

точкових зарядів направлена вздовж лінії, яка з'єднає ці заряди, і обернено пропорційна квадрату відстані між ними (рис. 1.3).

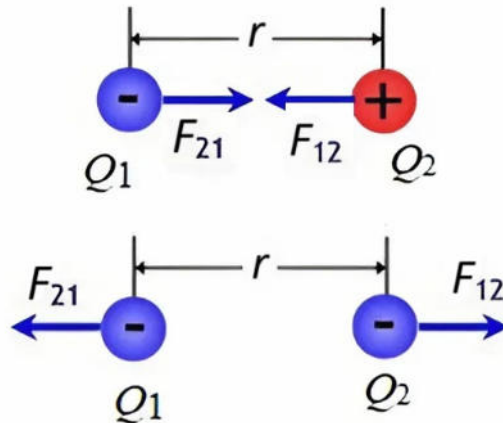


Рисунок 1.3 - Сили взаємодії між зарядженими тілами F залежать від величини їхніх зарядів Q_1 і Q_2 та відстані між ними r

Математично закон Кулона для двох точкових зарядів можна записати у вигляді простого виразу (рис. 1.4):

$$\vec{F} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^3} \vec{r}, \quad (\pi, \epsilon - \text{прямі}) \quad (1.1)$$

де \vec{F} – вектор сили, яка діє між зарядами Q_1 та Q_2 ,

\vec{r} – радіус-вектор, напрямлений від одного заряду до іншого,

r – модуль радіус-вектора \vec{r} ,

ϵ_0 – електрична стала, рівна $8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл²/(Н·м²).

При цьому напрям вектора сили \vec{F} визначається правилом взаємодії однойменно та різнойменно заряджених тіл.

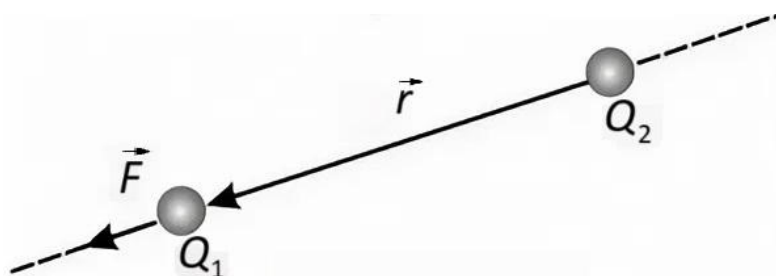


Рис.1.4. Параметри розрахунку сили F , яка діє на заряд Q_1 зі сторони заряду Q_2

Відмітимо, що для заряджених тіл довільних розмірів закон Кулона в наведеній простій формі використовувати не можна, так як сила електричної взаємодії протяжних тіл залежить від форми і

взаємного розміщення цих тіл. Але форма тіл та їх взаємна орієнтація перестають проявлятися, якщо розміри тіл зовсім малі в порівнянні з відстанню між ними. Тому ще раз підкреслимо, що закон Кулона застосовний лише для точкових зарядів.

Сили взаємодії електричних зарядів між собою практично не використовують для виконання механічної роботи. Це обумовлено тим, що для створення необхідних для цього сил слід створювати великі заряди. Крім того, дані сили різко зменшуються зі збільшенням відстані між взаємодіючими тілами. Тому в електриці та електроніці переважно використовується лише здатність носіїв заряду створювати електромагнітні поля. І саме такі поля є основним матеріальним носієм передачі взаємодії між зарядами, який використовується у практичній діяльності, у тому числі і для виконання механічної роботи.

1.6 Електричне поле

Численні експерименти Кулона та інших дослідників показали, що між зарядженими тілами взаємодія виникає при відсутності безпосереднього зв'язку (або контакту) між ними. Тому при дослідженні взаємодії електричних зарядів виникає важливе запитання: як ці сили-взаємодії передаються від одного зарядженого тіла до другого через простір без контакту між самими тілами.

Перед тим, як дати відповідь на поставлене запитання, розглянемо простий приклад. Абонент звичайної провідної телефонної мережі набирає з одного міста номер абонента іншого міста. Після з'єднання абонентів зміст розмови у вигляді електричного сигналу передається по провідниках, наприклад, на відстань $L \approx 1000$ км між цими містами. Розглянемо два варіанти передачі сигналу у вигляді дуже спрощеної моделі.

Перший варіант. Сигнал почергово передається електронами від одного до другого за рахунок їх направлено руху по металевих провідниках від міста до міста: Відомо, що швидкість направлено руху вільних електронів у провідниках телефонної ліній при передачі сигналів не перевищує величину $v \approx 100$ км/с. Розрахуємо час проходження сигналу між містами в цьому випадку.

$$t_1 \approx L/v \approx (1000 \text{ км})/(100 \text{ км/с}) \approx 10 \text{ с.}$$

Отже, якби «носіями» сигналу у провідниках були б саме електрони, то при передачі інформації між абонентами існувала б затримка в часі в десятки секунд навіть для невеликих відстаней! На практиці цього не спостерігається. Останнє свідчить про те, що не безпосередня взаємодія (наприклад, удари) окремих вільних електронів між собою у провідниках зумовлює передачу інформації в телефонних лініях зв'язку. Такий висновок слідує і з багатьох інших закономірностей, які описують експериментальні результати досліджень фізичної взаємодії між зарядженими тілами.

Другий варіант. Із багатьох експериментів та теоретичних розрахунків слідує, що із взаємодією зарядів і передачею сигналів пов'язаний якийсь інший матеріальний носій, який здатний значно швидше поширюватися у просторі. Дійсно, наявні на сьогодні численні факти свідчать, що для розуміння виникнення і передавання сил, діючих між електричними зарядами, необхідно припустити наявність між цими зарядами деякого фізичного посередника, який забезпечує цю взаємодію. Цей посередник отримав назву електромагнітне поле. Його особливістю є те, що воно поширюється у просторі зі швидкістю світла $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с.

Розрахуємо час проходження телефонного сигналу між містами в цьому випадку. Відповідно, сигнал генерується телефоном в одному місті, створюючи тут електромагнітне поле. Воно поширюється по провідниках зі швидкістю світла до іншого міста і створює там у телефонному апараті приймаючого абонента відповідний сигнал. Тоді час розповсюдження сигналу:

$$t_2 \approx L/c \approx (1000 \text{ км}) / (300000 \text{ км/с}) \approx 3,3 \text{ мс.}$$

Такий результат вже відповідає реальності. Він ще раз підкреслює важливість існування в матеріальному світі електромагнітних полів як особливого виду матерії для функціонування систем електрики та електроніки.

Щоб не змінювати практичну направленість матеріалу посібника, теоретичні фізичні принципи прояву та опису електричних полів коротко розглянуто у додатку Б.

1.7 Магнітне поле, електромагнітне поле та електромагнітні хвилі

Електричне поле, як правило, пов'язують з нерухомими зарядами. При їх русі у просторі виникає ще один вид матерії, який називають магнітним полем. Природнім джерелом магнітного поля є особливі магнітні матеріали. Їхній магнетизм обумовлений колективним рухом електронів по певних електронних орбітах атомів магнітного матеріалу.

Електричні та магнітні поля тісно пов'язані між собою, можуть перетворюватись одне в одне і є лиш частковими випадками загального єдиного поля, яке називають електромагнітним. Таке загальне електромагнітне поле одночасно містить у собі складові і електричного поля, і магнітного поля. У багатьох фізичних явищах до уваги беруть лише або електричну складову електромагнітного поля (електричне поле), або магнітну складову (магнітне поле).

Властивості електромагнітного поля як матеріального об'єкта:

- виникає при появі у просторі зарядженого тіла;
- поширюється навколо заряду по всьому простору до безкінечності;
- з'являється, розповсюджується і зникає зі швидкістю світла;
- має певну енергію;
- проявляється по силовій дії на поміщені в це поле заряди.

Таким чином, електромагнітне поле не є абстрактним поняттям, введеним для опису електричних і магнітних взаємодій, а представляє собою реальний фізичний об'єкт, який володіє відміченими вище основними матеріальними властивостями.

Електромагнітне поле з певними властивостями може існувати й незалежно від зарядів, які його породили. Зокрема, **змінне електромагнітне поле має здатність самотійно розповсюджуватися у просторі у вигляді електромагнітних хвиль** – періодичної зміни (коливань) величини та напрямку векторів напруженості електричного та магнітного поля. Швидкість розповсюдження таких електромагнітних хвиль у вакуумі є постійною: $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с. Частота f таких коливань в електроніці може змінюватися в дуже широкому діапазоні. При цьому найвищим частотам відповідає світловий діапазон, оскільки світло теж є електромагнітною хвилею. Ще одним

параметром електромагнітної хвилі є її довжина: $\lambda = c/f$. Детальніше із властивостями та застосуванням електромагнітних хвиль в електроніці та автоматизації будемо знайомитися в інших дисциплінах спеціальності.

ПРАКТИЧНА РОБОТА №1

ЕЛЕКТРИЧНІ ЗАРЯДИ ТА БУДОВА РЕЧОВИН

Завдання для аудиторної роботи

Завдання 1.1. Відмітьте, де на рис. 1.1 зображено електрони, електронні орбіти, протони та нейтрони. Які грубі фізичні помилки наявні на даному рисунку?

Завдання 1.2. Розрахувати силу електричної взаємодії між протоном та електроном, які розміщені на віддалі, рівній умовному розміру атома 10^{-10} м. Яка величина цієї сили? Який напрямок має ця сила? Як будуть вести себе частинки під дією цієї сили? Чи відповідає така поведінка реальній картині будови атомів?

Підказка. Використайте закон Кулона.

Примітка. При технічних розрахунках отримані кількісні результати округлюють з тією чи іншою точністю. Надалі домовимось, що при виконанні навчальних практичних робіт під час навчання в університеті результати обчислень слід округлювати з точністю до трьох значущих цифр.

Завдання 1.3. Які основні постулати планетарної моделі атомів? З якою швидкістю має рухатися електрон по коловій орбіті в атомі водню, щоб атом залишався стабільним у рамках дії класичної механіки? Радіус орбіти прийняти рівною 10^{-10} м. Порівняйте отримане значення швидкості руху електрона зі швидкістю автомобіля, рівну 100 км/год.

Підказки. Згадайте основні постулати квантової механіки.

Завдання 1.4. Розрахувати силу електричної взаємодії між двома протонами, розміщеними на віддалі, рівній умовному розміру ядра атома. Яка величина цієї сили? Який напрямок має ця сила? Як мають вести себе протони під дією цієї сили? З якою швидкістю мали б рухатися протони під дією даної сили через 1 с? Порівняйте цю швидкість зі швидкістю світла. Чи відповідає така поведінка реальній картині будови ядер атомів? Чим пояснюється стабільність ядер атомів?

Підказки. Згадайте закон Кулона. Що він описує? Згадайте або знайдіть у конспекті чи довідниках величину умовного розміру ядра атома. Згадайте основні фундаментальні взаємодії (сили) нашого всесвіту.

Завдання 1.5. Що є носієм інформації у Wi-Fi каналах зв'язку? З якою швидкістю поширюється такий носій у просторі?. Який приблизно інтервал часу між моментами передачі сигналу космічним центром керування та отриманням цього сигналу штучним супутником Землі?

Підказки. Згадайте або дізнайтеся, що таке Wi-Fi. Яка траєкторія руху штучного супутника Землі? Які середні розміри орбіти штучного супутника? Як відбувається зв'язок зі штучними супутниками та іншими космічними об'єктами?

Завдання 1.6. Які грубі фізичні помилки допущені на наведеному зображенні двохмірної кристалічної решітки металу на рис. 1.3?

Підказки. Згадайте, що таке іонний остов атомів в кристалічних решітках металів. Як зв'язана концентрація вільних електронів із концентрацією атомів у металах?

Завдання для самостійної роботи.

Завдання 1.7. Спробуйте зобразити на рисунку в масштабі спрощену модель атома водню, використовуючи умовні розміри ядра (10^{-15} м), електрона (10^{-15} м) та радіуса орбіти електрона (10^{-10} м). Для спрощення можна зобразити ядро та електрон точкою з умовним розміром 0,1 мм. Якого розміру аркуш паперу потрібен для цього? Чим заповнений простір у середині такого атома? Чи характерні отримані властивості й для інших атомів нашого матеріального світу?

Завдання 1.8 (для модульного контролю). Знайти напруженість електричного поля двох точкових зарядів, розміщених між собою на відстані 1 м, за одним із наведених нижче варіантів. Зобразити рисунком наближену картину силових ліній електричного поля. Величину зарядів обох тіл прийняти рівною 1 Кл.

1. Тіла заряджені позитивно, електричне поле в точці посередині між тілами.

2. Тіла заряджені негативно, електричне поле в точці посередині між тілами.

3. Одне тіло заряджене негативно, друге – позитивно, електричне поле в точці посередині між тілами.

4. Тіла заряджені позитивно, електричне поле в точці, яка віддалена від обох тіл на відстань 1 м.

5. Тіла заряджені негативно, електричне поле в точці, яка віддалена від обох тіл на відстань 1 м.

6. Одне тіло заряджене негативно, друге – позитивно, електричне поле в точці, яка віддалена від обох тіл на відстань 1 м.

2 СТОРОННІ СИЛИ ТА ЕЛЕКТРОРУШІЙНА СИЛА

2.1 Сторонні сили. Розділення зарядів. Джерела електрорушійних сил

Основою практичної електрики та електроніки є можливість керуванні рухом вільних носіїв заряду. Для здійснення таких процесів застосовують електричні та магнітні поля. Тому в основі електроніки й електрики лежать процеси створення необхідних електромагнітних полів і, особливо, електричних полів.

Ми вже вияснили, що електричні поля створюються зарядженими тілами. Відповідно з законами електричних полів (див. додаток Б), якщо з'єднати два заряджені тіла провідником, то вони утворять єдиний провідник, у котрому має утворитися однаковий електричний потенціал по всіх окремих його частинах. Тому, якщо до з'єднання між тілами існувала різниця електричних потенціалів, то рівновага зарядів в об'єднаній системі не буде зберігатися. Між таким тілами, а відповідно і у провіднику, виникне електричне поле з певною напруженістю \vec{E} . Під його дією електрони провідності в системі даних тіл прийдуть у направлений рух для відновлення стану електричної рівноваги.

Стабільних довготривалих природних джерел великої кількості вільних носіїв заряду в земних умовах не існує. Відповідно, не існує й природних земних джерел тривало діючих потужних електричних полів. Зокрема, якщо в якості джерела різниці потенціалів використовувати любі елементи з електростатичним полем (наприклад, заряджений конденсатор), то при їх з'єднанні провідником вони не можуть забезпечити підтримання постійності в часі величини різниці потенціалів – у такій системі заряди швидко перетечуть між пластинами конденсатора і між ними встановиться нульова різниця потенціалів. Дана властивість є загальною для всіх електростатичних сил: вони можуть переміщувати заряди лише в таких електронних процесах, при яких швидко зменшується різниця потенціалів між зарядженими тілами.

Якщо скористатися гідростатичною аналогією, то сили електростатичного поля можна прирівняти силі тяжіння, яка заставляє

струмись води текти зверху вниз, поступово вичерпуючи її запаси у верхній посудині і поповнюючи їх у нижній посудині.

Тому для живлення електричних та електронних кіл використовують різні елементи, котрі створюють електричні поля не електростатичної природи. У таких елементах різниця потенціалів на клеммах не змінюється протягом тривалого часу протікання струму в електричних колах, які підключені до цих елементів.

Отже на сьогодні **основою одержання електричних полів для електроніки є використання сторонніх сил різної неелектричної природи (рис. 2.1)**. Такі сили називають також електрорушійними силами (ЕРС). Таким чином, **електрорушійними називають ті сили неелектричної природи, які в певних пристроях забезпечують розділення зарядів протилежного знаку, створюючи на одній клемі (полюсі) цих пристроїв надлишок негативного заряду (надлишок електронів), а на другій клемі – рівний за величиною надлишок позитивного заряду (недостачу електронів)**.

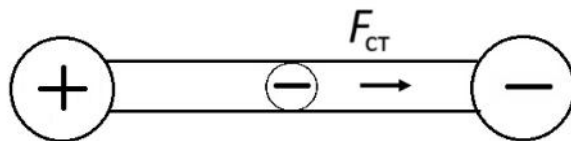


Рисунок 2.1- Дія сторонніх сил $F_{ст}$ на вільні носії заряду (наприклад, електрони) призводить до накопичення електричних зарядів різних знаків на двох клеммах джерела ЕРС

Таким чином, джерела ЕРС за рахунок сторонніх сил забезпечують виникнення на своїх клеммах відповідної різниці електричного потенціалу та його підтримку на необхідному рівні протягом тривалого часу. У аналогії протікання води джерело сторонніх сил можна порівняти з насосом, який працює проти сили тяжіння. Він перекачує воду з нижньої посудини у верхню, постійно підтримуючи постійний перепад рівнів води в них, не дивлячись на наявність постійного відтоку води зверху вниз. **Такі пристрої для розділення зарядів та створення різниці електричних потенціалів називають джерелами ЕРС.**

Отже ЕРС – це фізична величина, яка характеризує сторонні сили неелектричного походження, які викликають виникнення електричної

різниці потенціалів. Пристрої, у яких виникають ЕРС, називають джерелами ЕРС. При цьому фізична природа виникнення ЕРС у різних джерелах різна: в гальванічних елементах – сили молекулярної взаємодії, в термоелектричних батареях – сили тиску електронного газу; в генераторах використовують сили електромагнітної індукції.

Розділення та накопичення зарядів різного знаку на двох полюсах джерел ЕРС з формуванням у цих джерелах певної різниці потенціалів відповідає нагромадженню в них і певної кількості електричної енергії. У результаті джерела ЕРС створюють умови для виникнення руху вільних носіїв заряду та надають енергію для забезпечення такого руху. Тому джерела ЕРС часто також називають і джерелами електричної енергії. При цьому слід завжди мати на увазі, що сторонніми силами забезпечується не лише виникнення, а й підтримка постійності різниці електричних потенціалів на клеммах джерела ЕРС. У результаті створюються й умови для стаціонарного неперервного протікання електронних процесів в усіх елементах системи.

Для розділення зарядів у джерелах ЕРС обов'язково необхідна наявність певних початкових природних джерел електричного або магнітного поля. На сьогодні в якості природного джерела магнітного поля переважно використовують речовини з магнітними властивостями (магніти). У якості ж природних початкових електричних полів переважно застосовують поля, які виникають при тісному контакті між собою двох різних речовин.

2.2 Первинні та вторинні джерела електричної енергії

Ті **джерела ЕРС, які для створення різниці потенціалів використовують різні сили (або енергії) неелектричної природи, називають первинними джерелами ЕРС або первинними джерелами електричної енергії.** Основними такими сучасними пристроями є: генератори (використовують для розділення зарядів механічну енергію), сонячні фотоелементи (перетворюють сонячну енергію в електричну), термоелектричні елементи (перетворюють теплову енергію). До умовно первинних джерел ЕРС належать гальванічні елементи та акумулятори (використовують хімічні реакції для накопичення електричних зарядів на своїх клеммах).

Крім перерахованих вище первинних джерел електричної енергії в сучасній електроніці більш широко використовують вторинні джерела електричної енергії. Це такі джерела, які перетворюють електричну енергію одного виду в електричну енергію іншого виду або в енергію необхідного нам сигналу. Вторинні джерела електричної енергії в більшості випадків називають джерелами напруги. У цілому, як джерела ЕРС, так і джерела напруги в електриці та електроніці часто також називають джерелами живлення.

Джерела електричної енергії мають дві клемми (або два полюси). На одній своїй клемі джерело формує й постійно підтримує надлишок електронів (і відповідно некомпенсований негативний заряд). Такі процеси в середині джерела забезпечуються за рахунок переміщення електронів від другої його клемми, де таким чином створюється некомпенсований позитивний заряд позитивно заряджених іонів кристалічної ґратки. Таке розділення зарядів проходить за рахунок енергії сторонніх сил (рис. 2.1).

2.3. Величина ЕРС. Вольт

Зрозуміло, що виконання роботи джерелом буде відбуватися, якщо з його допомогою будуть переміщуватися носії заряду. Це можливо, якщо зовні до клем джерела під'єднати певний зовнішній пристрій (рис. 2.2). У такому разі говорять, що ми отримуємо замкнуте електричне коло.

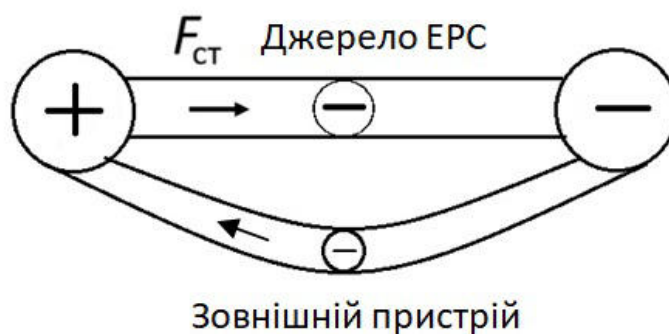


Рисунок 2.2 - Схема створення замкнутого електричного кола із джерела ЕРС та зовнішнього пристрою

Основним кількісним параметром джерел ЕРС (джерел живлення) є величина, яка показує, яку роботу буде виконувати дане джерело енергії, переміщуючи 1 Кл електричного заряду в замкненому колі. Вимірюють величину ЕРС у вольтах (позначення В). Відповідно, одному вольту відповідає така ЕРС джерела, яка при переміщенні по замкнутому електричному колу заряду в 1 Кл використовує для цього енергію 1 Дж. Величину ЕРС позначатимемо надалі літерою E .

Примітка. Слід розрізняти позначення напруженості електричного поля, яка є векторною величиною \vec{E} , та позначення скалярної величини ЕРС E .

Таким чином, величина ЕРС характеризує потенційну можливість даного джерела живлення виконувати ту або іншу роботу з переміщення електричних зарядів. Однак, виконання роботи джерелом ЕРС реально відбувається лише при наявності замкнених електричних кіл.

2.4. Джерела сигналів та джерела живлення

Якщо джерело електричної енергії забезпечує електронну систему лише енергією, то воно називається джерелом живлення. Ця енергія використовується для забезпечення руху електронів по необхідних елементах електронної схеми. Прикладами джерел живлення є акумулятор, електричний блок живлення комп'ютера або мобільного телефона та інше. **Якщо ж джерело електричної енергії забезпечує електронну систему необхідним для нас електричним сигналом, то його називають джерелом сигналу або генератором сигналу.** Наприклад, генератор гармонічних сигналів, генератор імпульсних сигналів, генератор цифрових сигналів, тактовий генератор.

Як правило, джерела ЕРС в електронних колах працюють автономно. Однак у теорії електричних кіл часто використовують і спеціальні типи джерел енергії або сигналів, які називають неавтономними або керованими. Параметри вихідної ЕРС або вихідного струму таких джерел є функціями величини струмів чи напруг в інших (як правило, вхідних) ділянках цієї електричної схеми. Керовані джерела ЕРС використовують для побудови схем заміщення

(заміни) активних електронних компонент, наприклад, транзисторів, мікросхем, окремих блоків та інше.

2.5. Позначення джерел ЕРС на схемах

У більшості літературних джерел з електроніки використовується основне умовне схемне позначення (СП) для ідеальних джерел постійної ЕРС, яке наведене в додатку А на рис. А.2.

Відмітимо, що зображення схемних умовних позначень всіх елементів електрики та електроніки строго регламентуються відповідними державними та міжнародними стандартами. Тому при використанні таких позначень у даному посібнику ми будемо максимально дотримуватись положень даних документів. Зокрема, для наведеного на рис. А.2 першого схемного позначення діаметр кола рівний 10 мм. Товщина ліній від 0,2 мм до 1 мм. Довжина лінії стрілки – 7 мм, а довжина самої стрілки – 3 мм. Величина кута «розкриття» стрілки визначається загальними правилами виконання креслень інженерної графіки.

СП керованих джерел такі ж, як і для автономних джерел ЕРС, але при цьому біля схемного значка записують математичний вираз функції ЕРС або його сили струму від одного або кількох аргументів (рис. А.9).

2.6. Основні типи сучасних джерел живлення та їхні умовні позначення

Основними типами джерел живлення сучасної електроніки є такі.

1. Генератори змінного та постійного струму - прилади, які перетворюють механічну енергію в електричну. Їхнє загальне базове позначення відповідає наведеному на рис. А.1. Воно використовується для всіх електричних машин, до яких відносять і генератори. У залежності від типу генератора до наведеного основного значка вводять додаткові елементи.

2. Мережі або пристрої постійної ЕРС або постійної напруги. Загальне позначення таких джерел наведено на рис. А.3.

2. Мережі або пристрої змінної ЕРС або змінної напруги.

Загальне позначення таких джерел наведено на рис. А.4.

3. Перетворювачі ЕРС змінного струму в напругу постійного струму, наприклад, блоки живлення, зарядки.

4. Перетворювачі напруги постійного струму однієї величини в напругу постійного струму іншої величини. Їх часто ще називають DC-DC-перетворювачами.

5. Перетворювачі напруги постійного струму в напругу змінного струму, які називають інверторами.

6. Хімічні джерела, до яких відносять гальванічні елементи, гальванічні батареї та акумулятори. Схемні позначення таких джерел наведені на рис. А.5.

7. Конденсаторні накоплювачі енергії або іоністори (рис. А.6).

8. Термоелектричні перетворювачі (рис. А.7).

9. Фотоелектричні перетворювачі або сонячні батареї (рис. А.8).

10. Інші джерела-перетворювачі енергії (від телефонної лінії; концентратори енергії електромагнітних випромінювань або енергії акустичних хвиль тощо).

Типи перетворювачів пунктів 3, 4, 5 та 10 є складними електронними пристроями. Тому їхні схемні позначення та будова розглядаються у відповідних різних дисциплінах циклу електрики та електроніки.

3 ЕЛЕКТРИЧНІ ТА ЕЛЕКТРОННІ СХЕМИ

3.1. Електронні елементи або компоненти, електронні кола та схеми

Схемний елемент або компонент – електричний або електронний прилад чи деталь, які не можуть бути розділені на частини і мають самостійне призначення щодо виконання певної функції з перетворення електричного струму або сигналів у певному пристрої.

Згадайте різницю між електрикою та електронікою.

Слід мати на увазі, що при теоретичному аналізі під елементами електричного або електронного кола зазвичай розуміють не реально існуючі пристрої чи прилади, а їх ідеалізовані моделі.

Окремі електронні компоненти у пристроях з'єднують між собою за строго визначеними правилами в різні технічні ланцюжки, які називають електричними або електронними колами.

Надалі ми не будемо окремо виділяти електронні кола та електричні кола. Усі закони, які вивчаються в даному курсі відносяться переважно до електричних кіл. Але, оскільки у більшості випадків ми розглядатимемо пристрої обробки інформації, то особливою помилкою не буде вживання й терміну електронне коло. Тому надалі вживатимемо обидва вказані терміни, враховуючи при цьому відмічену вище різницю між електрикою та електронікою.

Приклад графічного зображення простих електронних кіл та електронних компонент сучасної електроніки наведено на рис. 3.1 у вигляді графічної схеми. **Графічне зображення електронних кіл завершеного пристрою чи якоїсь його частини за допомогою умовних схемних позначень окремих електронних компонентів, які з'єднані між собою за певними правилами в єдину систему, називають електричною або електронною схемою.** При цьому електрична схема призначена для аналізу виконання відповідним пристроєм заданих операцій з електричною енергією, а електронна схема – із сигналами.

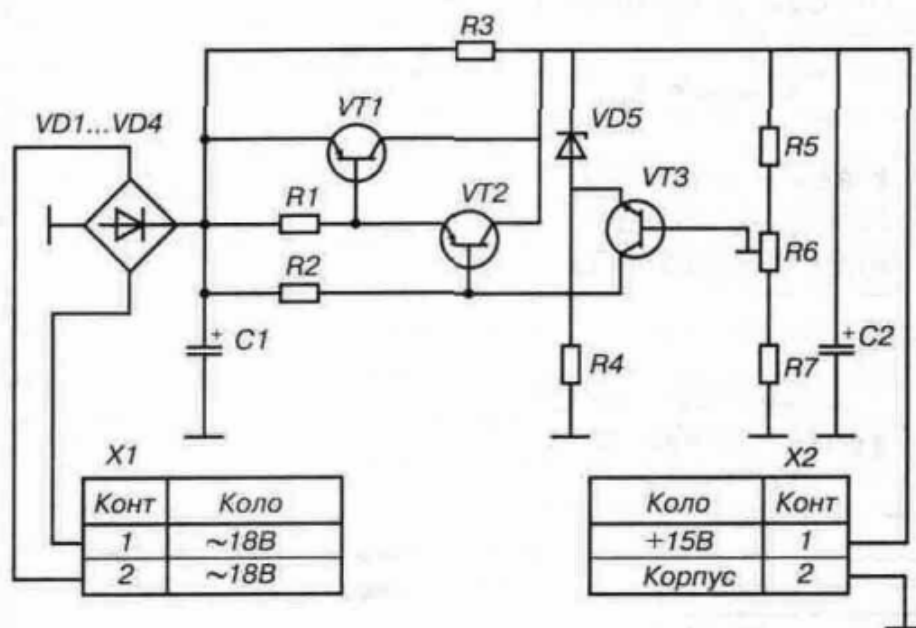


Рисунок 3.1 – Приклад графічного зображення принципової електричної схеми

Часто електронною схемою називають і реальний завершений електронний модуль або його частину. Як уже відмічено, таку ж назву часто вживають і до технічного графічного креслення певного електронного модуля. Однак, у випадку креслень слід вживати встановлені стандартами назви: принципова електрична схема, структурна електрична схема та інші. Особливості побудови таких схем детально вивчаються в таких освітніх компонентах як «Інженерна графіка», «Комп'ютерна графіка», «Стандартизація» та інші. Тут познайомимося лише з найпростішими поняттями таких схем.

Схема електрична принципова – це конструкторський документ, на якому показуються у вигляді умовних графічних схемних позначень усі електричні елементи пристрою та електричні зв'язки між ними. При цьому дійсне просторове розташування схемних елементів, як правило, не враховується.

Принципові схеми використовують для вивчення принципу роботи пристроїв електроніки, при їх налагодженні, контролі та ремонті. Вони також є основою для розробки інших конструкторських документів на електронні пристрої. Для прикладу, на рис. 3.1 наведена принципова електрична схема стабілізованого джерела живлення. Функцією цієї схеми є перетворення змінної ЕРС у постійну

напругу із стабільним значенням величини цієї напруги. Під стабільністю тут розуміється незмінність величини напруги протягом тривалого часу експлуатації такого джерела.

Кожному елементу принципової схеми присвоюють літерно-цифрове позиційне позначення. Воно складається з двох частин: літерного коду, який вказує на тип елемента (наприклад, R - резистор, С — конденсатор, VT — транзистор, VD — діод або стабілітрон), та порядкового номера елементів одного і того ж виду. Ці дві частини записуються без розділових знаків і пропусків між ними. Наприклад, R1, R2, VT1, VT2 (див. рис. 3.1). Порядковий номер присвоюється елементам схеми, починаючи з одиниці і далі, згідно з послідовністю розташування однотипних елементів на схемі – зліва праворуч і зверху донизу.

Літерний код та графічні СП різних електронних компонентів встановлені відповідними стандартами. Дозволяється також зображати СП повернутими на кут 90°, 180° чи 270° та робити їх дзеркальні відображення. Розміри СП теж задаються відповідними стандартами.

У таблиці 3.1 наведено літерні коди СП деяких сучасних компонентів електроніки. Літерно-цифрові позиційні позначення інших компонент електроніки можна знайти в додатку А. Слід також відмітити, що літерно-цифрові позиційні позначення компонент даної схеми, як правило, наносяться й на друковані плати при виготовленні цієї схеми.

Таблиця 3.1 – Літерні коди СП деяких компонентів електроніки

Назва компонента	Літерний код
Конденсатор	С
Резистор	R
Блоки живлення	UG
Діоди	VD
Транзистори	VT
Рознімачі контактні	X
Штир з'єднання	XP
Гніздо з'єднання	XS

Електричні з'єднання між елементами зображуються лініями електричного зв'язку, розташованими у вигляді горизонтальних та вертикальних відрізків з найменшою можливою кількістю зломів і взаємних перетинів. Умовні СП елементів і ліній їх електричного зв'язку виконуються на схемах лініями однакової товщини від 0,2 мм до 1 мм (рис. А.12).

Підключення до електронної схеми інших пристроїв здійснюють у багатьох випадках через елементи зовнішньої комутації (наприклад, через рознімачі), які мають позиційні позначення X1, X2 і т.д. (див. рис. 3.1). Такі СП виконують у вигляді таблиць, геометричні параметри яких наведено на рис. А.13. У кожній таблиці вказують номери контактів рознімача та електричні параметри ліній зв'язку, які підключаються до цих контактів. Зокрема, на рис. 3.1 через рознімач X1 до схеми подається змінна напруга 18 В, а до рознімача X2 можна підключати зовнішні споживачі стабільної напруги постійного струму з величиною ЕРС +15 В. Позиційні позначення елементів зовнішньої комутації записують зверху над таблицею.

Геометричну структуру електронних схем характеризують такими основними поняттям як ділянка, електричний ланцюг або гілка, електричне коло, вузол, електричний контур. **Ділянкою електронної схеми будемо називати будь-яку виділену нами окрему частину конкретної схеми.**

Під електричним ланцюгом (або гілкою) розуміють нерозгалужену ділянку електронної схеми, вздовж якої струм у компонентах у будь-який момент часу має одне і те саме значення. Якщо електричний ланцюг містить кілька елементів, то ці елементи з'єднані в ньому тільки послідовно.

Вузлом називають точку схеми, де з'єднуються три або більше її ланцюгів (або гілок). У вузлах відбувається розгалуження потоків електричного струму. Якщо дві або більше гілок приєднані до двох одних і тих же вузлів, то їх називають паралельними гілками схеми, а саме з'єднання гілок – паралельним.

Для проведення теоретичного аналізу електронної схеми, її вузли прийнято нумерувати. Така нумерація може бути довільна, але доцільно її проводити за правилом: «зліва направо і зверху вниз». Після цього кожену гілку схеми можна виділяти для аналізу, вказуючи номери вузлів, які входять у дану гілку. Наприклад, «гілка 1 – 3 – 5».

Електричним контуром електронної схеми називають будь-яку її замкнуту ділянку, тобто таку ділянку, початок та кінець якої співпадають з одним і тим же вузлом.

Електричним колом називають довільний електричний контур, який містить як джерела живлення, так і споживачі електричної енергії. При цьому електричне коло може перебувати у двох станах – замкнутому або розімкнутому.

Відрізняйте терміни «електричне коло» і «електричний контур».

Необхідно також чітко розуміти різницю між термінами «електронний пристрій» та «електронний прилад». Для цього наведемо визначення кількох основних видів виробів, які представляються у вигляді електронних схем або входять в електронні схеми.

Електронний (електричний) пристрій – сукупність елементів (компонентів), яка представляє собою єдину конструкцію і призначена для виконання певної операції (або кількох операцій) над електричним струмом або електричним сигналом. Це може бути окремий модуль, блок, макетна панель та інше.

Електронний прилад – завершений електронний пристрій, параметри та характеристики якого відповідають діючим метрологічним вимогам, стандартам та технічним умовам. Наприклад, телевізор, осцилограф, напівпровідниковий діод і т.д.

Функціональна група – сукупність не об'єднаних в єдину конструкцію елементів (компонентів), яка виконує в електронному приладі або пристрої певну функцію або операцію. Це може бути підсилювач, модулятор, генератор, модуль синхронізації та інше. Функціональна група може складатися і з одного схемного елемента.

Функціональна частина – окремий схемний елемент, функціональна група або пристрій, які виконують в електронному приладі певну функцію або операцію.

Лінія зв'язку або канал зв'язку – функціональна частина або група, яка забезпечує передачу сигналів між іншими функціональними частинами приладу чи пристрою або між окремими приладами.

Функціональний ланцюг – лінія зв'язку, канал зв'язку або окремий тракт визначеного конкретного призначення.

Проаналізуйте, у чому полягає основна відмінність між пристроєм та приладом.

3.2 Макетні та друковані плати

Конструктивно поєднання окремих компонентів електронної схеми між собою в багатьох електронних приладах та пристроях здійснюється на певній несучій основі. Прикладом такої основи може бути макетна плата, якою ми користуємося при виконанні практичних та лабораторних робіт з електроніки та основ автоматизації (рис. 3.2). Компонування електронної схеми на такій платі здійснюють простим вставлянням ніжок компонентів у відповідні отвори (вузли схеми).

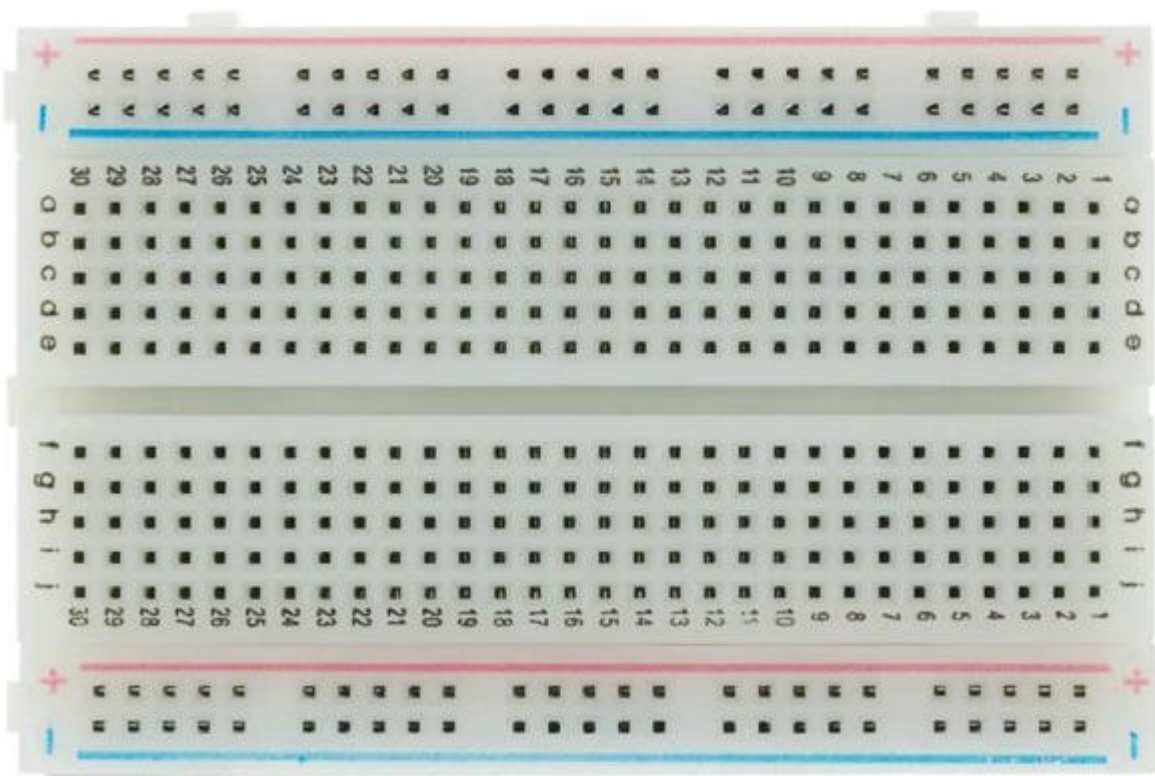


Рисунок 3.2 – Макетна плата для компонування простих електронних схем

Іншою основою може бути тонка пластина діелектрика з провідними доріжками, виготовлена за певною технологією. Таку пластину називають друкованою платою (рис. 3.3). Компонування елементів електронної схеми на друкованій платі здійснюють, як правило, методом паяння.

Примітка. Зверніть увагу на наявність літерно-цифрових позначень та параметрів компонент схеми на друкованій платі.

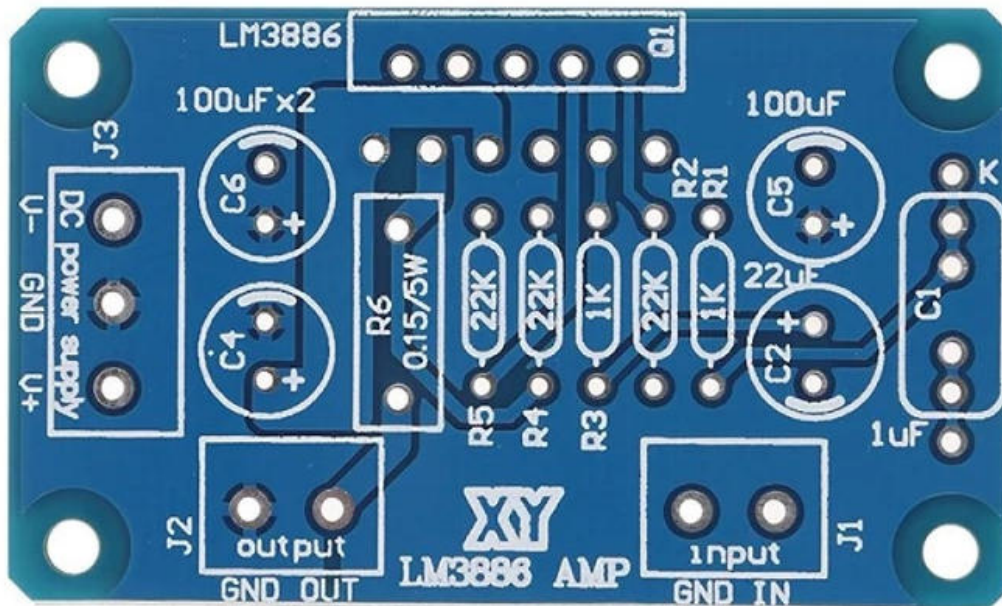


Рисунок 3.3 – Приклад друкованої плати

Компоненти схеми завжди знаходяться в певному оточуючому середовищі (як правило, повітря). Властивості несучої основи та оточуючого середовища суттєво впливають на експлуатаційні властивості, параметри та характеристики електронних схем, зокрема, на максимальні робочі напруги, діелектричні втрати, рівень завадостійкості, стійкість до механічних навантажень та вібрацій, тепловіддача, тощо. Крім того, зі зміною властивостей оточуючого середовища можуть змінюватися і характеристики самої електронної схеми. Всі такі дії оточуючого середовища на електронну схему враховуються шляхом встановлення **граничних експлуатаційних умов, у межах яких схема може працювати тривалий час і забезпечувати при цьому задані параметри оброблюваного або вихідного сигналу.** Основними із таких експлуатаційних умов для переважної більшості електронних схем є:

- тип кліматичного виконання (наприклад, для роботи в приміщеннях чи зовні);
- діапазон робочих температур;
- діапазон вологості оточуючого повітря;
- максимальні механічні навантаження при вібраціях і прискореннях.

3.3 З'єднувальні провідники та шини

Функціональне з'єднання окремих компонент між собою в електронну схему здійснюється з'єднувальними провідниками (рис.3.4а). На друкованих платах (рис. 3.3) з'єднувальні провідники виконують у вигляді металевих доріжок. З'єднувальні провідники в електронних схемах виконують такі основні функції:

- електричне з'єднання відповідних виводів окремих компонент між собою;
- передачу сигналів між окремими компонентами схеми;
- передачу потужності джерела живлення компонентам схеми.

Якщо до одного і того ж провідника (або кількох провідників) підключають багато електронних компонент схеми, то його (або їх) називають шиною (рис. 3.4б та рис. 3.5).

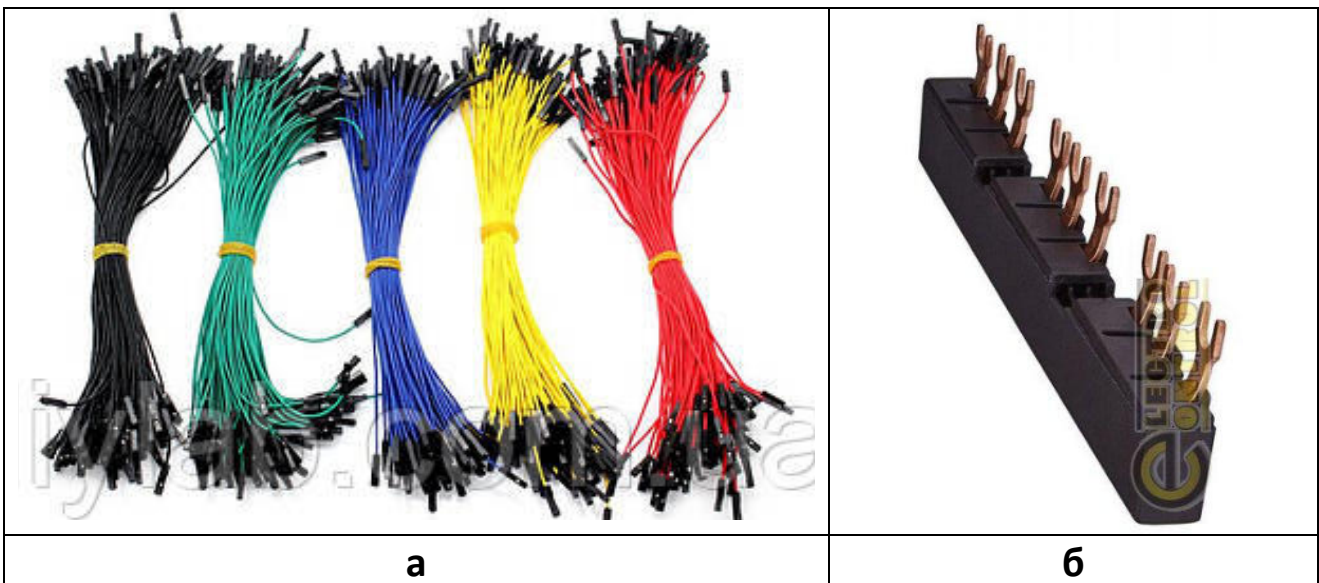


Рисунок 3.4– Приклад з'єднувальних провідників (а) та шини (б)

Для хорошої роботи електронної схеми з'єднувальні провідники і шини мають задовольняти ряд умов. Основна із них – це низьке значення електричного опору. У ідеальному випадку у процесі аналізу електронних схем він вважається рівним нулю. Дана умова забезпечує безперешкодне протікання вільних носіїв заряду по провідниках. Для того, щоб реальні з'єднувальні провідники та шини наближалися до цієї умови, вони мають мати такі параметри:

- площа їх поперечного перерізу повинна відповідати тій сумарній величині зарядів, які переміщуються в даному провіднику;
- електромагнітним випромінюванням від провідників та шин в усьому діапазоні робочих частот електронної схеми можна нехтувати;
- довжина з'єднання компонент провідниками має бути мінімальною.

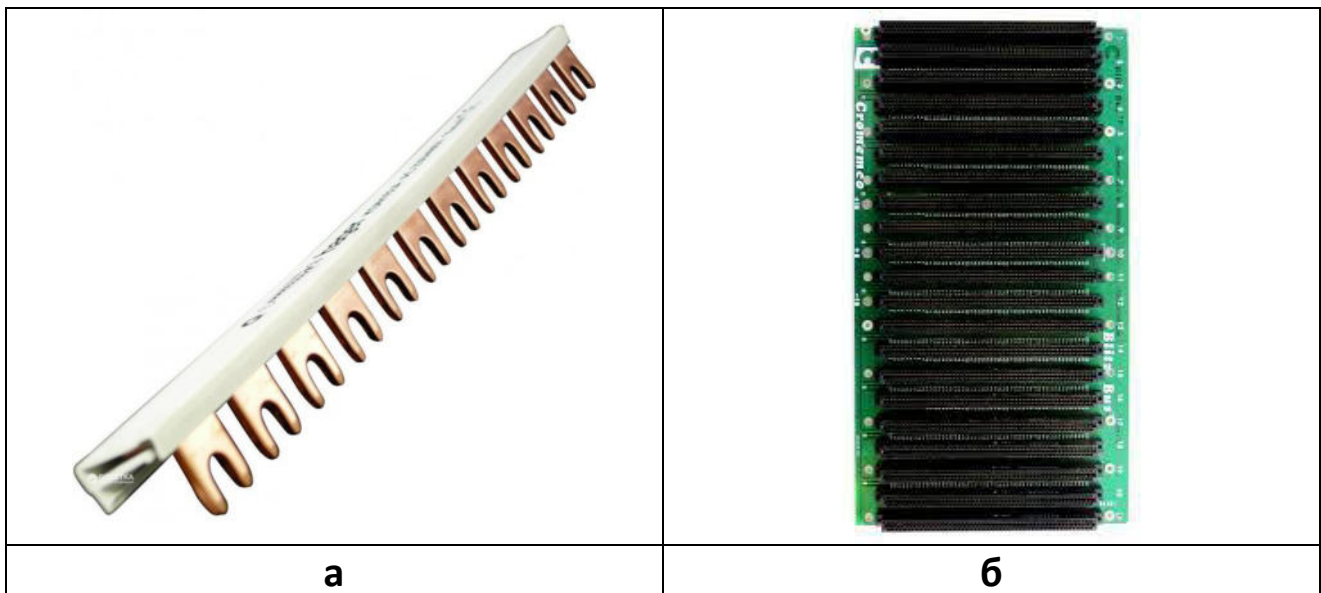


Рисунок 3.5– Приклади енергетичної (а) та сигнальної (б) шин

З'єднувальні провідники та шини забезпечують протікання як енергетичних електричних струмів, так і струмів електронних сигналів. При цьому, у більшості випадків, провідники енергетичного забезпечення електронної схеми будуть мати значно більші площі поперечного перерізу (або ширини доріжок), у порівнянні із сигнальними провідниками.

Умовні графічні позначення з'єднувальних провідників та шин наведено в додатку А (рис. А.12 та рис. А.14).

3.4 Шина живлення та загальна шина

Розглянемо два важливі елементи електронних схем (рис. 3.6).

1. Загальний для всієї схеми провідник, через який подається енергія живлення до всіх компонентів схеми, називається шиною живлення. На рис. 3.6 він розміщений зверху схеми і під'єднує

шину). Крім того, загальна шина, у більшості випадків, є однією із клем для вхідних та вихідних сигналів, з якими працює дана електронна схема. Зокрема, на рис. 3.6 вихідний сигнал "output" утворюється між позначеною цим словом клемою та загальною шиною.

Відмітимо також, що вся шина живлення є одним електричним вузлом електронної схеми. Те ж саме відноситься і до загальної шини.

На сьогодні в електроніці для схем, які працюють з постійними за напрямком струмами, умовно прийнято під'єднувати до загальної шини негативний полюс джерела живлення, а до шини живлення - позитивний полюс. Саме це й відображено на прикладах схем рис. 3.1 та рис. 3.6. Однак, при необхідності, можна використати і обернений тип підключення цих шин до клем джерела живлення.

3.5 Джерела енергії та навантаження у схемах. Активні та пасивні компоненти схем

Переважна більшість електронних схем не може працювати без відповідних джерел енергії, які ми домовились називати джерелами живлення. Дані джерела виконують дві основні функції: 1. Забезпечують встановлення робочих режимів різних компонентів електронної схеми. 2. Передають свою електричну енергію сигналам, з якими працює електронна схема.

Більшість сучасних електронних схем використовують для своєї роботи джерела живлення із постійною напругою (гальванічні елементи і батареї, акумулятори, блоки живлення постійним струмом).

Таким чином, **джерела живлення є постачальниками електричної енергії, яка необхідна для роботи всіх компонентів електронної схеми.** Відповідно, всі компоненти електронної схеми є споживачами електричної енергії від джерела живлення. **Любий такий компонент, який споживає електричну енергію, можна назвати навантаженням.** Але, у більш вузькому значенні, у електроніці навантаженням називають ті компоненти, які є кінцевими споживачами енергії і які підключені до виходу електронної схеми. Підкреслимо, що аналіз конкретної схеми у більшості випадків має враховувати наявність на її виході відповідного навантаження.

Ті електронні компоненти, які здатні створювати в електронній схемі свої власні ЕРС за рахунок енергії джерела живлення, називають активними. Саме такі активні компоненти моделюються при дослідженнях відповідними неавтономними керованими джерелами ЕРС. Всі інші компоненти електронних схем будуть пасивними. Пасивні компоненти лише споживають електричну енергію джерела живлення й розсіюють її в оточуюче середовище у вигляді тепла.

4 ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

4.1 Замкнене електричне коло. Переміщення носіїв заряду по замкнутому колу. Електричний струм

Поняття замкненого електричного кола ми вже маємо із розгляду матеріалу розділу 2. У загальному випадку замкненим називають таке електричне або електронне коло, яке містить одне (або кілька) джерел живлення та групу електронних компонент, які утворюють замкнений контур. Найпростіше замкнене електричне коло містить у собі одне джерело енергії (наприклад, джерело живлення у вигляді акумуляторної батареї GB1 – рис. 4.1) та один певний споживач цієї енергії або навантаження (наприклад, електричну лампочку EL1 – рис. 4.1), сполучені між собою провідниками для створення замкненого контуру. На рис. 4.1 наведено розімкнуте електричне коло. Замкнене електричне коло ми отримаємо, якщо переведемо перемикач SA1 у положення замикання його контактів.

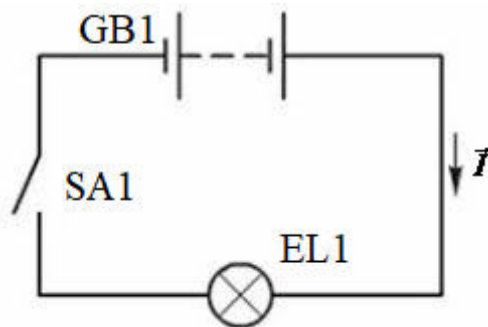


Рисунок 4.1 – Приклад найпростішого замкненого електричного кола та виникнення електричного струму в ньому

Таким чином, перехід електричного кола з одного свого стану у другий здійснюється за допомогою спеціальних електричних компонентів – перемикачів. Тобто, перемикач – це електронний компонент, за допомогою якого можна керувати протіканням струму в ланцюзі без перерізання провідників та без від’єднання джерела живлення від електричного кола. Перемикачі зазвичай мають два

стани: розірваний (ВІМК – OFF) і замкнений (УВІМК – ON). Схемні позначення деяких вимикачів наведені в додатку А.

При наявності в замкненому колі джерела живлення у ньому існує електричне поле з певною різницею потенціалів, створювана цим джерелом на своїх клеммах. Під дією даного електричного поля вільні носії заряду в компонентах кола придуть у направлений рух. Цей рух буде продовжуватися до тих пір поки потенціали двох клем джерела живлення не стануть рівними, тобто, поки різниця потенціалів між ними не стане рівною нулю.

Більш просто такі процеси можна описати мовою концентрації вільних носіїв заряду. Оскільки у джерелах живлення на клеммах формуються надлишки електричних зарядів протилежних знаків, то в замкненому колі електрони від клемми, де є їх надлишок, починають переміщатися по провідниках і через навантаження до іншої клемми, де є недостача електронів. У результаті у провідниках та в усіх електронних компонентах замкненого електричного кола виникає направлене (від однієї клемми до іншої) переміщення електричних зарядів (як правило, електронів). Таке **явище направленого впорядкованого переміщення вільних носіїв заряду називають електричним струмом** (рис. 4.2). Тому говорять, що в замкненому електричному колі через його провідники та компоненти протікає електричний струм. Умовно напрям протікання електричного струму прийнятий від позитивного полюса джерела живлення до негативного. На рис. 4.1 протікання електричного струму умовно позначене стрілкою та вектором \vec{I} . При цьому у **простих замкнених колах, які не мають розгалужень, через усі компоненти завжди протікає однаковий електричний струм.**

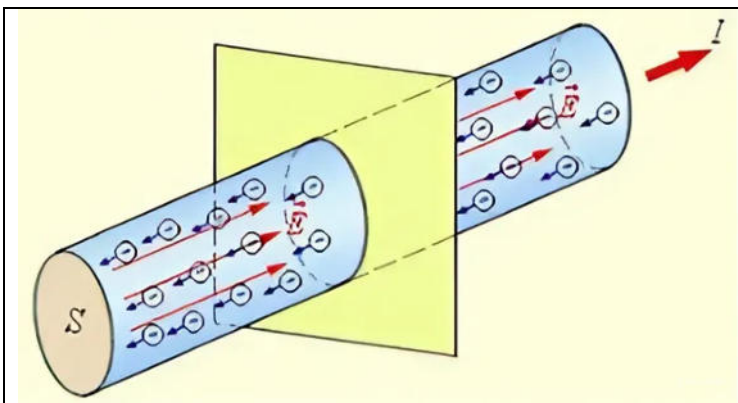


Рисунок 4.2 – Електричний струм як направлене переміщення вільних електронів

У замкнених електричних колах виділяють дві основні ділянки. Перша – це зовнішня ділянка електронної схеми, яка складається із всіх під'єднаних до джерела живлення електронних компонент споживачів енергії. Внутрішня ділянка джерела живлення – це елементи, через які електричний струм протікає в середині самого джерела живлення.

Таким чином, саме наявність певної різниці потенціалів між певними елементами замкнутого електричного кола змушує вільні електрони рухатися чи текти в електричних ділянках електронних схем. При цьому виконується реальна робота з переміщення електричних зарядів в електричних колах. Це стає можливим завдяки існуванню певного запасу енергії у вигляді різниці потенціалів на клеммах джерела живлення.

4.2 Густина та сила електричного струму. Напрямок струму

Основними кількісними характеристиками електричного струму є сила струму \vec{I} та його густина \vec{J} . Ці величини є векторами (так, як і механічна сила), оскільки сам електричний струм є направленим переміщенням зарядів, тобто має напрям. Сила струму задає величину електричного заряду Q , який переносять його носії (наприклад, електрони) за одиницю часу через всю площину поперечного перерізу провідника площею S . (рис. 4.2). Густина ж струму рівна величині заряду, який проходить за одиницю часу через площину поперечного перерізу цього провідника одиничної площі.

Слід чітко розділяти два поняття: "електричний струм" та "сила струму". Перше позначає саме фізичне явище направленого переміщення носіїв заряду. А друге характеризує інтенсивність такого переміщення, тобто вказує на кількість тих зарядів, які протікають по електричному колу за одиницю часу. Однак часто вживають ці два поняття як еквівалентні між собою.

Оскільки сила та густина струму є векторними величинами, то для них слід вказувати і напрямки. Реально, у більшості випадків, електричний струм створюється рухом електронів. Але за домовленістю за напрям струму (а відповідно і напрям векторів \vec{I} та \vec{J}) прийнято брати напрямок – протилежний напрямку руху

електронів в електричному колі. У результаті при аналізі електричних кіл вважають, що в них струм тече від позитивного полюса джерела ЕРС або напруги до негативного (рис. 4.1). **У середині ж джерела живлення вважають, що електричний струм тече навпаки від негативної клеми до позитивної.**

При аналізі багатьох електричних схем та кіл часто напрямок струму невідомий. У таких випадках при розрахунках в окремих гілках та замкнених контурах електричної схеми довільно задаються напрямки протікання струму. У процесі аналізу напрямки струмів часто позначають на електричних схемах стрілками як на рис. 4.1 та рис. 4.2.

На закінчення підрозділу наведемо два прості математичні співвідношення, які слідує із визначень сили електричного струму та густини струму:

$$\vec{I} = Q/t \text{ та } \vec{I} = \vec{J} \cdot S.$$

Зверніть увагу на те, що у формулі для сили струму ніби є невідповідність: зліва стоїть векторна величина, а справа – скалярна. Але фізично скалярна величина Q позначає не просто електричний заряд, а заряд, який направлено рухається. Саме направленість руху заряду враховується відображенням лівої частини формули як вектора.

Величина сили струму в системі СІ вимірюється в амперах (А), а густина струму в А/м^2 . Зокрема, **сила струму в 1 А відповідає такому випадку, коли за 1 секунду через всю площину поперечного перерізу провідника проходить сумарний заряд, рівний 1 Кл.**

4.3 Умови виникнення електричного струму

Виходячи з приведенного визначення електричного струму слідує, що його виникнення можливе при одночасному виконанні кількох основних умов:

1. Необхідна наявність достатньої кількості вільних носіїв зарядів у всіх компонентах електронної схеми, які входять у замкнене коло. **Для існування реальних струмів у сучасній електроніці кількісним критерієм є концентрація вільних носіїв $n > 10^{10}$ носіїв/см³.** Для матеріалів електроніки це відповідає присутності одного вільного електрона приблизно на сто мільярдів атомів.

2. Електронна схема має замкнені електричні кола.

3. У схемі існують необхідні джерела живлення, які стимулюють і підтримують направлене переміщення вільних носіїв заряду по замкнених електричних колах даної електронної схеми.

4.4 Електричний опір електронних компонентів. Напруга, вольт

Для протікання електричного струму по замкненому електричному колі джерело живлення постійно надає електронам свою енергію. Ці електрони проходять через електронні компоненти (навантаження) замкненого кола. Кожне навантаження чинить певну протидію руху електронів по ньому. **Властивість електронних компонентів створювати протидію протіканню електричного струму називають електричним опором.** Величину цього опору зазвичай позначають як R .

Таким чином, при протіканні електричного струму енергія джерела живлення витрачається носіями на подолання опору компонентів електричної схеми. **Енергія електричного струму, яка витрачається при його протіканні між двома заданими точками електронної схеми характеризується такою фізичною величиною як напруга (або спад напруги) між цими точками.** Важливо наголосити, що напруга на ділянці електричного кола з'являється лише тоді, коли через цю ділянку протікає певний електричний струм i , відповідно, виникає протидія такому протіканню зі сторони елементів електричного кола.

Величину напруги надалі позначатимемо літерою U . Одиницею вимірювання напруги в системі СІ є вольт (1 В). **Такій напрузі відповідає втрата електричної енергії в 1 Дж при проходженні між двома точками електричного кола сумарного електричного заряду в 1 Кл.**

ПРАКТИЧНА РОБОТА №2 ДЖЕРЕЛА ЕРС, ЕЛЕКТРОННІ КОЛА І ЕЛЕКТРОННІ СХЕМИ

Завдання для аудиторної роботи

Завдання 2.1. Поясніть відмінності акумулятора мопеда від акумулятора мобільного телефону, які мають однакову величину ЕРС, наприклад, рівну 6 В. Чому ці акумулятори так сильно відрізняються розмірами?

Підказка. Згадайте визначення величини ЕРС.

Завдання 2.2. Опишіть процеси, які протікають при явищі електризації двох тіл тертям у термінах електрони та іони. Чи можна за допомогою такого явища створити джерела живлення для електроніки? Обґрунтуйте свою відповідь.

Завдання 2.3. Наведіть приклад та охарактеризуйте одне з первинних природних джерел електричного поля, яке використовується в сучасних первинних джерелах ЕРС.

Завдання 2.4. Наведіть приклад та охарактеризуйте одне первинне природне джерело магнітного поля, яке використовується в сучасних первинних джерелах ЕРС.

Завдання 2.5. Знайдіть та позначте на кресленнях електронних схем рис. 3.1 та рис 3.6 шину живлення та загальну шину.

Завдання 2.6. Знайдіть грубі помилки виконання схем на рис. 3.1 та рис. 3.6. Виправте наявні грубі помилки. Правильно пронумеруйте вузли схем, наведених на даних рисунках. Чи є в електронній схемі рис. 3.6 паралельні гілки (позначте їх)? Який елемент даної схеми показує, що до шини живлення під'єднано позитивний полюс джерела живлення? Яка величина прикладеної напруги від цього джерела живлення?

Завдання 2.7. Запишіть кілька замкнених електронних контурів схеми рис. 3.6, які містять транзистор Q_4 , шляхом послідовного переліку вузлів даного контуру (наприклад, замкнений контур 1-2-3-4-1). З яким джерелом живлення має працювати ця електронна схема?

Завдання для самостійної роботи.

Завдання 2.8. Напишіть короткий реферат про один із видів сучасних джерел ЕРС або джерел живлення.

Завдання 2.9. Уважно роздивіться модуль мікроконтролера платформи Ардуіно, який ми будемо надалі вивчати. Визначте його друковану плату, розміщення та ширину провідних доріжок, тип технології виготовлення даної плати та інші її елементи й параметри (розміри, наявність та призначення отворів, тип кріплення компонентів та інше). Знайдіть різні схемні елементи на модулі Ардуіно. Знайдіть на ньому з'єднувальні провідники. У якому вигляді вони виконані? Як з'єднувальні провідники позначаються на кресленнях схем? Знайдіть на вашому модулі Ардуіно наявні шини. У якому вигляді вони виконані?

Завдання 2.10. Знайдіть у довідникових матеріалах інформацію про граничні експлуатаційні умови використання вашого модуля Ардуіно.

5 МАТЕРІАЛИ КОМПОНЕНТІВ ЕЛЕКТРОНІКИ

Матеріальною основою сучасної електроніки є різні речовини, переважно у вигляді твердих тіл. Для всіх цих речовин характерно чинити певний опір протіканню електричного струму. Також і кожен компонент електронної схеми чинить електричний опір. Для визначення кількісних значень здатності різних матеріалів та електронних компонент чинити такий електричний опір в електроніці використовують кілька величин.

5.1 Електрична провідність та електричний опір матеріалів і компонент. Ом та Сіменс

Здатність речовини або компонентів електроніки проводити електричний струм під дією електричного поля називають електричною провідністю або електропровідністю. Одночасно таку ж назву має і фізична величина, яка кількісно характеризує цю здатність. По визначенню, для зразка певних розмірів із конкретного матеріалу або для певного електронного компонента електропровідність G визначається відношенням значення сили струму I , який протікає у зразку, до напруги U , яка виникає на його кінцях. Тобто $G = I/U$.

Іноді для розгляду питань електропровідності зручніше користуватися величиною електричного опору зразка матеріалу або електронного компонента R , яка обернена до електропровідності. Відповідно, $R = 1/G = U/I$.

Одиницею вимірювання опору є Ом, а одиницею вимірювання електропровідності є сіменс (См). Очевидно, що $1 \text{ См} = 1/\text{Ом}$. 1 См відповідає провідності такого зразка, на кінцях якого виникає напруга 1 В при протіканні через нього струму силою 1 А. Відповідно опір такого зразка буде рівний 1 Ом.

Величини R і G є одними із основних параметрів для аналізу електричних процесів, які протікають в різних електричних та електронних колах.

5.2 Питомий опір та питома провідність матеріалів

Із наведених вище визначень слідує, що для речовин електропровідність або електричний опір залежать від геометричних розмірів зразка. Це робить такі фізичні величини незручними для використання в якості характеристик самих матеріалів електроніки. Тому в цьому випадку вводять інші характеристиками, які визначають здатність речовин проводити електричний струм незалежно від форми та розмірів конкретного зразка. Це питома електропровідність речовини σ та питомий опір речовини ρ .

Якщо речовину умовно взяти у вигляді однорідного зразка з формою циліндра довжиною L і площею поперечного перерізу S та поміряти його опір R і провідність G , то $\sigma = GL/S$, а $\rho = RS/L$. Відповідно, $\rho = 1/\sigma$. У системі СІ одиницею вимірювання питомої електропровідності є См/м, а одиницею вимірювання питомого опору є Ом·м. Відмітимо також, що величини σ і ρ є характеристиками речовин і, у загальному випадку, практично майже не застосовуються для аналізу електричних та електронних кіл.

5.3 Метали та провідники. Діелектрики та ізолятори. Напівпровідники

На сьогодні важливим є поділ всіх матеріалів електроніки на три основні класи за їх здатністю проводити електричний струм. Вже перші дослідження з електрикою дали змогу розділити всі тверді тіла на два великі класи:

- хороші провідники струму – метали;
- погані провідники струму – ізолятори.

Відмітимо, що в електроніці термін метали переважно застосовують до того класу речовин, які добре проводять електричний струм (наприклад, метал алюміній). У той же час термін провідник переважно вказує вже на конкретний зразок, виготовлений із металу (наприклад, мідний провід або мідна доріжка на печатній платі). Аналогічно термін діелектрики більш застосовний до речовин (наприклад, кварцове скло), а ізолятор - до конкретно зразка або виробу із діелектрика (наприклад, ізоляційна стрічка, ізолятор на високовольтних лініях електропередач).

Історично пізніше було виявлено велику групу речовин, які займають проміжне положення за своєю здатністю проводити електричний струм. Цю групу речовин було названо напівпровідниками. Важливою особливістю напівпровідників є також здатність у широких межах змінювати свою провідність при введенні невеликої кількості домішкових атомів та при дії різних зовнішніх чинників.

Розглянутий вище якісний поділ речовин за величиною електропровідності на три основні групи на сьогодні доповнюють кількісним критерієм – величиною їхньої питомої провідності:

- провідники із $\sigma > 10^4 \text{ См}\cdot\text{см}^{-1}$.
- напівпровідники із $10^4 \text{ См}\cdot\text{см}^{-1} > \sigma > 10^{-7} \text{ См}\cdot\text{см}^{-1}$.
- діелектрики із $\sigma < 10^{-7} \text{ См}\cdot\text{см}^{-1}$.

5.4 Концентрація та рухливість вільних носіїв

Питому електричну провідність будь-якої речовини можна наближено виразити через два її основних параметри: концентрацію вільних носіїв заряду n та рухливість вільних носіїв заряду μ .

Концентрація визначає кількість вільних носіїв заряду в одиниці об'єму речовини. Рухливість показує, яку швидкість направлено руху вільні носії заряду набувають у матеріалі, поміщеному в електричне поле з напруженістю 1 В/м.

Знаючи два розглянуті вище параметри, питому провідність матеріалу, створену вільними електронами, можна наближено записати як:

$$\sigma = en\mu.$$

Рухливість вільних носіїв відносно слабо залежить від структури та електричних властивостей речовини. У різних металах, діелектриках та напівпровідниках рухливість відрізняється лише на два-три порядки, тому при спрощеному розгляді її наближено можна вважати однаковою для всіх речовин. Зокрема, у твердих тілах величина рухливості вільних електронів знаходиться біля $100 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Концентрація ж вільних носіїв у різних матеріалах може відрізнятися на десятки порядків. Тому основний вклад у відмінність електричної провідності різних речовин надає саме цей параметр.

Зокрема, для типових металів, які застосовуються в електроніці, значення n лежать біля 10^{22} см^{-3} , що й визначає їх високу електричну провідність.

Якщо в речовині є кілька типів носіїв заряду, наприклад електрони та дірки, то для кожного з них параметри n та μ будуть різні. Тому загальна питома провідність такої речовини буде дорівнювати сумі питомих провідностей, зумовлених різними типами вільних носіїв заряду, наявними в даній речовині.

5.5 Іонна провідність

З курсу фізики та хімії за середню школу відомо, що при розчиненні багатьох речовин у воді (значно рідше в інших розчинниках) відбувається розпад молекул розчинених речовин на іони. Цей процес називається електролітичною дисоціацією. Частку молекул розчиненої речовини, які розпалися на іони, називають ступінню дисоціації. Чим більша ступінь дисоціації, тим більша концентрація позитивно і негативно заряджених іонів утворюється в розчині. У багатьох рідинах і навіть деяких твердих тілах теж відбуваються процеси дисоціації молекул на іони. Вони протікають самі по собі без розчинення речовин у деякому розчиннику. Оскільки в таких речовинах утворюється та існує певна концентрація вільних позитивно та негативно заряджених іонів, то вони володіють електричною провідністю, яку називають іонною.

Ступінь дисоціації конкретної речовини або розчину залежить від температури, концентрації розчину, діелектричної проникності та деяких інших параметрів. Зокрема, у більшості випадків зі збільшенням температури ступінь дисоціації зростає.

Особливістю іонної провідності є те, що протікання електричного струму супроводжується перенесенням речовини. Це обумовлено тим, що іони проходять по деякій ділянці електричного кола і осідають на електродах або інших елементах електронних компонент.

Величина іонної провідності розраховується за співвідношенням

$$\sigma = eN\mu.$$

де N – концентрація відповідних іонів,

μ – рухливість відповідних іонів.

ПРАКТИЧНА РОБОТА №3 ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕКТРОНІКИ

Завдання для аудиторної роботи

Завдання 3.1. Для заданих у таблиці 5.1 умов для свого варіанту розрахувати основні електричні параметри зразка певного матеріалу у вигляді циліндра з діаметром D та довжиною L . Розрахунку підлягають такі величини:

- питомий опір матеріалу циліндра;
- питома провідність матеріалу циліндра;
- опір зразка;
- провідність зразка;
- силу струму через зразок;
- напругу на зразку;
- густину струму у зразку.

Примітки. 1. Номер варіанту відповідає останній цифрі номера вашої залікової книжки.

2. Завдання зручно виконати за допомогою редактора таблиць Excel. У редакторі використати степеневе представлення чисел та ввести формули для автоматичного проведення розрахунків. Важливо всі одиниці вимірювання величин брати в системі СІ. Будьте уважні при роботі з різними масштабними приставками (міні, мікро та інші).

Завдання 3.2. Накреслити у збільшеному вигляді переріз циліндра матеріалу із завдання 3.1 вздовж його осі та умовні електроди зовнішнього джерела ЕРС, приєднані до торців циліндра. Нанести на креслення умовні зображення вільних носіїв заряду, які беруть участь у провідності циліндра. Показати на кресленні вектори напруженості прикладеного електричного поля, швидкостей носіїв заряду та вектори сили струму, який ці носії створюють.

Таблиця 5.1- Вихідні дані для виконання завдання 3.1

№ варіанту	Матеріал	D , мм	L , мм	Величина ЕРС зовнішнього джерела постійного струму $E = 3$ В. Внутрішній опір джерела живлення $r = 2$ Ом.
1	Мідь	0,1	20	
2	Вольфрам	0,2	15	
3	Сталь	0,3	10	
4	Ніхром	0,4	5	
5	Кремній n -типу	1	5	
6	Кремній p -типу	2	8	
7	GaAs n -типу	3	12	
8	GaAs p -типу	4	15	
9	Кварц	10	10	
10	Нелегований Si	10	5	

Завдання 3.3. Використовуючи результати виконання завдання 3.1, розрахуйте приблизну концентрацію вільних носіїв заряду в матеріалі електроніки свого варіанту.

Примітка. Використайте наближену величину рухливості носіїв, взяту із конспекту лекцій.

Завдання для самостійної роботи

Завдання 3.4. Напишіть короткий реферат про напрямки сучасного практичного використання одного з металів, діелектриків чи напівпровідників.

6 ВЛАСТИВОСТІ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ В ЕЛЕКТРОНІЦІ

6.1 Ідеальне та реальні джерела живлення. Основна властивість ідеального джерела живлення

Як ми вже знаємо, у джерелах живлення за рахунок протікання тих або інших фізичних чи хімічних процесів створюються умови для переміщення електричних зарядів у зовнішніх електричних колах, підключених до джерела. Основною енергетичною характеристикою даних процесів є ЕРС джерела живлення. Вона рівна роботі, яку зможе виконувати джерело при переміщенні одиниці заряду по замкнутому електричному колу. Таким чином, ЕРС характеризує потенційну можливість джерела живлення ініціювати проходження електричного струму (або заряду) певної величини в заданому електричному колі.

Джерела живлення, які використовуються в електроніці, мають цілий набір своїх фізичних, електричних, хімічних, технічних та інших параметрів, які визначають можливості їх конкретних застосувань. Однак, дуже часто при теоретичному аналізі та при моделюванні електронних схем застосовують ідеальні моделі джерел живлення. У таких моделях нехтують багатьма реальними параметрами, що значно спрощує розгляд електронних процесів із використанням таких джерел. Зокрема, **ідеальним вважають таке джерело живлення, яке не чинить ніякої протидії протіканню через нього електричного струму**. Це означає, що **внутрішній електричний опір ідеального джерела r беруть рівний нулю**.

Схемні значки додатку А позначають, як правило, саме ідеальні джерела живлення. Для реальних джерел живлення вводять так звані схеми заміщення. На них послідовно із значком ідеального джерела додають значок внутрішнього опору даного джерела (рис. 6.1). При цьому вихідними клемми такого джерела є точки А і Б рисунку. Схему заміщення джерела живлення, наведену на рис. 6.1, ще називають еквівалентною схемою.

Іноді на схемах значок внутрішнього опору реального джерела живлення опускають, але біля його СП ставлять як величину ЕРС, так і значення даного опору. При цьому слід мати на увазі, що, при аналізі

електронних процесів із участю такого джерела, його внутрішній опір діє як послідовно підключений до самого джерела відповідно із його схемою заміщення.



Рисунок 6.1 - Схемне позначення реального джерела живлення у вигляді схеми заміщення

Крім зазначеної вище математичної умови $r = 0$, ідеальне джерело живлення має важливу властивість: **воно підтримує постійну величину ЕРС або напруги на своїх клеммах при будь-якій силі струму, який протікає у замкненому електричному колі.** У результаті, величина напруги на клеммах ідеального джерела живлення не змінюється при зміні опору навантаження, підключеного до нього.

При вивченні і аналізі електронних кіл та схем ми дуже часто будемо використовувати наближення ідеальних джерел живлення. Однак слід розуміти, що любє джерело живлення електроніки є реальним. Тому необхідно вміти "відчувати", де наближення ідеального джерела є дуже грубим і призводить до суттєвих похибок у дослідженнях електронних і, особливо, електричних кіл.

6.2 Властивості реальних джерел живлення

Реальні джерела ЕРС називають також джерелами прикладеної напруги (або джерелами напруги) чи джерелами живлення електронних схем. Розглянемо просте замкнене електричне коло із реальним джерелом живлення та із навантаженням у вигляді схемного елемента з опором навантаження R_H (рис. 6.2).

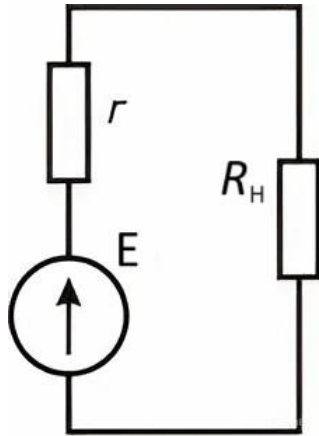


Рисунок 6.2 - Найпростіше замкнене електронне коло із реальним джерелом живлення

Оскільки у простому замкненому колі струм з однаковою силою I протікає і через навантаження, і через джерело живлення, то енергія джерела використовується як для протидії опору навантаження (це зовнішнє електричне коло електронної схеми), так і для протидії внутрішньому опору джерела. Таким чином, **джерело живлення у зовнішнє коло віддає не всю енергію E , а лише її частину.**

6.3 Відхилення від ідеальності джерел живлення. Основна вимога до джерел живлення. Прикладена напруга

Як уже відмічалось нами вище, експерименти показують, що якщо через любий елемент електроніки із величиною опору R протікає електричний струм силою I , то на цьому елементі втрачається електрична енергія. **Якщо через певний електронний компонент проходить сумарний електричний заряд в 1 Кл, то на цьому компоненті втрачається електрична енергія джерела, рівна добутку сили струму, який протікав через даний компонент, на його електричний опір, тобто $I \cdot R$.** Тоді для простого замкненого електронного кола (рис. 6.2) в середині джерела живлення на проходження 1 Кл заряду буде витрачатися енергія, рівна $I \cdot r$.

Відповідно, у зовнішнє коло для переміщення 1 Кл заряду джерело зможе віддавати не всю свою енергію E , а лише її частину, яка буде рівна

$$U = E - I \cdot r.$$

Записану нами вище формулу закону збереження енергії ще називають законом Ома для повного електричного кола. Наведене

співвідношення математично також описує відхилення від ідеальності реальних джерел живлення: **Завдяки втратам деякої частини енергії в середині джерела, зовнішнє електричне коло живиться не постійною енергією джерела живлення E , а певною прикладеною напругою, величина U якої залежить від сили струму в електричному колі.** При цьому величина відхилення від ідеальності джерела живлення $\Delta U = I \cdot r$ зростає із збільшенням сили струму в колі (рис. 6.3). Величина цього відхилення для конкретного джерела визначається значенням його внутрішнього опору. Наведений на рис. 6.3 графік ще називають зовнішньою характеристикою джерела живлення. Із наведеного рисунка видно, що величина відхилення від ідеальності ΔU залежить від режиму роботи джерела, а саме, від сили струму, який підтримується даним джерелом у зовнішньому колі.

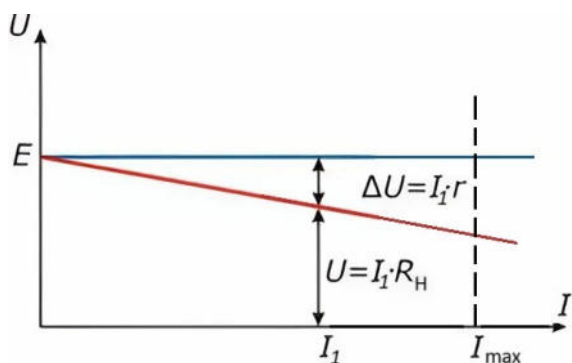


Рисунок 6.3 – Зовнішня характеристика джерела живлення та параметри відхилення його від ідеальності в робочій точці із величиною струму I_1

Джерела живлення, які мають графік зовнішньої характеристики у вигляді прямолінійного відрізка, як на рис. 6.3, називають лінійними.

Зовнішня характеристика реального джерела живлення не продовжується по осі струму до безкінечності. Будь-яке реальне джерело має обмеження щодо того максимального струму I_{\max} , який воно здатне забезпечувати тривалий час без свого руйнування. Для робочих струмів, більших I_{\max} , режим роботи джерела живлення виходить за межі допустимих умов його функціонування і вважається аварійним.

Виходячи із отриманих результатів досліджень можемо зробити висновок, що **основна вимога до джерел живлення полягає у забезпеченні в них якнайменшого внутрішнього опору**. У такому випадку проявляються менші відхилення джерела від ідеальності.

У розглянутому випадку реального джерела живлення говорять, що до зовнішнього кола прикладається ЕРС з величиною E . Однак, **при протіканні в колі електричного струму, до цього зовнішнього кола прикладається вже не сама ЕРС, а так звана прикладена напруга**, величину якої ми позначаємо через U . Ще раз підкреслимо, що причина цього – втрата частини електричної енергії джерелом живлення у своїх внутрішніх колах.

У зовнішнє коло електронної схеми електрична енергія передається безпосередньо «напрямую» лише первинними джерелами ЕРС. У вторинних джерелах живлення, як правило, наявні додаткові спеціальні електронні пристрої. Вони підтримують на вихідних клеммах такого джерела стабільну різницю електричного потенціалу, незалежно від умов функціонування зовнішнього кола. Тому ще раз наголошуємо, що такі джерела живлення прийнято називати не джерелом ЕРС, а джерелом прикладеної напруги або просто джерелом напруги. Умовні СП таких джерел для випадку кіл постійного струму наведено на рис. А.11. Таким чином, у більшості випадків будемо вважати, що **в реальних електронних колах живлення зовнішніх споживачів здійснюється джерелами прикладеної напруги, які ми надалі позначатимемо літерою V** .

6.4 Поняття про джерело струму. Позначення джерел струму на схемах

У деяких випадках для живлення електронних елементів слід використовувати джерела струмів. Під останнім розуміють електронний пристрій, який забезпечує споживачів необхідною силою струму в зовнішньому колі. **Основною особливістю джерела струму є те, що воно підтримує постійне значення сили струму в зовнішньому колі незалежно від опору споживачів у цьому колі та незалежно від величини своєї ЕРС**. При цьому вважають, що **ідеальне джерело струму має нескінченний внутрішній опір або рівну нулю внутрішню провідність**. Позначення джерел струму на схемах наведено на рис. А.10.

6.5 Коефіцієнт корисної дії реальних джерел напруги та джерел струму

Як слідує із розглянутого вище матеріалу, енергія джерела використовується для живлення всіх зовнішніх споживачів (або навантаження) та частково втрачається у внутрішньому колі самого джерела. Перша частина енергії називається корисно використаною W_u , а друга частина – енергією втрат W_l . Для аналізу балансу цих двох частин енергії вводять величину ККД джерела живлення

$$\eta = W_u / (W_u + W_l).$$

Чим вищий даний показник, тим якіснішим є використане джерело живлення.

7 ЗАКОНИ ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ І ЕЛЕКТРОННИХ КІЛ

7.1 Закон Ома

При теоретичному вивченні, моделюванні та аналізі електричних та електронних схем часто усі споживачі енергії об'єднують в одне ціле і заміняють їх одним еквівалентним споживачем. Надалі такий еквівалентний споживач будемо позначати через R_e , а величину загального еквівалентного опору як R_e . Тоді вся електрична схема представляється одним замкненим колом (рис. 7.1). У даному колі R_e одночасно є і навантаженням (споживачем енергії джерела живлення).

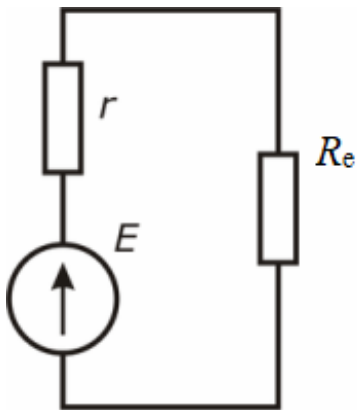


Рисунок 7.1 - Загальна електронна схема із активним еквівалентним опором R_e

Найпростіші процеси в електронних та електричних схемах теоретично вивчають, використовуючи закони Ома. Вони можуть записуватися для різних елементів електронних схем і мати різний математичний вигляд. Пригадаємо основні із цих законів.

1. Закон Ома для повного замкненого кола (див рис. 7.1): **сила струму в такому колі прямопропорційна величині ЕРС E джерела живлення і обернено пропорційна загальному опору повного кола $(R_e + r)$** . Тобто:

$$I = E / (R_e + r).$$

2. Закон Ома для ділянки кола: **якщо в ділянці кола, яка має сумарний опір R , протікає електричний струм силою I , то на цій ділянці утвориться спад напруги**

$$U = I \cdot R.$$

Зокрема, на ділянці кола 1-2 (рис. 7.2) буде спад напруги $U_3 = I_3 \cdot R_3$.

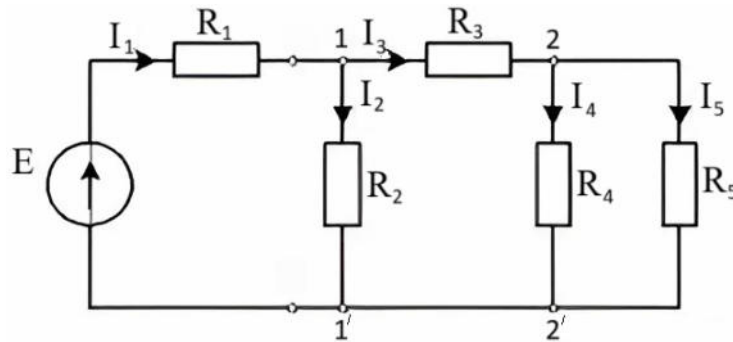


Рисунок 7.2 – Приклад електронної схеми із різними ділянками

3. При експериментальних дослідженнях явища електропровідності матеріалів досить часто вивчають залежність густини струму в них від напруженості прикладеного електричного поля. Як приклад розглянемо дію електричного поля напруженістю \vec{E} , на звичайний провідник (або провід). Зрозуміло, що така дія викликає в металі направлений рух електронів, тобто появу електричного струму. Густина цього струму \vec{j} буде пропорційна напруженості поля \vec{E} :

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \text{ або у скалярній формі } j = \sigma \cdot E.$$

Коефіцієнт пропорційності в даній залежності є введена нами раніше питома електрична провідність матеріалу провідника σ . Записане вище математичне співвідношення є законом Ома для матеріалів. Воно справедливе лише тоді, коли величина провідності матеріалу не залежить від величини та напрямку вектора напруженості електричного поля.

7.2 Розсіювання енергії в електричних колах

Раніше ми вже відмічали, що про протіканні в електронному колі електричного струму джерело живлення віддає свою енергію зовнішнім споживачам. За рахунок цієї енергії споживачі можуть виконувати певну роботу або необхідні операції з обробки сигналів. Однак, частина енергії джерела живлення розсіюється в електронних колах без виконання корисних дій. Тобто, частина електричної енергії джерела живлення втрачається марно.

Раніше ми вказували, що частина енергії втрачається в самому джерелі живлення. Але **основна частка марно втраченої енергії йде**

на нагрівання всіх елементів електронних кіл, через які протікає електричний струм. Від нагрітих компонентів теплова енергія розсіюється далі в оточуюче електронну схему середовище. Тому таку енергію називають розсіюваною енергією. **Величина розсіюваної енергії конкретним компонентом електронної схеми визначається величиною активного опору цього компонента R та силою струму I , який протікає через цей компонент**. Зокрема розсіювану потужність такого компонента (енергію, яка розсіюється компонентом за одну секунду у вигляді тепла) для постійного струму можна розрахувати як:

$$P = I^2 \cdot R = I \cdot U = U^2 / R.$$

У наведеному математичному виразі використано закон Ома для ділянки кола. Отримана формула ще раз підкреслює, що енергія джерела живлення розсіюється марно на електронних компонентах при одночасному виконанні двох умов:

- 1. Компонент має певний активний електричний опір.**
- 2. Через цей компонент протікає певний струм.**

Відмітимо також, що теплова енергія виділяється і в самому джерелі живлення, оскільки воно має свій внутрішній активний опір і через нього протікає струм при роботі електронної схеми. Тому при розробці схем слід забезпечувати такі умови, щоб виділена теплова енергія компонентів та джерела живлення могла вільно передаватися оточуючому схему середовищу - як правило, це повітря.

Відмітимо ще раз основну відмінність між ЕРС (або прикладеною напругою) та тепловими втратами в компонентах електронних схем. Ці обидва параметри є енергетичними характеристиками електронних кіл. Але величина ЕРС (або прикладена напруга) характеризує затрати енергії джерела живлення на переміщення по всіх колах електронної схеми одного кулона електричного заряду. При цьому таке переміщення включає в себе всі процеси обробки корисних електричних сигналів і процеси втрат електричної енергії в колах схеми. У той же час розсіювана енергія – це частина електричної енергії джерела живлення, яка перетворюється в теплову енергію, за рахунок наявності в компонентів електроніки електричного опору.

7.3 Режими холостого ходу та короткого замикання для електричних кіл

Повна зовнішня характеристика реального лінійного джерела живлення, яка містить у собі і аварійні режими його роботи, наведена на рис. 7.3. На рисунку видно, що графік такої характеристики є відрізком, кінці якого лежать відповідно на осі сили струму в колі та на осі прикладеної напруги. Дані кінцеві точки зовнішньої характеристики відповідають двом спеціальним режимам роботи лінійного джерела живлення, які часто застосовують для теоретичного аналізу електричних процесів в електричних та електронних колах. Розглянемо ці режими на прикладі загальної схеми повного кола.

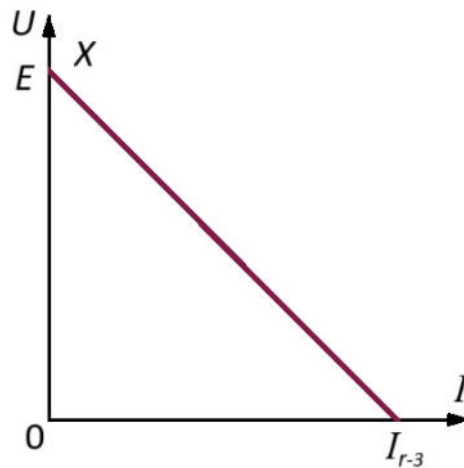


Рисунок 7.3 – Зовнішня характеристика лінійного джерела живлення з точками холостого ходу та короткого замикання

1. Режим холостого ходу. У цьому режимі всі споживачі від'єднанні від джерела живлення і електричний струм у колі не протікає (точка X рис. 7.3). Математично цей режим виражається у вигляді умови $I = 0$. У такому випадку говорять, що **на кінцях електронного кола (або на клеммах джерела живлення) існує прикладена напруга рівна величині ЕРС E** , тобто $U = E$. (рис. 7.3).

Реально режим холостого ходу реалізовується у схемах, якщо величина опору повного кола R_e дуже велика, тобто $R_e \rightarrow \infty$. У таких випадках спад напруги на повному колі схеми можна брати рівним величині E . Ще однією властивістю режиму холостого ходу

електронної схеми є те, що енергія джерела живлення практично не витрачається у споживачах.

2. Режим короткого замикання реалізується, коли клеми джерела живлення замикаються безпосередньо між собою. Тоді в зовнішньому колі в якості споживачів енергії джерела є лише з'єднувальні провідники, опір яких можна прийняти $R_e \approx 0$. У такому випадку по даному короткозамкненому електричному колу протікає струм із силою

$$I_{кз} = U/r.$$

Оскільки внутрішній опір джерела живлення зазвичай малий, то **в режимі короткого замикання в електричному колі починає протікати дуже великий струм.** Відповідно з попереднім підрозділом, енергія цього струму перетворюється в тепло, яке сильно нагріває як з'єднувальні провідники кола, так і саме джерело живлення. У результаті ці елементи електронного кола можуть швидко зруйнуватися.

Важливою умовою ідеального режиму короткого замикання є рівність нулю прикладеної напруги: $U = 0$. У такому випадку вся енергія джерела живлення виділяється в його середині та у сполучних провідниках. У реальних електричних колах у режимі короткого замикання прикладена напруга U має певне невелике значення, яке залежить від внутрішнього опору джерела живлення та опору тих провідників, які беруть участь у ситуації короткого замикання.

Таким чином, для ідеальних умов граничні режими функціонування джерела живлення визначаються такими математичними умовами:

- режим холостого ходу: $I = 0$ та $U = E$;
- режим короткого замикання: $I \rightarrow \infty$ та $U \rightarrow 0$.

Режим короткого замикання є аварійним для електронних та електричних кіл. Його негативна дія стосується лише тих компонент кола, які знаходяться до точки виникнення короткого замикання (рис. 7.4). Переважно це саме джерело живлення і окремі компоненти та провідники від даного джерела до точки короткого замикання.



Рисунок 7.4 – Ілюстрація впливу на джерело живлення та з'єднувальні провідники режиму короткого замикання

7.4 Плавкі запобіжники та захисні пристрої при режимі короткого замикання

Для запобігання або зменшення наслідків негативної дії короткого замикання на джерело живлення та інші електронні компоненти в початковій кола живлення електричних та електронних схем вводять спеціальні захисні пристрої. Вони розривають електричне коло при виникненні режиму короткого замикання або умов, близьких до такого режиму.

Найпростішим із захисних пристроїв є плавкий запобіжник (рис. 7.5). Він являє собою невеличкий відрізок тонкого провідника із спеціального матеріалу, який поміщений у діелектричний корпус. Довжину та товщину провідника підбирають таким чином, щоб запобіжник тривалий час працював при робочих величинах сили струму в електричному колі. При перевищенні ж величини силу струму критичного значення I_c , розігрів провідника призводить до його плавлення й руйнування.



Рисунок 7.5 - Типи плавких запобіжників: а- автомобільний, б- для електронної апаратури, в- для малопотужних енергетичних мереж, г- для високопотужних енергетичних мереж

При спрацюванні запобіжника коло електричної схеми розривається і вона відключається від джерела живлення. Схемне позначення плавких запобіжників наведено на рис. А.17.

Основним параметром запобіжників та інших захисних пристроїв для електричних та електронних схем є значення сили критичного струму I_c . Зазвичай величину сили струму I_c вибирають такою, щоб вона перевищувала максимальні робочі сили струму схеми (рис. 7.3).

7.5 Вольт-амперні характеристики

Кожен компонент електронної схеми має свою характерну залежність між силою струму в ньому та напругою на його клеммах (кінцях). Таку залежність називають **вольт-амперною характеристикою (ВАХ)**. Ці характеристики переважно визначаються або математичною формулою або відповідним графіком (рис. 7.6). Для деяких компонентів (наприклад, транзисторів) задають не одну, а кілька ВАХ, які описують функціонування цих компонентів у різних режимах роботи. Такий набір кількох ВАХ називають сімейством, а кожен окрему ВАХ сімейства – гілкою (рис. 7.6в).

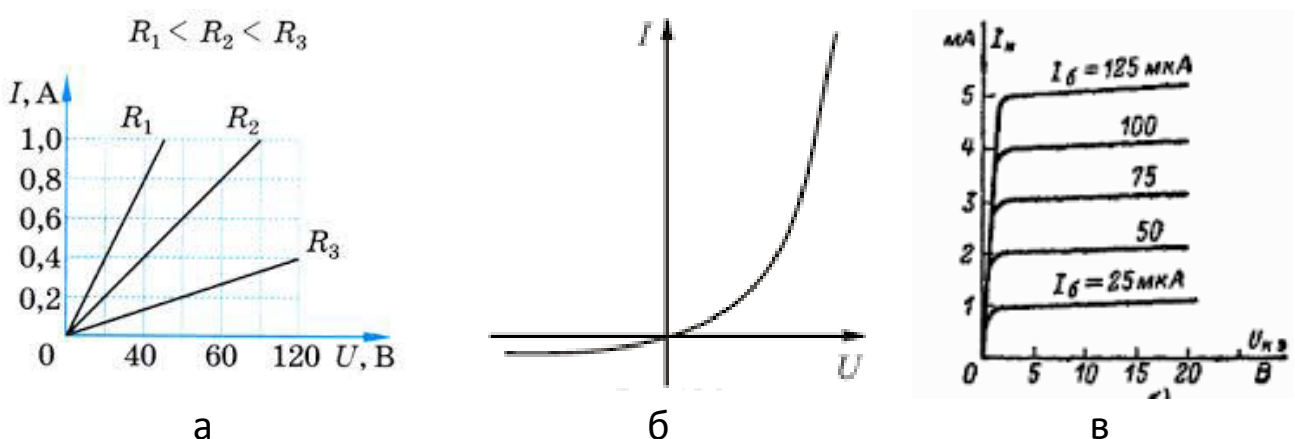


Рисунок 7.6-Типові ВАХ: а – резисторів із різними номіналами опору, б – випрямляючих діодів, в - сімейство ВАХ транзистора

Якщо ВАХ компонента електронної схеми має графік у вигляді прямої лінії (рис. 7.6а), то це вказує на прямопропорційну залежність між силою електричного струму в компоненті та напругою на ньому,

яку викликає цей струм. Якщо компонент має таку лінійну ВАХ, то говорять, що для нього виконується закон Ома. Зокрема, крім резисторів, даний закон виконується для більшості матеріалів сучасної електроніки в певному діапазоні умов, коли величина їхньої питомої електропровідності не залежить від величини прикладеного електричного поля.

У загальному ж випадку для компонентів електроніки спостерігається нелінійна залежність між величинами I та U (рис. 7.6б та рис. 7.6в). Якщо відомі ВАХ певного компонента електронної схеми, то за ними для цього компонента можна визначити більшість його експлуатаційних параметрів.

7.6 Напрямок струму та полярність напруг. "Додатні" та "від'ємні" струми й напруги

Як уже відмічалось вище, напрямки протікання струму в електронних колах є умовними - тобто вони визначаються тими правилами, які довільно встановлені дослідниками таких кіл. Одним із таких правил є те, що в повному колі позитивним напрямком протікання електричного струму у споживачах є напрямок від позитивного полюса джерела живлення до негативного його полюса. У самому ж джерелі живлення напрям струму є від негативного до позитивного полюса. Якщо із певних причин напрям протікання струму в електричному колі не відповідає наведеному вище правилу, то його значення прийнято брати із знаком "мінус", а про струм умовно говорять як про від'ємний. При цьому слід чітко розуміти, що напрям електричного струму не завжди відповідає напрямку руху вільних носіїв заряду в електричному колі.

Для джерел живлення постійною напругою або струмом, як вже вказувалося вище, існує поняття полярності величини їхньої ЕРС та прикладеної напруги. Така полярність визначається розміщенням в електричному колі або на електронній схемі позитивної та негативної клем джерела живлення. Відповідно, полярність прикладеної напруги в повному колі співпадає із полярністю клем (полюсів) джерела живлення. Полярність же спадів напруг (або просто напруг) на елементах схеми визначають по відношенню до напрямку протікання електричного струму в цьому елементі: позитивний полюс напруги

буде на тому кінці (виводі) елемента, через який в цей елемент електричний струм втікає, а негативний - на тому виводі, через який струм витікає (рис. 7.7). Якщо це правило виконується, то умовно вважають, що напруга на даному компоненті є додатною. У протилежному випадку напругу вважають від'ємною.

Значенням сили струму в окремих компонентах електронного кола також можуть умовно братися або додатними, або від'ємними. Зокрема, у електроніці існує ряд компонент, які по різному працюють при зміні полярності підключення до них джерела живлення (або прикладеної напруги).

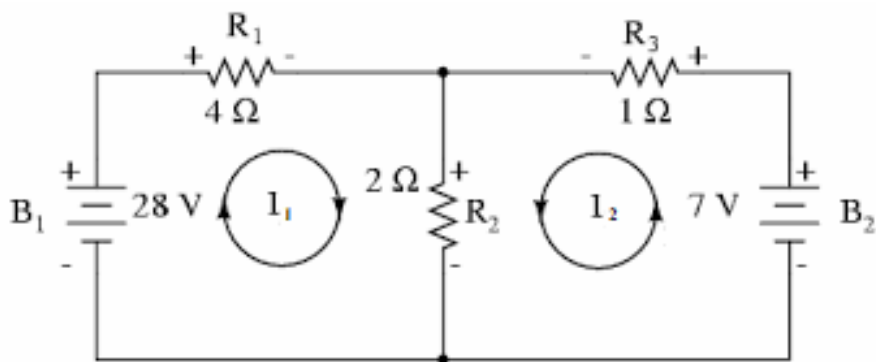


Рисунок 7.7 – Приклад встановлення напрямку струмів у ділянках кола та полярності спадів напруг на резисторах

Простим прикладом відміченого випадку є діоди, які добре пропускають електричний струм при підключенні до них джерела живлення однією полярністю, і практично не пропускають струм, при підключенні джерела з протилежною полярністю. У таких випадках умовно вважають, що при зміні полярності підключення джерела живлення в даній схемі знаки сили струму та напруги на діоді міняються на протилежні. Яскравим прикладом такої ситуації є типова ВАХ діодів (рис. 7.8). На даному графіку півосі додатних напруги та струму відповідають випадку, коли джерело живлення підключене до діода в одному (так званому прямому) напрямку, а півосі від'ємних напруги та струму відповідають випадку протилежного (так званого запрямого) напрямку підключення джерела живлення до діода.

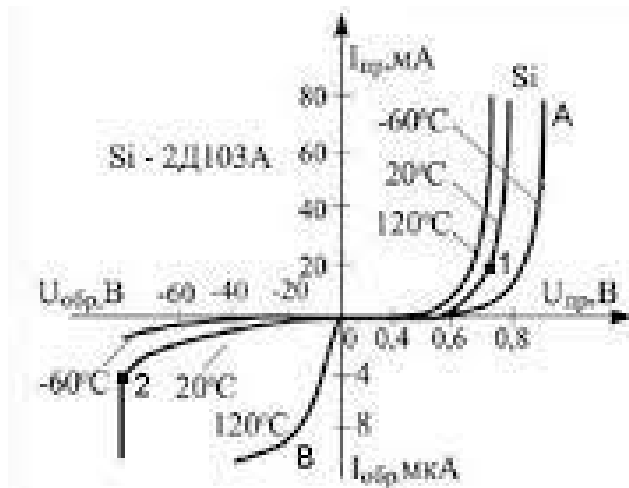


Рисунок 7.8 – Типова ВАХ кремнієвого діода

7.7 Потенціали та заземлення в електроніці та електриці

При відсутності електричного струму в середині і на поверхні провідника електричні заряди знаходяться в рівновазі. У такому випадку всі точки провідника мають однаковий електричний потенціал. Цей висновок справедливий і для кількох провідників, сполучених між собою.

Відповідно із законами електричних полів (див. додаток Б), якщо з'єднати два заряджені тіла провідником, то вони утворять єдиний провідник, у котрому має утворитися однаковий потенціал по всіх окремих його частинах.

Якщо електричні заряди у провіднику знаходяться в рівновазі, то в цьому провіднику немає електричного струму і напруженість електричного поля в будь-якій точці в середині провідника дорівнює нулю. Дійсно, якщо ці умови не виконувались би, то рухомі електричні частинки, які знаходяться в будь-якому провіднику, під дією сил електричного поля прийшли б у рух і рівновага була б порушена. Крім цього ми знаємо, що при рівновазі зарядів вектор напруженості поля біля поверхні провідника перпендикулярний до поверхні. Звідси випливає, що для переміщення заряду із будь-якої точки провідника в будь-яку іншу його точку не потрібно виконувати якусь роботу. Але згідно з визначенням потенціалу це означає, що різниця потенціалів будь-якої пари точок як у середині провідника, так і на поверхні рівна нулю. Тобто, при відсутності електричного струму всі точки провідника мають однаковий електричний потенціал.

При з'єднанні кількох провідників між собою вони утворюють єдиний провідник. І якщо навіть не початку в такій системі між окремими провідниками існувала різниця потенціалів, то після з'єднання електричні процеси зумовлюють перетікання електричних зарядів з одних провідників на інші таким чином, що потенціал всіх окремих провідників стає однаковим. Тому при дуже малому опорі сполучених між собою провідників всі їх точки мають однаковий електричний потенціал (рис. 7.9).



Рисунок 7.9—Приклад загальної потужної енергетичної шини з однаковим потенціалом

Земля є також хорошим провідником. Хоч у землі існують певні струми, але вони невеликі, і можна вважати, що електричні заряди землі близькі до рівноваги. Тому для практичних випадків електрики та електроніки можна прийняти, що всі точки землі (як локально, так і в межах всієї земної кулі) мають однаковий електричний потенціал. Величину цього потенціалу приймають рівним нулю. Тому **в електриці та електроніці землю вибирають загальним початком відліку при вимірюваннях електричного потенціалу.** Зрозуміло, що в такому випадку потенціали точок різних електронних схем мають один і той же нульовий рівень відліку і їх можна порівнювати між собою.

Для цього схему певним чином з'єднують із землею, тобто створюють заземлення електричної схеми. Точка заземлення має схемне позначення відповідно до рис. А.15. У такому випадку кожна точка електричної схеми має свій потенціал або величину напруги –

це напруга між заданою точкою схеми та точкою заземлення (рис. 7.10). Як правило, для конкретної електронної схеми встановлюють потенціали в її вузлових точках. Такі потенціали служать для полегшення налагодження та ремонту конкретних електронних пристроїв і приладів.

Заземлення сприяє відведенню вільних зарядів у землю. Тому, коли ми бажаємо розрядити будь-який провідник, то ми з'єднуємо його із землею через заземлений предмет (тобто через заземлення). При цьому відбувається перетікання зарядів між провідником і землею таким чином, що в них потенціал стає одноковим, тобто нульовим.

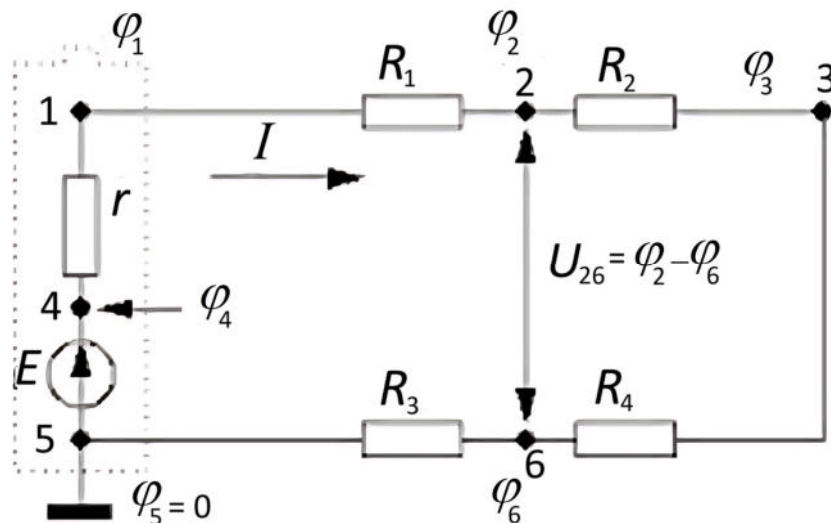


Рисунок 7.10 – Визначення потенціалів φ в електронних схемах

Оскільки всі електричні дії зумовлені електричним полем, то ми спостерігаємо їх тільки тоді, коли існує електричне поле, тобто коли існує певна різниця потенціалів між розглядуваним тілом і навколишніми предметами. При з'єднанні ж тіла із землею різницю потенціалів між цим тілом і навколишніми заземленими предметами стає рівна нулю, а значить зникає і електричне поле. Тому міжлюбими провідниками, з'єднаними із землею, відсутня різниця потенціалів, а відповідно відсутні і передумови для будь-яких електричних процесів у такій системі.

Термін "земля" в електроніці використовують всюди, де потрібно вказати існування нульового потенціалу. При цьому з'єднання саме із землею не відіграє принципової ролі. Для замкнутої

системи ті ж умови створюються і при з'єднанні всіх її компонентів із загальним спільним провідником, що постійно використовують в електроніці для отримання точки однакового потенціалу. Тому дуже часто в сучасних електронних схемах реальне заземлення не використовують. Але в кожній із них створюють спеціальну загальну провідну шину (спеціальний провідник), потенціал якої вважають нульовим і яка заміняє в даній схемі заземлення. Тому напруги (або потенціали) кожної точки схеми в таких пристроях визначають відносно загальної нульової шини. При цьому ці напруги (потенціали) можуть бути як позитивними, так і негативними.

У якості загальної шини дуже часто використовують металічний корпус електронного пристрою або його спільну металеву основу. У такому випадку загальну шину з'єднують із корпусом приладу і виводять у вигляді окремої клеми на корпусі. Якщо кілька приладів, електронних схем або окремих її компонентів з'єднані між собою одною загальною шиною, то між ними не існує різниці потенціалів. При цьому у всіх таких приладах величини напруг вимірюються відносно цієї однієї спільної точки відліку. Наприклад, у автомобілях такою загальною шиною є їх несуча металева рама.

7.8 Електричні властивості заземлення в електронних системах

У багатьох електронних системах (енергетика, електрозв'язок, тощо) у якості одного з провідників використовується земля шляхом заземлення відповідного контакту або клеми електронної схеми пристроїв (рис. 7.11). Це дозволяє у значній мірі економити на витратах матеріалів для створення таких систем. Але виникає закономірне питання про загальний опір заземлення R_z , яке з'єднує дуже віддалені електронні пристрої. Зокрема, у потужних лініях електропередач дана відстань може сягати сотні і тисячі кілометрів.

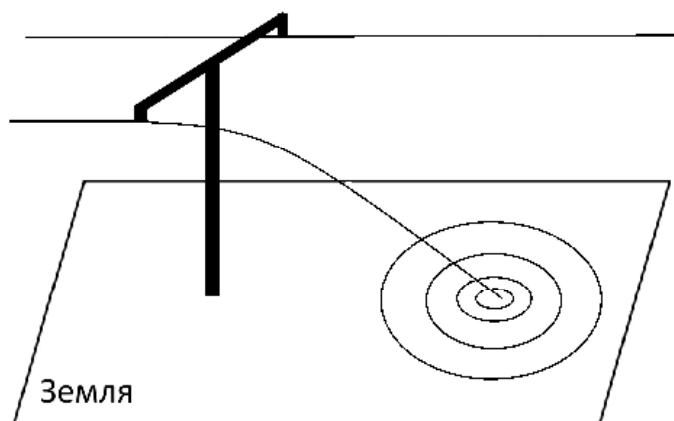


Рисунок 7.11 – Еквіпотенціальні криві в точці падіння проводу лінії електропередач під напругою

Теоретичний аналіз показує, що величина опору заземлення визначається простим співвідношенням

$$R_3 = \frac{1}{2\pi S \sigma_3},$$

де σ_3 – питома електропровідність ґрунту, а S – площа контуру заземлення, закопаного в землю. Як видно з приведеного виразу, загальний опір заземлення не залежить від відстані між двома заземленими електродами. Він визначається лише питомою провідністю ґрунту та площею змонтованого в землі заземлюючого контуру. Тому в добре змонтованих системах заземлення величина R_3 не перевищує одного Ома, тобто є досить малою і забезпечує хороше проведення електричного струму з малими втратами.

Звернемо ще раз увагу на рис. 7.11. З нього слідує, що густина силових ліній електричного поля велика лише безпосередньо біля поверхні заземлюючого контуру. Це означає, що напруженість поля значна лише поблизу цих контурів і тому основна різниця потенціалів буде виникати лише на ділянках землі, котрі безпосередньо примикають до заземлюючих контурів. Отже величина сили електричного струму заземлення буде визначатися лише властивостями ґрунту цих ділянок. Тому в якості параметру σ_3 слід брати питому електропровідність ґрунту саме в ділянці розташування заземлюючого контуру. Відповідно, для зменшення опору заземлення потрібно заземлюючий контур розміщувати у ґрунтах з доброю електропровідністю, а його контур має мати велику площу поверхні S .

Проведений аналіз вказує і на те, що при замиканні на землю провідників із високим електричним потенціалом, у даній локальній ділянці на поверхні землі будуть існувати великі різниці потенціалів, небезпечні для людини. Тому правила техніки безпеки забороняють дуже близько наближатися до обірваних провідників високовольтних ліній електропередач, котрі впали на землю. Одночасно рис. 7.11 ілюструє причини наявності великої крокової різниці потенціалів для людини, котра наближається близько до провідника з високою напругою, який лежить на землі.

ПРАКТИЧНА РОБОТА №4 ЗАКОНИ ОМА ТА РОЗСІЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМАХ

Завдання для аудиторної роботи

Завдання 4.1. Розрахувати ширину шини живлення електронної схеми, яка буде змонтована на друкованій платі. Схема буде споживати від джерела живлення електричний струм максимальною силою 1 А. Товщина провідного шару із міді друкованої плати дорівнює 0,1 мм. Відомо, що провідний шар друкованої плати площею 1 мм^2 без перегрівання може розсіювати в оточуюче середовище гранично допустиму потужність 1 мВт.

Примітка: При протіканні електричного струму джерело живлення виконує певну роботу, надаючи носіям заряду кінетичну енергію. Ця енергія розсіюється у провідниках та в електронних компонентах за рахунок зіткнень носіїв з атомами матеріалів компонент. У результаті таких процесів кінетична енергія носіїв перетворюється в теплову енергію і відповідні матеріали нагріваються. У свою чергу, теплова енергія матеріалів розсіюється в навколишнє середовище.

Завдання 4.2. Мідна шина живлення електронної схеми шириною 1 мм та товщиною 0,01 мм підключається до ідеального джерела живлення з величиною ЕРС 12 В. Електронна схема споживає сумарну потужність 5 Вт. Як змінилася б температура цієї шини через 1 хвилину роботи, якби був відсутній відвід тепла від неї?

Завдання для самостійної роботи

Завдання 4.3. Сформулюйте закони Кіргофа для електричних кіл постійного струму та опишіть загальний алгоритм аналізу електричних кіл із використанням цих законів на практиці.

Завдання 4.4. Використовуючи закони Кіргофа, розрахуйте спади напруг на резисторах та потенціали у вузлових точках схеми рис. 7.7.

ЧАСТИНА 2

КОМПОНЕНТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ЕЛЕКТРОННИХ КІЛ

На сьогодні більшість компонентів електроніки передбачають три основні способи їх кріплення на друковану плату:

- за допомогою спеціального механічного конструктиву (цей спосіб використовують для компонентів з великими габаритами та вагою);

- об'ємний монтаж за допомогою дротяних ніжок, які вставляють у спеціальні наскрізні отвори друкованої плати та пропаюють;

- поверхневий монтаж для мініатюрних компонентів, які припаюються на спеціальні маленькі площадки на поверхні друкованої плати.

Тенденція розвитку компонент електроніки полягає в постійному зменшенні їх розмірів. Тому у практиці виробництва електронних приладів все більше застосовуються компоненти саме для поверхневого монтажу із розмірами у кілька міліметрів.

Більшість елементів електронних систем є споживачами електричної енергії джерела живлення, тобто відіграють роль навантаження. При цьому кожен елемент може мати чисто резистивну, індуктивну чи ємнісну фізичну природу або поєднувати в собі в різних пропорціях вказані три типи властивостей. Наприклад, можна вважати, що лампочка розжарювання має переважно чистий резистивний опір, а трансформатор – поєднання резистивного та індуктивного опору. Тому познайомимося з основними трьома типами пасивних елементів електронних схем: резисторами, конденсаторами та котушками індуктивності. Кожен із таких елементів у найбільшій мірі проявляє фізичні властивості свого типу опору.

8 РЕЗИСТОРИ

8.1 Електричний опір та резистори

Поняття «опір» застосовують у різноманітних областях діяльності. У будівництві – механічний та тепловий опір різних конструкцій; у суспільному житті – збройний опір та інше. У електриці та електроніці під цим терміном, у більшості випадків, розуміють саме електричний опір різних матеріалів та елементів електронних схем. Він означає здатність цих об'єктів чинити супротив протіканню вільних носіїв заряду через них.

Наявність певного електричного опору матеріалів може відігравати як позитивну, так і негативну роль. Наприклад, якщо металічний провід застосовують для передачі електричної енергії, то його загальний опір R відіграє негативну роль, оскільки зумовлює теплові втрати енергії. Як вже відмічалось, потужність таких втрат визначаються як I^2R . Оскільки сила струму в лініях електропередач досягає мільйонів ампер, то такі втрати є дуже суттєвими навіть при малих значеннях опору R . Позитивна ж роль наявності опору в різних матеріалах проявляється при їх використанні в таких важливих компонентах електроніки, які називають резистори. Тому слід чітко розуміти відмінність понять у термінах «опір» та «резистор» і правильно їх використовувати при вивченні електроніки та електрики. Резистор – це конкретний прилад, а опір – це одна з властивостей даного приладу.

8.2 Фізична модель резисторів

Фізично резистор є елементом електроніки, який має лише активний електричний опір R . Під **активним електричним опором розуміють властивість елементів електронних кіл незворотно поглинати енергію електричного струму, перетворюючи її в інші види енергії (переважно теплову та хімічну)**. Графічне базове зображення резисторів показано на рис. А.25.

Якщо ми візьмемо конкретний резистор і поміряємо його реальний опір R , то він буде мати певне значення, яке будемо називати фізичним опором резистора. Цей опір резистора визначає

реальні величини інших параметри протікання електричного струму в ньому. Основними із них є три: сила електричного струму, спад напруги та розсіювана потужність. Застосовуючи закон Ома для ділянки кола до резисторів отримуємо, що при протіканні струму силою I через резистор на його кінцях виникає різниця потенціалів (або спад напруги, або напруга)

$$U = I \cdot R.$$

Це правило можна трактувати й по іншому: якщо на кінцях резистора з опором R існує спад напруги U , то через цей резистор протікає електричний струм силою

$$I = U/R.$$

У самому резисторі електрична енергія протікаючого через нього струму переходить у тепло. Дана **теплова енергія, яка виділяється на резисторі за 1 с, називається розсіюваною резистором потужністю і вона знаходиться як $P_R = I^2 R$** . Зазвичай цю величину визначають у ватах. Для цього в наведеній формулі струм слід брати в амперах, а опір в омах. Геометричні розміри резисторів підбирають таким чином, щоб вони були здатні розсіювати виділену в них теплову енергію без пошкоджень.

8.3 Технічна модель та параметри резисторів

З технічної точки зору, резистором називають такий найпростіший компонент електроніки, який має нормоване значення свого електричного опору R_n , наприклад, резистор на 1 кОм. Однак, якщо ми візьмемо конкретний резистор із значенням $R_n = 1$ кОм, і поміряємо його реальний фізичний опір R , то він буде відмінний від R_n .

У електроніці найбільш важливими є кілька технічних параметрів резисторів.

8.3.1. Визначений нами вище номінальний опір (або номінал) резистора R_n – це нормована і встановлена відповідними стандартами величина, близько біля якої має лежати фізичний опір вибраного резистора. Державними та міжнародними стандартами встановлюються відповідні таблиці (або ряди) номіналів резисторів (приклади будуть наведені нижче). Ряди номіналів позначають через літеру E , за якою слідує кількість різних номіналів, які існують у

даному ряді. Наприклад, позначення E12 задає ряд номіналів, у якому існує 12 різних доступних номінальних значень опору резисторів. Введення номіналів зумовлене кількома причинами:

- у електронній техніці часто нема необхідності застосування резисторів з занадто високою точністю фізичного опору;
- підприємствам практично неможливо налагодити масовий випуск резисторів без відповідних похибок величини опору;
- практично неможливо налагодити виробництво резисторів із безкінечною кількістю значень їх фізичних опорів.

8.3.2. Допуск (або клас точності) резистора – це нормовані стандартами допустимі відхилення величини фізичного опору резистора від його номіналу. Такі відхилення згідно стандартів вказуються у відсотках. За міжнародними стандартами, які введені в дію і в Україні, величину допуску позначають латинськими літерами. Кожна із цих літер задає відповідний клас точності.

Наведемо міжнародний ряд допусків резисторів (кирилицею у дужках указані аналогічні позначення допусків для України, використання яких допускається стандартами на сьогодні): E = ±0.001%; L = ±0.002%; R = ±0.005%; P = ±0.01%; U = ±0,02%; V(Ж) = ±0.1%; C(Y) = ±0.25%; D(Д) = ±0.5%; F(P) = ±1%; G(Л) = ±2%; J(И) = ±5%; K(C) = ±10%; M(B) = ±20%; N(Ф) = ±30%. Як бачимо, діючий вітчизняний стандарт визначає використання резисторів лише половини міжнародних класів точності.

Чим вищий клас точності, тим більш дорогим буде резистор. Існують дуже дорогі високоточні резистори, які використовуються лише для спеціалізованих схем, наприклад, літакобудування, космічної техніки, систем зв'язку та інше.

Для прикладу в таблиці 8.1 наведемо також два ряди номіналів резисторів двох класів точності для широкого вжитку.

Таблиця 8.1- Ряди номіналів резисторів різних допусків

Допуск	Номінали, Ом, кОм, МОм											
K (10%)	1	-	1,2	-	1,5	-	1,8	-	2,2	-	2,7	-
J (5%)	1	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,7	3,0

Продовження таблиці 8.1

Допуск	Номінали, Ом, кОм, МОм											
K (10%)	3,3	-	3,9	-	4,7	-	5,6	-	6,8	-	8,2	-
J (5%)	3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1

8.3.3. Номінальна потужність P_n – найбільша потужність струму, яка може бути розсіяна резистором у вигляді тепла при нормальних умовах експлуатації. Промисловістю випускаються резистори із такими основними номіналами потужності (у Ватах): 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 5; 10; 25; 50; 100. Можуть бути й інші номінальні потужності резисторів. Номінальна потужність резистора визначається орієнтовно його розмірами.

Реальна потужність, яка розсіюється резистором, визначається величиною протікаючого через нього струму за вказаними вище формулами для фізичних параметрів резисторів. У електронних схемах слід встановлювати такі резистори, реальна розсіювана потужність яких ніколи у процесі експлуатації не перевищить номінальну потужність.

8.3.4. Максимальна робоча напруга U_{max} . Це найбільша напруга, яка може виникати на кінцях резистора без його руйнування (електричного пробоя). Зазвичай, для сучасних резисторів ці напруги є достатньо високі і даний параметр не відіграє суттєвої ролі при встановленні резисторів в електронні інформаційні схеми. Однак, у електричних схемах із високими робочими напругами більше 100 В цей параметр стає важливим для правильного підбору типу резисторів.

8.3.5. Рівень власних шумів резистора U_n – це усереднений спад напруги, який виникає на кінцях вільного резистора за рахунок випадкових електричних процесів у матеріалі, з якого виготовлено резистор. Наприклад, для металевих резисторів рівень шумів легко розрахувати як $U_n = 0,125 \cdot \sqrt{R_n \Delta F}$ (мкВ), де ΔF – ширина смуги частот виникаючих шумів. Для більшості сучасних електронних схем цей параметр не є важливим і його можна не враховувати при їх конструюванні. Суттєво зростає вплив параметра U_n лише для тих електронних кіл, які обробляють сигнали із дуже низьким рівнем напруги, меншим одиниць мілівольт. Зрозуміло, що для таких кіл слід підбирати резистори із малим значенням рівня власних шумів.

8.3.6. Термічний коефіцієнт опору – показує зміну величини опору резистора при зміні його температури на один градус. Вимірюють цей параметр в Ом/град, а значення в технічній літературі часто надають в одиницях 10^{-6} Ом/К. Цей параметр резисторів стає

важливим для тих електронних схем, експлуатація яких передбачається в умовах зміни температури в широкому діапазоні в сотні градусів.

8.4 Основні типи резисторів

Переважає більшість резисторів поділяється на такі основні типи (рис. 8.1):

1. Резистори постійного опору.
2. Резистори змінного опору, налагоджувальні резистори та реостати.
3. Магазили опорів.
4. Резистори із спеціальними функціями (терморезистори, фоторезистори, варистори та інше).

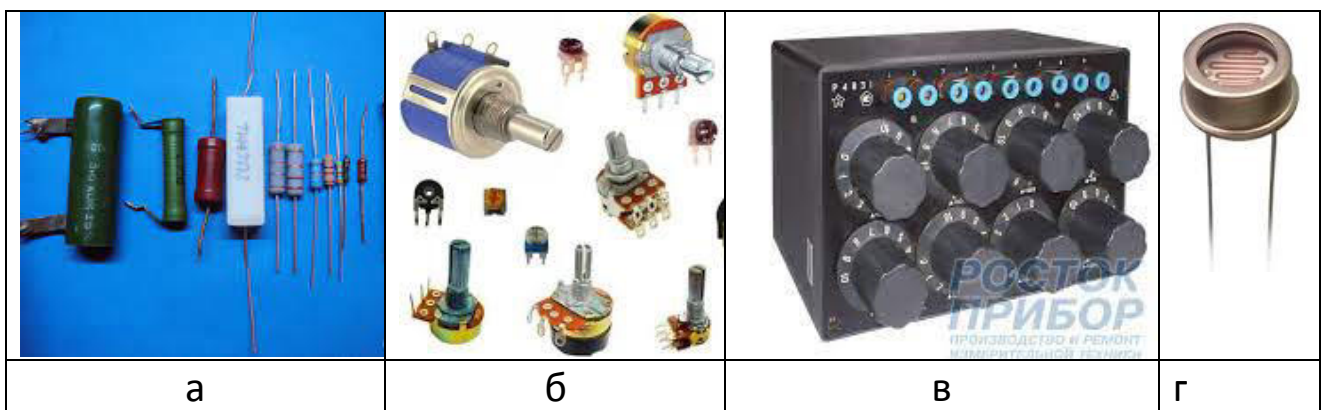


Рисунок 8.1 – Зовнішній вигляд деяких типів резисторів: постійного опору (а), змінного опору (б), магазину опорів (в), фоторезистор (г)

Правила креслення та нанесення позначень різного типу резисторів на принципових електричних схемах наведено на рис. А.25, А.26 та А.27.

На принципових електричних схемах поруч із графічним позначенням резистора обов'язково наводиться його позиційне схемне позначення (СП), яке складається з літери R та порядкового номера резистора у схемі (рисунки додатку А). Всі інші параметри резисторів можна наводити у переліку елементів та в специфікації до даної схеми. Однак, при необхідності, на принциповій схемі можна вказувати й номінал та розсіювану потужність резисторів, відповідно

із рисунками додатку А. Для змінних та налагоджувальних резисторів часто в якості номіналу вказують максимальний опір. Тоді, у більшості випадків, діапазон змін опору такого резистора буде від 0 Ом до максимального, вказаного на схемі або у специфікації. Іноді на схемах для змінних резисторів вказують конкретний діапазон змін величини опору.

Якщо на схемі у кінці СП резистора міститься значок (*), то значення опору резистора на схемі вказано орієнтовано і його необхідно підбирати при налагодженні електронної схеми або пристрою.

8.5 Маркування резисторів у вигляді надписів

На корпусі резисторів, які випускають різні фірми, наносять різні надписи та знаки, які називають маркуванням. Маркування дають змогу визначити основні технічні параметри даного компонента.

Якщо розміри корпусу резисторів є достатньо великими, то маркування містить спеціальний надпис (рис. 8.2). Прикладом може бути такий надпис: P1 –50Вт 47кОм \pm 10% 90. Перший елемент визначає конструктивний тип резистора та матеріал його провідної частини. Інші елементи надпису це номінальна потужність (50 Вт), номінальний опір (47 кОм), допуск (\pm 10%) та дата виготовлення компонента (1990 рік).



Рисунок 8.2 – Приклад маркування резистора у вигляді надпису на корпусі

Іноді номінали та допуски маркуються на корпусі спеціальним літерно-цифровим кодом (рис. 8.3). Перші три знаки цього коду позначають номінал резистора. При цьому дві цифри задають величину номіналу, а одна із літер Е, К(С), М, Г(G) або Т визначає множник, тобто одиницю вимірювання цієї величини (Ом, кОм, МОм,

ГОм, ТОм, відповідно). Дана літера розміщаються перед номіналом або після номіналу, або замість коми. Четвертий знак коду – літера, яка відповідає допуску згідно із наведеним вище рядом допусків на резистори. Наприклад, маркування 3Е0І означає резистор номіналом 3,0 Ом із допуском $\pm 5\%$, а маркування 5М1В - резистор номіналом 5,1 МОм із допуском $+20\%$.

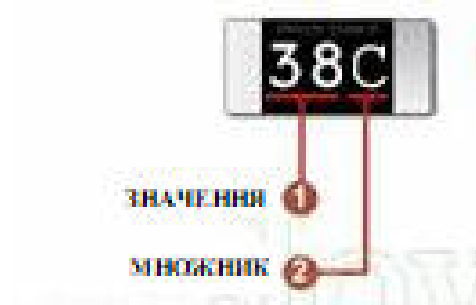


Рисунок 8.3—Приклад маркування резисторів літерно-цифровим кодом

Маркування резисторів змінного опору та налагоджувальних резисторів вітчизняного виробництва найчастіше складається з літер РП або СП із цифрою, яка вказує на матеріал резистивного шару (рис.8.4). Далі через тире йде цифра з літерою, які визначають номер розробки резистора та його конструктивний варіант. Далі через тире вказується номінальна потужність розсіювання, номінальний (максимальний) опір та допуск, аналогічно резисторам постійного опору. У кінці ставиться літера, яка задає тип функціональної характеристики резистора.



Рисунок 8.4 – Приклади маркування резисторів змінного опору

Наприклад, є маркування СПЗ-4а-0,5Вт-4700 Ом $\pm 20\%$ - А. Воно означає: що ми маємо резистор змінний з тонкого композиційного шару з номером розробки 4а для одинарного об'ємного монтажу з розсіюваною потужністю 0,5 Вт та максимальним номінальним опором 4,7 кОм, допуском $\pm 20\%$ та з функціональною характеристикою типу А.

8.6 Маркування резисторів кольоровими смугами

На сьогодні все частіше застосовують маркування резисторів постійного опору у вигляді кольорових кілець або смуг (рис. 8.5). Особливо це стосується резисторів із малими розмірами, на корпусі яких надписи погано читаються.



Рисунок 8.5 – Приклади маркування резисторів кольоровими кільцями або смугами

Кольорових смуг на корпусі резистора може бути від 3 до 6. Чим більше смуг нанесено на корпус елемента, тим точніше можна інтерпретувати його технічні параметри і характеристики. Однак при цьому збільшується і складність зчитування інформації, яка полягає у великій кількості варіантів зчитування. Для виключення помилкового визначення технічних даних резисторів з кольоровими смугами, бажано скористатися декодером кольорового маркування в мережі Інтернет.

Кольорові смуги наносяться на корпус резистора біля одного із його виводів, від якого і розпочинається читання параметрів. Якщо

розміри резистора не дозволяють розмістити смуги ближче до одного виводу, то товщина останньої смуги буде в 1,5...2 рази більша товщини інших смуг кольорового коду. Іншими ознаками початку коду може бути більш густе розміщення смуг або наявність широкого проміжку між першими трьома або чотирма смугами та останніми п'ятою або шостою смугами.

Набір маркувальних кольорових смуг утворює код, у якому зашифровано технічні параметри резистора. Правила читання коду викладені у вітчизняному стандарті ГОСТ 28883-90 та міжнародних стандартах 62 МЕК (Міжнародної електротехнічної комісії) і 63 МЕК. Розшифровка коду кольорових смуг згідно з цими стандартами наведена в таблиці 8.2.

Таблиця 8.2 - Коди кольорових кілець на маркуванні резисторів (ТКР - термічний коефіцієнт опору резистора; його числові значення наведені в одиницях 10^{-6} Ом/К)

Колір смуги	Перша, друга та третя	Четверта	П'ята	Шоста
	Цифри номінального опору	Множник	Допуск, %	ТКР, 10^{-6} Ом/К
Срібний	-	10^{-2}	± 10	-
Золотистий	-	0,1	± 5	-
Чорний	0	1	-	-
Коричневий	1	10	± 1	100
Червоний	2	10^2	± 2	50
Помаранчевий	3	10^3	± 3	15
Жовтий	4	10^4	± 4	25
Зелений	5	10^5	$\pm 0,5$	-
Голубий	6	10^6	$\pm 0,25$	10
Фіолетовий	7	10^7	$\pm 0,15$	5
Сірий	8	10^8	$\pm 0,05$	-
Білий	9	10^9	-	1

Слід відмітити, що при використанні спрощеного коду з трьох та чотирьох смуг, дві перші смуги позначають цілі цифри номіналу, третя смуга - множник, а четверта - допуск. Три смуги застосовують, якщо допуск номіналу рівний $\pm 20\%$.

Розглянемо два приклади.

1. Є резистор, на якому нанесені три смуги в такій послідовності кольорів: червоний, зелений і коричневий. Згідно таблиці опір буде 25 Ом, але при цьому необхідно застосувати множник 10. Тоді загальне значення опору резистора з таким маркуванням складе 250 Ом. Відповідно допуск буде $\pm 20\%$.

2. Є резистор з маркуванням у вигляді 6 смуг: помаранчева, синя, біла, чорна, сіра і фіолетова. Перші три смуги позначають число 360, четверта говорить про те, що множник буде дорівнювати 1. А ось п'ята і шоста смуги вказують на похибку опору в $\pm 0,05\%$ і ТКР, рівний $5 \cdot 10^{-6}$ Ом/К.

3. Ще кілька варіантів наведено на рис. 8.6.

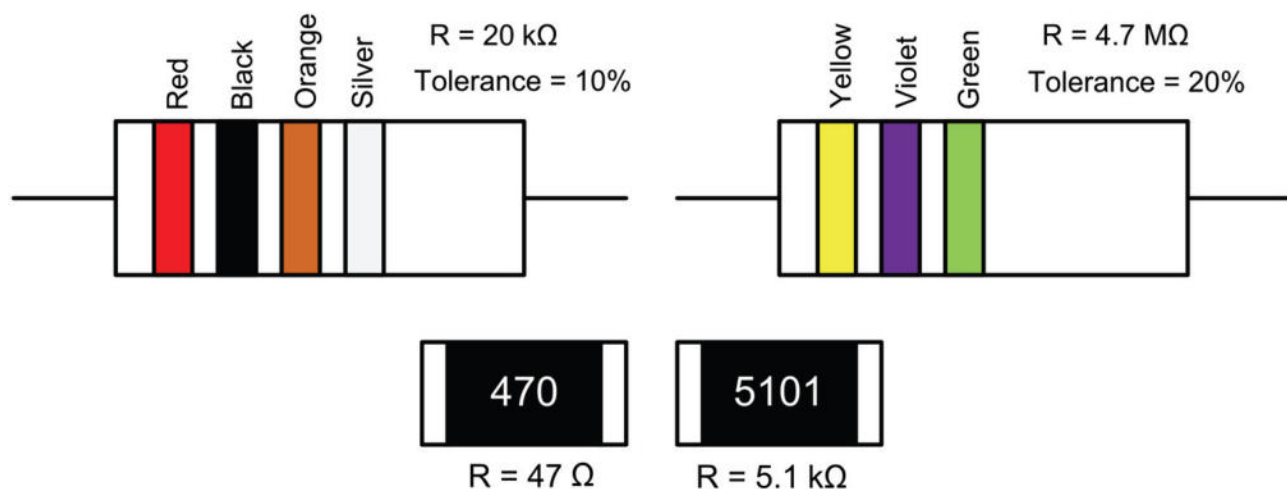


Рисунок 8.6 – Визначення номіналу резисторів за кольоровими смугами та за кодом (резистори для поверхневого монтажу)

Є деякі особливості визначення номіналу резисторів поверхневого монтажу. Для цього використовують нові системи кодування. Зокрема, для резисторів з низьким значенням опору літера R використовується для вказівки на місце розташування десяткової коми. Наприклад, код R470 вказує на резистор 0,47 Ом. Складнішими для інтерпретації є коди Міжнародного стандарту

EIA-96, призначені для резисторів з допуском 1 %. Якщо ж виникають якісь труднощі виявлення номіналу резисторів, слід звертатися до їх виробника.

Бувають випадки, коли потрібен резистор з дуже точним значенням опору. Тут можливі кілька шляхів вирішення проблеми. Перший – придбати велику кількість резисторів низького класу точності з найбільш близьким до потрібного опору номіналом. Потім шляхом ряду вимірювань серед них вибрати компонент з необхідним значенням опору. Другий шлях – із набору резисторів різних номіналів шляхом їх послідовного та паралельного сполучення отримати необхідний опір. Третій варіант – купити високоточний резистор з необхідним номіналом. Але слід мати на увазі, що часто високоточні резистори виробляються в одиничних екземплярах під замовлення і коштують дуже дорого.

9 ЕЛЕКТРИЧНА ЄМНІСТЬ ТА КОНДЕНСАТОРИ

9.1 Енергія електричного поля та ємнісні елементи. Конденсатори

Будь-яке електричне поле здатне діяти на заряджені тіла, переміщуючи їх у просторі. Відповідно, електричні поля мають у собі певний запас енергії. Якщо якийсь заряджене тіло розміщене в певній точці простору, то енергія електричного поля цього тіла розподілена по всьому цьому просторі. У такому випадку густина енергії електричного поля (кількість енергії на одиницю об'єму простору) є дуже малою.

У електроніці є ряд приладів, які забезпечують концентрацію дуже великих енергій електричного поля в малому об'ємі. Величина цієї енергії залежить від величини зарядів, які можуть бути зосереджені в таких пристроях. Зокрема, електричні джерела живлення концентрують у собі досить потужні енергетичні запаси. Для прикладу, у гальванічних елементах та акумуляторах величину цих запасів називають електричною (енергетичною) ємністю і вимірюють в ампер-годинах (наприклад, 5 А·год). Це означає, що в такому акумуляторі сконцентровано такий електричний заряд (q , відповідно, і така електрична енергія), який здатен підтримувати в зовнішньому колі протягом однієї години струм силою 5 А. За рахунок протікання електричного струму під час роботи електронної схеми джерела живлення віддають свою енергію всім компонентам даного пристрою.

Крім джерел живлення, **багато компонентів електричних та електронних кіл також мають властивість створювати електричні поля із запасанням у них значної кількості електричної енергії**. Основними із них є такі ємнісні елементи як **конденсатори, основні функції яких обумовлені процесами накопичування енергії електричного поля та її повертання назад в електричне коло**. Однак, на відміну від джерел живлення, процеси як накопичення, так і віддачі енергії електричного поля в конденсаторах проходять лише у процесі роботи даної електронної схеми. Крім того, функціонування

конденсаторів завжди зумовлене наявністю в електронних схемах певних джерел живлення.

Величина електричної енергії в конденсаторах, як правило, постійно змінюється (або зростає, або спадає) в широких межах при їхній роботі в електронній схемі. Величина тієї енергії електричного поля, з якою може працювати конкретний конденсатор, залежить від його ємності, аналогічно електричній ємності гальванічних джерел живлення.

9.2 Будова, зарядка, розрядка та ємність конденсаторів. Фарада

За своєю будовою у спрощеному вигляді конденсатори складаються з двох металевих обкладинок, розділених між собою тонким шаром діелектрика. При цьому форма й матеріали обкладинок та шару діелектрика і способи їх розміщення в корпусі конденсатора можуть бути досить різними. У залежності від цього розрізняють різні типи конденсаторів.

Енергія електричного поля в конденсаторах формується за рахунок накопичення електричних зарядів, які розміщуються на обкладинках. Для появи таких зарядів на обкладинки конденсатора слід подати певну зовнішню напругу від зовнішнього джерела живлення. Саме за її рахунок відбувається накопичення зарядів на обкладинках: на одній із них скупчується позитивний заряд величиною Q , а на другій – рівний за величиною негативний заряд. Такий процес називається зарядкою конденсатора. У процесі накопичення електричних зарядів між обкладинками конденсатора формується певний спад напруги U .

Величина Q накопиченого на обкладинках заряду залежить від двох базових факторів;

- конструкції та властивостей матеріалів конденсатора;
- величини створеної на обкладинках напруги.

Параметр, який враховує всі властивості матеріалів та конструкційні особливості конденсатора щодо накопичення електричних зарядів, називають його ємністю, яку загальноприйнято позначати як C . Тоді величину заряду Q на обкладинках конденсатора в певний момент часу можна розрахувати за співвідношенням:

$$Q = CU, \quad (9.1)$$

де U – величина напруги на обкладинках на даний момент часу.

Величину ємності в системі СІ вимірюють у фарадах (скорочено Ф, латинська – F). За визначенням, **одній фараді відповідає ємність такого конденсатора, у якого при напрузі на обкладинках в 1 В на кожній із них накопичується заряд в 1 Кл.** Одна фарада є досить великою ємністю. Тому в сучасній електроніці більш поширеними є похідні одиниці: мкФ, нФ, пФ.

Якщо прив'язуватись до будови конденсаторів, то у спрощеному вигляді їхню ємність можна записати для системи СІ як:

$$C = (\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S) / d,$$

де ϵ_0 – електрична стала;

ϵ – діелектрична проникність матеріалу шару діелектрика;

S – площа однієї обкладинки конденсатора;

d – товщина шару діелектрика.

Якщо тепер заряджений конденсатор увімкнути в замкнене електричне коло, то в ньому почне притікати електричний струм за рахунок існування на його пластинах різниці потенціалів. У результаті заряди $+Q$ і $-Q$ на пластинах конденсатора зменшуються, досягаючи нульового значення. Такий процес називають розрядкою конденсатора. У процесі розрядки електричні процеси в замкненому колі підтримуються електричною енергією, запасеною конденсатором під час зарядки.

9.3 Фізична модель та властивості конденсаторів

Електричні процеси, з якими пов'язане використання конденсаторів, є складнішими, у порівнянні з процесами в резисторах. Це обумовлено тим, що при функціонуванні конденсатора в електронних колах можуть відбуватися швидкі динамічні зміни в часі величини заряду Q . Дані зміни описуються кількома диференціальними законами, найпростіші із яких ми розглянемо.

При динамічних електричних процесах напруга u на обкладинках конденсатора вже не є постійною, а змінюється, що математично виражається її заданням у вигляді певної функції часу $u = u(t)$. Для таких процесів величина струму в електричних колах таж

стає змінною та є певною функцією $i = i(t)$. При цьому, відповідно із загальним визначенням величини струму як заряду, який протікає через коло за одиницю часу:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt}.$$

Застосувавши це визначення та використовуючи вираз (9.1) для конденсаторів отримуємо закон, за яким змінюється сила струму у простому колі з конденсатором:

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt}.$$

Із останнього співвідношення слідує, що функції сили струму і напруги в електричних колах з конденсатором можуть бути різними. Тобто форма графіків сили струму та напруги можуть не збігатися для тих ділянок електронної схеми, які містять конденсатори. Для прикладу, на рис. 9.1 наведено такі графіки для процесу заряджання конденсатора, при прикладанні до нього зовнішньої постійної напруги U .

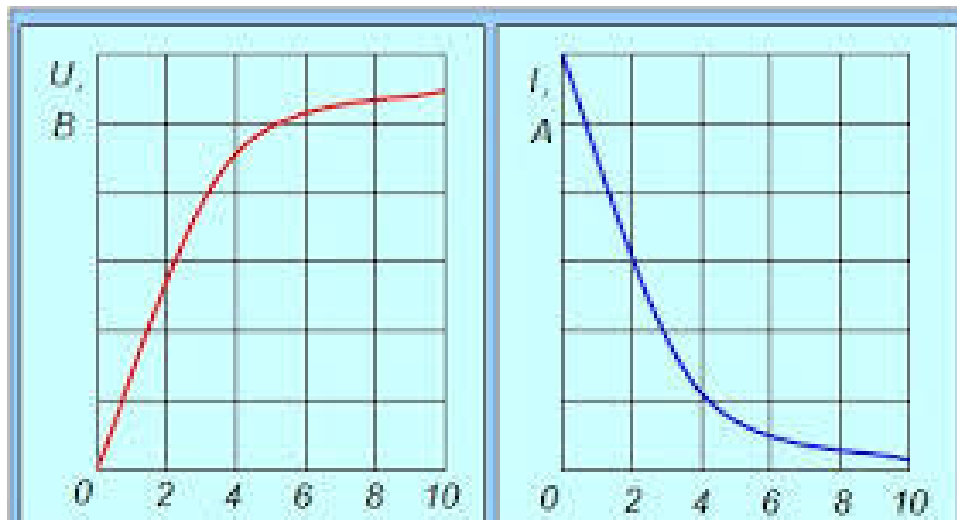


Рисунок 9.1 – Графіки змін з часом напруги на обкладинках та сили струму в електричному колі при заряджанні конденсатора

Електричний струм у ділянках електронних кіл з конденсатором протікає лише в період їх заряджання та розряджання, коли є можливість зміни кількості зарядів, а, відповідно, і напруги на обкладинках. Таким чином, перетікання зарядів між обкладинками стає можливим лише при зміні балансу напруг зовнішнього джерела прикладеної напруги та самого конденсатора.

Важливим наслідком описаних вище фізичних процесів є те, що

конденсатор після короткого інтервалу зарядки від зовнішнього джерела постійної прикладеної напруги в послідуєчому не пропускає постійний електричний струм. Такий струм переривається ізолятором між обкладинками конденсатора.

Однак, конденсатор може добре проводити змінний електричний струм, який генерується зовнішнім джерелом змінної ЕРС. У такому джерелі при замиканні електричного кола динамічно змінюється величина вхідної напруги на клеммах. Це зумовлює виникнення дисбалансів між вхідною напругою і напругою на обкладинках конденсатора. Останні створюють умови для протікання процесів зарядки і розрядки конденсатора, які й визначають закони протікання змінного струму в електронних колах.

Здатність пропускати змінний електричний струм колами з конденсатором залежить від частоти вхідної ЕРС f . Фізично така здатність визначається так званим ємнісним реактивним опором конденсатора $X_C = 1/(\omega \cdot C)$, де $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – кругова частота вхідної ЕРС. Як слідує із даного визначення, чим більша частота змінної вхідної ЕРС, то тим менший реактивний опір конденсатора і тим краще він буде проводити такий змінний електричний струм.

Енергія електричного поля, яка накопичена в даний момент у конденсаторі, визначається як $(C \cdot u^2)/2$. При протіканні змінного струму конденсатор у кожний певний момент часу віддає в коло (або забирає з кола на себе) певну потужність протікаючого в колі електричного струму. Така потужність називається миттєвою і за визначенням вона рівна:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t).$$

Застосовуючи наведений вище зв'язок між функціями струму в колі і напруги на конденсаторі, отримуємо:

$$p(t) = C \cdot u(t) \cdot [d(u)/dt].$$

Відмітимо також, що особливістю конденсаторів є те, що в усіх електронних процесах із їхньою участю практично не відбувається втрат електричної енергії в самих конденсаторах. Такі втрати відбуваються лише за рахунок протікання струмів зарядки і розрядки в інших компонентах електронного кола, зокрема, у резисторах.

9.4 Технічна модель та параметри конденсаторів

Основними технічними параметрами конденсаторів є 1. Номінальна ємність. Державними та міжнародними стандартами встановлюються відповідні таблиці (ряди) допустимих номіналів ємності конденсаторів, аналогічно номіналам опорів резисторів. Однак, оскільки виготовити конденсатори із точним значенням ємності значно складніше, то використовують переважно лише три ряди номіналів конденсаторів: E6; E12 та E24. Кількісні значення ємності ряду номіналів конденсаторів такі ж, як і для резисторів.

2. Допустимі відхилення величини ємності від номінального або допуск для сучасних найбільш поширених конденсаторів складає $\pm 2\%$, $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ та $\pm 30\%$. Для позначення допусків використовують ті ж літери, що і для резисторів. Однак для конденсаторів можливі й інші типи позначень допусків (табл. 9.1):

Таблиця 9.1 – Різні позначення допусків конденсаторів

Несиметричні допуски				
Літера позначень	Q	T	S	Z
Допуск, %	від -10 до +30	від -10 до +50	від -20 до +50	від -20 до +80
Симетричні допуски виражені значеннями відхилень				
Літера позначень	B	C	D	F
Допуск, долі фарад	$\pm 0,1$	$\pm 0,25$	$\pm 0,5$	± 1

3. Максимальна робоча напруга – найбільша напруга на обкладинках конденсаторах, при якій конденсатор буде надійно працювати протягом всього строку експлуатації. Робочі напруги конденсаторів таж маркуються літерами, наведеними в таблиці 9.2.

Максимальна робоча напруга вказується, як правило, для постійного струму. Якщо конденсатори використовуються в колах змінних сигналів, то діюче значення напруги таких сигналів має бути в 1,5 разів менше від максимальної робочої напруги, вказаної в табл. 9.2.

Таблиця 9.2 – Маркування максимальних робочих напруг конденсаторів (у вольтах)

Літера	I	R	M	A	C	B	D	E	F	G	H	S
Максимальна напруга	1	1,6	2,5	3,2	4	6,3	10	16	20	25	32	40
Літера	J	K	L	N	P	Q	Z	W	X	Y	U	V
Максимальна напруга	50	63	80	100	125	160	200	315	350	400	450	500

9.5 Типи конденсаторів та їх позначення на схемах

Загальний вигляд сучасних конденсаторів різного типу наведено на рисунку 9.2.

Конденсатори класифікують за різними ознаками. Ми розглянемо лише кілька основних із них.

За ємністю конденсатори, як і резистори поділяють на:

- конденсатори постійної ємності;
- конденсатори зі змінною ємністю;
- налагоджувальні конденсатори.



Рисунок 9.2 – Загальний вигляд сучасних конденсаторів

За особливостями використання конденсатори поділяють на:

- звичайні неполяризовані;
- електролітичні неполяризовані;

- електролітичні поляризовані;
- іоністори.

Для двох останніх типів конденсаторів підключення в електронні кола має проводитися із врахуванням полярності самих конденсаторів та полярності відповідних джерел напруг у цих колах. При цьому поляризовані конденсатори не допускають зміни полярності напруги на своїх обкладинках.

При однакових масогабаритних параметрах звичайні конденсатори мають на 2 – 3 порядки меншу ємність, ніж електролітичні конденсатори та іоністори.

Основні типи конденсаторів мають схемні позначення, які наведені на рисунках у додатку А із прикладами їхніх літерно-цифрових кодів у вигляді схемних позначень.

9.6 Маркування конденсаторів

1. Якщо дозволяють розміри, то застосовують літерно-цифрове маркування, яке наноситься на корпус конденсатора і може бути повне або скорочене.

Повне позначення має такі елементи (рис. 9.3):

- тип конденсатора;
- номінальна ємність;
- максимальна напруга;
- допуск;
- температурний коефіцієнт ємності;
- дата виготовлення.



Рисунок 9.3 – Приклади маркування на корпусі конденсаторів

Номінальну ємність при маркуванні вказують у вигляді конкретного значення, вираженого в пікофарадах (пФ) або мікрофарадах (мФ). При ємності до 0,01 мкФ вона вказується у пікофарадах, при цьому можна не вказувати одиницю вимірювання. При зазначенні номіналу ємності в інших одиницях вказують одиницю вимірювання.

Максимальна напруга, допуск та температурний коефіцієнт ємності можуть вказуватися у вигляді літер відповідного кодування, аналогічних наведеним у таблицях вище для резисторів.

2. На сьогодні для позначення ємності часто застосовують метод цифрового маркування у вигляді коду із трьох або чотирьох цифр за стандартом IEC (рис. 9.4). При такому маркуванні перші дві або три цифри позначають номінал ємності в пікофарадах, а остання цифра вказує кількість нулів у кінці номіналу.

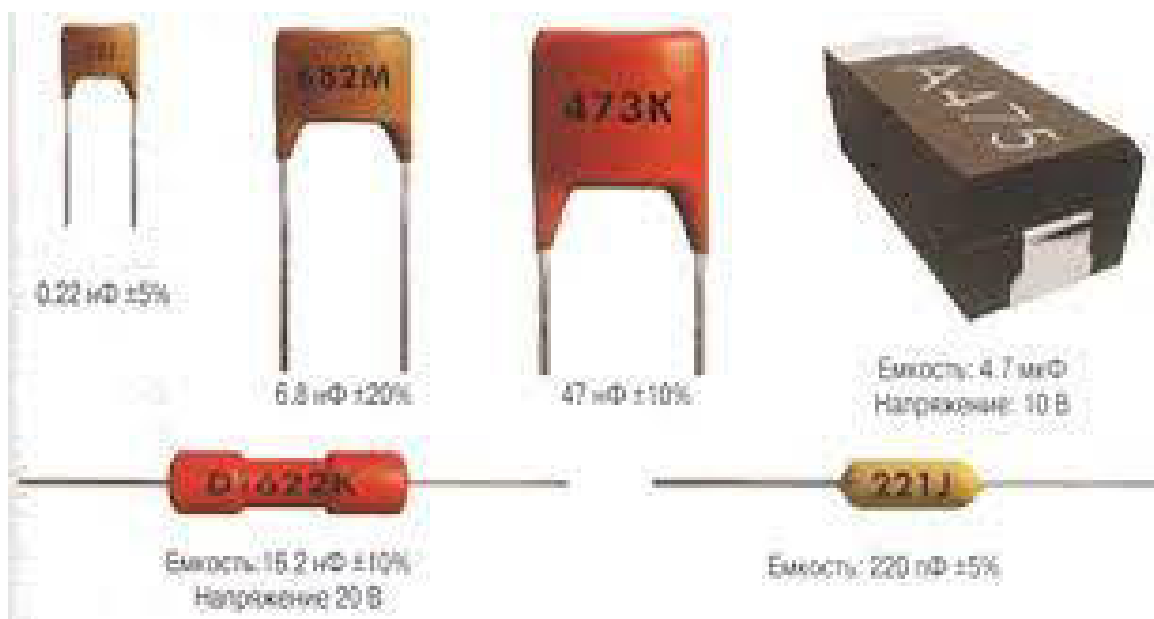


Рисунок 9.4 – Приклади маркування конденсаторів цифро-літерним кодом

3. Маркування кольоровими смугами. Для цього застосовують кілька методів.

Перший - це маркування смугами за тими ж правилами, що і резисторів. При цьому кінець коду відповідає тій стороні конденсатора, з якої відведені його контактні провідники-ніжки (рис. 9.5).

Другий метод, коли код задається кількома невеличкими кольоровими кружками, нанесеними на одну або дві сторони конденсатора. У цьому випадку кружок кінця коду розміщується біля одного із еквівалентних виводів конденсатора або біля виводу, який є більш товстим і позначає позитивну полярність підключення конденсатора.

Третій метод, коли весь корпус конденсатора розкрашений в ділянки з різними кольорами. Правила читання коду цих ділянок аналогічні наведеним вище. Якщо крім цього на корпусі є ще й кольоровий кружок, то він є кінцевим елементом коду, який, як правило, визначає множник номіналу конденсатора.

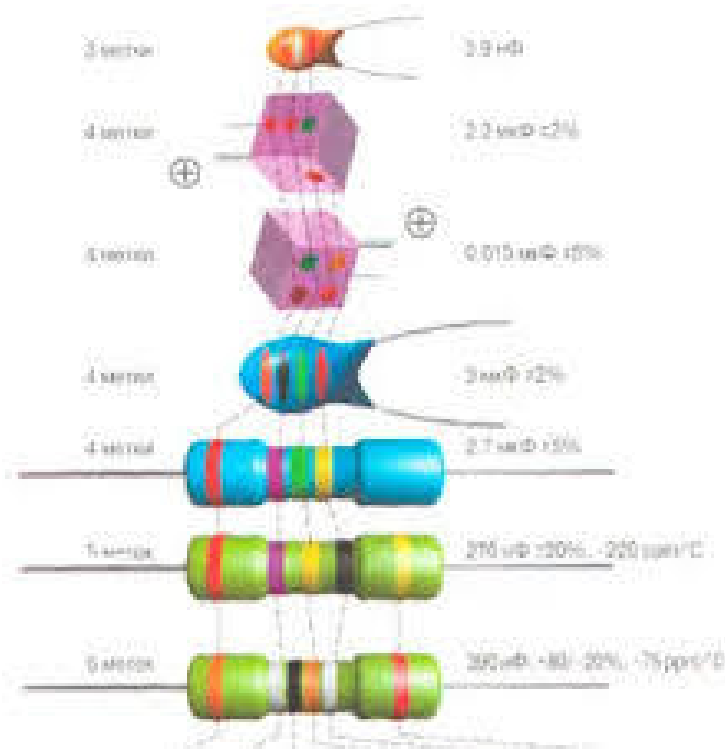


Рисунок 9.5 – Приклад маркування конденсаторів кольоровими смугами та кружками

9.7 Іоністори

У сучасній електроніці все частіше знаходять застосування іоністори - конденсатори з великою ємністю до 1000 Ф, що на 5 порядків більше, у порівнянні зі звичайними електролітичними конденсаторами (рис. 9.6). Така велика ємність цих приладів дозволяє застосовувати їх як відновлювальні джерела живлення.

Іоністори мають декілька переваг над гальванічними елементами та акумуляторами;

- високі швидкості заряду й розряду;
- простота зарядного пристрою;
- мала деградація параметрів навіть після сотень тисяч циклів заряду/розряду;
- мала вага в порівнянні з електролітичними конденсаторами подібної ємності;
- висока ефективність з ККД > 95 %;
- неполярні прилади (хоча на іоністорах і зазначені «+» і «-», але це робиться для позначення полярності залишкової напруги після його заряду на заводі-виробнику).

Недоліки іоністорів, як джерел живлення:

- напруга залежить від ступеня зарядженості;
- малий термін служби (сотні годин) на граничних ЕРС заряду;
- великий внутрішній опір (до 100 Ом);
- значно більший саморозряд;
- більш ніж на порядок менша кількість енергії на одиницю маси, у порівнянні з гальванічними елементами.



Рисунок 9.6 – Приклад сучасного іоністора з ємністю 500 Ф

Конденсатори знаходять широке застосування у різноманітних електронних та електричних схемах для розділення постійного й змінного струмів, фільтрації різних сигналів, налаштування частотних властивостей пристроїв та інше. Детально ці питання є предметом вивчення в майбутньому в багатьох освітніх компонентах освітньої програми за науковим напрямком «Електроніка».

10 ІНДУКТИВНІСТЬ ТА КОТУШКИ ІНДУКТИВНОСТІ

10.1 Енергія магнітного поля та індуктивність

При протіканні електричного струму через будь-який компонент електричних кіл навколо них виникає магнітне поле, яке містить певну енергію. Величина енергії створеного магнітного поля визначається конструкцією компоненту, його розмірами та тими матеріалами, з яких він виготовлений. **Фізичний параметр, який характеризує здатність створення магнітного поля та інтенсивність запасання його енергії в даному компоненті електроніки, називають індуктивністю.** При цьому відмітимо, що ця властивість компонентів проявляється тільки при протіканні електричного струму через них. Таким чином, обов'язковою умовою накопичення енергії магнітного поля в електронних елементах є протікання в них певних електричних процесів у вигляді електричного струму. На відміну від цього, у конденсаторах енергія електричного поля може зберігатися досить довго і при відсутності будь-яких електронних процесів у них.

Індуктивність компонентів електроніки здебільшого позначається літерою системі СІ вимірюється в одиницях, яку називають генрі (Гн).

10.2 Індуктивні компоненти електроніки. Котушки індуктивності

Будь-який компонент електроніки, який проводить електричний струм, має свою індуктивність. Але зазвичай її величина дуже мала, щоб чинити суттєву відчутну дію на електричні процеси в електронних схемах. Тому при необхідності індуктивні компоненти електроніки виготовляють спеціально. І основою таких елементів є котушки індуктивності – пасивні компоненти у вигляді певної основи, на яку намотано витки провідника, покритого ізоляцією (рис. 10.1). Тобто, прості котушки індуктивності за будовою є аналогом швейних катушок, у яких замість ниток намотано, як правило, мідний провід. У загальному, ті **компоненти електроніки, які спеціально створюються**

для функціонування з використанням енергії магнітного поля, називають індуктивними або індуктивностями. Умовні схемні позначення котушок індуктивності наведено на рисунках додатку А.



Рисунок 10.1– Зовнішній вигляд індуктивних компонентів електроніки на основі котушок індуктивності

Форма котушок індуктивних компонентів зумовлена тим, що кожен окремий виток дроту має свою невелику індуктивність і створює своє магнітне поле, яке концентрується переважно в центрі даного витка. Якщо ж тепер намотати із таких витків котушку, то її індуктивність буде приблизно дорівнювати сумі індуктивностей всіх витків. Відповідно, у середині котушки буде концентруватися основна енергія магнітного поля всіх витків котушки. Якщо ж довжина котушки набагато більша за її діаметр, то напруженість магнітного поля за межами котушки буде малою.

Каркас, на який намотують котушки індуктивності може мати різну форму. Але основними формами є: прямокутна, циліндрична та у вигляді тороїда. Часто для збільшення величини індуктивності котушки в середину їхнього каркасу монтують осердя із різних матеріалів. Спеціальні котушки індуктивності, які використовуються в певних, переважно силових електричних колах, називають дроселями.

Величина індуктивності конкретної намотаної котушки залежить від числа витків провідника в ній, форми, довжини та діаметра котушки, наявності та типу осердя; наявності та типу екрану навколо

неї. Із певним наближенням індуктивність котушки можна розрахувати за співвідношенням:

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot S}{l},$$

де N – кількість витків котушки;

μ – абсолютна магнітна проникність матеріалу осердя котушки;

S – площа поперечного перерізу осердя;

l – довжина одного витка обмотки котушки.

На друкованих платах електронних пристроїв іноді роблять плоскі «котушки» індуктивності. Для цього геометрія доріжки провідника на платі виконується у вигляді круглої чи прямокутної спіралі, хвилястої лінії або меандра.

10.3 Фізичні властивості індуктивностей

1. Електрорушійна сила індукції. При зміні сили струму в індуктивному елементі на його кінцях виникає ЕРС індукції, яка пропорційна індуктивності котушки та швидкості зміни сили струму в ній:

$$e(t) = -L \frac{di}{dt}. \quad (10.1)$$

Знак "мінус" у формулі показує, що ЕРС індукції завжди направлена так, щоб протидіяти зміні сили струму. При зростанні сили струму, ЕРС індукції намагається сповільнити його, при спаданні ж струму – навпаки підтримує струм у котушці. Саме такі інерційні властивості котушок індуктивності зумовлюють їх широке використовуються в електронних схемах. При цьому виникаюча ЕРС індукції $e(t)$ буде впливати на величину напруги, яка утворюється на клеммах котушки індуктивності при протіканні через неї змінного струму. Відмітимо, що математичні вирази типу 10.1, які функціонально пов'язують між собою електричний струм і напругу на пасивних електронних елементах, часто називають компонентними співвідношеннями.

2. Струми та напруги на індуктивних компонентах. Записане вище математичне співвідношення вказує на особливий зв'язок між напругою і струмом на ділянках електричних кіл, які містять індуктивні елементи. Із нього слідує, що індуктивність буде

зумовлювати появу додаткових напруг на компонентах ділянок електронного кола лише при змінних електронних процесах в них. Якщо ж через ділянку кола протікає постійний електричний струм, то наявність індуктивних властивостей компонент не проявляється у протіканні електричних процесів у них. Таким чином, при протіканні постійного струму в електричному колі з ідеальною індуктивністю, саму індуктивність можна замінити простим провідником з нульовими активним опором та ємністю.

Відповідно із співвідношенням (10.1), функції зміни в часі величин напруги і струму в індуктивних компонентах зв'язані диференціальним законом. Це означає, що ці функції можуть бути досить різні і мати різні графіки. Якщо в резистивному елементі ці графіки однотипні і мають вигляд двох синхронізованих прямих (рис. 10.2а), то графіки струму і напруги на індуктивному елементі можуть значно відрізнятись (рис. 10.2б).

3. Миттєва потужність струму в індуктивних компонентах. При наявності в електричному колі індуктивних елементів потужність електричного струму в них може постійно змінюватися в часі. Тому для опису фізичних процесів в таких колах вводять **функцію миттєвої потужності $p(t)$, яка показує потужність електричного струму в кожен миттєвий момент часу.** За визначенням

$$p(t) = u(t) \cdot i(t).$$

Застосовуючи наведене визначення до індуктивних компонентів та враховуючи (10.1), отримаємо:

$$p(t) = -L \cdot i(t) \cdot [d(i)/dt].$$

Оскільки похідна функції струму може мати як додатні, так і від'ємні значення (а також нульове значення), то і миттєва потужність у колах з індуктивностями може мати також ці типи значень. При цьому, якщо миттєва потужність додатна, то індуктивний елемент забирає енергію з електричного кола та передає й накопичує її у своєму магнітному полі. Якщо ж ця потужність від'ємна, то магнітне поле повертає свою енергію до електричного кола.

4. При протіканні в індуктивному елементі постійного електричного струму силою I , у ньому зосереджується постійна енергія магнітного поля з величиною

$$W = 0,5 \cdot L \cdot I^2.$$

5. Реактивний опір. При проходженні через індуктивний елемент змінного або імпульсного струму з частотою f , він чинить такому струму протидію, яку називають індуктивним реактивним електричним опором. Величина цього опору визначається із формули:

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L.$$

6. Активний опір. Оскільки ті частини індуктивних елементів, по яких протікає електричний струм, виготовляють із відповідних провідних матеріалів, то вони мають свій електричний опір, який називають активним опором. Таким чином, активний опір R індуктивного елемента визначається лише провідністю тих його елементів, по яких протікає електричний струм. Зокрема, для котушки індуктивності активним опором є електричний опір всього провідника, яким намотано її витки. У той же час реактивний індуктивний опір X_L залежить від всіх параметрів електронного компонента (матеріалів, розмірів, форми та інше), вплив яких сумарно сконцентрований у такій величині даної котушки як L .

10.4 Типи котушок індуктивності

Більшість котушок можна поділити на такі основні типи (рис. 10.3).

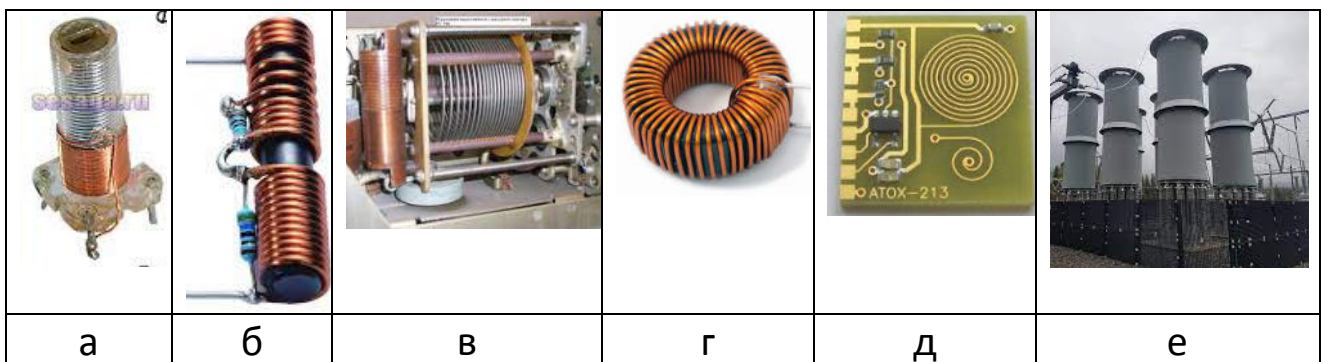


Рисунок 10.3 – Основні типи котушок індуктивності: контурні (а), котушки зв'язку (б), варіометри (в), дроселі (г), на друкованих платах (д), високовольтні реактори (е)

1. Контурні котушки індуктивності, як правило, використовуються спільно з конденсаторами для отримання резонансних контурів. Такі котушки повинні мати високу стабільність параметрів, точність і добротність.

2. Котушки зв'язку застосовують для забезпечення індуктивного зв'язку між окремими колами, каскадами і блоками електронних схем. До таких котушок не ставляться жорсткі вимоги щодо добротності й точності, тому вони виконуються з тонкого дроту у вигляді двох обмоток невеликих габаритів.

3. Варіометри. Індуктивність таких котушок можна змінювати у процесі експлуатації для переналаштування коливальних контурів.

4. Дроселі. Це котушки індуктивності, які мають високий опір до змінного струму і малий опір до постійного. Застосовуються переважно в колах живлення електронних пристроїв як елементи захисту від завад та перешкод. Для мереж змінного струму з частотами 50-60 Гц дроселі намотують на осердях з трансформаторної сталі. На більш високих частотах також застосовуються осердя з інших матеріалів.

5. Котушки у вигляді доріжок друкованих плат. Такі «котушки індуктивності» знаходять використання в деяких надшвидкодійних цифрових пристроях для узгодження часу поширення групи сигналів між компонентами електронної схеми.

6. Реактори високовольтних ліній електропередач використовують як струмообмежувальні компоненти.

10.5 Технічні параметри котушок індуктивності

До основних технічних параметрів котушок індуктивності належать:

- номінальне значення індуктивності;
- допустиме відхилення індуктивності від номінального;
- максимальний струм котушки;
- номінальна добротність.

Крім вказаних, у багатьох пристроях слід також враховувати й інші параметри котушок індуктивності, а саме опір втрат, температурний коефіцієнт індуктивності, власна ємність котушки, робочий діапазон температур та інші.

Коротко розглянемо основні технічні параметри котушок індуктивності.

1. Номінальне значення індуктивності. У залежності від призначення індуктивність котушок може бути від декількох

наногенрі до декількох десятків генрі. Котушки індуктивності значно рідше зустрічаються в сучасній електроніці і тому вони серійно випускаються значно вужчою номенклатурою, у порівнянні з конденсаторами та резисторами. Однак для них застосовують ті ж ряди номіналів, що і для резисторів та конденсаторів. Переважне використання при цьому мають котушки з номіналами рядів E6 ($\pm 20\%$); E12 ($\pm 10\%$) та E24 ($\pm 5\%$).

2. Допустиме відхилення (допуск або точність) індуктивності котушок. Для прикладу відмітимо, що для сучасних контурів з резонансним налаштуванням точність індуктивностей котушок повинна бути не меншою за 0,2 %. У свою чергу, для котушок зв'язку та дроселів, які працюють не на резонансних частотах, допуск може становити десятки відсотків. Таким чином, ряд допусків більшості котушок індуктивностей охоплює ті ж класи від 0,2 % до 30 %, що і в резисторів.

3. Максимальний струм котушки індуктивності визначається площею поперечного перерізу провідника, яким намотано витки, та тією кількістю теплоти, яку може розсіювати котушка без сильного її нагріву.

4. Добротність котушки дорівнює відношенню її реактивного та активного опорів, тобто Практично добротність котушок сучасної електроніки перебуває в межах від 50 до 300. Чим вища добротність котушки, тим більша частина енергії електричного струму трансформується котушкою в енергію магнітного поля і тим меншими є теплові втрати енергії в ній.

5. Опір втрат котушки, який визначається цілим рядом складових, основною із яких є розглянутий вище активний опір котушки.

10.6 Маркування котушок індуктивностей

Для маркування котушок індуктивностей застосовують ті ж методи, що і для конденсаторів. При цьому переважно кодуються номінальне значення індуктивності та допустиме відхилення від номінального значення.

При прямому маркуванні надписами номінальне значення кодується цифрами, а допуск – літерами. Величина номіналу при

цьому задається в мікрогенрі (мкГн). Якщо ж індуктивність менша за 10 мкГн, то застосовують літеру R, яка відіграє роль десяткової коми. Аналогічно для індуктивностей менше за 1 мкГн з цією метою використовують літеру N. Слід відмітити, що іноді котушки індуктивностей маркуються безпосередньо у мікрогенрі- тоді в їхньому коді буде літера K.

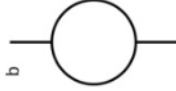
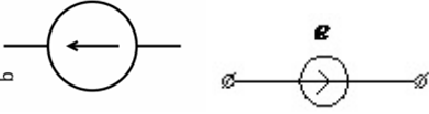
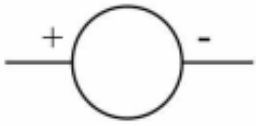

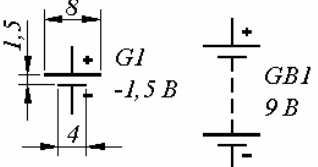
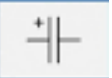
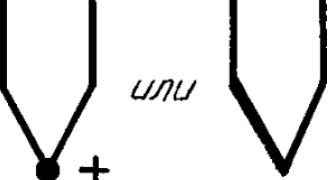
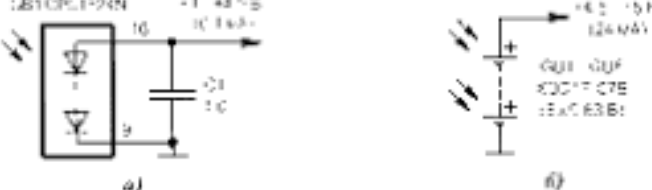
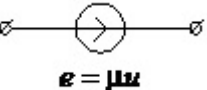
Застосовується також кольорове маркування котушок індуктивності, яке аналогічне кольоровому маркуванню конденсаторів.


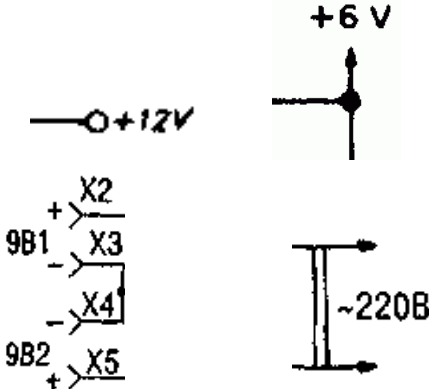
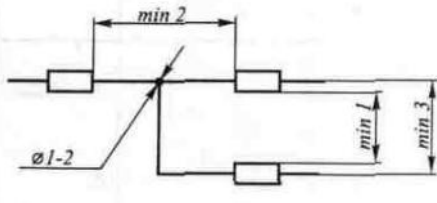
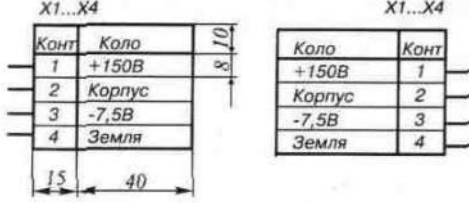
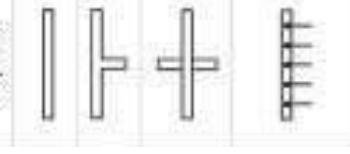
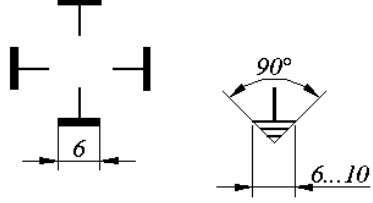
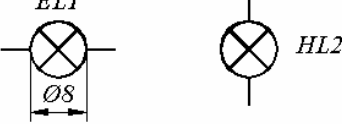
10.7 Позначення котушок індуктивності на схемах

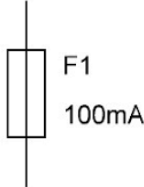

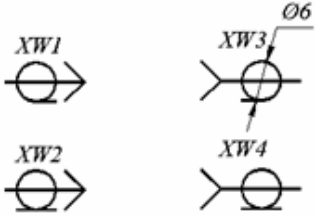
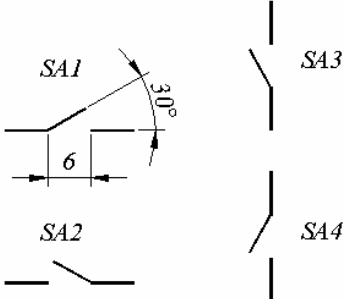

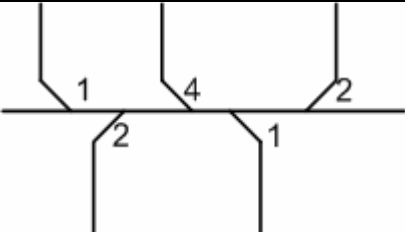
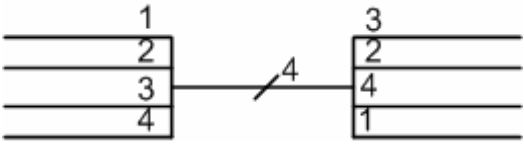
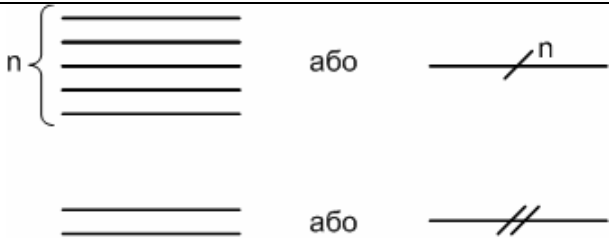
Основні схемні позначення котушок індуктивності наведено в додатку А. На умовних схемних значках кількість півкіл (дуг) може бути довільною, але не менше двох. Найчастіше кількість півкіл обирають рівною чотирьом. Якщо необхідно показати відвід від котушки, то лінію електричного зв'язку приєднують у місці сполучення півкіл або посередині одного з них (як на рис. А.33). При цьому відмітимо, що крапку в місці сполучення не ставлять.

Літерно-цифрова позиційна позначка котушок і дроселів містить літеру L і порядковий номер елемента по схемі. Поряд (вище або справа) можна вказувати також індуктивність котушки, зазвичай у мілігенрі або мікрогенрі.

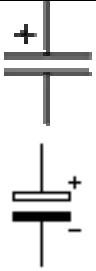
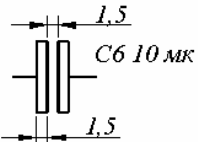
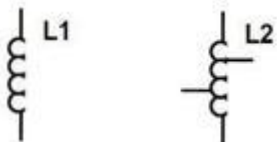
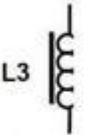
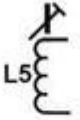
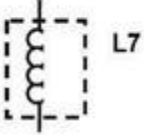
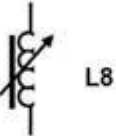
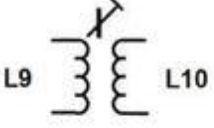
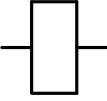
ДОДАТОК А
СХЕМНІ ПОЗНАЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРИКИ ТА
ЕЛЕКТРОНІКИ

Схемні позначення (СП)	Пояснення до СП
Джерела ЕРС, джерела живлення, генератори	
	Рисунок А.1 - Загальне СП джерел ЕРС та джерел живлення
	Рисунок А.2 - СП ідеальних джерел ЕРС. Стрілка показує на позитивну клему джерела ЕРС або на клему із більшим електричним потенціалом
	Рисунок А.3 – Базове СП джерел прикладеної постійної напруги
	Рисунок А.4 - СП джерел змінної ЕРС або змінної напруги
	Рисунок А.5 - СП гальванічних елементів (а), гальванічних батарей та акумуляторів (б)
	Рисунок А.6 - СП іоністорів
	Рисунок А.7 - СП термоелектричних перетворювачів
	Рисунок А.8 - СП сонячних батарей
	Рисунок А.9 - СП неавтономного джерела ЕРС, керованого напругою. Поряд зі значком записують функцію керування. Для наведеного на рисунку прикладу μ – коефіцієнт керування, а u – напруга на деякому

	елементі схеми
	Рисунок А.10 - СП ідеальних джерел струму. Стрілки показують позитивний напрямок струму у джерелі
	Рисунок А.11 – Різні варіанти позначення під'єднання джерел живлення
Загальні позначення	
	Рисунок А.12 - СП провідників (ліній електричного зв'язку) та геометричні параметри зображення й розміщення СП на електричній принциповій схемі
	Рисунок А.13 – Графічне зображення на схемах рознімачів у вигляді таблиці
	Рисунок А.14 - СП шин: одна лінійна, розгалуження шин, перетин шин без з'єднання, під'єднання до шини окремих ліній електричного зв'язку
	Рисунок А.15 - СП корпусу (зліва) та заземлення електронного приладу або схеми
	Рисунок А.16 - СП ламп розжарювання освітлювальна (а) та сигнальна (індикаторна) (б)

	<p>Рисунок А.17 – СП плавкого запобіжника</p>
	<p>Рисунок А.18 – СП однопровідного рознімного з'єднання (штир та гніздо)</p>
	<p>Рисунок А.19 – СП однопровідного коаксіального кабельного з'єднання (штир та гніздо)</p>
	<p>Рисунок А.20 – СП замикаючих контактів вимикача</p>
<p>SV1, SV2</p> 	<p>Рисунок А.21 – СП вимикачів кнопкових натискних з замикаючим та розмикаючим контактом</p>
	<p>Рисунок А.22 – СП каналу групового зв'язку (багатожильного джгута) з відгалуженням окремих ліній (ГОСТ 2.751 - 73)</p>
	<p>Рисунок А.23 – СП каналу групового зв'язку з відгалуженням та злиттям окремих ліній зв'язку (ГОСТ 2.751 - 73)</p>
	<p>Рисунок А.24 – Спрощення СП ліній групового зв'язку, якщо не порушується порядок слідування ліній (ГОСТ 2.751 - 73)</p>
<p>Резистори</p>	

		<p>Рисунок А.25 – Базове СП резисторів постійного опору</p>
		<p>Рисунок А.26 – СП резисторів змінного опору</p>
		<p>Рисунок А.27 – СП налагоджувальних резисторів</p>
<p>Конденсатори</p>		
		<p>Рисунок А.28 – Базове СП конденсаторів постійної ємності</p>
		<p>Рисунок А.29 – Базове СП конденсаторів змінної ємності</p>
		<p>Рисунок А.30 – Базове СП налагоджувальних конденсаторів</p>

	<p>Рисунок А.31 – Базове СП електролітичних поляризованих конденсаторів</p>
	<p>Рисунок А.32 – Базове СП електролітичних неполяризованих конденсаторів</p>
<p>Індуктивності</p>	
	<p>Рисунок А.33 – Базове СП котушок індуктивності без (L1) та з додатковими відводами від обмоток (L2)</p>
	<p>Рисунок А.34 – Базове СП котушок індуктивності з осердям</p>
	<p>Рисунок А.35 – Базове СП налагоджувальних котушок індуктивності</p>
	<p>Рисунок А.36 – Базове СП екранованих котушок індуктивності</p>
	<p>Рисунок А.37 – Базове СП котушок індуктивності змінної індуктивності</p>
	<p>Рисунок А.38 – Базове СП двох індуктивно зв'язаних котушок з налаштуванням величини зв'язку між ними</p>
	<p>Рисунок А.39 – Базове СП котушок електромагнітних пристроїв</p>

Додаток Б ФІЗИКА ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ

Б.1 Напруженість електричного поля

Досліди з передачі сигналів показують, що коли в будь-якій точці простору з'являється носій електричного заряду, то довкола цього заряду з'явиться і електричне поле. Таким чином, **навколо кожного зарядженого тіла у просторі існує своє електричне поле**. Величину цього поля в певній точці простору А характеризують вектором напруженості $\vec{E}(A)$. При цьому умовно вважають, що напрямок вектора напруженості завжди направлений від позитивних зарядів до негативних.

Як вже було відмічено в першому розділ, основною властивістю електричного поля є те, що на всякий заряд, поміщений у це поле, діє певна сила, яка не залежить від швидкості руху заряду. Фізичною величиною, яка характеризує таку силову дію електричного поля на заряд, є напруженість електричного поля \vec{E} . **Улюбій точці простору (рис. Б.1) напруженість електричного поля визначається як відношення сили \vec{F} , яка дія на пробний точковий позитивний заряд, поміщений у цю точку, до величини цього заряду Q , тобто**

$$\vec{E} = \vec{F} / Q.$$

(Б.1)

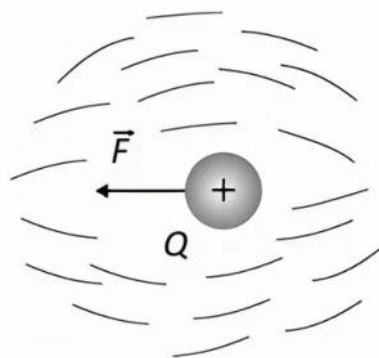


Рисунок Б.1 – Визначення силової характеристики електричного поля – його напруженості

У наведеному вище співвідношенні слід враховувати й знак заряду Q . Зокрема, якщо в електричне поле поміщено тіло з негативним зарядом, то напрям дії сили на цей заряд буде протилежний напрямку вектора напруженості цього поля.

Як слідує із визначення, напруженість електричного поля є величина векторна. Напрямок цього вектора в кожній точці простору задається напрямком сили, яка діє на позитивний пробний заряд, поміщений у дану точку. Наприклад, для електричного поля точкового заряду, розміщеного у вакуумі, вектор напруженості направлений вздовж радіус-вектора \vec{r} , проведеного від точкового заряду до точки А, у котрій вимірюється ця напруженість (рис. Б.2). При цьому вектор напруженості електричного поля позитивного точкового заряду направлений від заряду, а для негативного – до заряду.

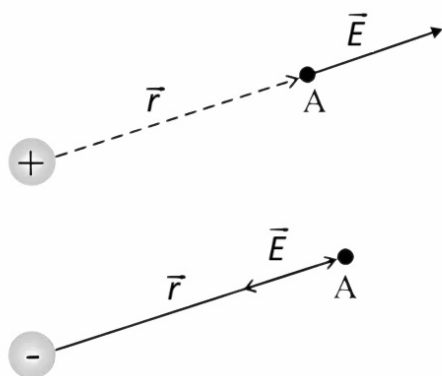


Рисунок Б.2 – Напруженості електричних полів точкових зарядів протилежних знаків у точці А простору

Розглянуте поле навколо точкового заряду є найпростішим прикладом електричного поля. У цьому випадку, використовуючи закон Кулона, напруженість електричного поля може бути задана аналітично для будь-якої точки простору таким співвідношенням:

$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^3} \vec{r}. \quad (\text{Б.2})$$

У практичній електроніці напруженість електричного поля вимірюють у В/м.

Важливою властивістю електричного поля є його незмінність при внесенні у простір цього поля додаткових нових електричних зарядів. При цьому до існуючого електричного поля додаються електричні поля внесених зарядів. Це дозволяє легко знаходити напруженість сумарного електричного поля системи заряджених тіл, які довільно розміщені у просторі. Для цього слід визначити в заданій точці напруженості електричних полів від кожного зарядженого тіла і після їх векторно додати. На рис. Б.3 наведено приклад використання властивості суперпозиції напруженості електричних полів для

системи із двох різнойменних точкових зарядів Q_1 та Q_2 . Напруженість \vec{E} сумарного електричного поля такої системи в точці простору А дорівнює векторній сумі напруженості електричного поля першого заряду \vec{E}_1 та другого заряду \vec{E}_2 , тобто $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$.

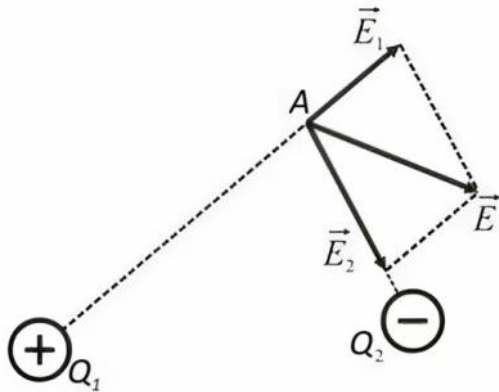


Рисунок Б.3 – Демонстрація принципу суперпозиції електричних полів на прикладі системи двох точкових зарядів

Б.2 Силові лінії електричних полів

Для повного опису електричного поля необхідно в кожній точці простору задати вектор його напруженості. Це можна зробити аналітично у вигляді формули, яка задає залежність величини \vec{E} від координат точки поля в певній системі координат. Для електричного поля точкового заряду така залежність приведена у вигляді формули (Б.2). Але електричне поле можна описати і графічно.

Для графічного зображення електростатичних полів використовують поняття силових ліній. **Силовими лініями електричного поля називають направлені криві, дотичні до яких улюбій точці простору співпадають з напрямом вектора напруженості \vec{E}** (рис. Б.4). Напрямок силових ліній визначають за простим правилом: силові лінії електричного поля завжди розпочинаються на позитивному заряді (або на безкінечності) і закінчуються на негативному заряді (або на безкінечності) (рис. Б.5).

Практично силову лінію можна провести через будь-яку точку простору з електричним полем. При цьому вони мають важливу властивість: силові лінії електричного поля ніде не перетинаються.

За допомогою силових ліній зображають не тільки напрямок, але і величину напруженості електричного поля. При цьому спрощено можна вважати, що кількість силових ліній, які проходять

через одиницю поверхні, перпендикулярної до силових ліній, пропорційна величині напруженості поля в даній точці простору. Зокрема, з рис. Б.5 зрозуміло, що максимальна напруженість електричного поля реалізується біля заряджених тіл та у просторі між ними.

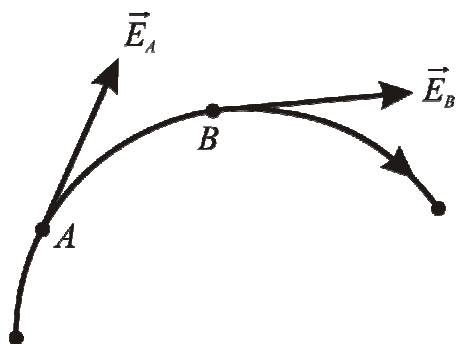


Рис. Б.4. – Графічне зображення електричного поля за допомогою силових ліній

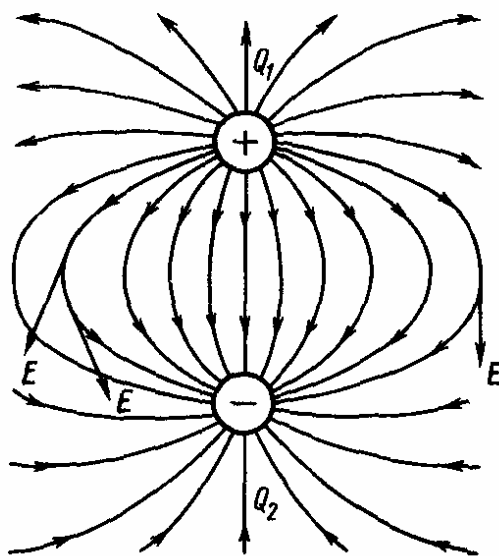
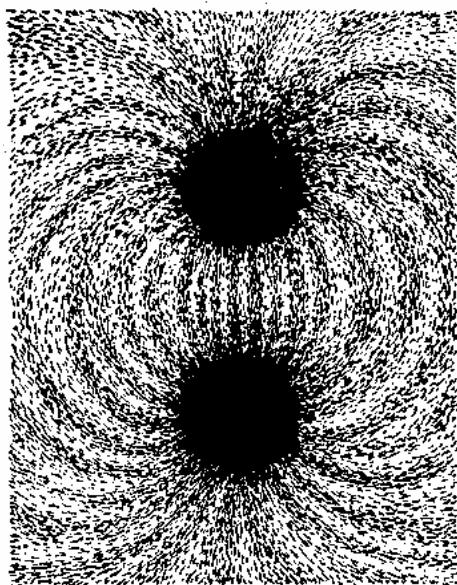


Рис. Б.5. – Просторова картина та діаграма силових ліній електричного поля системи із позитивного та негативного точкових зарядів

Зображуючи силові лінії електричного поля, ми отримуємо своєрідні просторові карти цього поля, які відразу наглядно показують, чому дорівнює напруженість у різних місцях поля і як вона змінюється у просторі. Внаслідок великої наочності цей спосіб представлення електричних полів широко застосовують в електротехніці та електроніці.

Б.3 Однорідні електричні поля

Розглянемо електричне поле між розділеними між собою двома паралельними металічними пластинами, зарядженими різнойменними зарядами (тобто плоский конденсатор). Якщо відстань між пластинами мала в порівнянні із розмірами пластин, то більшість силових ліній електричного поля такої системи, які виходять із однієї пластини, закінчуються на другій пластині (рис. Б.6). Слід звернути увагу на те, що в середній частині конденсатора силові лінії мають вигляд прямих паралельних ліній, розміщених з однаковою густиною. Відповідно з визначенням силових ліній це означає, що **напруженість поля між пластинами плоского конденсатора однакова в різних точках простору. Такі електричні поля називаються однорідними.**

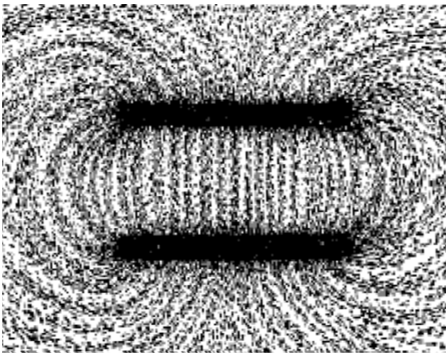


Рис. Б.6 – Просторова картина силових ліній електричного поля плоского конденсатора

На рис. Б.6 також видно, що поблизу країв пластин конденсатора силові лінії викривляються, тобто поле робиться неоднорідним. Відмітимо також, що на розглянутих рисунках силові лінії біля поверхні металічних пластин перпендикулярні до них. Така властивість електричних полів характерна для любого провідника. Якби напруженість поля була б не перпендикулярна до поверхні провідних пластин, то існувала б складова електричного поля, направлена вздовж поверхні (рис. Б.7). Під дією цієї складової електрони провідника починали б рухатися вздовж поверхні, що порушувало б рівновагу електричних зарядів у системі. Таку дію електричного поля слід враховувати при практичному розгляді різноманітних електронних процесів у різних середовищах та електронних приладах.

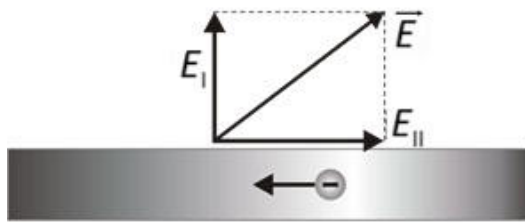


Рис. Б.7 – Вплив напрямку напруженості електричного поля на рух електронів біля поверхні провідника

Б.4 Розподіл зарядів у середині провідників

У електроніці провідники є одним із головних компонентів всіх приладів та електронних схем. Тому важливим є розуміння загального характеру розподілу електричних зарядів по їх об'єму при відсутності та при наявності зовнішнього електричного поля.

Спочатку розглянемо провідники при відсутності зовнішнього електричного поля. Якщо цей провідник не має на собі електричного заряду, то в будь-якій його внутрішній точці негативний заряд вільних електронів зкомпенсовується позитивним зарядом ядер атомів. При цьому як об'ємна ρ так і поверхнева σ густини заряду в середині провідника дорівнюють нулю. У результаті у провіднику існує рівновага зарядів і напруженість електричного поля в будь-якій точці в середині провідника рівна нулю (рис. Б.8).

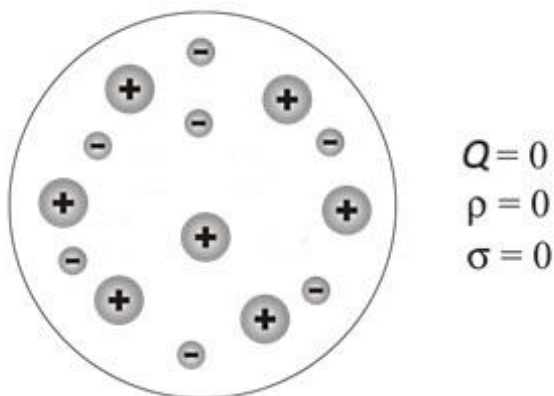
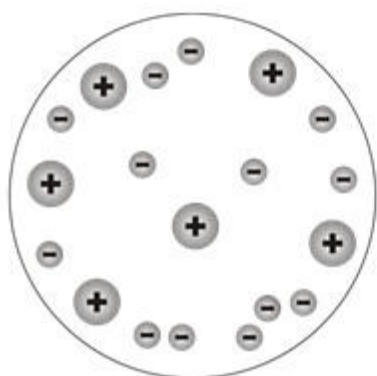


Рис. Б.8 – Розподіл зарядів у середині електрично нейтральних провідників

Якщо провідник містить на собі незкомпенсований заряд величиною Q , то внаслідок дії електричних сил цей заряд рівномірно розподіляється тільки на поверхні провідника. У результаті об'ємна густина заряду у провіднику залишається рівна нулю, але на поверхні з'являється поверхнева густина заряду $\sigma = Q/S$, де S – загальна площа поверхні провідника (рис. Б.9). При цьому сумарна напруженість

електричного поля в середині провідника лишається рівна нулю. Зовні ж провідника картина силових ліній електричного поля визначається його розмірами та формою.

Якщо із нашого зарядженого суцільного провідника видалити певну внутрішню частину, то отримаємо провідник із порожниною. Так як внутрішня частина не мала об'ємної густини заряду, то її видалення не змінить ні розподіл поля, ні розподіл вільних зарядів у середині провідника, які залишилися. Тому рівноважний розподіл зарядів у провіднику з порожниною буде таким же, як і в суцільному провіднику, тобто заряди будуть тільки на зовнішній поверхні із поверхневою густиною σ . Напруженість же електричного поля буде рівна нулю в будь-якій точці в середині самого провідника і в будь-якій точці в середині порожнини.



$$\begin{aligned} Q &\neq 0 \\ \rho &= 0 \\ \sigma &= Q/S \neq 0 \end{aligned}$$

Рис. Б.9 – Розподіл зарядів у середині заряджених провідників

Б.5 Поведінка провідників у зовнішньому статичному електричному полі

Якщо в існуюче однорідне електричне поле з напруженістю \vec{E} помістити певне тіло із провідника, наприклад, металеву пластину, то це поле починає діяти на заряджені частинки в даному середовищі. Оскільки в металах є висока концентрація вільних електронів, то під дією поля вони можуть вільно переміщатися до одного з країв пластини (рис. Б.10). На іншому ж боці пластинки буде недостача електронів, а, відповідно, тут з'явиться незкомпенсований позитивний заряд ядер. У результаті на протилежних кінцях провідника вздовж вектора напруженості зовнішнього електричного поля поступово будуть скупчуватися протилежні за знаком заряди.

Таке явище називають електричною індукцією (електростатичною індукцією), а виникаючі заряди – індукованими.

Індуковані заряди створюють у середині пластини внутрішнє електричне поле з напруженістю \vec{E}' , напрям якого буде протилежний до напрямку зовнішнього поля \vec{E} . У результаті дія внутрішнього поля на заряджені частинки в середині провідника буде поступово зкомпенсовувати дію на них зовнішнього електричного поля. Тому розділення зарядів у середині пластини триватиме до тих пір, поки індуквані заряди на поверхні пластини не створять своє електричне поле, рівне по величині зовнішньому полю. Дана ситуація буде реалізована при досягненні поверхневою густиною індукованих зарядів певної величини σ (рис. Б.10). У таких умовах сумарна напруженість електричного поля в середині пластини буде рівна (згадай принцип суперпозиції електричних полів) $\vec{E}_в = \vec{E} + \vec{E}' = 0$. Відповідно зникнуть сили, які здатні переміщувати заряджені частинки в ньому. У результаті і **в середині провідників, поміщених у зовнішнє електричне поле, напруженість поля рівна нулю.**

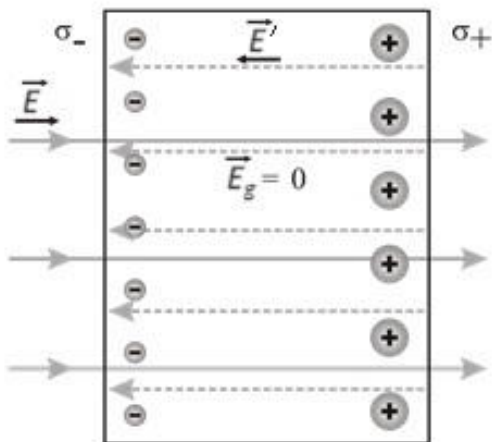


Рис. Б.10 – Явище електричної індукції провідників у зовнішньому електричному полі

Електричне поле відсутнє не лише в суцільному провіднику, але і в середині металічної оболонки (рис. Б.11), поміщеної в електричне поле. Ця властивість електричного поля широко використовується в електроніці для захисту електронних компонентів, пристроїв та цілих систем від дії сторонніх електростатичних полів. Для цього їх поміщають у металеву оболонку (металевий корпус, сітку-екран тощо).

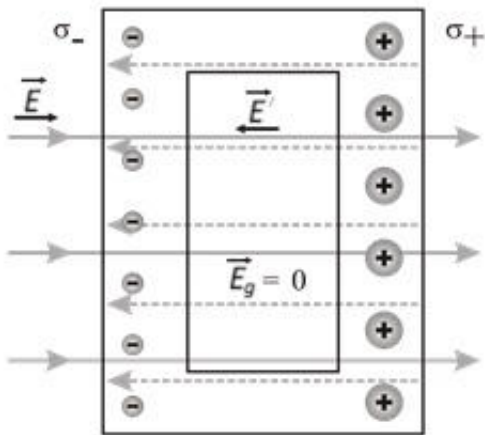


Рис. Б.11 – Електричне поле в середині металічної оболонки

Б.6 Поведінка діелектриків у зовнішньому статичному електричному полі

Діелектрики теж є важливими компонентами приладів і систем сучасної електроніки, які постійно знаходяться під дією електричних полів. Подібно провідникам, на діелектриках, поміщених у зовнішнє електричне поле, також виникають заряди, знак яких відповідає законам електричної взаємодії. Для їх вивчення розглянемо найпростіший приклад. Помістимо в електричне поле плоского конденсатора (рис. Б.12) пластину діелектрика. Матеріал діелектрика можна схематично зобразити у вигляді зібрання молекул або інших структурних одиниць, у кожній із яких зв'язані між собою рівні позитивні і негативні заряди розподіленні рівномірно по всьому їхньому об'єму (рис. Б.12а). При цьому в такому матеріалі при нормальних умовах концентрація вільних носіїв заряду дуже мала. Тому можна вважати, що під дією електричного поля в діелектрику відсутнє вільне переміщення заряджених частинок. Але у межах однієї молекули (або інших структурних частинок кристалічної ґратки) виникає зміщення різнойменних зарядів у протилежні сторони і на одному кінці молекул з'являється позитивний заряд, а на другому – негативний (рис. Б.12б). Зміщені і одночасно зв'язані між собою різнойменні заряди утворюють так званий електричний диполь. Зміщення зарядів у молекулах буде проявлятися зовні як виникнення деяких поверхневих зарядів на кінцях діелектрика (рис. Б.12б).

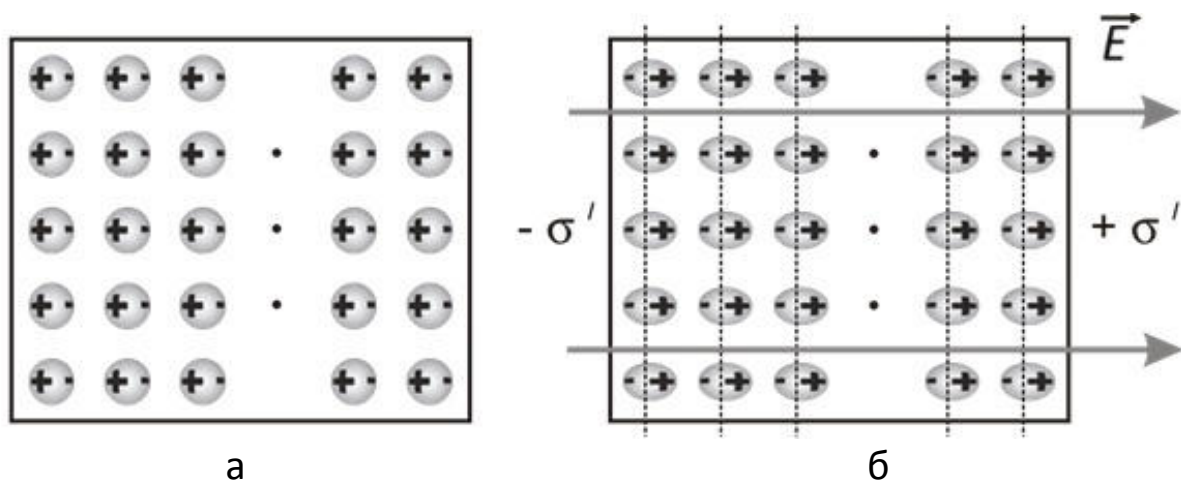


Рис. Б.12 – Явище поляризації діелектриків у зовнішньому електричному полі

Таким чином, у середні діелектрика в електричному полі кількість позитивного заряду буде рівно кількості негативного, але на одному із кінців діелектрика виникне тонкий шар з незкомпенсованим позитивним зарядом, а на іншому з'явиться незкомпенсований негативний заряд (рис. Б.12б). У результаті на протилежних кінцях діелектрика з'являються електричні полюси від чого і саме явище виникнення таких зарядів отримало назву **поляризації діелектриків**. Заряди ж, які виникають на діелектриках у зовнішньому електричному полі, називають **поляризаційними зарядами**. Зрозуміло, що чим сильніше електричне поле, тим більшими будуть величини поверхневої густини σ поляризаційних зарядів і тим більшою буде поляризованість пластини діелектрика.

Поляризовані заряди завжди створюють своє внутрішнє електричне поле \vec{E}' , яке направлене у протилежну сторону до зовнішнього поля \vec{E} . Внаслідок цього, у **середині діелектрика величина напруженості електричного поля рівна $\vec{E} - \vec{E}'$, тобто завжди менша, за величину напруженості зовнішнього поля**.

Б.7 Відмінності явищ електричної індукції провідників та поляризації діелектриків

Явище поляризації діелектриків має схожість із електричною індукцією у провідниках. Але між цими явищами є і важливі відмінності. Зокрема, роз'єднуючи в електричному полі провідник на частини, можна відокремити один від одного протилежні індукційні

заряди, і тому після зникнення поля роз'єднані частини провідника залишаються зарядженими. Роз'єднуючи ж в електричному полі частини діелектрики, ми знайдемо, що після зняття поля кожна частина діелектрика стає незарядженою. Відокремити один від одного поляризаційні заряди неможливо.

Ця відмінність пояснюється тим, що в металах негативний заряд існує в рухомому стані у вигляді електронів провідності, які можуть переміщуватися на значні відстані. Тому індукційні заряди в металах можна відділити один від одного. У діелектриках заряди протилежних знаків зв'язані один з іншим і можуть лише зміщуватися на малі відстані в межах однієї молекули або іншої структурної частинки.

Відмічені особливості будови провідників та діелектриків зумовлюють ще одну важливу відмінність. Внутрішнє електричне поле індукційних зарядів у провідниках повністю зкомпенсовує зовнішнє електричне поле. Тому в середині провідника сумарне електричне поле завжди рівне нулю. У діелектриках же внутрішнє електричне поле поляризаційних зарядів лише частково зкомпенсовує зовнішнє поле. Тому зовнішнє електричне поле завжди проникає в середину діелектриків, але напруженість його в середині діелектрика менша, ніж зовні, на величину внутрішнього поля поляризаційних зарядів.

Б.8 Вплив оточуючого заряди середовища на характеристики електричного поля

Наведені вище приклади показують, що в середовищах, поміщених в електричне поле, виникають різні електричні процеси. Ці процеси активно впливають на зовнішнє електричне поле. Тому напруженість електричного поля залежить від того оточуючого середовища, у якому розміщені індукуючі поле заряди. Для характеристики такого впливу використовують спеціальний параметр – **діелектричну проникність середовища ϵ** . Ця величина показує, що, якщо у вакуумі задана система зарядів створює в певній точці простору електричне поле напруженістю \vec{E}_0 , то в однорідному ізотропному середовищі з діелектричною проникністю ϵ напруженість електричного поля цієї системи $\vec{E} = \vec{E}_0 / \epsilon$. Тобто,

діелектрична проникність показує, у скільки разів зменшується напруженість електричного поля в середовищі, порівняно з вакуумом. Зокрема, для точкового заряду, який знаходиться в однорідному діелектричному середовищі, напруженість електричного поля буде задаватися виразом

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^3} \vec{r}.$$

Фізичні причини і інтенсивність послаблення електричного поля в речовині визначаються її структурою та характером міжмолекулярних і міжмолекулярних хімічних зв'язків. Як ми бачили, у діелектриках таке послаблення зумовлюється процесами поляризації з виникненням поляризаційних зарядів, які зменшують напруженість поля. Для порівняння в таблиці Б.1 наведено діелектричні проникності деяких однорідних середовищ, які часто використовують в електроніці.

Таблиця Б.1 – Діелектричні проникності деяких однорідних середовищ

Середовище	Діелектрична проникність
Вакуум	1
Повітря при нормальних умовах	1,000594
Трансформаторне масло	2,2
Гума	2,7
Ебоніт	2,7 – 2,9
Папір парафінований	4,3
Фарфор	5,8
Скло	5 – 10
Скло-текстоліт	5,5 – 5,2
Гетинакс	5 – 6
Кварц	3,5 – 4,5
Слюда	5,7 – 7
Кремній	11,7

Б.9 Потенціал та різниця потенціалів електричного поля

На носії заряду, поміщені в електричне поле, діють певні сили, внаслідок яких може здійснюватися переміщення цих зарядів. У такому випадку електричне поле виконуватиме роботу, а відповідно

воно має певну енергію. Тому енергетичні характеристики електричного поля є досить важливими в електроніці та електротехніці.

Основою енергетичною характеристикою є **різниця потенціалів між двома заданими точками 1 і 2 електричного поля** (рис. Б.13) $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$. Вона визначається роботою, яку виконує електричне поле по переміщенню одиничного позитивного заряду між цими точками простору. Коли між цими двома точками переміщується не одиничний заряд, а носій з величиною заряду Q і при цьому виконується робота A_{21} , то, очевидно, що $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = A_{21}/Q$.

Якщо різниця потенціалів не залежить від форми траєкторії руху зарядів, то таке електричне поле називається електростатичним. Найпростішими прикладами електростатичного електричного поля є поля, які існують навколо нерухомих заряджених тіл. Важливою властивістю електростатичних полів є рівність нулю роботи при переміщенні заряду по замкнутому контуру в даному полі.

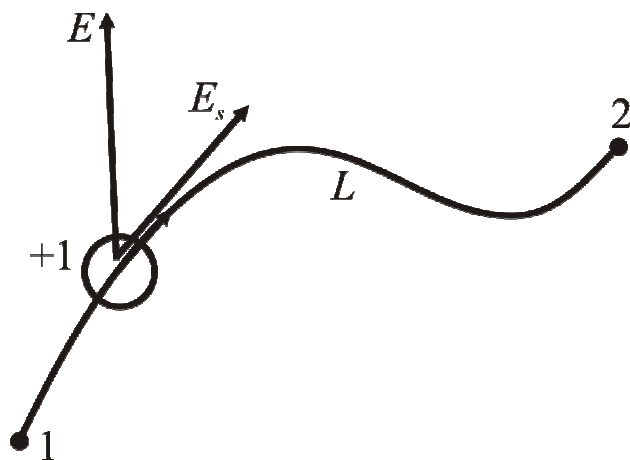


Рис. Б.13 – Прояв енергетичної характеристики електричного поля – його потенціалу – поєднати з останнім параграфом

Оскільки величина роботи однозначно задана лише тоді, коли зафіксовані дві кінцеві точки траєкторії руху заряду, то строгий фізичний зміст має саме різниця потенціалів. Проте часто використовують і поняття потенціалу електричного поля в заданій точці. Але і в цьому випадку мається на увазі різниця потенціалів з вибором фіксованої другої точки поля за домовленістю. У фізиці таку точку найчастіше вибирають на безкінечності, а в електриці та

електроніці таку умовну точку фіксують на вибраному спільному провіднику електричної схеми або на загальній шині «земля».

Величина потенціалу та різниці потенціалів вимірюється у вольтах (В).

Поняття різниці потенціалів широко використовують з двох основних причин. По-перше, опис електричного поля за допомогою потенціалу набагато простіший, ніж за допомогою напруженості поля. Напруженість поля є вектор, і тому для кожної точки поля необхідно знати три скалярні величини – складові напруженості по осях відповідної системи координат. Потенціал же – це скалярна величина, яка визначається в кожній точці одним своїм числовим значенням.

По-друге, різницю потенціалів набагато легше виміряти експериментально, ніж напруженість поля. Для вимірювання напруженості електричного поля немає зручних методів. Навпаки, для вимірювання різниці потенціалів існують різні методи і різноманітні прилади.

Б.10 Напруженість та потенціали різних заряджених тіл

Величину напруженості та потенціалу електричного поля точкового заряду влюбій точці простору на відстані r від заряду легко знайти, використовуючи співвідношення:

$$E(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}, \quad \varphi(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}. \quad (\text{Б.3})$$

Якщо заряд Q розподілений в діелектричній кулі радіусом R рівномірно по її об'єму V із об'ємною густиною $\rho = Q/V$, то в середині кулі напруженість поля та потенціал будуть рівні:

$$E(r) = \frac{\rho}{3\epsilon\epsilon_0} r, \quad \varphi(r) = \frac{\rho}{6\epsilon\epsilon_0} (3R^2 - r^2), \quad (\text{Б.4})$$

де має виконуватись нерівність $r < R$. Зовні ж кулі напруженість та потенціал поля визначатимуться виразом (Б.3) для потенціалу точкового заряду.

Якщо ж заряд Q у кулі (або сфері) радіусом R розподілений рівномірно лише по її поверхні площею S із поверхневою густиною $\sigma = Q/S$, то напруженість та потенціал електричного поля зовні такої кулі (або сфери) рівні

$$E(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}, \quad \varphi(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}, \quad (\text{Б.5})$$

де $r > R$. Тобто електричне поле аналогічне полю точкового заряду. У середині ж даної кулі (або сфери) напруженість поля рівна нулю, а потенціал є постійною величиною, яка рівна:

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R}. \quad (\text{Б.6})$$

Б.11. Еквіпотенціальні поверхні

Якщо у просторі з електричним полем об'єднати між собою ті точки, котрі мають однаковий потенціал, то ми отримаємо деяку поверхню, котру називають поверхнею рівного потенціалу або еквіпотенціальною поверхнею. Користуючись еквіпотенціальними поверхнями, можна зображати електричне поле графічно, подібно тому як ми це робиться за допомогою силових ліній (рис. Б.14). Пересікаючись з площиною рисунка, еквіпотенціальні поверхні дають еквіпотенціальні лінії (рис. Б.14). Наносячи еквіпотенціальні лінії, які відповідають різним значення потенціалу, ми отримуємо наочне представлення про характер змін потенціалу даного електричного поля у просторі.

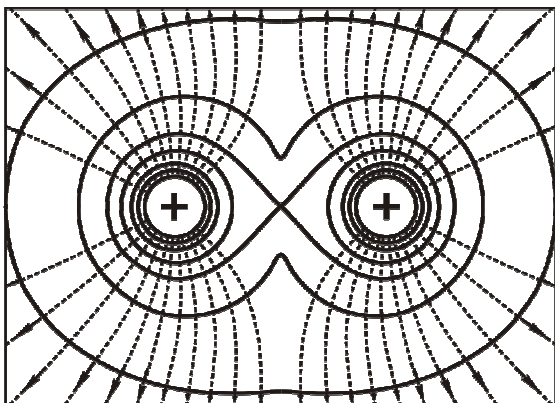


Рис. Б.14. Еквіпотенціальні лінії та силові лінії (пунктирні) електричного поля системи двох однойменних точкових зарядів

Оскільки потенціал всіх точок еквіпотенціальної поверхні однаковий, то при переміщенні зарядів по цих поверхнях не виконується робота. Тобто, при такому переміщенні на заряди не діють сили. Відповідно, сили електричного поля весь час діють на заряди в напрямку, перпендикулярному до еквіпотенціальних

поверхонь. Це також означає, що силові лінії електричного поля також завжди перпендикулярні до екіпотенціальних поверхонь та екіпотенціальних ліній (рис. Б.14), оскільки саме вони задають напрям дії сил електричного поля на заряди.

Якщо екіпотенціальні лінії проводити через фіксований інтервал зміни потенціалу, то їх густина буде пропорційна напруженості електричного поля на відповідній ділянці простору: там де лінії розміщуються густіше буде і більша напруженість електричного поля (див. рис. Б.14).

Знаючи екіпотенціальні поверхні електричного поля можна завжди побудувати його силові лінії і навпаки. Тому любе електричне поле можна зображати графічно одним із цих двох способів. Конкретний вибір одного із них визначається змістом тієї задачі, котра вирішується при цьому.

Б.12. Зв'язок між потенціалом та напруженістю електричного поля

Знаючи напруженість поля в кожній точці простору можна визначити і різницю потенціалів для будь-яких двох точок. Якщо ds – елемент переміщення заряду, а E_s – проекція вектора напруженості поля на напрямок ds (рис.Б.13), то за визначенням напруженості, як силової характеристики електричного поля, робота при переміщенні заряду Q на відрізок ds : $dA = QE_s ds$. Тому загальна різниця потенціалів точок 1 і 2 дорівнює

$$\Delta\varphi_{12} = \int_1^2 (dA/Q) = \int_1^2 E_s ds . \tag{Б.7}$$

У наведеному виразі для електростатичних полів інтегрування можна проводити вздовж будь-якого контуру L , який з'єднує розглянуті точки в напрямку від точки 1 до точки 2 (див. рис. Б.13).

Можна легко розв'язати і обернену задачу: по відомому розподілу потенціалу електричного поля в кожній точці простору знайти і напруженість цього поля в кожній точці. При розв'язуванні цієї задачі в загальному випадку неоднорідного поля розглядувані дві точки 1 і 2 (рис. Б.13) слід вибирати нескінченно близько одну від

одної, щоб можна було вважати напруженість поля у всіх точках відрізка ds постійною. Тоді можна записати:

$$E_s = -\frac{d\varphi}{ds}. \quad (\text{Б.8})$$

Похідна яка стоїть у правій стороні рівняння, виражає інтенсивність зміни потенціалу у вибраному напрямку. Таким чином, проекція вектора напруженості електричного поля на даний напрямок у просторі рівна інтенсивності зміни потенціалу в цьому напрямку з протилежним знаком.

Останнє співвідношення можна також виразити за допомогою поняття градієнта потенціалу. Градієнтом будь-якої скалярної величини φ у векторному аналізі називають вектор, який визначає напрямок та інтенсивність зміни величини φ в заданій точці простору. Величина цього вектора рівна зміні величини φ при переміщенні на одиницю довжини переміщення у вибраному напрямку простору. Цей вектор позначається символом $\text{grad}\varphi$. Звідси випливає, що напруженість електричного поля в певній точці простору дорівнює градієнту потенціалу в цій точці з протилежним знаком:

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi. \quad (\text{Б.9})$$

Таким чином, знаючи розподіл потенціалу електричного поля у просторі, ми завжди можемо визначити і напруженість цього поля. Визначення напруженості електричного поля через потенціал особливо просте, якщо поле однорідне, наприклад, коли воно створюється плоским конденсатором. Тоді, якщо $\Delta\varphi$ – різниця потенціалів між пластинами конденсатора, а d – відстань між ними, то

$$E = \Delta\varphi/d. \quad (\text{Б.10})$$

Зрозуміло, що вектор напруженості в цьому випадку направлений перпендикулярно до площини пластин.

Співвідношення (Б.10) використаємо для визначення одиниці напруженості електричного поля. Вона задається напруженістю такого однорідного електричного поля, у якому різниця потенціалів на 1 м довжини силової лінії рівна 1 В. Ця одиниця має назву вольт на метр (В/м).

Наближення однорідного електричного поля часто використовують для аналізу процесів в електричних колах електронних систем. Оскільки при такому наближенні $\vec{E} = \text{const}$, то у

всіх точках такого поля на носії заряду діє одна і та ж постійна сила $\vec{F} = \vec{E} \cdot Q$, направлена вздовж силових ліній поля. Саме ця сила і виконує роботу A_{21} по переміщенню заряду. Тоді, при переміщенні заряду від точки 1 до точки 2 величина виконаної електричним полем роботи $A_{21} = F\Delta s$. Відповідно, для такого поля отримуємо просте співвідношення для різниці потенціалів

$$\Delta\varphi = F\Delta s/Q = EQ\Delta s/Q = E\Delta s. \quad (\text{Б.11})$$