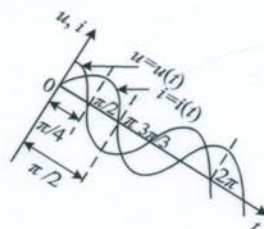
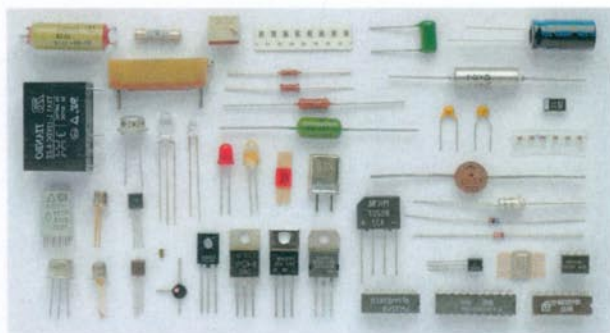


Й. Й. Білинський, О. П. Білилівська

ВСТУП ДО ФАХУ «ЕЛЕКТРОНІКА»



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Й. Й. Білинський, О. П. Білилівська

ВСТУП ДО ФАХУ «ЕЛЕКТРОНІКА»

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2016

УДК 621.38(075)

ББК 32.85я73

Б61

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 12 від 28.04.2016 р.)

Рецензенти:

О. Т. Кожухар, доктор технічних наук, професор

О. Г. Шайко-Шайковський, доктор технічних наук, професор

В. М. Кичак, доктор технічних наук, професор

Білінський, Й. Й.

Б61 Вступ до фаху «Електроніка»: навчальний посібник / Й. Й. Білінський, О. П. Білилівська. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – 64 с.

Посібник призначений для студентів спеціальності «Електроніка». У ньому розглянуті процеси в електричних та магнітних полях, структура та принципи роботи основних приладів електронної техніки. Зокрема, описані лінійні та нелінійні елементи електричних кіл (як постійного, так і змінного струму), наведені системи їх маркування, а також висвітлені базові поняття аналогової та цифрової електроніки. Матеріал посібника викладений у шести розділах, кожен з яких, для закріплення знань студентів із базового курсу, доповнений прикладами типових практичних завдань, запитаннями та задачами.

УДК 621.38(075)

ББК 32.85я73

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Природа електричних явищ	5
2 Лінійні елементи і вимірювання в електричних колах	16
3 Змінний електричний струм	25
4 Нелінійні елементи в електричних колах	31
5 Побудова аналогових електронних схем	40
6 Цифрова електроніка	48
Список літератури	56
Глосарій	57
Додаток А	62

ВСТУП

Електроніка – це галузь науки і техніки, яка займається явищами взаємодії електронів з електромагнітними полями та методами створення електронних приладів і пристроїв для перетворення електромагнітної енергії (як правило, для прийому, передавання, оброблення та зберігання інформації).

На сьогодні електроніка стала невід'ємною складовою нашого життя і розвивається надзвичайно швидкими темпами. Але використання фізичних процесів, які були покладені в основу роботи електронних приладів кілька десятиліть тому, залишається актуальним і в наш час. З іншого боку, вартами уваги є сучасні електронні прилади та тенденції їх розвитку.

Тому основна мета посібника – ознайомити студентів з колом питань, якими займаються фахівці в галузі електроніки, сформувати основу для вивчення фундаментальних дисциплін і практичної роботи з матеріалами, елементами та приладами електронної техніки, яка передбачена вже на першому році підготовки.

Навчальний посібник розроблений відповідно до навчальних та робочих програм дисципліни «Вступ до фаху «Електроніка» та орієнтований на студентів спеціальності 171 – «Електроніка», а також може бути корисним для студентів інших спеціальностей.

Посібник складається з шести розділів, що містять загальну інформацію про природу електричних і магнітних явищ, лінійні елементи і вимірювання в електричних колах, змінний електричний струм, нелінійні елементи в електричних колах, аналогові електронні схеми, базові поняття цифрової електроніки. Кожен з розділів доповнений прикладами типових практичних завдань, запитаннями та задачами.

Під час роботи над посібником використані матеріали відомих підручників, посібників та монографій, перелік яких подано наприкінці книги.

1 ПРИРОДА ЕЛЕКТРИЧНИХ ЯВИЩ

Електростатика – це розділ фізики, що займається вивченням властивостей та взаємодії нерухомих зарядів. Основні означення та залежності, пов'язані з поняттям електричного заряду, наведені у табл. 1.1.

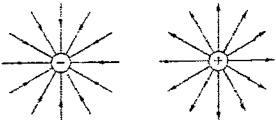
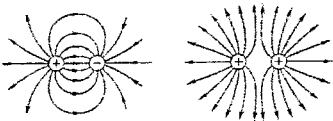
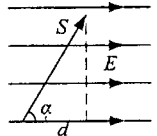
Таблиця 1.1 – Електричний заряд і його властивості

Електричний заряд (q) є фізичною величиною, що визначає електромагнітну взаємодію.		$[q] = K\ell = A \cdot c.$
Носії електричного заряду		
Електрон – негативно заряджена частинка ($m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$).		Протон – позитивно заряджена частинка ($m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$).
Елементарний заряд – модуль значення заряду електрона e або протона (p): $e = p = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.} \quad (1.1)$		Заряд тіла: $q = e(N_p - N_e), \quad (1.2)$ де N_e – кількість електронів; N_p – кількість протонів.
Закон збереження електричного заряду. Повний заряд замкнутої системи, тобто алгебраїчна сума зарядів всіх тіл, – величина постійна: $q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const.} \quad (1.3)$		
Закон Кулона. Сила електричної взаємодії (F) між нерухомими точковими зарядами, що знаходяться у вакуумі, прямо пропорційна добутку величин зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані між ними, а спрямована вздовж лінії, що з'єднує ці заряди.		$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ q_1 q_2 }{r^2}, \quad (1.4)$ де $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / (\text{м}^2 \cdot \text{В})$ – електрична стала; q_1, q_2 – заряди, що взаємодіють; ϵ – діелектрична проникність середовища ($\epsilon > 1$).

Простір, у якому виявляється дія на електричні заряди, називається *електричним полем*. *Електростатичне поле* – це електричне поле нерухомих заряджених тіл, заряди яких не залежать від часу. Основні характеристики електростатичного поля (напруженість та потенціал) описані в табл. 1.2, фізичні сталі наведені у табл. А.1 (додаток А).

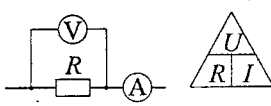
Електричні заряди створюють в навколишньому просторі електричне поле, яке зображується у вигляді силових ліній (рис. 1.1, 1.2) – ліній сил кулонівської взаємодії зарядів. *Силові лінії* (лінії напруженості) – уявні лінії, дотичні до яких у кожній точці поля збігаються за напрямком з вектором напруженості $\vec{E}$ у даній точці.

Таблиця 1.2 – Характеристики електричного поля

Напруженість ($\vec{E}$) електричного поля в довільній точці простору чисельно дорівнює силі, з якою електричне поле діє на одиничний пробний заряд, внесений у цю точку.	$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad [E] = \frac{H}{Kл}. \quad (1.5)$
 Рисунок 1.1 – Силові лінії позитивного і негативного зарядів	 Рисунок 1.2 – Взаємодія різноименних і однойменних зарядів
Принцип суперпозиції електричних полів. Якщо поле створене системою точкових зарядів, то напруженість поля в деякій точці простору визначається векторною сумою напруженостей полів всіх зарядів: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n. \quad (1.6)$	 Рисунок 1.3 – Робота кулонівських сил
Для однорідного поля робота (рис. 1.3): $A = FS \cos \alpha = EqS \cos \alpha = Eqd. \quad (1.7)$	
Потенціал (φ) електричного поля в певній точці – величина, яка чисельно дорівнює потенціальній енергії одиничного заряду, поміщеного в цю точку поля.	$\varphi = W_p / q, \quad (1.8)$ $[\varphi] = \frac{Дж}{Кл} = В.$
Різниця потенціалів (U) між точками a і b в електростатичному полі визначається роботою, яку виконують кулонівські сили при переміщенні одиничного позитивного заряду з точки a в точку b.	$\varphi_a - \varphi_b = U = \frac{A}{q}. \quad (1.9)$
Електричний струм – направлений рух заряджених частинок, що виникає під дією зовнішньої сили і приводить до перенесення заряду.	
Сила струму (I) дорівнює заряду, перенесеному електричним струмом за одиницю часу (q_0 – заряд вільної частинки, n та $\bar{v}$ – концентрація і середня швидкість руху носіїв заряду, S – площа перерізу провідника).	$I = \frac{q}{t} = q_0 n \bar{v} S, \quad (1.10)$ $[I] = \frac{Кл}{с} = А.$
Відношення роботи сторонніх сил (неелектростатичних сил) з переміщення одиниці позитивного заряду всередині джерела до заряду називається електрорушійною силою (ЕРС).	$\varepsilon = A_{cm} / q, \quad (1.11)$ $[\varepsilon] = \frac{Дж}{Кл} = В.$

Постійний струм – це електричний струм, що протікає в одному напрямку. Закони постійного струму наведено у табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Закони постійного струму

Закон Ома для ділянки електричного кола. Сила струму (I) прямо пропорційна напрузі (U) й обернено пропорційна опору (R) ділянки кола (ρ – питомий електричний опір; S і l – площа поперечно-го перерізу провідника та його довжина) (рис. 1.4).	$I = \frac{U}{R}, \quad (1.12)$ $R = \rho \frac{l}{S}.$
 Рисунок 1.4 – Закон Ома для ділянки кола	Ⓥ – вольтметр; Ⓐ – амперметр.
Електропровідність (G) – фізична величина, що характеризує здатність тіла проводити електричний струм.	$G = 1/R = I/U, \quad (1.13)$ $[G] = 1/\text{Ом} = \text{См}.$
Питома електропровідність речовини (σ) – міра здатності речовини проводити електричний струм.	$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{l}{RS}, \quad (1.14)$ $[\sigma] = \text{См}/\text{м}.$
Густина електричного струму (j).	$j = I/S, \quad (1.15)$ $[j] = \text{А}/\text{м}^2.$
Робота електричного струму (A) показує, яку роботу виконує електричне поле при переміщенні зарядів по провіднику.	$A = qU = UI t = I^2 R t = U^2 t / R. \quad (1.16)$
Потужність електричного струму (P) – робота, що виконується за одиницю часу.	$P = \frac{A}{t} = UI. \quad (1.17)$
Закон Джоуля – Ленца. Кількість теплоти (Q), яка виділяється при проходженні електричного струму по провіднику, прямо пропорційна квадрату сили струму, опору провідника і часу проходження струму.	$Q = I^2 R t. \quad (1.18)$
Закон Ома для повного кола. Величина струму в електричному колі прямо пропорційна ЕРС джерела струму й обернено пропорційна сумі електричних опорів зовнішньої і внутрішньої ділянок кола.	$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (1.19)$
Послідовне з'єднання провідників: $I_1 = I_2 = I_3 = I; \quad U_1 + U_2 + U_3 = U;$ $R = R_1 + R_2 + R_3.$	Паралельне з'єднання провідників: $I_1 + I_2 + I_3 = I; \quad U_1 = U_2 = U_3 = U;$ $1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3.$

Залежно від здатності проводити електричний струм матеріали поділяють на провідники, діелектрики та напівпровідники.

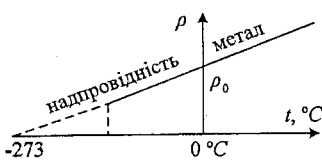
Провідники містять велику кількість вільних електронів. Під дією електричного поля електрони переносять заряд – виникає струм.

Діелектрики – речовини, що не мають вільних заряджених частинок. Під дією зовнішнього електричного поля струм у них не виникає. У молекулах *полярних* діелектриків центри розподілу позитивних і негативних зарядів розділені навіть за відсутності поля, тоді як у молекулах *неполярних* діелектриків вони за відсутності поля збігаються.

Напівпровідники – речовини, концентрація вільних зарядів у яких значно більша, ніж в діелектриках, але менша, ніж в провідниках. Під дією зовнішнього електричного поля виникає слабкий електричний струм.

Протікання електричного струму в різних середовищах пов'язане з явищами, характеристика яких наведена у табл. 1.4–1.6.

Таблиця 1.4 – Електричний струм у металах та електролітах

<i>Метали</i> – провідники електричного струму. Носії заряду – вільні електрони. Опір металів зумовлений дефектами ґраток і тепловим коливанням іонів у вузлах ґраток, що перешкоджає руху вільних електронів, тому при нагріванні опір збільшується. <i>Надпровідність</i> – явище стрибкоподібного зменшення питомого опору до нуля при охолодженні нижче критичної температури T_k, характерної для даного провідника. Для металів $T_k \geq 1..20\text{ K}$ (за шкалою Кельвіна).	
<i>Електроліти</i> – речовини, розчини яких проводять електричний струм (розчини солей, кислот і лугів). Носії заряду – позитивні й негативні іони. <i>Електроліз</i> – зміна хімічного складу розчину або розплаву, зумовлена втратою або приєднанням електронів іонами.	
<i>Перший закон електролізу Фарадея:</i> маса m речовини, що виділилась на електроді, пропорційна заряду q, що пройшов через електроліт (k – електрохімічний еквівалент, M – молярна маса, n – валентність, N_A – стала Авогадро (табл. А.1).	$m = kq = kIt, \quad (1.20)$ $k = \frac{M}{eN_A n}.$
<i>Залежність питомого опору металів та електролітів від температури</i> (рис. 1.5): $\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad (1.21)$ де ρ – питомий опір за $0\text{ }^\circ\text{C}$, t – температура за шкалою Цельсія, α – температурний коефіцієнт опору (для металів $\alpha > 0$, для електролітів $\alpha < 0$).	 Рисунок 1.5 – Графік залежності питомого опору металів від температури

Таблиця 1.5 – Електричний струм у газах та вакуумі

Гази за нормальних умов є діелектриками. Носії електричного струму (електрони та іони) в газах виникають тільки в результаті іонізації. Газовий розряд – проходження електричного струму через гази (рис. 1.6). Несамостійний газовий розряд – явище проходження електричного струму через газ при зовнішньому іонізувальному впливі (ультрафіолетове, рентгенівське й радіоактивне випромінювання, сильне нагрівання). Самостійний газовий розряд – явище проходження через газ електричного струму, що не залежить від дії зовнішніх іонізаторів; виникає тільки за великої напруженості поля ($E = 3 \cdot 10^6 \text{ В/м}$) або високої температури.	
Іонізація при самостійному розряді виникає як електронний удар. Іонізація можлива за умови $mv^2/2 \geq A_i, \quad (1.22)$ де m і v – маса і швидкість електрона; A_i – робота іонізації. Напруга пробою – напруга, за якої виникає самостійний розряд.	Рисунок 1.6 – Вольт-амперна характеристика газового розряду
<i>Типи самостійного розряду</i> 1. <i>Тліючий розряд</i> виникає за низького тиску ($P \approx 0,01 \dots 1 \text{ мм рт. ст.}$), застосовується в газорозрядних трубках і газових лазерах. 2. <i>Іскровий розряд</i> виникає за великих напруженостей електричного поля в газі, що перебуває під тиском порядку атмосферного. 3. <i>Дуговий розряд</i> виникає, якщо після запалювання іскрового розряду від потужного джерела поступово зменшувати відстань між електродами, а також якщо електроди зблизити до зіткнення, а потім їх розвести. 4. <i>Коронний розряд</i> виникає за високого тиску в різко неоднорідному полі поблизу електродів з великою кривизною поверхні.	
Плазма – газ, у якому значна частина молекул або атомів іонізована. У плазмі концентрація позитивних і негативних зарядів практично однакова, тобто плазма електронейтральна. Газорозрядна плазма виникає під час газових розрядів. Високотемпературна плазма виникає за надвисоких температур ($T > 10^6 \text{ К}$).	
Вакуум – дуже розріджений газ, молекули якого зіштовхуються одна з одною рідше, ніж зі стінками посудини. Носії струму у вакуумі – електрони, які вилетіли внаслідок емісії з поверхні електродів. Термоелектронна емісія – явище виходу електронів із розжарених поверхонь. Електрони вилітають з «холодних» поверхонь під дією світла – фотоелектронна емісія.	

Таблиця 1.6 – Електричний струм у напівпровідниках

Напівпровідники – речовини, у яких кількість вільних зарядів залежить від температури. Їх питомий опір за кімнатної температури набуває значень, які знаходяться в інтервалі від $10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ до $10^7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Провідність напівпровідника, обумовлену рухом електронів, називають *електронною*.

Провідність напівпровідника, обумовлену рухом дірок (нескомпенсованих позитивних зарядів), називають *дірковою*.

Провідність чистого напівпровідника (без домішок) називають *власною* (електричний струм створює однакову кількість електронів і дірок).

При *домішкковій провідності* носії заряду створюються завдяки внесенню домішок у напівпровідник, наприклад, п'ятивалентного миш'яку (As) або тривалентного індію (In) у чотиривалентний кремній (Si).

Домішки, атоми яких легко віддають електрони, називаються *донорними*. Основними носіями зарядів у напівпровідниках *n-типу* є електрони (рис. 1.7).

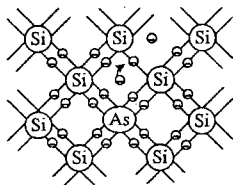


Рисунок 1.7 – Домішковий напівпровідник *n-типу*

Домішки, які «захоплюють» електрони атомів кристалічної ґратки, називаються *акцепторними*. Основними носіями зарядів у напівпровідниках *p-типу* є дірки (рис. 1.8).

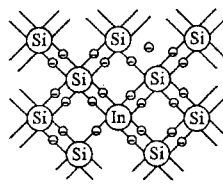


Рисунок 1.8 – Домішковий напівпровідник *p-типу*

Електронно-дірковий перехід (*p-n* перехід) – контакт двох напівпровідників з різними типами провідності.

При пропусковому, або *прямому* напрямку струму опір приконтактної ділянки зменшується, через контакт проходить струм (рис. 1.9).

При замикальному, або *зворотному* напрямку струму опір приконтактної ділянки збільшується, струм через перехід дуже малий (рис. 1.10).

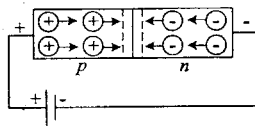


Рисунок 1.9 – Пряме вмикання *p-n* переходу

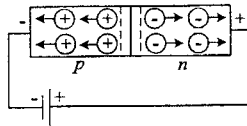
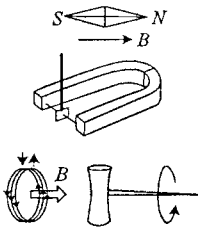
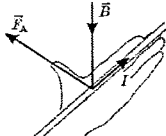


Рисунок 1.10 – Зворотне вмикання *p-n* переходу

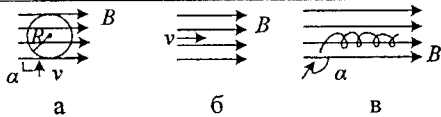
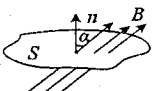
Електричні параметри металів, напівпровідників та діелектриків наведені у табл. А.2–А.4.

Магнітне поле – це простір, у якому виявляється дія на електричний струм (заряди). Магнітні силові лінії, на відміну від електричних, замкнуті. Тому магнітних зарядів (подібних до електричних) не існує (табл. 1.7).

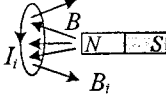
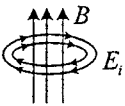
Таблиця 1.7 – Характеристики та закономірності магнітного поля

<i>Магнітна індукція ($\vec{B}$)</i> – силова характеристика магнітного поля.	
Напрямок вектора магнітної індукції (рис. 1.11): 1) збігається з напрямком осі магнітної стрілки в полі від південного полюса до північного; 2) збігається з напрямком вектора позитивної нормалі до рамки зі струмом (<i>позитивний напрям нормалі</i> – напрямок поступального руху гвинта, голівка якого обертається в напрямку струму, що тече в рамці); 3) збігається з напрямком обертального руху гвинта (з правою різьбою), якщо напрям струму збігається з напрямком його поступального руху (<i>правило гвинта</i>).	 Рисунок 1.11 – Визначення напрямку вектора магнітної індукції
<i>Сила Ампера ($\vec{F}_A$)</i> – це сила, що діє на провідник зі струмом у магнітному полі, спрямована перпендикулярно до магнітних силових ліній.	$F_A = I \Delta l B \sin \alpha. \quad (1.23)$
<i>Правило лівої руки.</i> Якщо долоню лівої руки розташувати так, щоб вектор магнітної індукції ($\vec{B}$) входив у долоню, а чотири витягнуті пальці вказували б напрям електричного струму (I), то відставлений під прямим кутом великий палець вкаже напрям сили ($\vec{F}_A$), що діє на провідник (рис. 1.12).	 Рисунок 1.12 – Правило лівої руки
<i>Модуль вектора магнітної індукції (B)</i> – відношення максимального значення модуля сили Ампера, що діє на прямолінійний провідник зі струмом, до добутку сили струму в провіднику на його довжину.	$B = \frac{F_{\max}}{I \Delta l}, \quad (1.24)$ $[B] = \frac{H}{A \cdot m} = T_{\text{л}}.$
<i>Модуль вектора магнітної індукції дорівнює відношенню максимального обертального моменту ($M_{\max}$), що діє на виток зі струмом, до добутку сили струму на площу витка (S).</i>	$B = \frac{M_{\max}}{I S n}, \quad (1.25)$ де n – кількість витків.

Продовження таблиці 1.7

Магнітна індукція поля прямого провідника зі струмом прямо пропорційна силі струму й обернено пропорційна відстані від провідника до досліджуваної точки поля (μ_0 – магнітна стала).		$B = k \frac{I}{r}, \quad (1.26)$ $k = \frac{\mu_0}{2\pi}, \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{A^2}.$
Сила Лоренца (F_n) – сила, що діє з боку магнітного поля на рухомий заряд (v – швидкість заряду; B – модуль вектора магнітної індукції; α – кут між векторами $\vec{B}$ і $\vec{v}$).		$F_n = qvB \sin \alpha. \quad (1.27)$
Заряджена частинка зі швидкістю $\vec{v}$ влітає в однорідне поле:		
1) перпендикулярно до ліній індукції ($\vec{v} \perp \vec{B}$, $\alpha = 90^\circ$), траєкторія руху – коло $R = mv/qB$ (рис. 1.13, а).	2) паралельно лініям індукції магнітного поля $\vec{B}$ ($\vec{v} \parallel \vec{B}$, $\alpha = 0^\circ$), $\vec{F}_n = 0$, траєкторія руху – пряма (рис. 1.13, б).	3) під деяким кутом $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ до ліній індукції магнітного поля, траєкторія руху – гвинтова лінія (рис. 1.13, в).
 а б в		
Рисунок 1.13 – Рух заряджених частинок у магнітному полі		
Магнітна проникність (μ) – фізична величина, що показує, у скільки разів індукція $\vec{B}$ магнітного поля в однорідному середовищі відрізняється за модулем від індукції $\vec{B}_0$ магнітного поля у вакуумі. Магнітна сприйнятність $\chi = \mu - 1$ (табл. А.5).		$\vec{B} = \mu \vec{B}_0. \quad (1.28)$
Класифікація речовин за їхніми магнітними властивостями		
Діамагнетики	$\mu < 1$ (вісмут $\mu = 0,999824$)	Слабомагнітні
Парамагнетики	$\mu > 1$ (платина $\mu = 1,00036$)	
Феромагнетики	$\mu \gg 1$ (залізо, нікель, кобальт)	Сильномагнітні
Гіпотеза Ампера: магнітні властивості тіла визначаються мікроскопічними струмами в речовині. Якщо струми різнонаправлені, то магнітні поля компенсують одне одного. У зовнішньому полі відбувається намагнічення.		
Магнітний потік (Φ) – потік магнітної індукції через площадку S (рис. 1.14).		$\Phi = B_n S = BS \cos \alpha, \quad (1.29)$ $[\Phi] = Tл \cdot м^2 = Вб,$ де B_n – проекція вектора $\vec{B}$ на нормаль $\vec{n}$ до площадки; α – кут між $\vec{B}$ і $\vec{n}$.
		
Рисунок 1.14 – Потік магнітної індукції		

Продовження таблиці 1.7

<i>Електромагнітна індукція</i> – явище виникнення електричного струму в замкненому контурі при змінах магнітного поля, що пронизує контур.	
Індуковане електричне поле в провіднику, що рухається, характеризується різницею потенціалів.	$\Delta\varphi = Bv/\sin \alpha. \quad (1.30)$
<i>Правило Ленца</i> . При зближенні магніту й контуру в контурі виникає індукційний струм I_i такого напрямку, що контур і магніт відштовхуються один від одного (рис. 1.15). <i>Індукційний струм</i> – струм, що є результатом електромагнітної індукції.	 Рисунок 1.15 – Правило Ленца
<i>Закон електромагнітної індукції</i> (закон Фарадея). ЕРС індукції ε_i в замкненому контурі дорівнює модулю швидкості зміни магнітного потоку через поверхню, обмежену контуром.	$\varepsilon_i = \left \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right . \quad (1.31)$
<i>Вихрове електричне поле</i> (рис. 1.16) – електричне поле, що виникає при змінах магнітного поля. Лінії напруженості замкнені. Непотенціальне (робота вихрового поля при русі електричного заряду по замкненому контуру може не дорівнювати нулю).	 Рисунок 1.16 – Вихрове поле
<i>Самоіндукція</i> – явище виникнення ЕРС індукції в електричному колі в результаті зміни сили струму в цьому колі.	
<i>Індуктивність</i> (L) – коефіцієнт пропорційності між силою струму в контурі й магнітним потоком, який створюється цим струмом (залежить від розмірів і форми контуру, від магнітної проникності середовища).	$\Phi = LI, \quad (1.32)$ $[L] = B\phi / A = \Gamma н.$
<i>Енергія магнітного поля</i> «запасається» у магнітному полі контуру зі струмом (для подолання ЕРС самоіндукції). Вона виділяється після того, як коло розмикається.	$W_M = \frac{LI^2}{2}, \quad (1.33)$ $[W_M] = Дж.$

Взаємодія електричного та магнітного полів виявляється у *коливальному контурі* – системі, що складається з конденсатора й котушки індуктивності. У контурі виникають *вільні електромагнітні коливання* – періодично повторювані зміни сили струму в котушці й напруги між обкладками конденсатора без споживання енергії від зовнішніх джерел. У контурі протікає змінний струм. Крім того, змінний струм низької частоти отримують за допомогою індукційного генератора, високої – за допомогою генератора на

транзисторі. Більш детально поняття змінного струму розкривається у третьому розділі.

Приклади типових завдань

Приклад 1.1. Визначте силу взаємодії двох однакових точкових зарядів $q_1 = q_2 = 1 \text{ мкКл}$, відстань між якими складає 30 см .

Розв'язання. За законом Кулона сила взаємодії

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2} = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{(10^{-6})^2}{0,3^2} = 0,1 \text{ (Н)}.$$

Приклад 1.2. Яка напруженість електричного поля на відстані 1 м від точкового заряду $0,1 \text{ нКл}$? Яка сила діє в цій точці на тіло з зарядом 10 нКл ?

Розв'язання. Напруженість електричного поля

$$E = kq_0 / r^2 = 9 \cdot 10^9 \cdot 0,1 \cdot 10^{-9} / 1^2 = 0,9 \text{ (Н / Кл)},$$

тоді на внесене в електричне поле тіло діє сила

$$F = |q_1|E = |10 \cdot 10^{-9}| \cdot 0,9 = 9 \cdot 10^{-9} \text{ (Н)}.$$

Запитання і завдання

1. Які сили, крім кулонівських, можуть привести в рух електричні заряди?

2. Чи можна в електричному полі виділити замкнуту поверхню, електричний потенціал на якій – стала величина?

3. Що таке напруженість електричного поля?

4. Який закон зміни напруженості електричного поля: у вакуумі, в провіднику, підключеному до джерела струму?

5. Які речовини називають напівпровідниками?

6. В чому полягає відмінність між напівпровідниками n - та p -типу?

Для побудови яких приладів вони використовуються?

7. Що показує напрям силових ліній магнітного поля?

8. Що таке електричний струм? Сформулюйте необхідні умови існування струму.

9. Чим відрізняється повне електричне коло від ділянки кола і що таке повний опір для повного кола?

10. Поясніть суть явища резонансу в колі змінного струму.

11. Сила взаємодії двох однакових точкових зарядів, які знаходяться на відстані $0,5\text{ м}$, складає $3,6\text{ Н}$. Обчисліть значення цих зарядів.

12. Відстань між двома точковими зарядами $+4\text{ нКл}$ та -5 нКл складає $0,6\text{ м}$. Знайдіть напруженість поля в середній точці між зарядами.

13. На заряд $+2 \cdot 10^{-7}\text{ Кл}$ в деякій точці електричного поля діє сила $0,015\text{ Н}$. Визначте напруженість поля в цій точці.

14. Поясніть, як зміниться сила, яка діє на точковий заряд з боку електричного поля, якщо заряд збільшиться удвічі (а) та якщо змінити заряд на протилежний, не змінюючи при цьому характеристики самого поля (б).

15. Сила струму в провіднику опором $r=100\text{ Ом}$ рівномірно наростає від $I_0=0$ до $I_{\text{max}}=10\text{ А}$ за час $t=30\text{ с}$. Визначте кількість теплоти Q , яка виділиться за цей час у провіднику.

16. По провіднику опором $R=3\text{ Ом}$ протікає струм, сила якого наростає. Кількість теплоти, яка виділиться за час $\tau=8\text{ с}$ у провіднику, $Q=200\text{ Дж}$. Визначте кількість електрики q , яка протікає за цей час по провіднику. В початковий момент часу сила струму дорівнює нулю.

17. Розрахуйте силу струму, яка проходить по мідному дроті довжиною 100 м та площею поперечного перерізу $0,5\text{ мм}^2$, якщо до кінців дроту прикладена напруга $6,8\text{ В}$.

18. В електричне коло під'єднані послідовно резистор опором 5 Ом та дві електричні лампи опором 500 Ом . Визначте загальний опір провідника.

19. Робота хімічних сил з переміщення заряду 1 Кл всередині батарейки дорівнює 5 Дж . Знайдіть напругу, яку створює батарейка.

20. Два резистори опором $r_1=5\text{ Ом}$ та $r_2=30\text{ Ом}$ з'єднані паралельно, до них підведена напруга 6 В . Знайдіть силу струму на всіх ділянках кола.

21. Визначте силу, з якою однорідне магнітне поле з індукцією $0,5\text{ Тл}$ діє на провідник довжиною 20 см , розташований під кутом 45° до вектора магнітної індукції, якщо сила струму в провіднику 300 мА .

22. Яка сила діє на протон, що рухається зі швидкістю 10 Мм/с в магнітному полі ($B=0,2\text{ Тл}$) перпендикулярно до ліній магнітної індукції?

23. Яка швидкість зарядженого тіла, що рухається в магнітному полі з індукцією 2 Тл , якщо на нього з боку магнітного поля діє сила 32 Н ? Швидкість тіла і магнітне поле взаємно перпендикулярні. Заряд тіла дорівнює $0,5\text{ мКл}$.

24. Чому дорівнює значення магнітного потоку, що пронизує плоску поверхню площею 50 см^2 при індукції поля $0,4\text{ Тл}$, якщо ця поверхня перпендикулярна до вектора індукції (а), розташована під кутом 45° до нього (б).

2 ЛІНІЙНІ ЕЛЕМЕНТИ І ВИМІРЮВАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ

Лінійні елементи електричних кіл – це елементи, для яких залежність струму від прикладеної напруги можна описати лінійними функціями. Найбільш поширеними лінійними елементами електричних кіл є резистори; їх параметри, позначення та з'єднання описано в табл. 2.1–2.4.

Таблиця 2.1 – Резистори

Резистор – елемент електричного кола, що має певне значення опору (задає струм або створює потрібний потенціал у деякій точці).			
Співвідношення одиниць вимірювання: $1\text{ кОм} = 10^3\text{ Ом}$, $1\text{ МОм} = 10^6\text{ Ом}$.	Умовне графічне позначення резисторів на принципових електричних схемах		
	постійний		
	змінний		
	підстроювальний		
Номінальне значення (номінал) резистора – значення, вказане на корпусі резистора (може відрізнятися від вимірюного).		Номінал вітчизняних резисторів за їх маркуванням: $R12 - 0,12\text{ Ом}$; $100R - 100\text{ Ом}$; $4K7 - 4,7\text{ кОм}$; $1,0 - 1\text{ МОм}$.	
Допуск – допустиме відхилення реального значення опору резистора від номінального, виражається у відсотках від номінального значення опору.			
Потужність резистора визначає максимальну розсіювану потужність і допустимий струм через резистор.			
Умовне позначення вітчизняних резисторів на принципових електричних схемах за їх номінальною розсіюваною потужністю (ГОСТ 2.728-74):			
	без зазначення потужності		0,5 Вт
	0,05 Вт		1 Вт
	0,125 Вт		2 Вт
	0,25 Вт		5 Вт
			10 Вт

Маркування імпортованих резисторів (табл. 2.2) – кольорові смужки, нанесені ближче до однієї зі сторін: 1, 2 – цифри десятків і одиниць; 3 – множник, на який потрібно помножити цифри, щоб отримати номінал, 4 – допуск ($\pm\%$), 5 – температурний коефіцієнт опору ($\pm 10^{-6} / K$). Якщо допуск менший за 1%, між смугами 2 і 3 наноситься додаткова смуга десятків.

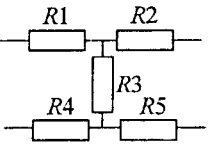
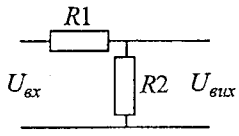
Таблиця 2.2 – Колірне маркування резисторів

Колір кільця	Номер кільця				
	1	2	3	4	5
відсутнє				20	
сріблястий			0,01 Ом	10	
золотистий			0,1 Ом	5	
чорний	0	0	$\times 1$ Ом	20	200
коричневий	1	1	$\times 10$ Ом	1	100
червоний	2	2	$\times 100$ Ом	2	50
жовтогарячий	3	3	$\times 1$ кОм	3	15
жовтий	4	4	$\times 10$ кОм	0,1	25
зелений	5	5	$\times 100$ кОм	0,5	
голубий	6	6	$\times 1$ МОм	0,25	10
фіолетовий	7	7	$\times 10$ МОм	0,1	5
сірий	8	8		0,05	1
білий	9	9			

Таблиця 2.3 – З'єднання резисторів

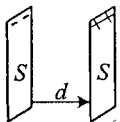
Послідовне з'єднання:	Паралельне з'єднання:
$P_{\text{заг.}} = P_1 + P_2;$ $R_{\text{заг.}} = R_1 + R_2. \quad (2.1)$	$P_{\text{заг.}} = P_1 + P_2;$ $R_{\text{заг.}} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2). \quad (2.2)$
Оцінювання загального опору при паралельному з'єднанні	
Правило 1. При паралельному з'єднанні загальний опір завжди менший меншого (менший, ніж опір, що має найменше значення).	
Правило 2. Якщо опори паралельно з'єднаних резисторів однакові, то загальний опір дорівнює 1/2 значення опору одного резистора в разі паралельного з'єднання двох резисторів, 1/3 для трьох і т. д.	
Правило 3. Якщо опори паралельно з'єднаних резисторів сильно (більш ніж у 10 разів) різняться за величиною, то величиною більшого резистора можна знехтувати і вважати, що загальний опір дорівнює опору меншого з резисторів.	

Таблиця 2.4 – Складні кола

 Рисунок 2.1 – Змішане з'єднання опорів	Перший закон Кірхгофа: алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулю. Другий закон Кірхгофа: алгебраїчна сума падів напруги на елементах контуру дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС, що діють в цьому контурі.
 Рисунок 2.2 – Дільник напруги	Струм, вихідна напруга та коефіцієнт передавання схеми: $I = U_{\text{вх}} / (R_1 + R_2);$ $U_{\text{вих}} = IR_2 = U_{\text{вх}} R_2 / (R_1 + R_2);$ $K = U_{\text{вих}} / U_{\text{вх}} = R_2 / (R_1 + R_2).$

Лінійний елемент, здатний накопичувати електромагнітну енергію у власному електричному полі, називається *конденсатором*. Далі розглядаються основні означення та співвідношення (табл. 2.5), умовні позначення (табл. 2.6), класифікація (табл. 2.7) конденсаторів.

Таблиця 2.5 – Конденсатори

<i>Конденсатор</i> – система, що складається з двох провідників (обкладок), розділених шаром діелектрика, товщина якого мала порівняно з розмірами провідників.		
<i>Плоский конденсатор</i> – система, що складається з двох плоских паралельних пластин, заряджених однаковими за модулем зарядами протилежного знаку, розділених шаром діелектрика (рис. 2.3).		
 Рисунок 2.3 – Структура конденсатора	Ємність (S – площа пластини; d – відстань між пластинами; ε – діелектрична проникність) розраховується за виразом (2.3).	$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (2.3)$ $[C] = \frac{K\lambda}{B} = \Phi.$
	Енергія електричного поля (W_p – потенціальна енергія конденсатора) визначається за формулою (2.4).	$W_p = CU^2/2 = q^2/(2C) = qU/2. \quad (2.4)$
Ємність паралельного з'єднання: $C = C_1 + C_2. \quad (2.5)$		Ємність послідовного з'єднання: $C = 1/C_1 + 1/C_2. \quad (2.6)$

Таблиця 2.6 – Умовні позначення конденсаторів (ГОСТ 2.728-74)

Позначення	Опис	Позначення	Опис
	Конденсатор сталої ємності		Підстроювальний конденсатор змінної ємності
	Поляризований конденсатор		
	Поляризований електролітичний конденсатор		Конденсатор змінної ємності

Таблиця 2.7 – Класифікація конденсаторів за матеріалом діелектрика

Типи конденсаторів		
вакуумні	з рідким діелектриком	з газоподібним діелектриком
з твердим неорганічним діелектриком		з твердим органічним діелектриком
скляні		паперові
слюдяні		метало-паперові
керамічні		плівкові
тонкошарові із неорганічних плівок (K10, K15, K25, K32)		комбіновані

На даний час є різні системи маркування конденсаторів, основні з яких наведено у табл. 2.8–2.12.

Таблиця 2.8 – Позначення номінальної ємності конденсаторів

Повне позначення			Скорочене (на корпусі)			
Позначення одиниць вимірювання		Приклади позначення	Позначення одиниць вимірювання		Приклади позначення	
			Старе	Нове	Старе	Нове
Пікофарад 0...999 <i>пФ</i>	<i>пФ</i>	0,82 <i>пФ</i> 5,1 <i>пФ</i> 36 <i>пФ</i>	П	р	П82 5П1 36П	р82 5р1 36р
Нанофарад 100...999999 <i>нФ</i>	<i>нФ</i> 1 <i>нФ</i> = 1000 <i>пФ</i>	120 <i>нФ</i> 3300 <i>нФ</i> 68000 <i>нФ</i>	Н	н	Н12 3Н3 68Н	н12 3н3 68н
Мікрофарад 1...999 <i>мкФ</i>	<i>мкФ</i>	0,22 <i>мкФ</i> 0,15 <i>мкФ</i> 2,2 <i>мкФ</i>	М	μ	22Н М 15 2М2	22н μ15 2μ2

Таблиця 2.9 – Колірне маркування конденсаторів

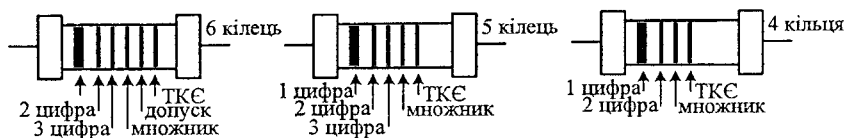


Рисунок 2.4 – Маркування вітчизняних конденсаторів широкого використання



Рисунок 2.5 – Маркування танталових конденсаторів

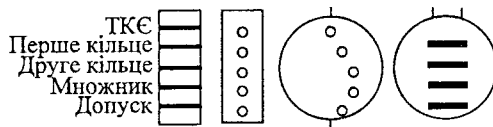


Рисунок 2.6 – Маркування зарубіжних конденсаторів широкого використання

Таблиця 2.10 – Маркування вітчизняних конденсаторів

Колір маркування	Номинальна ємність			Множник	Допуск, %	ТКС
	Перше кільце	Друге кільце	Третє кільце			
Сріблястий	-	-	-	10^{-2}	±10	-
Золотий	-	-	-	10^{-1}	±5	-
Чорний	0	0	0	1	-	±252
Коричневий	1	1	1	10	±1	±100
Червоний	2	2	2	10^2	±2	±50
Помаранчевий	3	3	3	10^3	-	±15
Жовтий	4	4	4	10^4	-	±25
Зелений	5	5	5	10^5	±0,5	±20
Синій	6	6	6	10^6	±0,25	±10
Фіолетовий	7	7	7	10^7	±0,1	±5
Сірий	8	8	8	10^8	-	±1
Білий	9	9	9	10^9	-	-
Немає кольору	-	-	-	-	±20	-

Таблиця 2.11 – Маркування танталових конденсаторів

Колір маркування	Номінальна ємність			Допуск, %
	Перше кільце	Друге кільце	Третє кільце (множник)	
Сріблястий	-	-	10^{-2}	± 10
Золотистий	-	-	10^{-1}	± 5
Чорний	-	0	1	-
Коричневий	1	1	10	± 1
Червоний	2	2	10^2	± 2
Помаранчевий	3	3	10^3	-
Жовтий	4	4	10^4	-
Зелений	5	5	10^5	$\pm 0,5$
Синій	6	6	10^6	$\pm 0,25$
Фіолетовий	7	7	10^7	$\pm 0,1$
Сірий	8	8	10^8	$\pm 0,05$
Білий	9	9	10^9	-

Таблиця 2.12 – Маркування зарубіжних конденсаторів

Колір	Перше і друге кільце	Множник	Допуск, %	Клас	ТКС
Чорний	0	1	20	-	0
Коричневий	1	10	1	1	-33
Червоний	2	10^2	2	-	-75
Помаранчевий	3	10^3	-	2	-150
Жовтий	4	10^4	-	-	-220
Зелений	5	-	-	3	-330
Синій	6	-	-	-	-470
Фіолетовий	7	-	-	-	-750
Сірий	8	-	0,5	-	-
Білий	9	-	-	4	-
Золотистий	-	-	5	-	+100

Ще одним лінійним елементом є котушка індуктивності (табл. 2.13).

Таблиця 2.13 – Котушки індуктивності

Індуктивність – здатність провідника при протіканні по ньому струму накопичувати енергію магнітного поля. Котушка індуктивності – це скручений провід. Умовне графічне позначення: 	$L = \frac{\mu \mu_0 \omega^2 S}{l}, \quad [L] = \Gamma_n, \quad (2.7)$ де μ – магнітна проникність; S і l – площа поперечного перерізу і довжина котушки; ω – кількість витків.
--	--

Вимірювання – це відображення вимірюваних величин їхніми значеннями шляхом експерименту та обчислень за допомогою спеціальних технічних засобів. Базові поняття вимірювань в електричних колах наведені в табл. 2.14.

Таблиця 2.14 – Електричні вимірювання

<i>Похибка приладу</i> – різниця між показами приладу і дійсним значенням вимірюваної величини. Похибку вимірювального приладу прийнято виражати у відсотках відносно найбільшого показу приладу.	
<i>Абсолютна похибка</i> виражається в абсолютних одиницях вимірюваної величини.	<i>Відносна похибка</i> – відношення абсолютної похибки вимірювання до дійсного значення вимірюваної величини, виражене у відсотках.
<i>Клас точності</i> позначається величиною похибки, вираженої в відсотках (чим більша цифра позначає клас точності, тим гірша точність приладу).	
<i>Амперметр</i> призначений для вимірювання струму, під'єднується послідовно («в розрив кола»).	<i>Вольтметр</i> призначений для вимірювання напруги, під'єднується паралельно.
	
Розрахунок шунта (під'єднується паралельно): $R_{ш} = \frac{R_A}{n - 1}, \quad (2.8)$ де n – кратність збільшення по- рогу вимірювання.	Розрахунок додаткового опору (з'єднується послідовно з вольт- метром для розширення діапазону вимірювань): $R_{дод} = (n - 1)R_V. \quad (2.9)$

Приклади типових завдань

Приклад 2.1. Номінальне значення резистора 18 кОм , допуск 10% . Визначте максимально і мінімально можливі значення опору.

Розв'язання. Мінімально і максимально можливий опір:

$$R_{\min} = 18 \text{ кОм} - 18 \text{ кОм} \cdot 0,1 = 16,2 \text{ кОм};$$

$$R_{\max} = 18 \text{ кОм} + 18 \text{ кОм} \cdot 0,1 = 19,8 \text{ кОм}.$$

Таким чином, будь-який резистор номіналом 18 кОм із допуском 10% буде мати опір між $16,2 \text{ кОм}$ і $19,8 \text{ кОм}$.

Приклад 2.2. Паралельно з'єднані резистори з опором 10 кОм , 100 Ом , 1 кОм , 300 Ом , 5 кОм , 20 кОм . Оцінити величину загального опору.

Розв'язання. Резистор з найменшим опором – 100 Ом , тому, згідно з правилом 1, загальний опір буде менший, ніж 100 Ом . Наступне найменше значення опору резистора – 300 Ом . Резистор 100 Ом може бути поданий як паралельне з'єднання трьох резисторів опором 300 Ом . Тоді маємо паралельне з'єднання чотирьох резисторів опором 300 Ом кожний, загальний опір $300/4 = 75\text{ Ом}$. Округливши в меншу сторону, приймемо за загальний опір 70 Ом . Результат точного розрахунку – 68 Ом .

Приклад 2.3. Як розширити межі вимірювання амперметра в 10 разів з 1 А до 10 А ?

Розв'язання. Потрібно під'єднати до амперметра шунт, через який при максимальному значенні струму пройде 9 А , щоб через амперметр як і раніше проходив струм величиною 1 А . Тому опір шунта повинен бути в 9 разів менший, ніж опір приладу.

Запитання і завдання

1. На яку величину номінальне значення опору резистора може відрізнятись від його реального значення?
2. Як визначається потужність при паралельному з'єднанні резисторів?
3. Як позначається потужність резисторів на принципових схемах?
4. З яких матеріалів виготовляють резистори?
5. Як розрахувати коефіцієнт передавання дільника напруги?
6. Чому конденсатор може накопичувати заряди?
7. Що таке електричний дросель?
8. Як визначити сумарну індуктивність/ємність при послідовному і паралельному з'єднанні котушок індуктивності/конденсаторів?
9. Як можна точно визначити внутрішній опір джерела струму?
10. Як розрахувати опір шунта для амперметра та додатковий опір для вольтметра?
11. Як розраховується похибка показів вимірювального приладу?
12. Наведіть приклад визначення параметрів резистора за маркуванням.
13. Потрібен резистор потужністю 10 Вт і опором 10 кОм . Яким чином його можна замінити, якщо наявні лише резистори потужністю 2 Вт та опором 2 кОм ?
14. Резистор опором 100 Ом , потужністю 2 Вт і резистор опором 1 кОм , потужністю 5 Вт з'єднали паралельно і подали напругу 20 В . Чи правильно обрана потужність резисторів?

15. Оцінити величину загального опору паралельного з'єднання резисторів із опороми $5,6\text{ кОм}$, 200 Ом , 400 Ом , 10 кОм , 200 Ом , 1 кОм , 20 кОм .

16. Розрахувати значення опору R_1 дільника напруги (див. рис. 2.2), якщо вхідна напруга $U_{\text{вх}} = 12\text{ В}$, опір $R_2 = 3,6\text{ кОм}$, а на виході потрібно отримати напругу $U_{\text{вх}} = 5\text{ В}$.

17. Вхідна напруга резисторного дільника (див. рис. 2.2) складає 300 В , вихідна – 5 В . Через дільник протікає струм $I = 4\text{ мА}$. Розрахувати значення опору та потужності резисторів R_1 , R_2 .

18. Визначте ємність і енергію електричного поля конденсатора, якщо при напрузі на його обкладках $U_C = 400\text{ В}$ заряд конденсатора $q = 0,2 \cdot 10^{-3}\text{ Кл}$.

19. Розрахуйте ємність конденсатора, що складається з двох пластин, кожна з яких має площу 120 мм^2 . Пластини розділені шаром повітря товщиною $0,5\text{ мм}$.

20. Визначте ємність конденсатора з даними, зазначеними в попередньому завданні, якщо простір між пластинами заповнено парафінованим папером з діелектричною проникністю $\varepsilon = 4$, склом ($\varepsilon = 7$), електротехнічним картоном ($\varepsilon = 2$), слюдою ($\varepsilon = 8$).

21. Які смужки повинні бути нанесені на танталовому конденсаторі ємністю $6,8\text{ мкФ}$? Допуск складає $\pm 5\%$.

22. На конденсаторі широкого використання (зарубіжному) послідовно нанесені смужки коричневого, помаранчевого, синього, червоного і золотистого кольорів. Які параметри має такий конденсатор?

23. Скільки витків дроту діаметром $d = 0,6\text{ мм}$ має одношарова обмотка котушки, індуктивність якої $L = 1\text{ мГн}$ і діаметр $D = 4\text{ см}$? Витки щільно прилягають один до одного.

24. Індуктивність одношарового соленоїда довжиною $l = 1\text{ м}$, намотаного на немагнітний каркас, складає $L = 1\text{ мГн}$. Знайдіть кількість витків на кожному сантиметрі довжини соленоїда (площа поперечного перерізу $S = 20\text{ см}^2$).

25. За допомогою вольтметра на 200 В вимірювалася напруга 40 В , а вольтметр показав 38 В . Яке значення похибок – абсолютної та відносної (щодо найбільшого показу приладу та щодо вимірюваної напруги)?

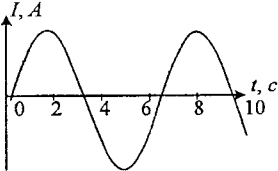
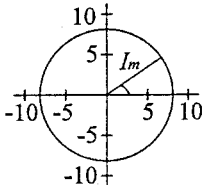
26. Цифровий вольтметр на 1000 В здійснює 8-розрядне перетворення вимірюваної величини. Обчислити значення молодшого розряду (найменший вимірюваний сигнал), абсолютну та відносну похибки.

27. Вольтметр може виміряти максимальну напругу 6 В ; його опір 2 кОм . Який додатковий опір слід підключити, щоб підвищити межу вимірюваної напруги до 240 В ? Як зміниться чутливість вольтметра?

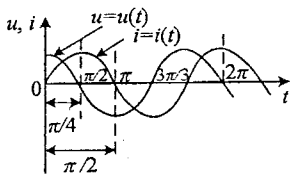
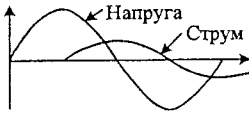
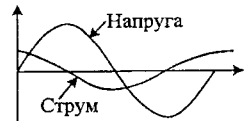
3 ЗМІННИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

Змінний електричний струм – це електричний струм, який періодично змінює значення і напрям протікання. Найбільш просту форму має гармонічний сигнал (табл. 3.1), його використовують для аналізу інших сигналів.

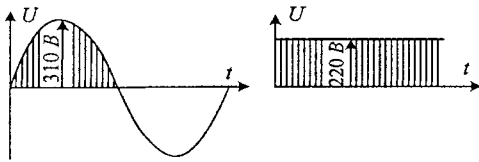
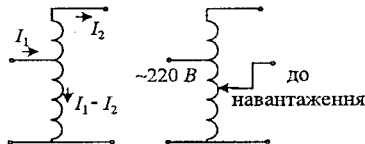
Таблиця 3.1 – Гармонічні коливання

Періодичні коливання струму, що змінюються за синусоїдальним законом (рис. 3.1), називають <i>гармонічними</i>. Прості гармонічні коливання, які входять до складу змінного струму складної форми, називаються <i>гармоніками</i>. Гармоніки нумеруються в порядку зростання частоти.	 Рисунок 3.1 – Гармонічний струм
Значення струму і напруги у фіксовані моменти часу називають <i>миттєвими значеннями</i> (i, u). <i>Амплітудні</i>, або <i>максимальні значення</i> струму і напруги позначаються I_m, U_m.	
Моделлю гармонічного коливання може бути обертання відрізка навколо точки, що збігається з початком цього відрізка (рис. 3.2). При цьому проекція вершини відрізка на вісь ординат буде описувати синусоїду, а для визначення миттєвого положення відрізка можна використовувати кут між відрізком і віссю абсцис.	 Рисунок 3.2 – Модель коливального процесу
Період (T) – повний цикл зміни струму від деякого стану до такого самого стану.	$T = 1/f; \quad (3.1)$
Частота коливань (f) показує, скільки періодів коливання вкладається в одну секунду.	$[T] = 1 \text{ с}; \quad [f] = 1 \text{ Гц}.$
Математичний вираз миттєвих значень струму і напруги (ω – циклічна частота; φ_0 – початкова фаза коливань).	$\begin{aligned} i(t) &= I_m \sin(\omega t + \varphi_0); \\ u(t) &= U_m \sin(\omega t + \varphi_0). \end{aligned} \quad (3.2)$
Якщо у колі змінного струму є резистор, то для нього справедливий закон Ома.	$i(t) = \frac{u(t)}{R}. \quad (3.3)$
Зв'язок струму та напруги отримуємо в результаті диференціювання закону зміни напруги на ємності.	$\begin{aligned} i(t) &= C \frac{du(t)}{dt} = C\omega u(t); \\ u(t) &= U_m \cos \omega t. \end{aligned} \quad (3.4)$

Продовження таблиці 3.1

У коливальному контурі відбуваються періодичні перетворення енергії електричного поля конденсатора в енергію магнітного поля котушки індуктивності і навпаки (рис. 3.3): $\frac{CU_m^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2}. \quad (3.5)$	 Рисунок 3.3 – Електромагнітні коливання в контурі
Активний опір (R). Коливання напруги й сили струму збігаються за фазою. На активному опорі виділяється потужність змінного струму.	$u = U_m \cos \omega t; \quad i = I_m \cos \omega t;$ $P = 0,5 I_m U_m = IU = I^2 R. \quad (3.6)$
Індуктивний опір (X_L) являє собою протидію зростанню струму з боку виникнення в котушці індуктивності ЕРС самоіндукції. Коливання напруги випереджають за фазою коливання сили струму на $\pi/2$ радіан (рис. 3.4). Середня за період потужність $P = 0$.	$i = I_m \cos \omega t; \quad u = -U_m \sin \omega t;$ $X_L = \omega L; \quad i(t) = U(t) / X_L.$  Рисунок 3.4 – Змінна напруга і струм на котушці індуктивності
Ємнісний опір (X_C): заряджений конденсатор є, по суті, джерелом ЕРС, яка протидіє генератору. Коливання напруги відстають за фазою від коливань сили струму на $\pi/2$ радіан (рис. 3.5). Середня за період потужність $P = 0$.	$i = I_{\max} \cos \omega t; \quad u = U_{\max} \sin \omega t;$ $X_C = 1 / \omega C.$  Рисунок 3.5 – Змінна напруга і струм на конденсаторі
Повний опір (Z) розраховується за формулою (3.7).	$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1 / \omega C)^2}. \quad (3.7)$
Резонанс у колі змінного струму – різке зростання амплітуди коливань сили струму при збігу частоти зовнішньої ЕРС із частотою вільних коливань у контурі. Резонанс виникає, якщо $X_C = X_L$.	
Формула Томсона описує вільні електромагнітні коливання у коливальному контурі (T – період коливань; L – індуктивність котушки; C – ємність конденсатора).	$T = 2\pi \sqrt{LC}. \quad (3.8)$

Продовження таблиці 3.1

Під діючим значенням змінного струму розуміється такий постійний струм, який за той самий час здійснює таку ж роботу (або виділяє кількість тепла), як і даний змінний струм (рис. 3.6).		$I_{\delta} = I_m / \sqrt{2};$ $U_{\delta} = U_m / \sqrt{2}. \quad (3.9)$
		
Рисунок 3.6 – Амплітудне і діюче значення напруги в побутовій мережі		
Активну потужність вимірюють ватами ($[P_a] = 1 \text{ Вт}$).	$P_a = U_{\delta} I_{\delta} \cos \varphi. \quad (3.10)$	
Реактивну потужність вимірюють варами ($[P_r] = 1 \text{ вар} = 1 \text{ var}$).	$P_r = U_{\delta} I_{\delta} \sin \varphi. \quad (3.11)$	
Повну потужність вимірюють вольт-амперами ($[P_{\Pi}] = 1 \text{ В} \cdot \text{А} = 1 \text{ В} \cdot \text{А}$).	$P_{\Pi} = U_{\delta} I_{\delta} = \sqrt{P_a^2 + P_r^2}. \quad (3.12)$	
Для перетворення напруги змінного струму використовують <i>трансформатор</i> – пристрій, що складається із двох котушок (<i>первинної і вторинної обмоток</i>) на загальному осердді (рис. 3.7); він здійснює гальванічну розв'язку кіл первинної і вторинної обмоток.		
Перетворення напруги здійснюється залежно від коефіцієнта трансформації k (n_1, n_2 – кількість витків первинної та вторинної обмоток, відповідно; $k > 1$ – трансформатор знижувальний, $k < 1$ – трансформатор підвищувальний).	$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (3.13)$	
Варіант трансформатора з однією обмоткою і кількома виводами (одна з обмоток є частиною іншої) називається <i>автотрансформатором</i> (рис. 3.8). Автотрансформатор не забезпечує гальванічної розв'язки первинного та вторинного кіл, його можна розглядати як дільник напруги.		
 Рисунок 3.7 – Умовне позначення трансформатора	 Рисунок 3.8 – Автотрансформатор	

У *реактивних* опорах не відбувається виділення тепла, тому що частину періоду вони споживають енергію, а потім її віддають. Реактивні опори

залежать від частоти змінного струму, тому електричні кола, які містять конденсатори та котушки індуктивності, називають колами з частотно-залежними параметрами (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Електричні кола з частотно-залежними параметрами

На рис. 3.9 показані прості RC-фільтри високої (ФВЧ) і низької (ФНЧ) частот, що являють собою дільник напруги з частотно-залежним плечем. Характеристику, яка показує частотні властивості фільтра або іншої електронної схеми, називають амплітудно-частотною (АЧХ) (рис. 3.10).

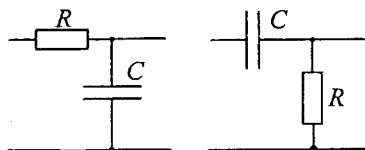


Рисунок 3.9 – Фільтри низької (ліворуч) і високої (праворуч) частот

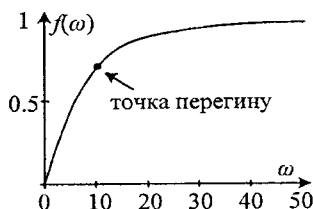


Рисунок 3.10 – Амплітудно-частотна характеристика ФВЧ

Точці перегину на АЧХ (рис. 3.10) відповідає значення на осі частот ($\tau = RC$ – стала часу RC-кола).

$$\omega = 1/\tau. \quad (3.14)$$

Відношення амплітуд напруг або струмів двох сигналів характеризує послаблення електричних сигналів, його вказують в децибелах.

$$N_{\text{дБ}} = 20 \lg \frac{U_2}{U_1}. \quad (3.15)$$

Приклади типових завдань

Приклад 3.1. В деякому електричному колі активна потужність дорівнює 1000 Вт , $\cos \varphi = 0,8$. Яку напругу повинен створювати генератор, щоб при струмі 10 А забезпечити повну потужність (йдеться про діючі значення струму і напруги)? Яке значення цієї напруги було б за відсутності реактивної складової в колі навантаження для тієї ж потужності?

Розв'язання. Повна потужність та напруга генератора:

$$P_{\Pi} = U_{\text{д}} I_{\text{д}} = P_{\text{а}} / \cos \varphi = 1000 / 0,8 = 1250 \text{ (В} \cdot \text{А)};$$

$$U_{\text{д}} = P_{\Pi} / I_{\text{д}} = 1250 / 10 = 125 \text{ (В)}.$$

За відсутності реактивної складової достатньо було б напруги $U_{\text{а}} = P_{\text{а}} / I_{\text{а}} = 1000 / 10 = 100 \text{ (В)}$.

Приклад 3.2. Трансформатор має коефіцієнт трансформації $k = 4$, напруга первинної обмотки дорівнює 160 В , опір навантаження в колі вторинної обмотки – 20 Ом . Розрахуйте опір, який створює трансформатор для генератора. Втратами потужності знехтувати.

Розв'язання. Напруга, струм та потужність у вторинній обмотці:

$$\begin{aligned}U_2 &= U_1 / k = 40\text{ (В)}; \\I_2 &= U_2 / R_2 = 40 / 20 = 2\text{ (А)}; \\P_2 &= U_2 I_2 = 40 \cdot 2 = 80\text{ (Вт)}.\end{aligned}$$

Потужність в первинній мережі приймемо також $P_1 = 80\text{ Вт}$, тоді

$$I_1 = P_1 / U_1 = 80 / 160 = 0,5\text{ (А)}.$$

Тепер визначимо, який опір являє собою первинна обмотка для генератора:

$$R_1 = U_1 / I_1 = 160 / 0,5 = 320\text{ (Ом)}.$$

Отже, опір R_1 більший у 16 разів, ніж R_2 . Знижувальний трансформатор, навантажений на опір R_2 , являє собою опір для генератора у k^2 більший, ніж R_2 . Підвищувальний трансформатор зменшує опір у k^2 разів.

Запитання і завдання

1. Які коливання називають гармонічними та що таке друга гармоніка змінного струму промислової частоти?
2. Що ви можете сказати про відносні фази струму і напруги на активному опорі, конденсаторі, котушці індуктивності?
3. Поясніть фізичний зміст ємнісного опору.
4. Чому ємнісний та індуктивний опори протилежні за характером дії?
5. Як визначити, який характер (індуктивний чи ємнісний) має еквівалентний реактивний опір кола, що містить і котушку, і конденсатор?
6. У чому полягає поверхневий ефект?
7. Як визначити діюче значення напруги: для синусоїдального сигналу, для прямокутного сигналу?
8. Підсилення першої гармоніки сигналу 60 дБ , а другої 20 дБ . У скільки разів відрізняються сигнали?
9. Які види потужності є у колі змінного струму?
10. Чим відрізняється автотрансформатор від звичайного трансформатора? Чи забезпечує він гальванічну розв'язку?
11. Що означає точка перегину на частотній характеристиці?

12. На послідовне з'єднання конденсатора невідомої ємності, котушки з індуктивністю L і опором R подається змінна напруга $\varepsilon = \varepsilon_0 \cos \omega t$. Сила струму в колі дорівнює $i = \varepsilon_0 R^{-1} \cos \omega t$. Визначте амплітуду напруги між обкладками конденсатора.

13. Отримайте вираз для резонансної частоти контуру, в якому до паралельного з'єднання котушки індуктивності та резистора послідовно під'єднаний конденсатор.

14. Заряд на пластинах конденсатора коливального контуру змінюється в часі за виразом $q = 50 \cos(100\pi t)$. Знайдіть період і частоту коливань в контурі, циклічну частоту, амплітуду коливань заряду й амплітуду коливань сили струму. Запишіть рівняння $i = i(t)$.

15. У коливальному контурі конденсатору з ємністю $C = 10 \text{ мкФ}$ надали заряд $q = 1 \text{ мКл}$, після чого виникли згасаючі електромагнітні коливання. Скільки тепла Q виділиться до моменту, коли максимальна напруга на конденсаторі стане менша, ніж початкова максимальна напруга в 4 рази?

16. Коливальний контур складається з котушки індуктивності та чотирьох конденсаторів (рис. 3.11). У скільки разів зміниться період власних коливань в контурі, якщо замкнути ключ, що з'єднує точки А і В? $C_1 = 10^{-8} \text{ Ф}$, $C_2 = 4 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}$.

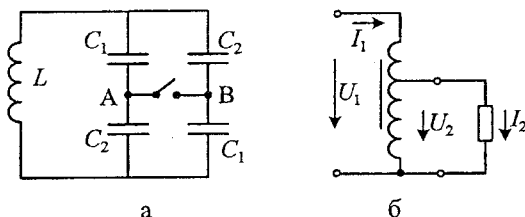


Рисунок 3.11 – Коливальний контур (а) та автотрансформатор (б)

17. Визначте зсув фаз коливань напруги і сили струму для електричного кола, що складається з послідовно з'єднаних провідників з активним опором $R = 1000 \text{ Ом}$, котушки індуктивністю $L = 0,5 \text{ Гн}$ і конденсатора ємністю $C = 1 \text{ мкФ}$. Визначте потужність, яка виділяється в колі, якщо амплітуда напруги $U_0 = 100 \text{ В}$, а частота $f = 50 \text{ Гц}$.

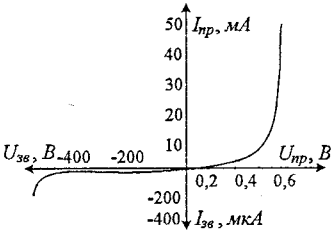
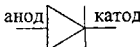
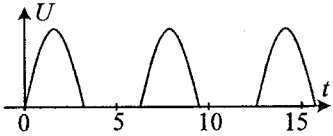
18. На автотрансформатор, схема якого зображена на рис. 3.11, б, подається напруга $U_1 = 220 \text{ В}$. Напруга на вторинних затискачах $U_2 = 180 \text{ В}$, струм навантаження $I_2 = 10 \text{ А}$. Обмотка має $n_1 = 500$. Визначте площу поперечного перерізу дроту, з якого виконана обмотка, якщо максимально допустима густина струму дорівнює $j_{\text{max}} = 2,5 \text{ А/мм}^2$.

19. Якому послабленню напруги (у %) відповідає її зміна на -6 дБ ?

4 НЕЛІНІЙНІ ЕЛЕМЕНТИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ

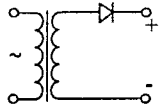
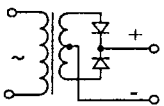
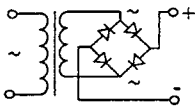
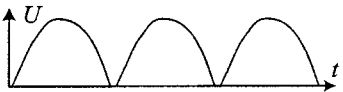
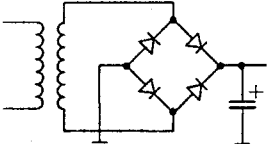
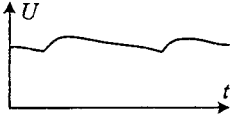
Нелінійний елемент – елемент, струм через який є нелінійною функцією напруги. Нелінійними можуть бути магнітні кола трансформаторів, спеціальні види резисторів (термістори, варистори). Одним із найбільш важливих нелінійних елементів електричних кіл є діод (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Діоди

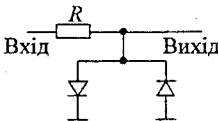
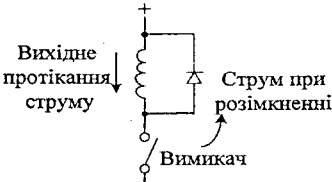
<i>Напівпровідниковий діод</i> – прилад, що містить один $p-n$ перехід (прилад з двома електродами, що пропускає електричний струм в одному напрямку) (рис. 4.1).	 Рисунок 4.2 – Вольт-амперна характеристика діода
 Рисунок 4.1 – Позначення діода на принциповій схемі	Вольт-амперна характеристика (ВАХ) – залежність струму від напруги через елемент (рис. 4.2) (kT/e – температурний потенціал, k – стала Больцмана, U – прикладена напруга, I_0 – зворотний струм діода, T – абсолютна температура) $I_{\phi} = I_0 \left(\exp \left(\frac{eU}{kT} \right) - 1 \right); \quad (5.1)$ $T = 293 \text{ K} \Rightarrow \frac{kT}{e} \approx 0,0258 \text{ В.}$
При вмиканні випрямного діода в коло змінного струму в колі протікає лише протягом однієї півхвилі напруги, яка відповідає прямому зміщенню діода (рис. 4.3). Під час дії другої півхвилі струму в колі не буде (<i>випрямлення змінного струму</i>).	 Рисунок 4.3 – Змінна напруга після випрямлення
Основні параметри випрямного напівпровідникового діода: максимальний струм в прямому напрямку, максимальна напруга у зворотному, максимально допустима частота змінного струму.	

Випрямлення змінного струму використовується для побудови схем випрямлячів (табл. 4.2) та інших пристроїв – обмежувачів сигналу, пристроїв захисту (табл. 4.3). Існують також інші типи діодів, класифікація яких за конструкцією, потужністю, частотою та функціональним призначенням наведена у табл. 4.4.

Таблиця 4.2 – Діодні випрямлячі

У <i>однопівперіодній схемі</i> (рис. 4.4) використовується один діод. На виході частота пульсувального струму, що протікає в одному напрямку, збігається з частотою змінного струму на вході випрямляча (див. рис. 4.3).	 Рисунок 4.4 – Однопівперіодний випрямляч
У разі використання <i>двопівперіодної схеми</i> (рис. 4.5) в обмотці трансформатора необхідний середній вивід. При такому включенні в кожному півперіоді навантаженою виявляється тільки частина цієї обмотки.	 Рисунок 4.5 – Двопівперіодний випрямляч
Збільшення числа діодів в <i>мостовій схемі</i> (рис. 4.6) дозволяє уникнути недоліків двопівперіодного випрямляча, проте кожна півхвиля струму проходить через два діоди (амплітуда вихідної напруги зменшується).	 Рисунок 4.6 – Мостовий випрямляч
Використання двопівперіодного та мостового випрямлячів дозволяє подвоїти частоту струму на виході (згладити струм) (рис. 4.7).	 Рисунок 4.7 – Напруга на виході двопівперіодного і мостового випрямлячів
Як фільтрувальний елемент на виході випрямляча паралельно до навантаження під'єднують електролітичний конденсатор з досить великою ємністю (рис. 4.8, 4.9).	
 Рисунок 4.8 – Схема випрямляча з фільтрувальним конденсатором	 Рисунок 4.9 – Напруга на виході випрямляча з фільтрувальним конденсатором
Амплітуда пульсацій випрямленої напруги (ΔU) при використанні фільтрувальної ємності тим менша, чим менший струм навантаження (I_n) і чим більша ємність (C) фільтра.	$\Delta U = \frac{I_n}{2fC}. \quad (4.1)$

Таблиця 4.3 – Пристрої на основі випрямних діодів

Коли треба обмежити амплітуду сигналу, щоб не пошкодити вхід чутливої схеми підсилювача, застосовується двосторонній діодний обмежувач (рис. 4.10), напруга на виході якого не перевищує 0,6 В.	 Рисунок 4.10 – Двосторонній діодний обмежувач амплітуди сигналу
Діод використовується також як захист у схемах з індуктивностями, через які протікає постійний струм (рис. 4.11). Діод, з'єднаний паралельно з індуктивністю, створює замкнуте коло для протікання індуктивного струму.	 Рисунок 4.11 – Діодний захист

Таблиця 4.4 – Класифікація діодів

Типи діодів			
1) За конструкцією:		2) За потужністю:	3) За частотою:
- площинні; - точкові.		- малопотужні; - середньої потужності; - потужні.	- низькочастотні; - високочастотні; - надвисокочастотні.
4) За функціональним призначенням:			
- випрямні діоди;		- тунельні діоди;	
- імпульсні діоди;		- світлодіоди;	
- стабілітрони;		- фотодіоди;	
- варикапи;		- діоди Шотткі.	

Система позначень діодів (ГОСТ 10862-72) складається з елементів:

- перший елемент (буква або цифра) вказує вихідний напівпровідниковий матеріал, з якого виготовлений діод: Г або 1 – германій, Д або 2 – кремній, А або 3 – арсенід галію, І або 4 – фосфід індію;

- другий елемент – буква, що показує клас або групу діода;
- третій елемент – число, що визначає електричні властивості діода;
- четвертий елемент вказує порядковий номер технологічної розробки діода і позначається від А до Я.

Умовне позначення діода (анод і катод) вказує, як потрібно підключати діод на платах пристроїв. Значення літер та цифр маркування наведено у

табл. 4.5. При нанесенні колірного коду (табл. 4.6) мітку, крапку або смужку наносять ближче до анода (рис. 4.12).

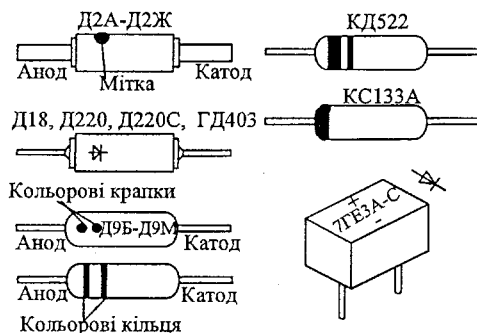


Рисунок 4.12 – Нанесення колірного коду на діоди

Таблиця 4.5 – Маркування діодів та транзисторів

Перше кільце	Друге кільце		Третє кільце
Код матеріалу	Тип		Серійний номер
А – германій	А – детекторний діод, змішувач	М – модулятори та помножувачі Холла	100-999 прилади загального застосування Z10...A99 прилади для промислового і спеціального застосування
В – кремній	В – варикап	Р – фотодіод, фототранзистор	
С – арсенід галію	С – малопотужний низькочастотний транзистор	Q – випромінювальні пристрої	
Р – сульфід кадмію	D – потужний низькочастотний транзистор	R – прилад, що працює на ділянці пробую	
	Е – тунельний діод	S – малопотужний перемикальний транзистор	
	Ф – малопотужний високочастотний транзистор	T – потужний регулювальний або ключовий прилад	
	G – декілька приладів в одному корпусі	U – потужний перемикальний транзистор	
	H – магніодіод	X – помножувальний діод	
	K – генератори Холла	Y – потужний випрямний діод	
	L – потужний високочастотний транзистор	Z – стабілітрон	

Таблиця 4.6 – Колірне маркування діодів за європейською системою

Колір кільця (крапки)	Номер кільця (крапки)			
	1	2	3	4
Чорний	AA	X		0
Коричневий			1	1
Червоний	BA	S	2	2
Помаранчевий			3	3
Жовтий		T	4	4
Зелений		V	5	5
Голубий		W	6	6
Фіолетовий			7	7
Сірий		Y	8	8
Білий		Z	9	9

Транзистор – напівпровідниковий прилад, що містить $p-n-p$ або $n-p-n$ переходи, дозволяє керувати струмом, що протікає через нього, за допомогою прикладеної до додаткового електрода напруги. За будовою та принципом дії транзистори поділяють на два великі класи: біполярні й польові. Біполярні транзистори розглянуто в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Біполярні транзистори

Біполярний транзистор містить два $p-n$ переходи і три легованих ділянки на одному кристалі напівпровідника. Середня ділянка називається базою, крайні – емітером і колектором (рис. 4.13).	колектор емітер колектор емітер
Показником підсилювальних властивостей транзистора є коефіцієнт підсилення струму (β).	$I_K = \beta I_B$. (4.2)
Всі струми в транзисторі пов'язані між собою за формулою (4.3).	$I_E = I_K + I_B$. (4.3)
Є три схеми вмикання транзистора: схема зі спільним емітером, спільною базою і спільним колектором (рис. 4.14). Схема зі спільним емітером (рис. 4.14, а) дає максимально можливе підсилення сигналу за потужністю (сигнал підсилюється і за напругою, і за струмом). Схеми зі спільною базою (рис. 4.14, б) і спільним колектором (рис. 4.14, в) фази сигналу не змінюють. У схемі зі спільною базою сигнал підсилюється тільки за напругою, у схемі зі спільним колектором – тільки за струмом.	

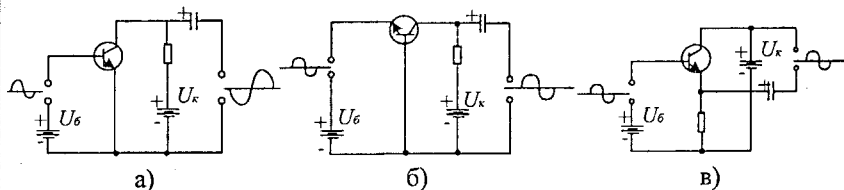


Рисунок 4.14 – Схеми вмикання транзистора: а) СЕ, б) СБ, в) СК

Вихідні характеристики транзистора у схемі зі СЕ показують, як змінюється струм колектора транзистора при зміні напруги колектор-емітер і деякому постійному струмі бази (або напрузі база – емітер). Графічний метод визначення струму при з'єднанні транзистора і опору навантаження отримав назву методу навантажувальних прямих (рис. 4.15). Точка, яка відповідає струму через транзистор без сигналу, отримала назву робочої точки.



Рисунок 4.15 – Побудова прямої навантаження

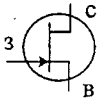
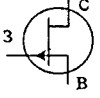
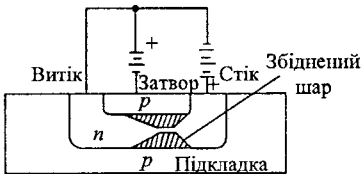
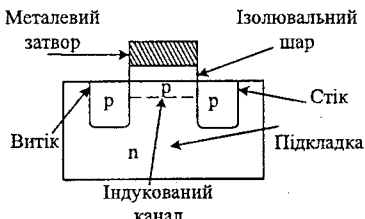
Основні параметри біполярного транзистора: максимальний струм колектора, максимальна напруга колектор-емітер, максимальна розсіювана потужність, коефіцієнт підсилення за струмом, гранична частота підсилення, передатна провідність або крутизна.

Польовий транзистор може мати чотири виводи, три з них основні: стік, витік і затвор. Четвертий вивід – вивід підкладки. Струм в польовому транзисторі проходить через канал, який легований носіями одного виду. Керується польовий транзистор напругою. В цілому польові транзистори поділяються на дві групи: транзистори з керувальним $p-n$ переходом; транзистори з ізолюваним затвором – МОН-транзистори (Метал-Оксид-Напівпровідник) (табл. 4.8).

Основними характеристиками польового транзистора є *стоко-затворні характеристики* (показують залежність струму стоку від напруги затвор – витік) та *вихідні характеристики* (відображають залежність струму стоку від напруги стік – витік при заданій напрузі затвор – витік).

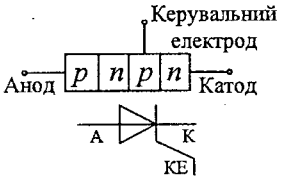
Параметри польового транзистора: максимальний струм стоку, максимально допустимі значення напруги стік – витік і затвор – витік, напруга відсікання, максимальна розсіювана потужність, крутизна стоко-затворної характеристики та частотні властивості.

Таблиця 4.8 – Класифікація польових транзисторів

Типи польових транзисторів		
Польові транзистори з керувальним $p-n$ переходом	МОП-транзистори	
	Збідненого типу	Збагаченого типу
n -канальні 	n -канальні 	n -канальні 
p -канальні 	p -канальні 	p -канальні 
		
Рисунок 4.16 – Структура транзистора з керувальним $p-n$ переходом і каналом n -типу	Рисунок 4.17 – Структура транзистора збагаченого типу з p -каналом	

Як було зазначено вище, діод має один $p-n$ перехід, транзистор – два. Елемент, який має три $p-n$ переходи, називається тиристором (табл. 4.9).

Таблиця 4.9 – Тиристор

Тиристор (рис. 4.18) – електронний елемент, що працює в ключовому режимі, тобто може знаходитися в двох станах. У відкритому стані він пропускає струм, якщо вивід анода має вищий потенціал, ніж вивід катода. При зворотній полярності напруги тиристор закривається. ВАХ тиристора має S-подібний характер.	 Рисунок 4.18 – Структура та позначення тиристора
Основні параметри тиристора: максимально допустимий прямий струм, максимальна зворотна напруга, мінімальне значення струму і напруги на керувальному електроді, потрібні для відкриття тиристора, значення струму утримання, максимально допустима частота проходження струму.	

Приклад 4.1. Розшифрувати позначення КД202А та 2С920.

Розв'язання. Діод КД202А: К – матеріал, кремній, Д – діод випрямний, 202 – призначення і номер розробки, А – різновид; 2С920 – кремнієвий стабілітрон великої потужності різновиди типу А; АІ301Б – фосфід-індієвий тунельний діод типу Б.

Приклад 4.2. Пряма напруга на $p-n$ переході за температури $T = 350\text{ К}$ складає $U = 0,2\text{ В}$. Зворотний струм насичення $I_0 = 10\text{ мкА}$. Знайдіть опір діода постійному струму R_0 та диференціальний опір r .

Розв'язання. Через діод протікає прямий струм

$$I_0 = I_0 \left(\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right) = 10 \cdot 10^{-6} \left(\exp\left(\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,2}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 350}\right) - 1 \right) = 7,6\text{ (мА)}.$$

Тоді опір діода постійному струму та диференціальний опір:

$$R_0 = U/I = 0,2/(7,6 \cdot 10^{-3}) = 26,3\text{ (Ом)}.$$

$$r_{\text{диф}} = \left(\frac{dI}{dU} \right)^{-1} = \left(I_0 \frac{e}{kT} \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) \right)^{-1} \approx \frac{kT}{eI} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 350}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 7,6 \cdot 10^{-3}} = 4\text{ (Ом)}.$$

Запитання і завдання

1. Чому напівпровідниковий діод проводить струм тільки у прямому напрямку?
2. Який змінний струм напівпровідниковий діод не зможе випрямити?
3. Що таке основні носії заряду?
4. Якщо потрібно вибрати напівпровідниковий діод для електронної схеми, які характеристики діода потрібно враховувати?
5. Які види випрямних схем ви знаєте, чим вони відрізняються, які їх переваги і недоліки?
6. Крім випрямлення змінного струму, як ще може використовуватися напівпровідниковий діод?
7. Які типи біполярних транзисторів ви знаєте? Нарисуйте їх структурну схему і умовне позначення на принципових схемах. Поясніть принцип роботи біполярного транзистора.
8. Чим відрізняється ВАХ біполярного транзистора від ВАХ діода?

9. Нарисуйте схеми включення біполярного транзистора зворотної провідності, вкажіть полярність підключення джерела живлення до виводів транзистора. Які особливості є у кожній схемі включення?

10. Як виглядає вхідна характеристика біполярного транзистора?

11. Який принцип роботи польового транзистора?

12. Чим відрізняються польові транзистори збагаченого і збідненого типів?

13. Нарисуйте ВАХ тиристора? Чим пояснюється її форма?

14. Ідеальний $p-n$ перехід має зворотний струм насичення $I_0 = 10^{-13} \text{ А}$ за температури $T = 280 \text{ К}$ і $I_0 = 10^{-8} \text{ А}$ за температури $T = 115^\circ \text{С}$. Визначте напругу на $p-n$ переході в обох випадках, якщо прямий струм дорівнює $I_0 = 2 \text{ мА}$.

15. Германієвий сплавний $p-n$ перехід має зворотний струм насичення $I_0 = 1 \text{ мкА}$, а кремнієвий з такими самими параметрами — $I_0 = 10^{-8} \text{ А}$. Обчислити і порівняти прямі напруги на переходах за температури $T = 293 \text{ К}$, якщо через кожен діод протікає прямий струм $I = 100 \text{ мА}$.

16. На рис. 4.19, а зображена діодна схема. Визначте напругу на діоді, вважаючи його параметри ідеальними.

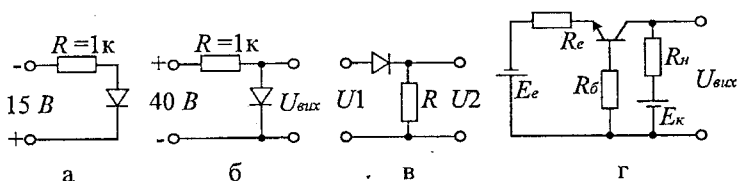


Рисунок 4.19

17. Визначте вихідну напругу (напругу на діоді) в схемі на рис. 4.19, б при кімнатній температурі, якщо діод виготовлений з кремнію та має зворотний струм насичення $I_0 = 10 \text{ мкА}$.

18. На вхід схеми, яка зображена на рис. 4.19, в, подається напруга $U_1 = U_m \sin \omega t$. Амплітуда напруги складає 70 В , опір $R = 1 \text{ кОм}$. Визначте значення і форму вихідної напруги U_2 . Діод вважати ідеальним для сигналу з великою амплітудою ($R_{np} = 0$, $R_{zs} = \infty$).

19. У схемі, що наведена на рис. 4.19, г, $R_e = 2 \text{ кОм}$, $R_b = 50 \text{ кОм}$, $R_n = 5 \text{ кОм}$, $E_e = 6 \text{ В}$, $E_k = 20 \text{ В}$. Знайти вихідну напругу $U_{вих}$, якщо зворотний струм насичення переходу колектор — база $I_{кб0} \approx 0$, коефіцієнт передавання струму у схемі зі спільною базою $\alpha \approx 0,98$ ($\alpha = I_k / I_e$), $r_k \rightarrow \infty$.

5 ПОБУДОВА АНАЛОГОВИХ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ

В аналогових електронних схемах напруга і струм можуть змінюватися неперервно в часі. Розробка будь-яких аналогових схем потребує використання базових пристроїв, що розглядаються в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Складові аналогових електронних схем

Параметричний стабілізатор – простий пристрій для стабілізації напруги, який базується на властивостях зенерівського, або опорного діода, який також називають стабілітроном (рис. 5.1, а).

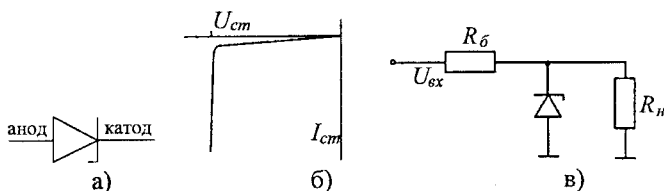


Рисунок 5.1 – Умовне позначення стабілітрона (а), графік зміни струму при пробіі (б) та схема включення стабілітрона (в)

При збільшенні зворотної напруги струм різко зростає (внаслідок збільшення енергії рухомих заряджених частинок), настає *електричний пробій*, напруга стабілізується (рис. 5.1, б).

Якщо струм не обмежити, то він нагріває *p-n* перехід до високих температур і руйнує його – *тепловий пробій*.

Робота стабілітрона обмежена рамками мінімального і максимального струмів. Стабілітрон підключається паралельно до навантаження (R_n). Призначення баластного опору ($R_б$) – обмеження струму (рис. 5.1, в). Баластний опір та розсіювана потужність стабілітрона розраховуються за формулами (5.1) та (5.2).

$$R_б = \frac{U_{вх\max} - U_{ст\text{аб}}}{I_n - I_{ст\text{аб}\min}}; \quad (5.1)$$

$$P_{ст\text{аб}} = \left(\frac{U_{вх\max} - U_{ст\text{аб}}}{R_б - I_n} \right) U_{ст\text{аб}}. \quad (5.2)$$

Емітерний повторювач – це схема включення біполярного транзистора із спільним колектором (рис. 5.2). Емітерний повторювач не підсилює напругу, але підсилює струм (напруга на виході менша на величину спаду напруги на переході база – емітер, тобто на 0,6 В).

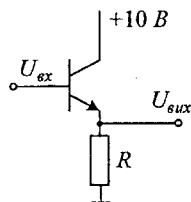
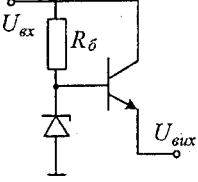
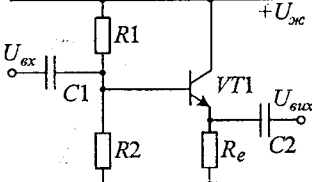


Рисунок 5.2 – Повторювач

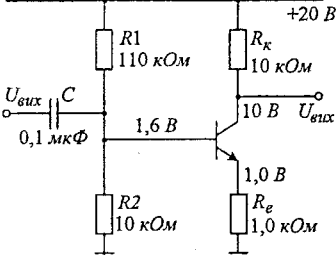
Продовження таблиці 5.1

При зміні напруги на базі (див. рис. 5.2) на ΔU_{δ} відповідна зміна напруги емітера ΔU_e розраховується за формулою (5.3).	$\Delta U_e = \Delta U_{\delta}. \quad (5.3)$
Оскільки емітерний опір зазвичай менший, ніж опір навантаження, що підключається паралельно, зміна струму емітера визначається за формулою (5.4).	$\Delta I_e = \Delta U_e / R_e. \quad (5.4)$
Зміна базового струму (β – коефіцієнт підсилення за струмом) та вхідний опір розраховуються за формулами (5.5) та (5.6).	$\Delta I_{\delta} \approx \Delta I_e / \beta; \quad (5.5)$ $R_{ex} = \Delta U_{\delta} / \Delta I_{\delta}. \quad (5.6)$
Струм стабілітрона у стабілізаторі, наведеному на рис. 5.3, незалежний від струму навантаження. Але стабілітрон повинен бути розрахований на високу потужність.	Зв'язок між декількома каскадами підсилювача зазвичай здійснюється за допомогою ємностей. На рис. 5.4 зображений емітерний повторювач як каскад підсилювача.
 Рисунок 5.3 – Вдосконалений варіант стабілізатора напруги	 Рисунок 5.4 – Емітерний повторювач у складі підсилювача
Робоча точка схеми (рис. 5.4) повинна знаходитися рівновіддалено між позитивним і негативним виводами живлення. Напруга емітера розраховується за формулою (5.7).	$U_e = U_{жсв} I_2. \quad (5.7)$
Знаючи струм спокою і напругу на емітері, легко визначити опір в колі емітера (формула (5.8)).	$R_e = \frac{U_{жсв}}{2I_{спокою}}. \quad (5.8)$
Напруга на базі транзистора розраховується за формулою (5.9).	$U_{\delta} = U_e + 0,6 \text{ В}. \quad (5.9)$
Умова ефективного передавання сигналу напруги в базу транзистора вказана в нерівності (5.10).	$R_1 / R_2 \ll R_{ex}. \quad (5.10)$

Більш складними аналоговими пристроями є пристрої зі зворотним зв'язком. *Зворотним зв'язком* (33) у підсилювачах (табл. 5.2) називають

явище передавання частини сигналу з вихідного ланцюга у вхідний. Електричне коло, що забезпечує це передавання, називається *колом* чи *петлею зворотного зв'язку*. Зворотний зв'язок називають *негативним*, якщо його сигнал віднімається від вхідного сигналу, і *позитивним*, якщо сигнал 33 додається до вхідного.

Таблиця 5.2 – Підсилювачі

Підсилювач на транзисторі зі <i>СЕ</i> (рис. 5.5). Якщо на вхід схеми надходить сигнал, він змінює напругу бази ΔU_{δ}, тоді на емітері виникають такі ж зміни за амплітудою $\Delta U_e = \Delta U_{\delta}$. Вони приводять до зміни емітерного струму $\Delta I_e = \Delta U_e / R_e$ і до приблизно таких самих змін колекторного струму $\Delta I_{\kappa} \approx \Delta I_e$.	 Рисунок 5.5 – Підсилювальний каскад на транзисторі зі <i>СЕ</i>
Напруга на колекторі транзистора (і на виході підсилювача) визначається за формулою (5.11).	$U_{\kappa} = U_{\text{жив}} - I_{\kappa} R_{\kappa}. \quad (5.11)$
Зміна спаду напруги на колекторному резисторі і напруги на колекторі розраховується за формулою (5.12).	$\begin{aligned} \Delta U_{\kappa} &= -\Delta I_{\kappa} R_{\kappa} = \\ &= \Delta U_{\delta} R_{\kappa} / R_e. \end{aligned} \quad (5.12)$
Коефіцієнт підсилення каскаду (<i>K</i>) дорівнює відношенню зміни напруги на колекторі (вихідного сигналу) до зміни напруги на базі (вхідного сигналу).	$\begin{aligned} K &= \Delta U_{\kappa} / \Delta U_{\delta} = \\ &= R_{\kappa} / R_e. \end{aligned} \quad (5.13)$
Коли зовнішнього резистора немає, внутрішній опір визначає загальну величину опору в колі емітера й величину коефіцієнта підсилення каскаду. Власний опір емітера невеликий, але він залежить від струму колектора.	$\begin{aligned} r_e &= 25 / I_e (\text{мА}), \quad (5.14) \\ (T &= 293 \text{ К}). \end{aligned}$
Для кількісного оцінювання впливу кола зворотного зв'язку використовують коефіцієнт зворотного зв'язку (k_{33}), що показує, яка частина вихідного сигналу надходить на вхід підсилювача.	$k_{33} = U_{33} / U_{\text{вих}}. \quad (5.15)$
На рис. 5.6 схематично показана петля 33 в підсилювачі. Коефіцієнт підсилення розраховується за формулою (5.16).	$K_{33} = U_{\text{вих}} / U_{33}. \quad (5.16)$

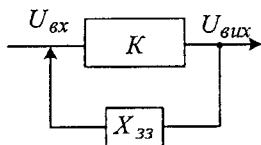


Рисунок 5.6 – Схема підсилювача, охопленого ЗЗ

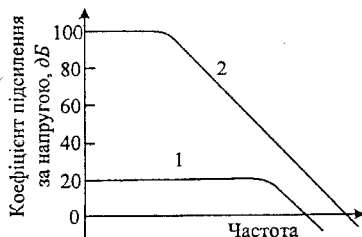


Рисунок 5.7 – АЧХ підсилювача зі ЗЗ (1) і без нього (2)

Напруга на вході схеми (рис. 5.6) при негативному ЗЗ визначається за формулою (5.17).

$$U_1 = U_{\text{вх}} - U_{\text{зз}}. \quad (5.17)$$

Напруга зворотного зв'язку розраховується за формулою (5.18).

$$U_{\text{зз}} = X_{\text{зз}} U_{\text{вих}}. \quad (5.18)$$

Напруга на виході без зворотного зв'язку розраховується за формулою (5.19).

$$U_{\text{вих}} = K U_1. \quad (5.19)$$

Вираз $KX_{\text{зз}}$ називають петлевим підсиленням, а $(1 + KX_{\text{зз}})$ – глибиною зворотного зв'язку.

$$U_{\text{вих}} = \frac{K U_1}{1 + U_{\text{зз}}} = \frac{K}{1 + KX_{\text{зз}}}. \quad (5.20)$$

Незважаючи на те, що негативний зворотний зв'язок знижує величину коефіцієнта підсилення, він підвищує рівномірність підсилення в смузі частот та стійкість роботи підсилювача (рис. 5.7).

Ще одним типом приладів із ЗЗ є стабілізатор (табл. 5.3). *Стабілізатор зі зворотним зв'язком* (рис. 5.8) містить коло зворотного зв'язку, яке контролює вихідну напругу. При змінах вихідної напруги з'являється керувальний сигнал. Коло вибору напруги – це дільник напруги, він подає вихідну напругу для порівняння на коло реєстрації помилок, яке порівнює вихідну напругу з опорною. Напруга помилки (різниця між вихідною і опорною напругою) підсилюється підсилювачем помилки (він керує провідністю транзистора для компенсації змін вихідної напруги).

На рис. 5.9 резистори R_3 , R_4 і R_5 – коло вибору напруги. Транзистор VT_2 – реєстратор і підсилювач помилки. Стабілітрон VS_1 і резистор R_1 задають опорну напругу. VT_1 – регулювальний транзистор. Резистор R_2 є колекторним навантаженням транзистора VT_2 і подає зміщення на базу транзистора VT_1 . Недоліком послідовного стабілізатора є те, що транзистор послідовно з'єднаний з навантаженням. Коротке замикання в навантаженні призведе до великого струму через транзистор. Необхідне коло, яке підтримує струм через транзистор на безпечному рівні.

Таблиця 5.3 – Стабілізатори зі зворотним зв'язком

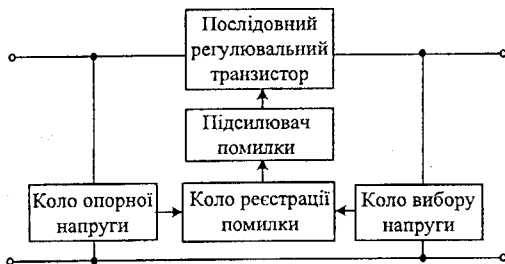


Рисунок 5.8 – Блок-схема стабілізатора зі зворотним зв'язком

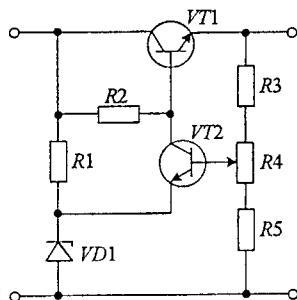


Рисунок 5.9 – Принципова схема стабілізатора зі зворотним зв'язком

У коло зворотного зв'язку (рис. 5.10) доданий послідовний регулятор напруги. Транзистор VT3 і резистор R6 утворюють коло обмеження струму. Для того, щоб транзистор VT3 проводив, його перехід база – емітер повинен бути зміщений у прямому напрямку напругою не менше 0,7 В. Коли напруга між базою і емітером під дією великого струму через резистор R6 досягне 0,7 В, транзистор відкриється.

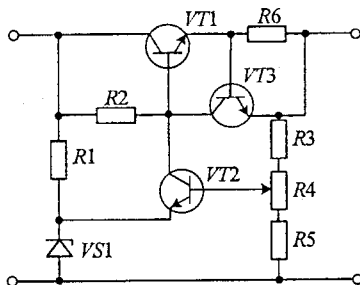


Рисунок 5.10 – Стабілізатор з колом обмеження струму

Сучасні стабілізатори в інтегральному виконанні мають малі габарити і вагу, вони дешеві і прості в застосуванні. (рис. 5.11). При виборі мікросхеми стабілізатора необхідно знати напругу і струм навантаження, а також електричні характеристики нестабілізованого блока живлення. Мікросхеми стабілізаторів з фіксованою вихідною напругою мають три виводи і забезпечують тільки одну вихідну напругу. Існують також двополярні стабілізатори напруги.

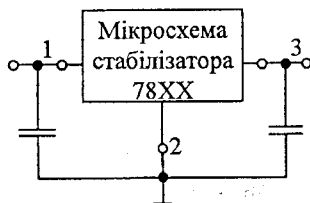


Рисунок 5.11 – Схема вмикання стабілізатора в інтегральному виконанні

Приклад 5.1. Для стабілізації напруги на навантаженні використовують-ся напівпровідниковий стабілітрон (рис. 5.12), напруга стабілізації якого $U_{cm} = 10 \text{ В}$. Знайти межі допустимих змін напруги живлення, якщо максимальний струм стабілітрона $I_{cm, \max} = 30 \text{ мА}$, мінімальний струм стабілітрона $I_{cm, \min} = 1 \text{ мА}$, опір навантаження $R_n = 1 \text{ кОм}$, баластний опір $R_\phi = 0,5 \text{ кОм}$.

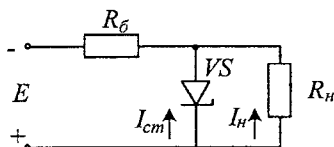


Рисунок 5.12 – Схема стабілізації напруги

Розв'язання. Напруга джерела живлення та струм через навантаження:

$$E = U_{cm} + R_\phi (I_n + I_{cm});$$

$$I_n = U_{cm} / R_n,$$

тоді

$$E = U_{cm} (1 + R_\phi / R_n) + R_\phi I_{cm};$$

$$E_{\min} = 10(1 + 0,5 \cdot 10^3 / 10^3) + 0,5 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} = 15,5 \text{ В};$$

$$E_{\max} = 10(1 + 0,5 \cdot 10^3 / 10^3) + 0,5 \cdot 10^3 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 30 \text{ В}.$$

Приклад 5.2. Підсилювач із входним опором $R_{вх} = 10 \text{ кОм}$ та вихідним опором $R_{вих} = 0,5 \text{ кОм}$ при роботі на навантаження $R_n = 2 \text{ кОм}$ має коефіцієнт підсилення за напругою 500. Як зміниться коефіцієнт підсилення при введенні до підсилювача послідовного зворотного зв'язку за напругою? Дільник напруги під'єднаний паралельно до навантаження і складається із опорів $R_1 = 9,9 \text{ кОм}$ та $R_2 = 100 \text{ Ом}$.

Розв'язання. Розрахуємо коефіцієнт підсилення за напругою підсилювача без зворотного зв'язку при холостому ході:

$$K_U = K_{U_{xx}} \frac{R_n}{R_n + R_{вих}} \Rightarrow K_{U_{xx}} = K_U \frac{R_n + R_{вих}}{R_n} = 500 \cdot \frac{2 + 0,5}{2} = 625.$$

З урахуванням опору дільника $R'_n = 1,66 \text{ кОм}$, тоді

$$K_U = 625 \cdot \frac{1,66}{1,66 + 0,5} = 480;$$

$$X_{33} = \frac{R1}{R1 + R2} = \frac{0,1}{0,1 + 9,9} = 0,01.$$

Розраховуємо коефіцієнт підсилення:

$$K_{U33} = \frac{K_U}{1 + X_{33} K_U} = 480 = \frac{480}{1 + 0,01 \cdot 480} = 83.$$

Запитання і завдання

1. Чим відрізняються електричний і тепловий пробої стабілітрона?
2. Яку роль в параметричному стабілізаторі напруги виконує баластний опір?
3. Чи може струм навантаження параметричного стабілізатора перевищувати максимально допустимий струм стабілітрона?
4. Який вхідний опір емітерного повторювача?
5. Як може бути використаний емітерний повторювач, якщо його коефіцієнт підсилення менший за 1?
6. Нарисуйте схему стабілізатора напруги, що використовує емітерний повторювач.
7. Як визначити коефіцієнт підсилення каскаду на транзисторі, включеному за схемою СЕ, СК?
8. У чому суть дії зворотного зв'язку в підсилювачах? Застосування якого виду зворотного зв'язку використовується в підсилювальних схемах і чому?
9. Поясніть принцип роботи стабілізатора напруги зі зворотним зв'язком.
10. Як уникнути пошкодження схеми стабілізатора при короткому замиканні в навантаженні? Поясніть призначення обмежувача струму.
11. Які особливості мають стабілізатори напруги в інтегральному виконанні?
12. Напруга живлення схеми (див. рис. 5.1, в) E змінюється в діапазоні від 25 В до 40 В, опір навантаження R_n змінюється в діапазоні від 0,5 кОм до 1 кОм. Зміни E і R_n відбуваються незалежно один від одного. Знайти опір баластного резистора R_6 , при якому струм стабілітрона мінімальний: визначити діапазон зміни напруги на навантаженні і діапазон зміни струму стабілітрона.
13. У схемі на рис. 5.1, в $E = 40$ В і $R_6 = 0,2$ кОм в результаті зменшення опору навантаження R_n струм навантаження змінився в 2 рази, а напруга

на навантаженні змінилася на $0,5\text{ В}$. Знайти напругу на навантаженні і струм стабілітрона до і після зміни.

14. Розрахуйте значення баластного опору, необхідного для побудови параметричного стабілізатора напруги і розрахуйте коефіцієнт стабілізації, якщо навантаження має постійний опір 500 Ом . Напруга стабілізації 10 В , вхідна напруга 15 В , $I_{\min} = 5\text{ мА}$, $I_{\max} = 50\text{ мА}$, $P_{\max} = 200\text{ мВт}$, $r_{\text{ст}} = 1\text{ Ом}$.

15. Розрахуйте значення вхідного та вихідного опорів при введенні до підсилювача послідовного зворотного зв'язку за напругою, використовуючи дані з прикладу 5.2.

6 ЦИФРОВА ЕЛЕКТРОНІКА

Цифрова електроніка – електроніка, яка базується на елементах, здатних знаходитися в двох станах (0 – «Брехня», 1 – «Істина»). Суть основних понять та законів цифрової електроніки розкривається у табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Поняття цифрової електроніки

Основою цифрової електроніки є так звані <i>логічні елементи</i> – елементи, що виконують логічні операції, а також <i>елементи електронної пам'яті</i> , які здатні зберігати свій стан необмежено довго за наявності живлення.		
Комбінаційні логічні схеми виконують порівняння, перетворення, підрахунок та інші дії з цифровими електричними сигналами. Комбінаційні логічні схеми є складовими цифрових мікросхем.		
Цифрові мікросхеми складаються з великої кількості з'єднаних певним чином логічних елементів і можуть розглядатися як самостійний електронний пристрій (вони виконані в одному корпусі і реалізують певні дії).		
Логічними (булевими) функціями називають функції, аргументами яких можуть бути або булеві величини, або булеві змінні.		
Операції над логічними змінними		
Логічне заперечення (інверсія, операція НЕ): $\bar{x}, \sim x$ («не ікс»).	Логічне множення (кон'юнкція, операція І): $x \cdot y, xy, x \wedge y, x \& y$.	Логічне додавання (диз'юнкція, операція АБО): $x + y, x \vee y, x y$.
«Сума за модулем два» (операція ВИКЛЮЧНЕ АБО, нерівнозначність): $x \oplus y = \bar{x} \cdot y \vee x \cdot \bar{y}$.		
Закони заперечення:		Закони двоїстості (де Моргана):
$x \vee \bar{x} = 1;$	(6.1)	$\overline{x \vee y} = \bar{x} \cdot \bar{y};$ (6.8)
$x \cdot \bar{x} = 0;$	(6.2)	$\overline{x \cdot y} = \bar{x} \vee \bar{y}.$ (6.9)
$0 \vee x = x;$	(6.3)	Закони поглинання:
$1 \cdot x = x;$	(6.4)	
$1 \vee x = 1;$	(6.5)	
$0 \cdot x = 0;$	(6.6)	
$\bar{\bar{x}} = x.$	(6.7)	
		$x \vee x \cdot \bar{y} = x;$ (6.10)
		$x(x \vee y) = x.$ (6.11)

Основних логічних елементів, як і операцій, три. Одним зі способів подання логічних функцій є *таблиці істинності* – таблиці, в яких перераховані всі можливі комбінації параметрів і результат функції. У табл. 6.2 наведено характеристику основних логічних елементів.

Таблиця 6.2 – Логічні елементи

Елемент НЕ – інвертор (рис. 6.1), він задає на виході стан, протилежний вхідному.

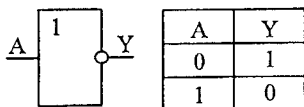


Рисунок 6.1 – Умовне позначення і таблиця істинності елемента НЕ

Елемент І (рис. 6.2). Змінна Y істинна тоді, коли A і B істинні.

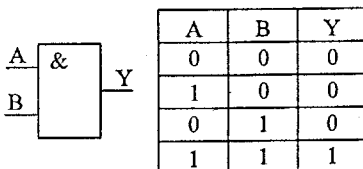


Рисунок 6.2 – Умовне позначення і таблиця істинності елемента І

Елемент АБО (рис. 6.3). На виході з'являється 1, якщо хоча б на один із входів подана 1.

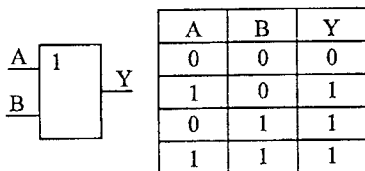


Рисунок 6.3 – Умовне позначення і таблиця істинності елемента АБО

Елемент І-НЕ (рис. 6.4). На виході з'являється 0 тільки тоді, коли на обидва входи подана 1.

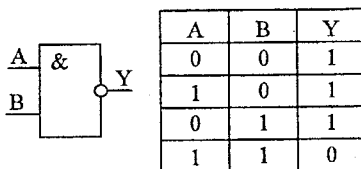


Рисунок 6.4 – Умовне позначення і таблиця істинності елемента І-НЕ

Елемент АБО-НЕ (рис. 6.5). На виході з'являється 0, якщо хоча б на один із входів подана 1.

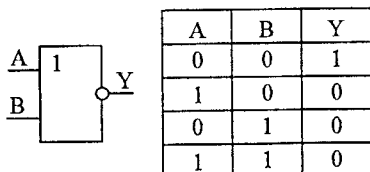


Рисунок 6.5 – Умовне позначення і таблиця істинності елемента АБО-НЕ

Елемент ВИКЛЮЧНЕ АБО (нерівнозначність) (рис. 6.6). На виході з'являється 1, якщо тільки на один із входів подана 1.

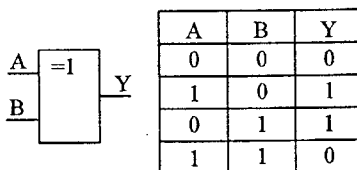


Рисунок 6.6 – Умовне позначення і таблиця істинності елемента ВИКЛЮЧНЕ АБО

Якщо за 1 приймається високий рівень напруги, а за 0 низький, то логіка називається *позитивною*, якщо навпаки, — *негативною*.

Залежно від способу зберігання інформації елементи пам'яті можуть бути статичними (дозволяють зберігати двійкову інформацію як завгодно довго) і динамічними (зберігають інформацію протягом обмеженого проміжку часу). Статичними елементами пам'яті є тригери (табл. 6.3).

Таблиця 6.3 – Тригери

Тригер – елементарна електронна комірка пам'яті, здатна зберігати один розряд двійкового числа.

RS-тригер (рис. 6.7) має два виходи, Q , $\bar{Q}$, і два керувальних входи, R (Reset – скидання), S (Set – установлення). Стан, коли одночасно на входи R і S подається високий рівень, заборонений, оскільки неможливо передбачити, який з виходів (Q чи $\bar{Q}$) опиниться в стані з високим рівнем і, отже, стан виходів тригера не може бути визначено (рис. 6.8).

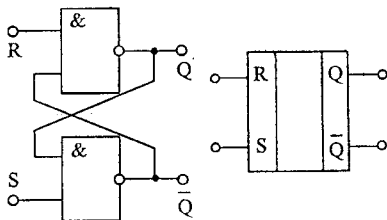


Рисунок 6.7 – Схема та умовне позначення RS-тригера

Входи		Виходи	
S	R	Q	$\bar{Q}$
0	0	NC	NC
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	?	?

Рисунок 6.8 – Таблиця істинності RS-тригера (NC – не змінюється, ? – заборонений стан)

Синхронний RS-тригер доповнений керувальним блоком для уникнення заборонених станів на вході тригера (рис. 6.9). Такий тригер керується логічними станами входів R і S лише за наявності тактового імпульсу (Clock).

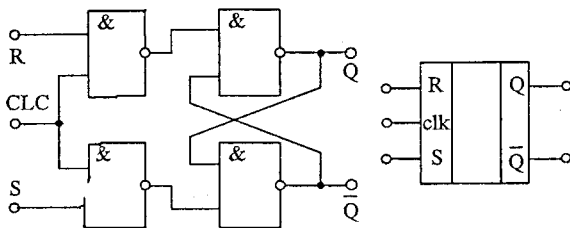


Рисунок 6.9 – Схема та умовне позначення синхронного RS-тригера

Продовження таблиці 6.3

D-тригер (тригер даних) має лише один вхід запису інформації (рис. 6.10).

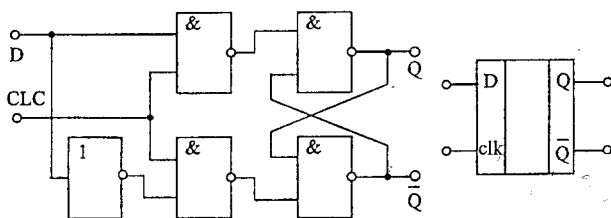


Рисунок 6.10 – Схема та умовне позначення D-тригера

JK-тригер вважається найбільш універсальним (рис. 6.11). При подачі на обидва входи J і K високого рівня сигнали тактові імпульси змушують вихід перемикається і змінювати стан.

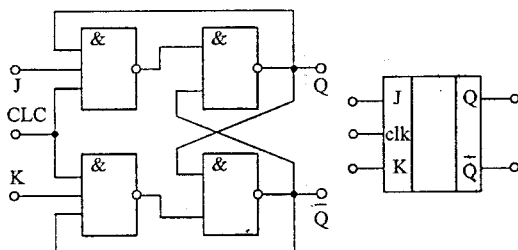


Рисунок 6.11 – Схема та умовне позначення JK-тригера

Тригер обробляє один розряд двійкового числа. Для одночасної роботи з кількома розрядами створені логічні схеми – регістри.

По суті, *регістр* – це набір тригерів з єдиною схемою управління. Регістр пам'яті зберігає інформацію, якщо на керувальному вході низький рівень напруги, а при високому рівні інформація з входів надходить на виходи. Регістр зсуву дозволяє перетворювати паралельний двійковий код в послідовний і навпаки.

Комбінаційні схеми є більш складними цифровими пристроями в порівнянні з логічними елементами та елементами пам'яті.

Шифратор – комбінаційна логічна схема, що виконує перетворення одного двійкового числа в інший. Наприклад, десятково-двійковий шифратор перетворює сигнали, що відповідають десятковим цифрам, у двійковий код.

Дешифратор виконує операцію, зворотну тій, яку виконує шифратор. Наприклад, він може перетворити двійкове число в унітарний код на одному з десяти виходів.

Мультиплексор – це електронний багатопозиційний комутатор. Мультиплексор на вісім входів має три лінії керування (А, В і С). Подачею відповідного коду на лінії керування може бути обраний будь-який із входів.

Серед програмованих інтегральних схем найбільшу інформаційну потужність мають *мікропроцесори (МП)* – програмно керовані пристрої, виконані на одному кристалі, які здійснюють прийом, обробку і видачу інформації (рис. 6.12). Основою МП є центральне обчислювальне ядро (центральний процесорний пристрій – ЦПП), яке містить арифметичний обчислювач, логічне ядро і регістри загального призначення. Із зовнішніми пристроями ЦПП спілкується за допомогою трьох шин: адреси, даних і керування. Ініціалізація регістрів ЦПП виконується за сигналом скидання RESET, а синхронізація роботи здійснюється від тактових імпульсів SYN.

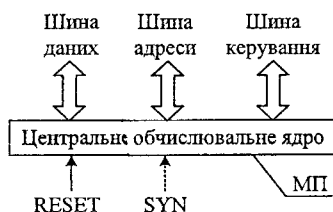


Рисунок 6.12 – Функціональна схема мікропроцесора

Мікроконтролер (МК) – мікропроцесор, в якому на кристалі ЦПП розміщені також оперативний і постійний запам'ятовувальні пристрої (ОЗП, ПЗП), таймери, лічильники, аналого-цифрові і цифроаналогові перетворювачі (АЦП, ЦАП), інтерфейсні вузли і порти введення/виведення (рис. 6.13). Тактові імпульси виробляє вбудований синхрогенератор, частота якого стабілізується кварцовим резонатором. Для програмування ПЗП використовується окремий вхід або шина декількох сигналів.



Рисунок 6.13 – Функціональна схема мікроконтролера

Окремим типом мікроконтролерних пристроїв є *цифрові сигнальні процесори* (англ. DSP – Digital Signal Processor) (рис. 6.14), які здійснюють обробку широкосмугових сигналів в режимі реального часу завдяки високій швидкодії ядра сигнального процесора (СП), багатопотоковій системі обслуговування пам'яті та наявності апаратних математичних команд. DSP використовуються для аудіо- і відеотехніки, систем гнучкого керування роботизованими комплексами тощо.

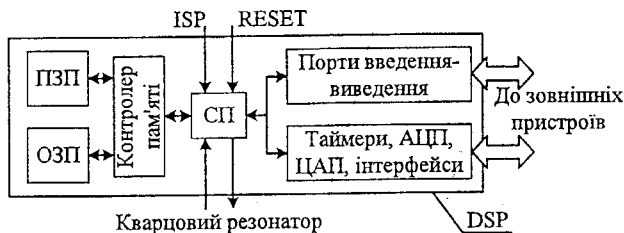


Рисунок 6.14 – Функціональна схема DSP

Сучасний мікрокомп'ютер (рис. 6.15) містить всі складові МК або DSP, але додатково має на борту контролер шин для підключення зовнішньої високошвидкісної пам'яті, а також аудіо- і відеопроцесори.

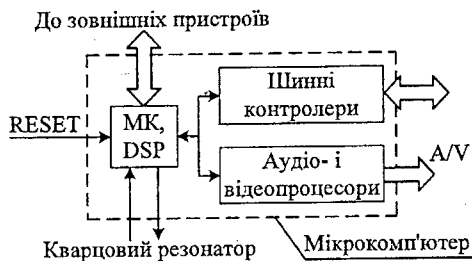


Рисунок 6.15 – Функціональна схема мікрокомп'ютера

ПЛИС (програмовані логічні інтегральні схеми) – це мікросхеми, логіка роботи яких не визначається при виготовленні, а задається за допомогою програмування. У пристроях ПМЛІ (програмована матрична логіка) існує вбудована структура, змінити яку неможливо, а мікросхеми ПЛІМ (програмована логічна матриця) мають велику гнучкість, зв'язки між логічними елементами в ній можна створювати довільно.

Мікропроцесорна система – обчислювальна, контрольно-вимірювальна система або система керування, в якій основним пристроєм

обробки інформації є МП. Мікропроцесорна система будується з набору мікропроцесорних ВІС (великих інтегральних схем).

Мультимікропроцесорна (або мультипроцесорна) система – система, яка утворюється об'єднанням деякої кількості універсальних або спеціалізованих МП, завдяки чому забезпечується паралельна обробка інформації і розподілене керування.

Мікропроцесорний комплект (МПК) – сукупність інтегральних схем, сумісних за електричними, інформаційними та конструктивними параметрами і призначених для побудови електронно-обчислювальної апаратури та мікропроцесорних систем керування. Зазвичай МПК містить: ВІС МП; ВІС ОЗП; ВІС ПЗП; інтерфейси або контролери зовнішніх пристроїв; службові ВІС (тактовий генератор, регістри, шинні формувачі, контролери шин, арбітри шин).

Приклади типових завдань

Приклад 6.1. Розрахувати частоту сигналу на кожному виході чотирирозрядного двійкового лічильника, на тактовий вхід якого надходить сигнал з частотою $f_0 = 100 \text{ кГц}$.

Розв'язання. На виходах тригерів лічильника виникають імпульсні послідовності з частотами

$$f_1 = f_0 \cdot 2^{-1} = 10^5 \cdot 2^{-1} = 50 \text{ кГц}, \quad f_2 = f_0 \cdot 2^{-2} = 10^5 \cdot 2^{-2} = 25 \text{ кГц}, \\ f_3 = f_0 \cdot 2^{-3} = 10^5 \cdot 2^{-3} = 12,5 \text{ кГц}, \quad f_4 = f_0 \cdot 2^{-4} = 10^5 \cdot 2^{-4} = 6,25 \text{ кГц}.$$

Приклад 6.2. Який двійковий код потрібно подати на вхід дешифратора 7-сегментного індикатора, щоб отримати цифру 1 на індикаторі?

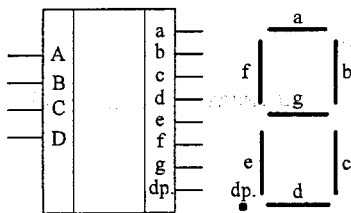


Рисунок 6.16 – Дешифратор двійково-десятькового коду для 7-сегментного індикатора

Розв'язання. Щоб запалити цифру 1 на індикаторі, повинні з'явитися високі рівні на виходах b і c, ці рівні з'являються при подачі на вхід двійкової одиниці – числа 0001.

1. Що показує таблиця істинності?
2. У чому різниця між позитивною і негативною логікою?
3. На чому базується цифрова електроніка?
4. Які логічні елементи найбільш поширені і чому?
5. Нарисуйте логічну схему, умовне позначення і таблицю істинності D-тригера.
6. Чому тригер вважається елементом пам'яті?
7. Як впливає вхід синхронізації на роботу тригера?
8. Чим пояснюється затримка часу встановлення вихідного сигналу тригера?
9. Які операції виконує мультиплексор? Нарисуйте його позначення.
10. Які види дешифраторів ви знаєте?
11. Чи можна регістр замінити набором тригерів?
12. На чому заснований принцип роботи цифрових мікросхем-лічильників?
13. Нарисуйте таблицю істинності для шифратора.
14. Нарисуйте логічну схему, що виконує функцію елемента «виключне АБО» з використанням тільки трьох основних логічних елементів.
15. Чим відрізняється мікроконтролер від мікропроцесора?
16. Визначте частоту прямокутних імпульсів на виході лічильного тригера, якщо частота вхідного сигналу 1000 Гц .
17. Визначте частоту сигналу в старшому розряді на виході п'ятирозрядного двійково-десятьового лічильника, на тактовий вхід якого подається сигнал з частотою $XXX \text{ Гц}$.
18. На рис. 6.17, а зображений JK-тригер. Назвіть його функціональні стани і перерахуйте двійкові значення на виході Q, що відповідають кожному тактовому імпульсу.

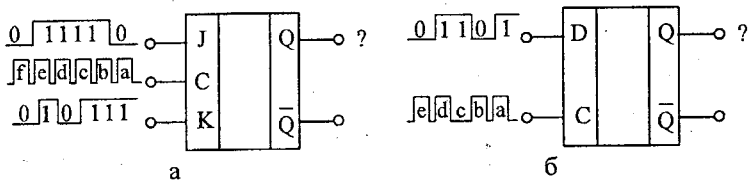


Рисунок 6.17

19. Назвіть функціональні стани D-тригера, зображеного на рис. 6.17, б і перерахуйте двійкові значення на виході Q, що відповідають кожному тактовому імпульсу.
20. Які двійкові коди на вході дешифратора 7-сегментного індикатора відповідають кожній десятковій цифрі на індикаторі?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аваев Н. А. Основы микроэлектроники / Аваев Н. А., Наумов Ю. Е., Фролкин В. Т. – М. : Радио и связь, 1991. – 288 с.
2. Батушев В. А. Электронные приборы / Батушев В. А. – М. : Высшая школа, 1980. – 193 с.
3. Викулин И. М. Физика полупроводниковых приборов / И. М. Викулин, В. Н. Стафеев – М. : Радио и связь, 1990. – 264 с.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов : в 2-х кн. / Зи С. ; пер. с англ. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Мир, 1984. – 456 с.
5. Марголин В. И. Физические основы микроэлектроники / Марголин В. И., Жабров В. А., Тупик В. А. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 400 с.
6. Осадчук В. С. Напівпровідникові діоди / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук – Вінниця : ВДТУ, 2002. – 162 с.
7. Осадчук В. С. Транзистори / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук – Вінниця : ВДТУ, 2003. – 207 с.
8. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника / [под ред. В. А. Терехова]. – М. : Высшая школа, 1991. – 351 с.
9. Пасынков В. В. Полупроводниковые приборы / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин – М. : Высшая школа, 1987. – 456 с.
10. Степаненко И. И. Основы микроэлектроники / Степаненко И. И. – М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 488 с.
11. Кушманов И. В. Электронные приборы : учебное пособие для вузов / И. В. Кушманов, Н. Н. Басильев, А. Г. Леонтьев – М. : Связь, 1973. – 360 с.
12. Жеребцов И. П. Основы электроники / И. П. Жеребцов – Л. : Энергия, 1990. – 352 с.
13. Булычев А. Л. Электронные приборы : учебник / Булычев А. Л., Лямин П. М., Тулинов Е. С. – Мн. : Высшая школа, 1999. – 415 с.
14. Опадчий Ю. Ф. Аналоговая и цифровая электроника (полный курс) : учебник для вузов / [под ред. О. П. Глудкина]. – М. : Горячая линия – Телеком, 2002. – 768 с.
15. Колонтаевський Ю. П. Промислова електроніка та мікросхемотехніка : теорія і практикум / Ю. П. Колонтаевський, А. Г. Сосков / За ред. А. Г. Соскова. – К. : Каравела, 2004. – 432 с.
16. Основы технічної електроніки : у 2 кн. – Кн. 2. Схемотехніка : підручник / В. І. Бойко, А. І. Гуржій, В. Я. Жуйков та ін. – К. : Вища школа, 2007. – 510 с.
17. Гольденберг Л. М. Цифровая обработка сигналов : учеб. пособие для вузов / Л. М. Гольденберг, Б. Д. Матюшкин, М. Н. Поляк. – М. : Радио и связь, 1990. – 256 с.

ГЛОСАРІЙ

Акцепторна домішка (p-dopant modifier) – домішка в напівпровіднику, яка «захоплює» електрони атомів кристалічної ґратки.

Амперметр (ammeter, ampermeter) – прилад, призначений для вимірювання сили електричного струму.

Амплітудно-частотна характеристика (amplitude-response curve) – характеристика, яка показує, у скільки разів амплітуда сигналу на виході системи відрізняється від амплітуди на вході в усьому діапазоні частот.

Вакуум (vacuum) – дуже розріджений газ, молекули якого зіштовхуються одна з одною рідше, ніж зі стінками посудини.

Вимірювання (measurement) – це відображення вимірюваних величин їхніми значеннями шляхом експерименту та обчислень.

Вольт-амперна характеристика (volt-ampere characteristics, current-voltage characteristic) – залежність струму від напруги через елемент.

Вольтметр (voltmeter) – прилад, призначений для вимірювання електричної напруги.

Гармонічні коливання (harmonic oscillations) – періодичні коливання струму, що змінюються за синусоїдальним законом.

Дешифратор (decoder) – логічний пристрій, який перетворює код числа, що надійшло на вхід, в сигнал на одному з його виходів.

Діелектрик (dielectric, insulator) – речовина, яка не має вільних заряджених частинок.

Діод (diode) – напівпровідниковий прилад, що містить один електронно-дірковий перехід.

Донорна домішка (n-dopant modifier) – домішка в напівпровіднику, атоми якої легко віддають електрони.

Електричне поле (electric field) – простір, у якому виявляється дія на електричні заряди.

Електричний струм (electric current) – направлений рух зарядів, що виникає під дією зовнішньої сили і приводить до перенесення заряду.

Електромагнітна індукція (electromagnetic induction) – явище виникнення електричного струму в замкненому контурі при змінах магнітного поля, що пронизує контур.

Електроніка (electronics) – це галузь науки і техніки, яка займається явищами взаємодії електронів з електромагнітними полями та методами створення електронних приладів і пристроїв для перетворення електромагнітної енергії.

Елемент електронної пам'яті (electronic memory element) – елемент, який здатний зберігати свій стан необмежено довго за наявності живлення.

Електронно-дірковий перехід (p-n junction, electron-hole junction) – контакт двох напівпровідників з різними типами провідності.

Електрорушійна сила (electromotive force) – відношення роботи сторонніх сил з переміщення одиниці позитивного заряду усередині джерела до заряду.

Електропровідність (conductivity) – фізична величина, що характеризує здатність тіла проводити електричний струм.

Електростатика (electrostatics) – це розділ фізики, що займається вивченням властивостей та взаємодії нерухомих зарядів.

Електростатичне поле (electrostatic field) – це електричне поле нерухомих заряджених тіл, заряди яких не залежать від часу.

Зворотний зв'язок (feedback) – це явище передавання частини сигналу з вихідного кола у вхідне.

Змінний електричний струм (alternating current) – це електричний струм, який періодично змінює значення і напрям протікання.

Індуктивність (inductance) – коефіцієнт пропорційності між силою струму в контурі й магнітним потоком, який створюється цим струмом.

Клас точності (accuracy class, precision class) – метрологічна характеристика приладу, що позначається похибкою, вираженою в відсотках.

Коливальний контур (oscillatory circuit) – система, яка складається з конденсатора та котушки індуктивності.

Конденсатор (capacitor) – система з двох обкладок, розділених шаром діелектрика, товщина якого мала порівняно з розмірами провідників.

Лінійний елемент (linear component) – це елемент електричного кола, для якого залежність струму від прикладеної напруги можна описати лінійними функціями.

Логічна функція (logical function) – функція, аргументами якої можуть бути або булеві величини, або булеві змінні.

Логічний елемент (gate) – елемент, що виконує логічні операції.

Магнітна індукція (magnetic induction) – силова характеристика магнітного поля.

Магнітна проникність (permeability) – фізична величина, яка показує, у скільки разів індукція магнітного поля в однорідному середовищі відрізняється за модулем від індукції магнітного поля у вакуумі.

Магнітне поле (magnetic field) – це простір, у якому виявляється дія на електричний струм (заряди).

Мікроконтролер (microcontroller) – мікропроцесор, в якому на кристалі центрального процесорного пристрою розміщені також оперативний і постійний запам'ятовувальні пристрої, таймери, лічильники, аналого-цифрові і цифроаналогові перетворювачі, інтерфейс і порти введення/виведення.

Мікропроцесор (microprocessor) – програмно керований пристрій (на одному кристалі), який здійснює прийом, обробку і видачу інформації.

Мікропроцесорна система (microprocessor system) – обчислювальна, контрольно-вимірювальна система або система керування, в якій основним пристроєм обробки інформації є мікропроцесор.

Мультиплексор (multiplexer) – це електронний багатопозиційний комутатор.

Надпровідність (superconductivity) – явище стрибкоподібного зменшення питомого опору до нуля при охолодженні нижче критичної температури, характерної для даного провідника.

Напівпровідник (semiconductor) – речовина, концентрація вільних зарядів у якій значно більша, ніж в діелектриках, але менша, ніж в провідниках.

Напруга (voltage) – різниця потенціалів між двома точками в електростатичному полі, яка визначається роботою кулонівських сил при переміщенні одиничного позитивного заряду між цими точками.

Напруга пробою (breakdown voltage) – напруга, за якої виникає самостійний розряд.

Напруженість електричного поля (electric field intensity, electric force) – характеристика електричного поля, яка в довільній точці простору чисельно дорівнює силі, з якою електричне поле діє на одиничний заряд, внесений у цю точку.

Нелінійний елемент (nonlinear element) – елемент, струм через який є нелінійною функцією напруги.

Період (period) – повний цикл зміни сигналу від деякого стану до такого самого стану.

Плазма (plasma) – частково або повністю іонізований газ.

Постійний струм (direct current) – це електричний струм, що протікає в одному напрямку.

Потенціал електричного поля (electric field potential) – величина, яка чисельно дорівнює енергії одиничного заряду, поміщеного в точку поля.

Похибка вимірювання (measurement error) – різниця між показами приладу і дійсним значенням вимірюваної величини.

Провідник (conductor) – речовина, що містить велику кількість вільних електронів.

Програмована логічна інтегральна схема (programmable logic device, PLD) – це мікросхема, логіка роботи якої не визначається при виготовленні, а задається за допомогою програмування.

Регістр (register) – це набір тригерів з єдиною схемою управління.

Резистор (resistor) – елемент електричного кола, що має певне значення опору (задає струм або створює потрібний потенціал у деякій точці).

Резонанс (resonance) – різке зростання амплітуди сили струму при збігу частоти зовнішньої ЕРС із частотою вільних коливань у контурі.

Самоіндукція (self-induction) – явище виникнення ЕРС індукції в електричному колі в результаті зміни сили струму в цьому колі.

Сила Ампера (Ampere force) – це сила, що діє на провідник зі струмом у магнітному полі, спрямована перпендикулярно до магнітних силових ліній.

Сила Лоренца (Lorentz force) – сила, що діє з боку магнітного поля на рухомий заряд.

Сила струму (current) – величина, яка дорівнює заряду, перенесеному електричним струмом за одиницю часу.

Силові лінії (lines of force) – уявні лінії, дотичні до яких у кожній точці поля збігаються за напрямком з вектором напруженості у даній точці.

Термоелектронна емісія (thermionic emission) – явище виходу електронів із розжарених поверхонь.

Тиристор (thyristor) – електронний елемент, що працює в ключовому режимі, тобто може знаходитися в двох станах.

Транзистор (transistor) – керований напівпровідниковий прилад, що містить $p-n-p$ або $n-p-n$ переходи.

Трансформатор (transformer) – пристрій, що складається з двох котушок (первинної і вторинної обмоток) на загальному осерді.

Тригер (trigger) – елементарна електронна комірка пам'яті, здатна зберігати один розряд двійкового числа.

Фотоелектронна емісія (photoemission) – явище виходу електронів з «холодних» поверхонь під дією світла.

Цифрова електроніка (digital electronics) – електроніка, яка базується на елементах, здатних знаходитися в двох станах (0 та 1).

Цифрові мікросхеми (digital microcircuit) складаються з великої кількості з'єднаних певним чином логічних елементів і можуть розглядатися як самостійний електронний пристрій.

Частота коливаль (frequency) – величина, яка показує, скільки періодів коливання вкладається в одній секунді.

Шифратор (coder) – комбінаційна логічна схема, що виконує перетворення одного двійкового числа в інше.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Основні фізичні сталі

Елементарний заряд	$e = p = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Маса електрона	$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Маса протона	$m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Стала Авогадро	$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Стала Больцмана	$k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/Кл}$
Електрична стала	$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / (\text{м}^2 \cdot \text{Н})$
Магнітна стала	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$
Температурний потенціал ($T = 298 \text{ К}$)	$kT/e = 0,0258 \text{ В}$

Таблиця А.2 – Питомий опір і температурний коефіцієнт опору металів

Матеріал	Питомий опір при 18 °C ($\rho, 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$)	Температурний коефіцієнт опору ($\alpha, 10^{-4} \text{ К}^{-1}$)
Алюміній	3,21	38
Вольфрам	5,5	51
Залізо (0,1% С)	12,0	62
Золото	2,42	40
Латунь	6–9	10
Манганін (3% Ni, 12% Mn, 85% Cu)	44,5	0,02–0,5
Мідь	1,78	42,8
Нікель	11,8	27
Константан (40% Ni, 1,2% Mn, 58,8% Cu)	49,0	-0,4–0,1
Ніхром (67,5% Ni, 1,5% Mn, 16% Fe, 15% Cr)	110	1,7
Олово	11,3	45
Платина	11,0	38
Свинець	20,8	43
Срібло	1,66	40
Цинк	6,1	37

Таблиця А.3 – Електричні властивості напівпровідників

Матеріал	Питомий опір при 20 °С (ρ , Ом·м)	Відносна діелектрична проникність (ϵ)
Алмаз	$10^6 - 10^{10}$	5,5–16,5
Германій	0,43	16
Кремній	$2,6 \cdot 10^3$	11,7
Селен (крист.)	$10^3 - 10^{10}$	6
Телур	10^{-3}	25
Сульфід свинцю	$2 \cdot 10^{-3}$	—
Антимонід індію	$7 \cdot 10^{-5}$	17
Арсенід галію	1,5	12,7

Таблиця А.4 – Відносна діелектрична проникність деяких матеріалів

Речовина	ϵ	Речовина	ϵ
Вода (чиста)	81	Слюда	6–8
Повітря	1,0006	Скло	4–7
Кварц	4,5	Ебоніт	3
Кераміка (радіотехнічна)	до 80	Янтар	2,8
Парафін	2,3		

Таблиця А.5 – Магнітна сприйнятність елементів та з'єднань при 20 °С

Речовина	$\chi, 10^{-6}$	Речовина	$\chi, 10^{-6}$
Алюміній	23	Платина	360
Вісмут	-176	Срібло	26,25
Вода	-9	Скло	12,6
Вольфрам	176	Цинк	12,3
Золото	36,7	Ебоніт	14,0
Калій	5,6	Азот	0,013
Кам'яна сіль	12,6	Водень	-0,063
Кварц	15,1	Повітря	0,38
Кисень (рідкий)	3400	Гелій	-1,1
Мідь	10,3	Кисень (газ)	1,9

Навчальне видання

**Білинський Йосип Йосипович
Білилівська Ольга Петрівна**

ВСТУП ДО ФАХУ «ЕЛЕКТРОНІКА»
Навчальний посібник

Редактор В. Дружиніна

Оригінал-макет підготовлено О. Білилівською

Підписано до друку 01.08.2016 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 4,7.
Наклад 50 пр. Зам. № 2016-155.

Вінницький національний технічний університет,
навчально-методичний відділ ВНТУ.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, к. 2201.
Тел. (0432) 59-87-36.
Свідцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-87-38.
publish.vntu.edu.ua; email: kivc.vntu@gmail.com.
Свідцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.