

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних робіт з дисципліни

«Комп'ютерна електроніка»

(для здобувачів вищої освіти спеціальності F3 «Комп'ютерні науки» та F7 «Комп'ютерна інженерія», що навчаються за програмою підготовки бакалаврів)

(Електронне видання)

ЗАТВЕРДЖЕНО
на засіданні кафедри
комп'ютерних наук та інженерії
Протокол № 6 від 03.04.2026 р.

Київ 2026

УДК 004.312

Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Комп'ютерна електроніка» (для здобувачів вищої освіти спеціальності F3 «Комп'ютерні науки» та F7 «Комп'ютерна інженерія», що навчаються за програмою підготовки бакалаврів) (Електронне видання) / Укладач: В.С. Кардашук. – Київ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2026. – 76 с.

Наведені матеріали практичної частини дисципліни «Комп'ютерна електроніка», що викладається для здобувачів освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр». Варіанти завдань до виконання практичних робіт дають можливість практично засвоїти теоретичний матеріал розроблення електронних пристроїв на основі елементної бази. Кожна практична робота містить мету, короткі теоретичні відомості, задачу роботи, варіанти завдань, контрольні питання тощо.

Матеріали розраховані на студентів вищих навчальних закладів.

Укладач:

В. С. Кардашук, доц., к.т.н.

Відповідальний за випуск:

Л.О. Шумова, доц., к.т.н.

Рецензент:

О.І. Рязанцев, проф., д.т.н.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
Практична робота № 1. Розрахунок електричних ланцюгів постійного струму з довільним сполученням пасивних елементів	5
Практична робота № 2. Розрахунок електричних ланцюгів синусоїдального струму з довільним сполученням r , l , c елементів	12
Практична робота № 3. Перехідні процеси в лінійних електричних ланцюгах	24
Практична робота № 4. Розрахунок ланцюгів з напівпровідниковими діодами і стабілітронами	33
Практична робота № 5. Аналітичний розрахунок робочого режиму транзисторів	40
Практична робота № 6. Розрахунок типових схем підсилювачів на операційних підсилювачах	53
Практична робота № 7. Розрахунок схем мультівібраторів на операційних підсилювачах	64
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	75

ВСТУП

Метою виконання практичних робіт з дисципліни «Комп'ютерна електроніка» є опанування студентами знань в області електронної схемотехніки на базі напівпровідникових елементів та побудові електронних схем на їх основі. Знання принципів дії основних типів напівпровідникових елементів дозволять правильно експлуатувати електронні пристрої, набуті практичні навички дослідження, аналізу та синтезу електронних пристроїв на сучасній елементній базі та оформлення результатів досліджень.

Отримані практичні знання під час реалізації практичних робіт з дисципліни «Комп'ютерна електроніка» можуть бути використані при розрахунку типових аналогових схем, самостійному виборі необхідних напівпровідникових приладів при проєктуванні електронних пристроїв.

Отримані практичні навички допоможуть засвоїти:

- фізичні явища, що лежать в основі роботи напівпровідникових приладів;
- класифікацію, умовні позначення, принципи дії, призначення, основні характеристики та параметри, особливості застосування електронних аналогових пристроїв, побудованих на напівпровідникових приладах;
- умовні позначенням, класифікувати напівпровідникові прилади, пояснити їхнє призначення та принцип дії;
- користування електричними схемами побудованими на напівпровідникових елементах.

Отримані компетентності в подальшому допоможуть у питаннях застосування електронних компонентів у пристроях та системах сучасної комп'ютерної техніки.

Для виконання практичних робіт застосовується програма моделювання електронних схем Multisim 14.3 Education виробництва компанії National Instruments.

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ ЛАНЦЮГІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ДОВІЛЬНИМ СПОЛУЧЕННЯМ ПАСИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Метою заняття є ознайомлення з методикою розрахунку ланцюгів постійного струму з довільним (послідовним, паралельним, змішаним) з'єднанням резистивних елементів.

Під час підготовки до заняття необхідно повторити основні характеристики резистивних елементів, джерел живлення постійної напруги та струму, а також особливості застосування законів Ома та Кірхгофа при розрахунку електричних кіл постійного струму.

1.1. Методичні вказівки

На рис. 1.1 представлений ланцюг з послідовно-паралельним з'єднанням елементів, що складається з джерела напруги E і змішаним з'єднанням опорів R_1 , R_2 , R_3 .

Основними законами теорії ланцюгів є закони Ома та Кірхгофа. Закон Ома для ланцюга (рис. 1.1) має такий вигляд:

$$I_1 = \frac{E}{R_{\text{общ}}},$$

де $R_{\text{общ}}$ – загальний опір ланцюга:

$$R_{\text{общ}} = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}.$$

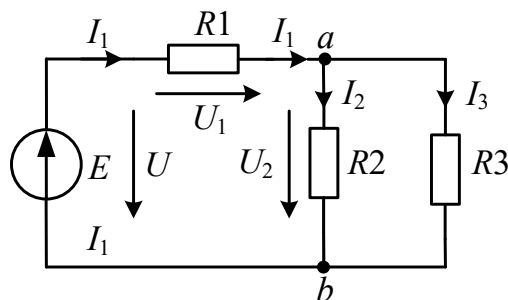


Рисунок 1.1 – Ланцюг з послідовно-паралельним з'єднанням елементів

Перший закон Кірхгофа для вузла a має вигляд: $I_1 = I_2 + I_3$.

Другий закон Кірхгофа для цього ланцюга:

$$E = U_1 + U_2.$$

Закон збереження енергії для електричних кіл описується рівнянням балансу потужностей:

$$\sum P_{\text{ист}} = \sum P_{\text{потр}},$$

де $\sum P_{\text{ист}}$ – потужність джерела;

$\sum P_{\text{потр}}$ – потужність споживачів.

Для даного ланцюга (рис. 1.1) рівняння балансу потужностей набуває вигляду:

$$EI_1 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 .$$

Розрахунок ланцюгів з одним джерелом живлення зазвичай здійснюється наступним чином: спочатку визначається еквівалентний опір, а потім обчислюється струм джерела та струми у гілках за допомогою закону Ома.

Нехай потрібно розрахувати ланцюг (рис. 1.2, а), в якому є з'єднання резисторів зіркою (R_1, R_3, R_5 і R_2, R_4, R_5) і трикутником (R_1, R_2, R_5 і R_3, R_4, R_5).

Розрахунок можна здійснити одним із методів. Але оскільки в ланцюзі є лише одне джерело живлення, найпростішим було б використання закон Ома. Проте спроба визначення загального опору ланцюга виявляється безрезультатною, оскільки немає ні послідовно, ні паралельно з'єднаних опорів. Вирішити завдання допомагає перетворення трикутника опорів на еквівалентну зірку.

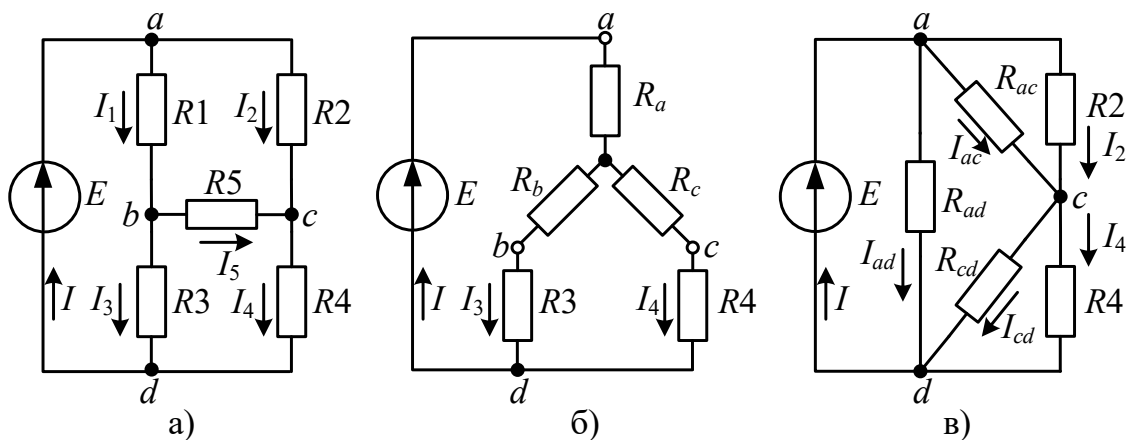


Рисунок 1.2 – Перетворення електричного ланцюга

Еквівалентне перетворення трикутника та зірки опорів.

Трикутник та зірка опорів мають вигляд, показаний на рис. 1.3.

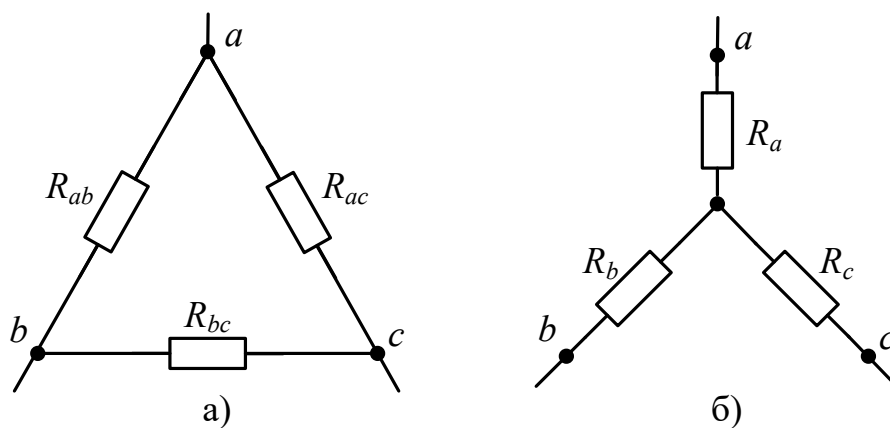


Рисунок 1.3 – Трикутник та зірка опорів

Якщо при заміні однієї з цих схем іншою не змінюються потенціали однойменних точок і струми, що підтікають до них, то в зовнішньому ланцюгу також не відбудеться жодних змін. Таким чином, схеми еквівалентні.

Можна показати, що умовою еквівалентності є такі рівняння:

а) при перетворенні трикутника на зірку:

$$R_a = \frac{R_{ab}R_{ac}}{R_{ab} + R_{ac} + R_{bc}}; \quad R_b = \frac{R_{ab}R_{bc}}{R_{ab} + R_{ac} + R_{bc}}; \quad R_c = \frac{R_{ac}R_{bc}}{R_{ab} + R_{ac} + R_{bc}}. \quad (1.1)$$

Наприклад, опір зірки R_a , приєднаний до вузла a , виходить множенням опорів R_{ab} і R_{ac} трикутника, приєднаних до цього ж вузлу, і діленням отриманого добутку на суму всіх опорів трикутника.

б) при перетворенні зірки на трикутник:

$$R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a R_b}{R_c}; \quad R_{ac} = R_a + R_c + \frac{R_a R_c}{R_b}; \quad R_{bc} = R_b + R_c + \frac{R_b R_c}{R_a}. \quad (1.2)$$

При зворотному перетворенні опір трикутника R_{ab} , що лежить між вузлами a і b , дорівнює сумі опорів зірки R_a і R_b , приєднаних до цих вузлів плюс їх добуток, поділений на опір третього променя зірки R_c .

1.2. Задачі для аудиторних занять

Розрахувати струми в ланцюзі, зображеному на рис. 1.2 а, при наступних числових значеннях її параметрів:

$$E = 66 \text{ В}, R_1 = 20 \text{ Ом}, R_2 = 30 \text{ Ом}, R_3 = 5 \text{ Ом}, R_4 = 20 \text{ Ом}, R_5 = 50 \text{ Ом}.$$

а) Рішення перетворенням трикутника на зірку

$$R_a = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2 + R_5} = 6 \text{ Ом}; \quad R_b = \frac{R_1 R_5}{R_1 + R_2 + R_5} = 10 \text{ Ом}; \quad R_c = \frac{R_2 R_5}{R_1 + R_2 + R_5} = 15 \text{ Ом}$$

Знаходимо загальний опір ланцюга:

$$R_{\text{общ}} = R_a + \frac{(R_b + R_3)(R_c + R_4)}{R_b + R_3 + R_c + R_4} = 16,5 \text{ Ом}.$$

Струм, що протікає від джерела (однаковий у заданій та перетвореній схемах), дорівнює:

$$I = \frac{E}{R_{\text{общ}}} = 4 \text{ А}.$$

Струми в паралельних гілках:

$$I_3 = I \cdot \frac{R_c + R_4}{R_b + R_3 + R_c + R_4} = 2,8 \text{ А}; \quad I_4 = I \cdot \frac{R_b + R_3}{R_b + R_3 + R_c + R_4} = 1,2 \text{ А}.$$

Повертаємося до початкової схеми (рис. 1.2, а):

$$I_1 = \frac{U_{ab}}{R_1} = \frac{E - I_3 R_3}{R_1} = 2,6 \text{ А}; \quad I_2 = \frac{U_{ac}}{R_2} = \frac{E - I_4 R_4}{R_2} = 1,4 \text{ А}.$$

Струм у п'ятій гілці знаходимо з першого закону Кірхгофа:

$$I_5 = I_1 - I_3 = 2,6 - 2,8 = -0,2 \text{ A.}$$

Знак мінус говорить про те, що дійсний напрямок струму I_5 протилежний зазначеному на схемі.

б) Рішення перетворенням зірки на трикутник

Перетворимо зірку, що утворюється у схемі на рис. 1.2, а опорами R_1 , R_5 і R_3 в еквівалентний трикутник (рис. 1.2, в).

Визначаємо опір трикутника:

$$R_{ad} = R_1 + R_3 + \frac{R_1 R_3}{R_5}; \quad R_{ac} = R_1 + R_5 + \frac{R_1 R_5}{R_3}; \quad R_{cd} = R_3 + R_5 + \frac{R_3 R_5}{R_1}.$$

Розраховуємо перетворений ланцюг. Спочатку знаходимо еквівалентні опори ділянок ac і cd :

$$R' = \frac{R_2 R_{ac}}{R_2 + R_{ac}}; \quad R'' = \frac{R_4 R_{cd}}{R_4 + R_{cd}}.$$

Визначаємо загальний опір та струми

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_{ad}(R' + R'')}{R_{ad} + R' + R''}; \quad I = \frac{E}{R_{\text{общ}}}; \quad I_{ad} = \frac{E}{R_{ad}};$$

$$I_2 = \frac{U_{ac}}{R_2} = \frac{E - (I - I_{ad})R''}{R_2}; \quad I_4 = \frac{U_{cd}}{R_4} = \frac{E - (I - I_{ad})R'}{R_4}.$$

Повертаємося до початкової схеми:

$$I_1 = I - I_2; \quad I_3 = I - I_4; \quad I_5 = I_1 - I_3,$$

Підставити у наведені формули числові значення параметрів ланцюга та порівняти результати обчислень з одержаними у прикладі 1.1 а.

в) Визначення струмів у гілках ланцюга з кількома джерелами енергії шляхом складання рівнянь за законами Кірхгофа

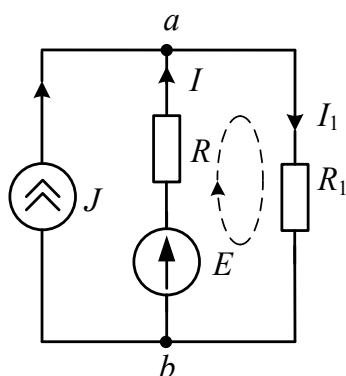


Рисунок 1.4

Дано: $E = 20 \text{ В}$, $J = 2 \text{ А}$, $R = 15 \text{ Ом}$, $R_1 = 85 \text{ Ом}$.

Визначити струми в ланцюзі.

Перевірити баланс потужностей.

Рішення

Виберемо позитивний напрямок струмів.

Складемо рівняння за законами Кірхгофа.

Ланцюг містить:

- три гілки – $N_b = 3$;
- два вузли a та b – $N_y = 2$;
- одне джерело струму – $N_t = 1$;

Кількість рівнянь, що складаються за першим законом Кірхгофа:

$$Y = N_y - 1 = 1.$$

Кількість рівнянь, що складаються за другим законом Кірхгофа:

$$K = N_b - N_y + 1 - N_t = 1.$$

Рівняння для вузла a за першим законом Кірхгофа:

$$J + I - I_1 = 0. \quad (1.3)$$

Незалежний контур вибираємо так, щоб він не містив джерела струму (на рис. 1.4 показано штриховою лінією). Для нього складаємо рівняння, за другим законом Кірхгофа:

$$I \cdot R + I_1 \cdot R_1 = E. \quad (1.4)$$

Підставляючи в рівняння (1.3) та (1.4) цифрові значення та вирішивши їх, отримаємо:

$$I = -1,5 \text{ А}; I_1 = 0,5 \text{ А}.$$

Для розрахунку балансу потужностей необхідно знати напругу на джерелі струму, яке знаходимо по гілках, зовнішніх по відношенню до полюсів джерела струму.

Напруга на ньому:

$$U_{ab} = I_1 \cdot R_1 = 42,5 \text{ В.}$$

Складаємо баланс потужностей:

$$U_{ab} \cdot J + E I = I^2 \cdot R + I_1^2 \cdot R_1.$$

Підставляючи числові значення, знаходимо:

$$42,5 \cdot 2 + 20 \cdot (-1,5) = (-1,5)^2 \cdot 15 + 0,5^2 \cdot 85.$$

Отримаємо тотожність:

$$55 = 55.$$

1.3. Задачі для самостійної роботи

Таблиця 1.1. Завдання для ланцюга, наведеного на рис. 1.1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
E (В)	5	9	12	24	48	110	5	9	12	24	48	110
R_1 (кОм)	1	2	3	6	12	24	3	4	5	10	20	30
R_2 (кОм)	2	4	6	12	24	48	5	6	8	20	30	40
R_3 (кОм)	4	8	10	20	40	80	8	10	12	30	50	60

Таблиця 1.2. Завдання для ланцюга, наведеного на рис. 1.2 а

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
E (В)	12	24	48	110	220	24	48	110	66	33	66	33
R_1 (Ом)	36,4	72,7	145	33,3	66,6	14,5	36,4	333	20	20	40	40
R_2 (Ом)	54,5	109	218	50	100	21,8	54,5	500	30	30	60	60
R_3 (Ом)	9,1	18,2	36,5	8,3	16,6	3,7	9,1	83	5	5	10	10
R_4 (Ом)	36,4	72,7	145	33,3	66,6	14,5	36,4	333	20	20	40	40
R_5 (Ом)	91	182	365	83	166	37	91	830	50	50	100	100

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ ЛАНЦЮГІВ СИНУСОЇДАЛЬНОГО СТРУМУ З ДОВІЛЬНИМ СПОЛУЧЕННЯМ R, L, C ЕЛЕМЕНТІВ

Метою заняття є ознайомлення з методикою розрахунку ланцюгів синусоїдального струму з довільною з'єднанням резистивних, індуктивних та ємнісних елементів.

При підготовці до заняття необхідно повторити основні характеристики резистивних, індуктивних та ємнісних елементів, джерел живлення напруги та струму, а також особливості застосування методів контурних струмів і вузлових потенціалів при розрахунку електричних ланцюгів синусоїдального струму.

2.1 Методичні вказівки

Синусоїдальний струм та напругу можна записати за допомогою рівнянь із тригонометричними функціями, зобразити графічно (рис 2.1), подати у вигляді векторів на декартовій площині або комплексними числами.

Алгебраїчні операції з комплексними числами істотно підвищують точність результатів.

Кожному вектору на комплексній площині відповідає певне комплексне число, яке може бути записано у таких формах:

Показовій $\dot{A}_m = A_m e^{j\psi};$

Тригонометричній $\dot{A}_m = A_m \cos \psi + jA_m \sin \psi;$

Алгебраїчній $\dot{A}_m = A'_m + jA''_m.$

Синусоїдальний струм/напруга $a = A_m \sin(\omega t + \psi)$, зображені на рис. 2.2 вектором, що обертається, відповідає комплексне число:

$$A_m e^{j(\omega t + \psi)} = A_m \cos(\omega t + \psi) + jA_m \sin(\omega t + \psi) = A'_m + jA''_m.$$

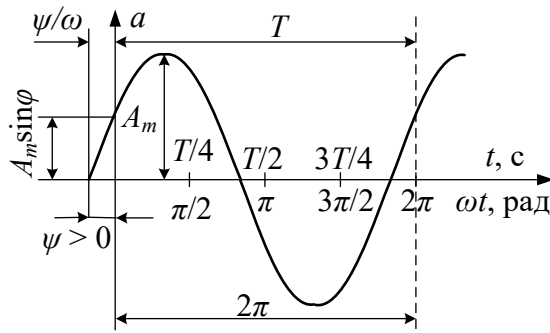


Рисунок 2.1 – Графічне зображення
синусоїдального струму/напруги a

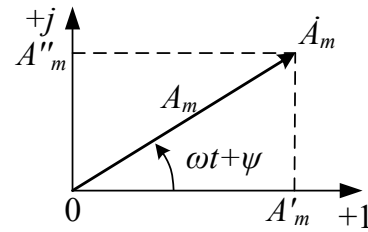


Рисунок 2.2 – Вектор
синусоїдального струму/напруги a на
комплексній площині

Фазовий кут $(\omega t + \psi)$ визначається за проєкціями вектора на осі "+1" та "+j" системи координат, як:

$$\operatorname{tg}(\omega t + \psi) = \frac{A''_m}{A'_m}.$$

Відповідно до тригонометричної форми запису уявна складова комплексного числа визначає миттєве значення синусоїдального струму/напруги, що змінюються:

$$a = A_m \sin(\omega t + \psi) = \operatorname{Im} \{ A_m e^{j(\omega t + \psi)} \}. \quad (2.1)$$

Комплексне число $A_m e^{j(\omega t + \psi)}$ зручно подати у вигляді добутку двох комплексних чисел:

$$A_m e^{j(\omega t + \psi)} = A_m e^{j\psi} \cdot e^{j\omega t} = \dot{A}_m \cdot e^{j\omega t}, \quad (2.2)$$

Параметр $\dot{A}_m$, що відповідає положенню вектора для $t = 0$ (або на комплексній площині, що обертається зі швидкістю ω), називають комплексною амплітудою $\dot{A}_m = A_m e^{j\psi}$, а параметр - комплексом миттєвого значення.

Параметр $e^{j\omega t}$ є оператором повороту вектора на кут ωt відносно початкового положення вектора.

Множення вектора на оператор повороту $e^{\pm j\alpha}$ є його поворотом щодо початкового положення на кут $\pm\alpha$.

Отже, миттєве значення синусоїдальної величини дорівнює уявній частині без знаку "j" добутку комплексу амплітуди $\dot{A}_m$ та оператора повороту $e^{j\omega t}$:

$$a = A_m \sin(\omega t + \psi) = \text{Im} \{ \dot{A}_m e^{j\omega t} \}.$$

Перехід від однієї форми запису синусоїдальної величини до іншої здійснюється за допомогою формули Ейлера:

$$e^{\pm j\alpha} = \cos \alpha \pm j \sin \alpha. \quad (2.3)$$

Якщо, наприклад, комплексна амплітуда напруги задана у вигляді комплексного числа в алгебраїчній формі:

$$\dot{U}_m = U'_m + jU''_m,$$

то для запису її у показовій формі, необхідно знайти початкову фазу ψ_U , тобто кут, який утворює вектор $\bar{U}_m$ з позитивною піввіссю +1:

$$\text{tg } \psi_U = \frac{U''_m}{U'_m}.$$

Тоді миттєве значення напруги:

$$u = \text{Im} \{ \dot{U}_m e^{j\omega t} \} = \text{Im} \left\{ \sqrt{U'^2_m + U''^2_m} e^{j \arctg \frac{U''_m}{U'_m}} e^{j\omega t} \right\} = U_m \sin(\omega t + \psi_U),$$

де $\psi_U = \arctg(U''_m / U'_m)$.

При записі виразу для визначеності було прийнято, що $U'_m > 0$, тобто зображуючий вектор знаходиться в першому або четвертому квадрантах. Якщо $U'_m < 0$, то при $U''_m > 0$ (другий квадрант):

$$\psi_U = \pi - \arctg \left| \frac{U_m''}{U_m'} \right|,$$

а при $U_m'' < 0$ (третій квадрант):

$$\psi_U = \pi + \arctg \left| \frac{U_m''}{U_m'} \right|,$$

або

$$\psi_U = -\pi + \arctg \left| \frac{U_m''}{U_m'} \right|.$$

Якщо задано миттєве значення струму у вигляді $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$, то комплексну амплітуду записують спочатку у показовій формі, а потім (за потреби) за формулою Ейлера переходять до алгебраїчної форми:

$$\dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i} = I_m \cos \psi_i + j I_m \sin \psi_i = I_m' + j I_m''.$$

При додаванні та відніманні комплексів слід користуватися алгебраїчною формою їх запису, а при множенні та діленні зручною є показова форма.

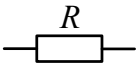
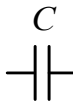
Застосування комплексних чисел дозволяє перейти від геометричних операцій над векторами до алгебраїчних комплексів (табл. 2.1).

Таблиця 2.1.

Запис при синусоїдальному струмі	Знак відповідності	Запис у комплексній формі
$i = I_m \sin(\omega t + \psi)$	$\rightarrow$	$\dot{I}_m = I_m e^{j\psi}$
$u_R = iR = RI_m \sin(\omega t + \psi)$	$\rightarrow$	$\dot{U}_{R_m} = R\dot{I}_m$
$u_L = L \frac{di}{dt} = \omega LI_m \cos(\omega t + \psi)$	$\rightarrow$	$\dot{U}_{L_m} = j\omega L\dot{I}_m$
$u_C = \frac{1}{C} \int_0^t i dt = -\frac{1}{\omega C} I_m \cos(\omega t + \psi)$	$\rightarrow$	$\dot{U}_{C_m} = -j \frac{1}{\omega C} \dot{I}_m$

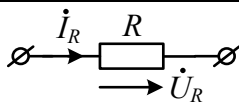
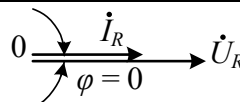
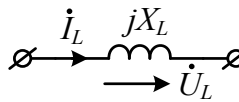
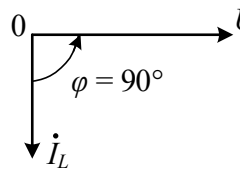
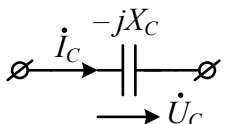
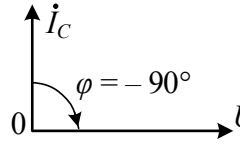
У табл. 2.2 наведено пасивні елементи, їх зображення та позначення, форми запису опору та провідності.

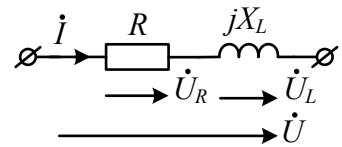
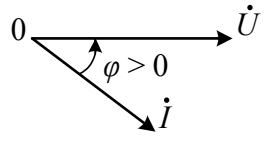
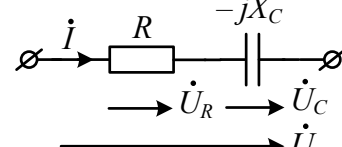
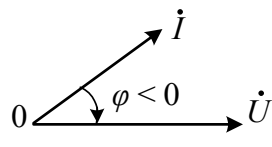
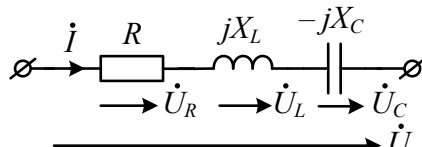
Таблиця 2.2.

Елементи			Опір при суносідальному струмі	Запис опору в комплексній формі	Провідність при суносідальному струмі	Запис провідності в комплексній формі
Наймен.	Властивість	Зображення та позначення				
Опір	Електричний опір		R	R	$G = 1 / R$	$G = 1 / R$
Індуктивна катушка	Індуктивність		$X_L = \omega L$	$\underline{Z}_L = j\omega L$	$B_L = \frac{1}{\omega L}$	$\underline{Y}_L = \frac{1}{\underline{Z}_L} = -jB_L$
Конденсатор	Ємність		$X_C = \frac{1}{\omega C}$	$\underline{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} = -j\frac{1}{\omega C}$	$B_C = \omega C$	$\underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C} = j\omega C$

У табл. 2.3 наведено типові гілки схеми ланцюга синусоїдального струму, векторні діаграми напруг і струмів гілок та кути зсуву фаз між їх векторами.

Таблиця 2.3.

Номер гілки	Елементи гілки	Векторна діаграма	Кут $\varphi = \psi_u - \psi_i$
1			$\varphi = 0$
2			$\varphi = 90^\circ (\pi/2)$
3			$\varphi = -90^\circ (-\pi/2)$

4			$\varphi = \arctg(X_L/R)$
5			$\varphi = \arctg(-X_C/R)$
6		а) $X_L > X_C$; см. гілка 4 б) $X_L < X_C$; см. гілка 5 в) $X_L = X_C$; см. гілка 1	$\varphi = \arctg[(X_L - X_C)/R]$

2.2 Задачі для аудиторних занять

Задача 2.1.

Дано: $E = 120 \text{ В}$; $R_1 = 25 \text{ Ом}$; $R_2 = 20 \text{ Ом}$;

$$X_{L2} = \omega L_2 = 50 \text{ Ом}; \quad X_{C1} = \frac{1}{\omega C_1} = 100 \text{ Ом};$$

$$X_{C3} = \frac{1}{\omega C_3} = 50 \text{ Ом}.$$

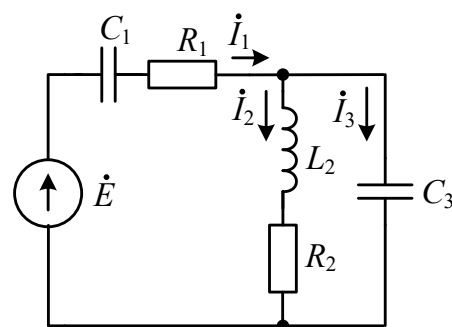


Рисунок 2.3

Визначити:

Повний комплексний опір ланцюга $\underline{Z}$;

Діючі значення струмів в гілках $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$, $\dot{I}_3$.

Рішення.

$$\underline{Z}_2 = R_2 + jX_{L2} = 20 + j50 \text{ (Ом)}.$$

$$\underline{Z}_{23} = \frac{-jX_{C3} \cdot \underline{Z}_2}{-jX_{C3} + \underline{Z}_2} = \frac{-j50 \cdot (20 + j50)}{-j50 + 20 + j50} = \frac{-j1000 + 2500}{20} = 125 - j50 \text{ (Ом)}.$$

$$\underline{Z} = -jX_{C1} + R_1 + \underline{Z}_{23} = -j100 + 25 + 125 - j50 = 150 - j150 = Z \cdot e^{j\varphi^\circ} \text{ (Ом)},$$

де

$$Z = \sqrt{150^2 + 150^2} = \sqrt{2 \cdot 150^2} = \sqrt{2} \cdot 150;$$

$$\varphi = \arctg \frac{-150}{150} = \arctg(-1) = -45^\circ;$$

тоді

$$\underline{Z} = \sqrt{2} \cdot 150 e^{-j45^\circ} = 212,132 \cdot e^{-j45^\circ} (\text{Ом}).$$

Приймаючи початкову фазу напруги за нуль:

$$\dot{E} = E e^{j0^\circ} = 120 (\text{В}),$$

тоді

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{E}}{\underline{Z}} = \frac{120}{212,132 \cdot e^{-j45^\circ}} = 0,5657 e^{j45^\circ} = I_1 e^{j\varphi_1} = I_1 \cos \varphi_1 + j I_1 \sin \varphi_1 = \\ &= 0,5657 \cos 45^\circ + j 0,5657 \sin 45^\circ = 0,4 + j 0,4 (\text{А}). \end{aligned}$$

Оскільки струм розподіляється обернено пропорційно опорі гілок (це впливає із закону Ома), тоді:

$$\begin{aligned} \dot{I}_2 &= \dot{I}_1 \cdot \frac{-jX_{C3}}{-jX_{C3} + \underline{Z}_2} = 0,5657 e^{j45^\circ} \cdot \frac{-j50}{-j50 + 20 + j50} = 0,5657 e^{j45^\circ} (-j2,5) = \\ &= 0,5657 e^{j45^\circ} \cdot 2,5 e^{-j90^\circ} = 1,414 \cdot e^{-j45^\circ} = I_2 e^{j\varphi_2} = I_2 \cos \varphi_2 + j I_2 \sin \varphi_2 = \\ &= 1,414 \cos(-45^\circ) + j 1,414 \sin(-45^\circ) = -1 - j 1 (\text{А}). \end{aligned}$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_1 - \dot{I}_2 = 0,4 + j 0,4 - 1 - j 1 = -0,6 + j 1,4 (\text{А}).$$

$$I_3 = \sqrt{0,6^2 + 1,4^2} = 1,523.$$

$$\varphi = \arctg \frac{I_3''}{I_3'} = \arctg \frac{1,4}{-0,6} = \arctg(-2,333) = -66,8^\circ.$$

$$\dot{I}_3 = -0,6 + j 1,4 = 1,523 e^{-j66,8^\circ} (\text{А}).$$

Аналогічний результат можна отримати, склавши для цього ланцюга рівняння за законами Кірхгофа у комплексній формі:

$$\dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_3 = 0;$$

$$\dot{I}_1(-jX_{C1} + R_1) + \dot{I}_3(-jX_{C3}) = \dot{E};$$

$$\dot{I}_3(-jX_{C3}) - \dot{I}_2(R_2 + jX_{L2}) = 0.$$

Задача 2.2.

Дано: $E = 130 \text{ В}$; $f = 50 \text{ Гц}$; $R_1 = 9 \text{ Ом}$;

$R_3 = 8 \text{ Ом}$; $L_1 = 15,9 \text{ мГн}$; $L_2 = 9,4 \text{ мГн}$;

$C_2 = 318 \text{ мкФ}$; $C_3 = 500 \text{ мкФ}$.

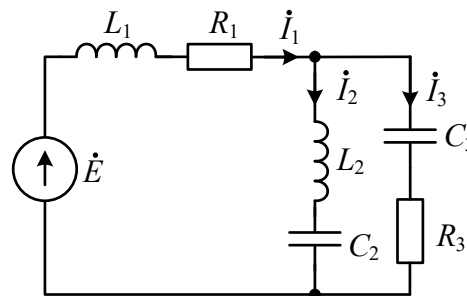


Рисунок 2.4

Визначити:

Повний комплексний опір ланцюга $\underline{Z}$;

Діючі значення струмів в гілках $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$, $\dot{I}_3$.

Рішення.

Циклічна частота ланцюга:

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ рад/с};$$

Опір реактивних елементів ланцюга:

$$X_{L1} = \omega L_1 = 314 \cdot 15,9 \cdot 10^{-3} = 4,99 \text{ Ом};$$

$$X_{C2} = 1/(\omega C_2) = 1/(314 \cdot 318 \cdot 10^{-6}) = 10,01 \text{ Ом};$$

$$X_{L2} = \omega L_2 = 314 \cdot 9,4 \cdot 10^{-3} = 2,95 \text{ Ом};$$

$$X_{C3} = 1/(\omega C_1) = 1/(314 \cdot 500 \cdot 10^{-6}) = 6,37 \text{ Ом};$$

Загальний опір ланцюга:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{вх}} &= R_1 + jX_{L1} + \frac{j \cdot (X_{L2} - X_{C2}) \cdot (R_3 - jX_{C3})}{R_3 + j(X_{L2} - X_{C2} - X_{C3})} = \\ &= 9 + 4,99j + \frac{j \cdot (2,95 - 10,01) \cdot (8 - 6,37j)}{8 + j \cdot (2,95 - 10,01 - 6,37)} = 10,632 + 0,669j \text{ (Ом)}; \end{aligned}$$

Характер вхідного опору активно-індуктивний, на це вказує наявність дійсної частини і позитивна уявна частина опору.

Комплекс діючого значення вхідної напруги:

$$\dot{E} = E \cdot (\cos \varphi + j \sin \varphi) = 130 \cdot (\cos 0^\circ + j \sin 0^\circ) = 130 + 0j \text{ (В)};$$

Діючі комплексні струми в ланцюзі:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{\underline{Z}_{\text{ВХ}}} = \frac{130}{10,632 + j0,669} = 12,179 - j0,767 = 12,203 \cdot e^{-j4^\circ} \text{ (А)}$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_1 \cdot \frac{R_3 - jX_{C3}}{R_3 + j(X_{L2} - X_{C2} - X_{C3})} = \frac{(12,179 - j0,767) \cdot (8 - j6,37)}{8 + j \cdot (2,95 - 10,01 - 6,37)} =$$

$$= 7,631 + j2,346 = 7,983 \cdot e^{j17^\circ} \text{ (А)};$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_1 - \dot{I}_2 = 12,179 - 0,767j - 7,631 - 2,346j =$$

$$= 4,548 - 3,113j = 5,511 \cdot e^{-j35^\circ} \text{ (А)}.$$

Падіння напруги на елементах ланцюга:

$$\dot{U}_{L1} = \dot{I}_1 \cdot jX_{L1} = (12,179 - 0,767j) \cdot 4,99j = 3,83 + 60,77j \text{ (В)};$$

$$\dot{U}_{R1} = \dot{I}_1 \cdot R_1 = (12,179 - 0,767j) \cdot 9 = 109,61 - 6,9j \text{ (В)};$$

$$\dot{U}_{L2} = \dot{I}_2 \cdot jX_{L2} = (7,631 + 2,346j) \cdot 2,95j = -6,92 + 22,51j \text{ (В)};$$

$$\dot{U}_{C2} = \dot{I}_2 \cdot (-jX_{C2}) = (7,631 + 2,346j) \cdot (-10,01j) = 23,48 - 76,39j \text{ (В)};$$

$$\dot{U}_{R3} = \dot{I}_3 \cdot R_3 = (4,548 - 3,113j) \cdot 8 = 36,38 - 24,9j \text{ (В)};$$

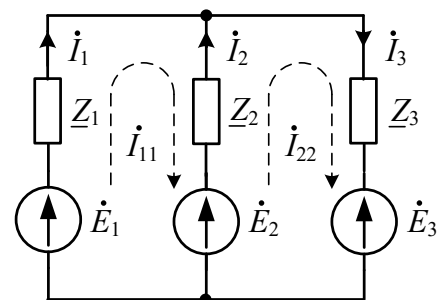
$$\dot{U}_{C3} = \dot{I}_3 \cdot (-jX_{C3}) = (4,548 - 3,113j) \cdot (-6,37j) = -19,83 - 28,97j = 35,11 \cdot e^{-j124^\circ} \text{ (В)}.$$

Задача 2.3.

Дано: $\dot{E}_1 = 120 \text{ В}$, $\dot{E}_2 = (100 + j10) \text{ В}$,

$\dot{E}_3 = (70 + j25) \text{ В}$, $\underline{Z}_1 = (10 + j30) \text{ Ом}$,

$\underline{Z}_2 = (15 + j40) \text{ Ом}$, $\underline{Z}_3 = 35 \text{ Ом}$



Визначити струми в ланцюзі.

Перевірити баланс потужностей.

Рисунок 2.5

Рішення.

Завдання вирішуємо методом контурних струмів, позначивши та вибравши їх напрямки, як зазначено на рис. 2.5.

Рівняння мають вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{11} \cdot (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2) - \dot{I}_{22} \cdot \underline{Z}_2 &= \dot{E}_1 - \dot{E}_2; \\ -\dot{I}_{11} \cdot \underline{Z}_2 + \dot{I}_{22} \cdot (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3) &= \dot{E}_2 - \dot{E}_3, \end{aligned}$$

або, підставляючи цифрові значення

$$\begin{aligned} \dot{I}_{11} \cdot (25 + j70) - \dot{I}_{22} \cdot (15 + j40) &= 20 - j10; \\ -\dot{I}_{11} \cdot (15 + j40) + \dot{I}_{22} \cdot (50 + j40) &= 30 - j15; \end{aligned}$$

Рішення системи рівнянь можна виконати за допомогою онлайн калькулятора за посиланням <https://www.kontrolnaya-rabota.ru/s/equal-many/system-any/>.

Приклад заповнення рівнянь у калькуляторі:

1 рівняння:

$$x_1 (25 + 70i) - y_1 (15 + 40i) = 20 - 10i$$

2 рівняння:

$$-x_1 (15 + 40i) + y_1 (50 + 40i) = 30 - 15i$$

Відповідь:

$$\begin{aligned} x_1 &= 0,346 - 0,761i; \\ y_1 &= 0,678 - 0,7935i, \end{aligned}$$

отримуємо

$$\dot{I}_{11} = 0,346 - j0,761 \text{ (A)};$$

$$\dot{I}_{22} = 0,678 - j0,7935 \text{ (A)}.$$

Остаточно отримуємо:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{11} = 0,346 - j0,761 \text{ (A)};$$

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{22} - \dot{I}_{11} = 0,332 - j0,0325 \text{ (A)};$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_{22} = 0,678 - j0,7935 \text{ (A)}.$$

Задача 2.4.

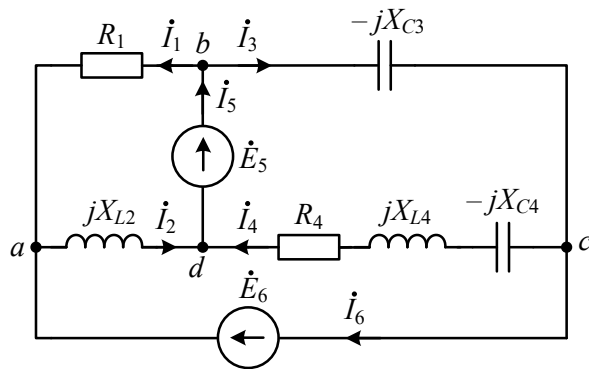


Рисунок 2.6

Дано: $E_5 = E_6 = 10 \text{ В}$; $R_1 = R_4 = 185 \text{ Ом}$; $X_{L2} = X_{C3} = 320 \text{ Ом}$; $X_{L4} = X_{C4}$;

$\dot{U}_{ac}$ відстає по фазі від $\dot{U}_{bd}$ на кут $\pi/3$

Визначити: $\dot{U}_{cd}$

Рішення

Завдання вирішується шляхом вузлових потенціалів.

Вважаємо

$$\dot{U}_{bd} = \dot{E}_5 = U_{bd} = 10 \text{ В},$$

тоді

$$\dot{U}_{ac} = \dot{E}_6 = 10 e^{-j60^\circ} \text{ В}.$$

Обрав $\dot{\phi}_d = 0$ В, отримуємо

$$\dot{\phi}_b = 10 \text{ В}, \text{ а } \dot{\phi}_a = \dot{\phi}_c + \dot{E}_6 = \dot{\phi}_c + 10 e^{-j60^\circ} \text{ В}.$$

Потрібно скласти одне рівняння для визначення $\dot{\phi}_c$.

Виходитимемо з наступного рівняння для струмів:

$$\dot{I}_2 + \dot{I}_4 = \dot{I}_5 = \dot{I}_1 + \dot{I}_3.$$

або

$$\frac{\dot{\phi}_a - \dot{\phi}_d}{jX_{L2}} + \frac{\dot{\phi}_c - \dot{\phi}_d}{R_4 + j(X_{L4} - X_{C4})} = \frac{\dot{\phi}_b - \dot{\phi}_c}{-jX_{C3}} + \frac{\dot{\phi}_b - \dot{\phi}_a}{R_1}$$

або

$$\frac{\dot{\phi}_c + 10 e^{-j60^\circ}}{j320} + \frac{\dot{\phi}_c}{185} = \frac{10 - \dot{\phi}_c}{-j320} + \frac{10 - (\dot{\phi}_c + 10 e^{-j60^\circ})}{185},$$

звідки напруга

$$\frac{\dot{\phi}_c + 10 e^{-j60^\circ} - 10 + \dot{\phi}_c}{j320} = \frac{10 - \dot{\phi}_c - 10 e^{-j60^\circ} - \dot{\phi}_c}{185}$$

$$\dot{U}_{cd} = \dot{\phi}_c = 10 e^{j60^\circ}.$$

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 3

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ЛАНЦЮГАХ

При всіх змінах у ланцюзі: включенні, виключенні, короткому замиканні, коливаннях величини будь-якого параметра тощо – у ньому виникають перехідні процеси, які не можуть протікати миттєво. Перехідний процес обумовлений невідповідністю величини запасеної енергії в магнітному полі котушки та електричному полі конденсатора її значення для нового стану ланцюга.

Одним із методів аналізу перехідних процесів у лінійних ланцюгах є класичний метод, що полягає у безпосередньому інтегруванні диференціальних рівнянь (ДР), що описують зміни струмів та напруг на ділянках ланцюга в перехідному процесі.

3.1 Класичний метод розрахунку

При використанні цього методу розрахунку складаються рівняння електромагнітного стану ланцюга за законами Ома та Кірхгофа для миттєвих значень напруги та струмів, пов'язаних між собою на окремих елементах ланцюга співвідношеннями:

$$u_R = Ri_R \text{ – для опору;}$$

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} \text{ – для котушки індуктивності;}$$

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} \text{ – для конденсатора.}$$

У загальному випадку рівняння, що описує перехідний процес у ланцюзі з n незалежними накопичувачами енергії, має вигляд:

$$a_n \frac{d^n x}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_k \frac{d^k x}{dt^k} + \dots + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = f(t) \quad (3.1)$$

де x – функція часу (u, i);

$f(t)$ – відомий вплив, що збурює (u та/або i джерела електричної енергії);

a_k – k -й постійний коефіцієнт, який визначається параметрами ланцюга.

Порядок ДР дорівнює числу незалежних накопичувачів енергії в ланцюзі, під якими розуміються L і C у спрощеній схемі.

Загальне рішення рівняння (3.1) x є сумою рішення (x_{np}) вихідного неоднорідного рівняння і загального рішення (x_{cv}) однорідного рівняння.

Приватне рішення x_{np} визначається видом функції $f(t)$ і називається вимушеною складовою.

Загальне рішення x_{cv} це рішення рівняння (3.1) з нульовою правою частиною, що відповідає режиму, коли зовнішні (примушують) джерела енергії на ланцюг безпосередньо не впливають. Цей режим роботи схеми називається вільним, а змінна x_{cv} – вільної складової.

Загальне рішення рівняння (3.1) має вигляд:

$$x = x_{np} + x_{cv}$$

При класичному методі розрахунку після комутаційний процес сприймається як накладення друг на друга двох режимів – вимушеного і вільного.

3.2 Початкові умови. Закони комутації

У виразі вільної складової x_{cv} є постійні інтегрування A_k , число яких дорівнює порядку n ДР і перебувають з початкових умов, які ділять на незалежні і залежні.

До незалежних початкових умов відносяться струм (потокочеплення) для L і напруга (заряд) на C в момент часу $t = 0$ (момент комутації). Незалежні початкові умови визначаються виходячи з законів комутації:

- у гілці з котушкою індуктивності струм у момент комутації зберігає своє до комутаційне значення і надалі починає змінюватися з нього:

$$i_L(0+) = i_L(0-);$$

- напруга на конденсаторі в момент комутації зберігає своє попереднє значення і надалі починає змінюватися з нього:

$$u_C(0+) = u_C(0-).$$

Залежними початковими умовами називаються значення інших струмів і напруг, що визначаються незалежними початковими умовами з допомогою рівнянь, складених за законами Кірхгофа для $t = 0$.

3.3 Корені характеристичного рівняння. Постійна часу

Вираз вільної складової $x_{св}$ загального рішення x ДР (3.1) визначається видом коренів характеристичного рівняння (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Вирази вільних складових загального рішення

Вид коренів характеристичного рівняння	Вираз вільної складової
Корні $p_1, p_2, \dots, p_n$ різні	$x_{св} = \sum_{k=1}^n A_k e^{p_k t}$
Корні $p_1, p_2, \dots, p_n$ $p_1 = p_2 = \dots p_m = p \ (m < n)$	$x_{св} = \sum_{k=1}^m A_k t^{k-1} e^{p t} + \sum_{k=m+1}^n A_k e^{p_k t}$
Пари комплексно-сполучених коренів $p_{k,k+1} = -\delta_k \pm j\omega_k$	$x'_{св} = e^{-\delta_k t} (A_k \cos \omega_k t + A_{k+1} \sin \omega_k t) =$ $= B_k e^{-\delta_k t} \sin(\omega_k t + \varphi_k)$

Оскільки у лінійному ланцюзі з часом вільна складова згасає, речові частини коренів характеристичного рівняння не можуть бути позитивними. При речових коренях $x_{св}$ монотонно згасає і має місце аперіодичний перехідний процес. Наявність пари комплексно-сполучених коренів $x_{св}$ обумовлює появу загасаючих синусоїдальних коливань (коливальний перехідний процес).

Важливою характеристикою для дослідження перехідних процесів є постійна часу τ , що визначається для ланцюгів першого порядку, як:

$$\tau = \text{mod}(1/p), \quad (3.3)$$

де p – корінь характеристичного рівняння.

Постійну часу можна інтерпретувати як часовий інтервал, протягом якого вільна складова зменшиться у e разів порівняно зі своїм початковим значенням.

Теоретично перехідний процес триває нескінченно довго. Однак на практиці вважається, що він закінчується при $t = (3 \dots 4) \tau$.

3.4 Способи складання характеристичного рівняння

Характеристичне рівняння складається для ланцюга після комутації та може бути отримано такими способами:

- безпосередньо з урахуванням ДР виду (3.1), т. е. шляхом виключення із системи рівнянь виходячи з першого і другого законів Кірхгофа, всіх невідомих величин, крім однієї, щодо якої записується рівняння (3.1);
- шляхом використання виразу для вхідного опору ланцюга на синусоїдальному струмі;
- на основі виразу головного визначника.

Оскільки лінійний ланцюг охоплений єдиним перехідним процесом, корені характеристичного рівняння є спільними для всіх вільних складових напруг і струмів гілок схеми, параметри яких входять до характеристичного рівняння. Тому, за першим способом складання характеристичного рівняння як змінну, щодо якої воно записується, може бути обрана будь-яка.

Складання характеристичного рівняння за другим методом полягає в наступному:

- записується вхідний опір ланцюга на змінному струмі;
- $j\omega$ замінюється на оператор p ;
- отриманий вираз $Z(p)$ прирівнюється до 0.

Рівняння $Z(p) = 0$ співпадає з характеристичним.

Вхідний опір може бути записано щодо місця розриву будь-якої гілки схеми.

При складанні характеристичного рівняння за третім методом число рівнянь алгебри, на основі яких він записується, дорівнює числу невідомих вільних складових струмів. Алгебраїзація системи інтегрально-диференціальних рівнянь здійснюється заміною символів диференціювання та інтегрування відповідно на множення та розподіл на оператор p . Характеристичне рівняння утворюється шляхом прирівнювання записаного визначника до нуля.

3.5 Загальна методика розрахунку перехідних процесів класичним методом

Розрахунок перехідних процесів класичним методом включає такі етапи:

1. Запис виразу для шуканої змінної як (3.2).
2. Знаходження вимушеної складової загального рішення на підставі розрахунку режиму, що встановився після комутаційного ланцюга.
3. Складання характеристичного рівняння та визначення його коренів (для ланцюгів, що описуються ДР першого порядку, замість коренів можна знаходити постійну часу τ). Запис виразу вільної складової у формі, що визначається типом знайденого коріння.
4. Підстановка отриманих виразів вимушеної та вільної складових у співвідношення (3.2).

5. Визначення початкових умов та на їх основі – постійне інтегрування.

3.5.1 Заряд и розряд конденсатора

При переведенні ключа в положення 1 (рис. 3.1) починається процес заряду конденсатора:

$$u_C(t) = u_{Cпр} + u_{Cсв}.$$

Вимушена складова напруги на конденсаторі

$$u_{Cпр} = U_0.$$

З характеристичного рівняння: $R_1 + \frac{1}{Cp} = 0$,

Визначається корінь $p = -1/(R_1 C)$.

Звідси постійна часу $\tau_{C1} = R_1 C$.

Таким чином,

$$u_C = U_0 + A e^{-\frac{t}{\tau_{C1}}}.$$

При $t = 0$ напруга на конденсаторі дорівнює $u_C(0)$ (загалом на момент комутації конденсатор може бути зарядженим, тобто $u_C(0) \neq 0$). Тоді $A = u_C(0) - U_0$ та

$$u_C(t) = U_0 + (u_C(0) - U_0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{C1}}}.$$

Відповідно для зарядного струму можна записати:

$$i(t) = C \frac{du_C}{dt} = \frac{U_0 - u_C(0)}{R_1} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{C1}}}.$$

Залежно від величини $u_C(0)$ можливі чотири види кривих перехідного процесу, що ілюструє Рисунок 3.2:

1. $u_C(0) = 0$;
2. $0 < u_C(0) < U_0$;
3. $u_C(0) < 0$;
4. $u_C(0) > U_0$.

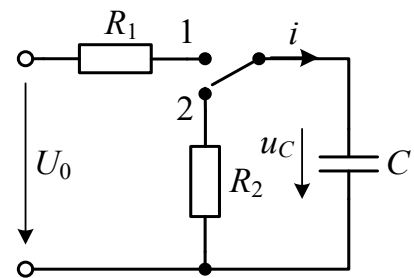


Рисунок 3.1 – RC-ланцюг для заряду и розряду конденсатора

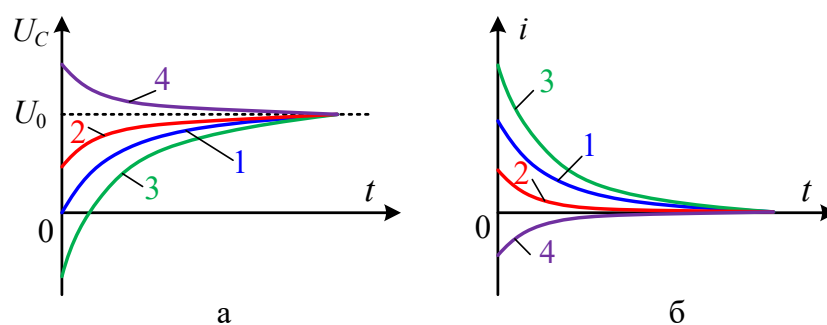


Рисунок 3.2 – Чотири види кривих перехідного процесу залежно від величини $u_C(0)$

При розряді конденсатора на резистор R_2 (ключ на рис. 3.1 переводиться в положення 2) $u_{Cnp} = 0$. Постійна часу $\tau_{c2} = R_2 C$.

Тоді, приймаючи, що на момент комутації конденсатор був заряджений до напруги $u_{C1}(0)$ (у разі $u_{C1}(0) = U_0$), для напруги у перехідному режимі можна записати:

$$u_C(t) = u_{C1}(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{c2}}}.$$

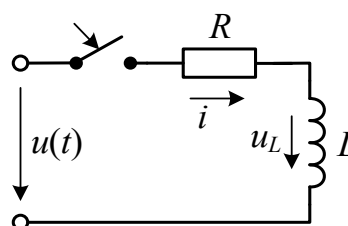
Відповідно розрядний струм:

$$i(t) = C \frac{du_C}{dt} = -\frac{u_{C1}(0)}{R_2} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{c2}}}. \quad (3.4)$$

Як видно з (3.4), щоб уникнути значних кидків розрядного струму величина R_2 повинна бути досить великою.

3.5.2 Перехідні процеси в RL -ланцюзі при її підключенні до джерела напруги

Такі процеси мають місце, наприклад, при підключенні до джерела живлення електромагнітів, трансформаторів, електричних двигунів тощо.



Розглянемо випадок, коли $u(t) = U_0$.

Згідно з розглянутою методикою для струму в ланцюзі на рис. 3.2 можна записати:

Рисунок 3.3 – RL -ланцюг при її підключенні до джерела напруги

$$i = i_{np} + i_{cv}. \quad (3.5)$$

Тоді вимушена складова струму:

$$i_{np} = \frac{U_0}{R}. \quad (3.6)$$

Характеристичне рівняння:

$$Lp + R = 0,$$

звідки

$$p = -R/L,$$

і постійна часу

$$\tau_L = |1/p| = L/R.$$

Таким чином,

$$i_{cb} = Ae^{-\frac{t}{\tau_L}}. \quad (3.7)$$

Підставляючи (3.6) и (3.7) у рівняння (3.5), отримуємо:

$$i = \frac{U_0}{R} + Ae^{-\frac{t}{\tau_L}}.$$

У відповідності з першим законом комутації $i(0) = 0$. Тоді:

$$i(0) = \frac{U_0}{R} + A = 0,$$

звідки

$$A = -U_0/R.$$

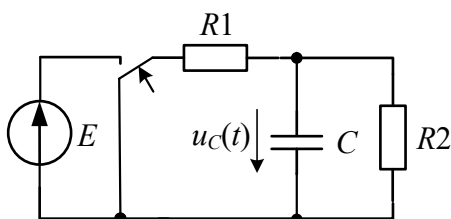
Таким чином, струм у ланцюзі в перехідному процесі описується рівнянням:

$$i(t) = \frac{U_0}{R} - \frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_L}} = \frac{U_0}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_L}}), \quad (3.8)$$

а напруга на котушці індуктивності – виразом:

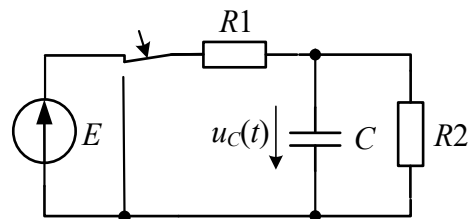
$$u_L(t) = L \frac{di}{dt} = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_L}}.$$

Задача 3.1



$E = 20 \text{ В};$
 $R1 = 50 \text{ Ом};$
 $R2 = 50 \text{ Ом};$
 $C = 10 \text{ мкФ}.$

Задача 3.2



1. Виконується розрахунок до комутації $t_{(0-)}.$

$$u_{C(0-)} = 0 \text{ В.}$$

$$u_{C(0-)} = \frac{E \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{20 \cdot 50}{50 + 50} = 10 \text{ В.}$$

2. Після комутації $t_{(0+)}$.

$$u_{C(0-)} = u_{C(0+)} = 0.$$

$$u_{C(0-)} = u_{C(0+)} = 10 \text{ В.}$$

3. Виконується розрахунок у встановленому режимі при $t \rightarrow \infty$.

$$u_{C\text{пр}} = \frac{E \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{20 \cdot 50}{50 + 50} = 10 \text{ В.}$$

$$u_{C\text{пр}} = 0.$$

Щодо затискачів джерела живлення складається характеристичне рівняння для опору ланцюга, в якому замінюється $j\omega$ на p .

Далі прирівнявши $Z(p) = 0$ і знаходимо коріння характеристичного рівняння p .

$$Z(p) = R_1 + \frac{1/pC \cdot R_2}{1/pC + R_2} = \frac{R_1 + pCR_1R_2 + R_2}{1 + pCR_2} = 0.$$

$$pCR_1R_2 + R_1 + R_2 = 0,$$

звідки

$$p = -\frac{R_1 + R_2}{CR_1R_2} = -\frac{50 + 50}{10 \cdot 10^{-6} \cdot 50 \cdot 50} = -\frac{100 \cdot 10^6}{10 \cdot 50 \cdot 50} = -4000 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

тоді

$$u_{C\text{св}} = Ae^{pt} = Ae^{-4000 \cdot t},$$

$$u_{C\text{св}} = Ae^{pt} = Ae^{-4000 \cdot t},$$

у якому A постійна інтегрування.

Запишемо остаточно вираз для $u_{C(t)}$

$$u_{C(t)} = u_{C\text{пр}} + u_{C\text{св}} = 10 + Ae^{-4000 \cdot t}.$$

$$u_{C(t)} = u_{C\text{пр}} + u_{C\text{св}} = 0 + Ae^{-4000 \cdot t}.$$

Знаходимо постійну інтегрування A , із виразу $u_{C(t)}$ для $t_{(0+)}$:

$$u_{C(0+)} = 10 + Ae^{-4000 \cdot 0} = 10 + A = 0,$$

$$u_{C(0+)} = 0 + Ae^{-4000 \cdot 0} = 0 + A = 10,$$

звідки

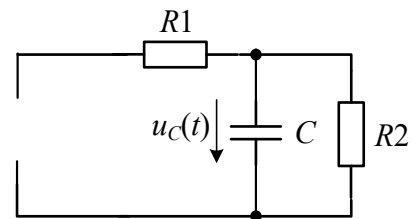
$$A = -10 \text{ (В)}$$

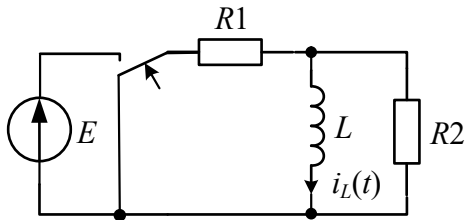
$$A = 10 \text{ (В)}$$

Остаточно отримуємо:

$$u_{C(t)} = 10 - 10 \cdot e^{-4000 \cdot t} = 10 \cdot (1 - e^{-4000 \cdot t}).$$

$$u_{C(t)} = 10 \cdot e^{-4000 \cdot t}.$$



Задача 3.3

$E = 200 \text{ В};$
 $R_1 = 100 \text{ Ом};$
 $R_2 = 50 \text{ Ом};$
 $L = 0,1 \text{ Гн.}$
 $i_{L(t)} - ?$

1. Виконується розрахунок до комутації $t_{(0-)}$.

$$i_{L(0-)} = 0.$$

2. Після комутації $t_{(0+)}$.

$$i_{L(0-)} = i_{L(0+)} = 0.$$

3. Виконується розрахунок у встановленому режимі при $t \rightarrow \infty$.

$$i_{L\text{пр}} = E / R_1 = 200 / 100 = 2 \text{ А.}$$

Щодо затискачів джерела живлення складається характеристичне рівняння для опору ланцюга, в якому замінюється $j\omega$ на p .

Далі прирівнявши $Z(p) = 0$ і знаходимо коріння характеристичного рівняння p .

$$Z(p) = R_1 + \frac{pL \cdot R_2}{pL + R_2} = 0.$$

$$pLR_1 + R_1R_2 + pLR_2 = 0,$$

звідки

$$p = -\frac{R_1 \cdot R_2}{LR_1 + LR_2} = -\frac{100 \cdot 50}{0,1 \cdot 100 + 0,1 \cdot 50} = -\frac{5000}{15} = -333,333 (\text{с}^{-1}).$$

тоді

$$i_{L\text{св}} = Ae^{pt} = Ae^{-333,333 \cdot t},$$

у якому A постійна інтегрування.

Отримаємо вираз для $i_{L(t)}$

$$i_{L(t)} = i_{L\text{пр}} + i_{L\text{св}} = 2 + Ae^{-333,333 \cdot t}.$$

Знаходимо постійну інтегрування A , із виразу $i_{L(t)}$ для $t_{(0+)}$:

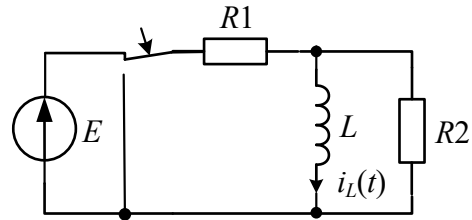
$$i_{L(0+)} = 2 + Ae^{-333,333 \cdot 0} = 2 + A = 0,$$

звідки

$$A = -2 (\text{А})$$

Остаточню отримуємо:

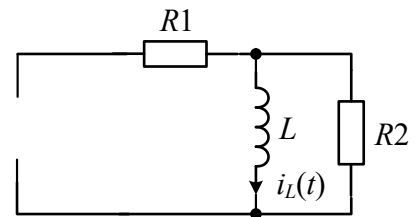
$$i_{L(t)} = 2 - 2e^{-333,333 \cdot t} = 2(1 - e^{-333,333 \cdot t}).$$

Задача 3.4

$$i_{L(0-)} = E / R_1 = 200 / 100 = 2 \text{ А.}$$

$$i_{L(0-)} = i_{L(0+)} = 2 \text{ А.}$$

$$i_{L\text{пр}} = 0.$$



$$i_{L\text{св}} = Ae^{pt} = Ae^{-333,333 \cdot t},$$

$$i_{L(t)} = i_{L\text{пр}} + i_{L\text{св}} = 0 + Ae^{-333,333 \cdot t}.$$

$$i_{L(0+)} = 0 + Ae^{-333,333 \cdot 0} = 0 + A = 2,$$

$$A = 2 (\text{А})$$

$$i_{L(t)} = 2e^{-333,333 \cdot t}.$$

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 4

РОЗРАХУНОК ЛАНЦЮГІВ З НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ ДІОДАМИ І СТАБІЛІТРОНАМИ

Метою заняття є ознайомлення з методикою розрахунку електричних параметрів у ланцюгах, що містять напівпровідникові діоди та стабілітрони.

При підготовці до заняття необхідно повторити матеріал з електрофізичних властивостей напівпровідників, електронно-діркових переходів, напівпровідникових діодів, а також закони Ома та Кірхгофа для електричних кіл.

4.1 Методичні вказівки

Властивості електронних приладів відображають їх вольтамперні характеристики (ВАХ). ВАХ напівпровідникового діоду наведена на рис. 1.1.

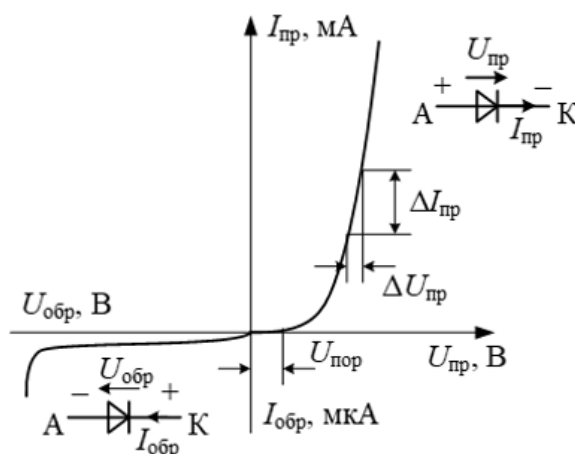


Рисунок 4.1 – ВАХ діоду

За ВАХ можна відзначити такі основні властивості діодів:

- одностороння провідність ($I_{пр} \gg I_{обр}$);
- температура навколишнього середовища надає більший вплив на діоди.

Користуючись ВАХ, можна визначити такі основні параметри:

- динамічний (диференціальний) опір

$$r_d = \frac{dU}{dI} \approx \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

- статичний опір діода в даній точці ВАХ.

На практиці замість $R_{ст}$ використовують опори $R_{пр}$ і $R_{обр}$, які відповідають опорам діода для постійного струму при номінальних (або спеціально обумовлених) значеннях прямої та зворотної напруги (або струмів). Очевидно, що $R_{пр} \ll R_{обр}$.

ВАХ стабілітрона наведена на рис. 1.2.

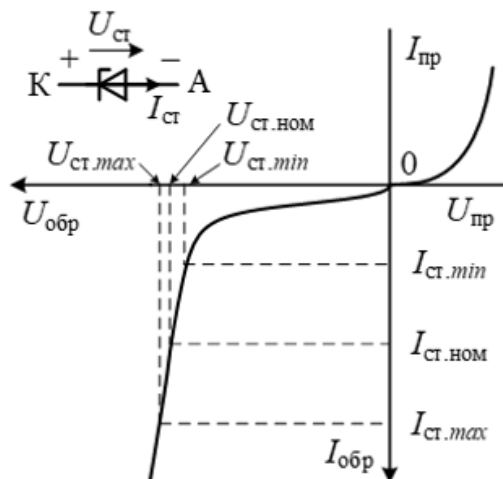


Рисунок 4.2 – ВАХ стабілітрону

Робочою ділянкою стабілітрону ВАХ є зворотна гілка, на якій вказані напруги та відповідні струми стабілізації. Основна властивість стабілітрону - підтримувати постійною напругу в діапазоні зміни струму $I_{ст}$ від мінімального $I_{ст\min}$ до максимального $I_{ст\max}$ значення, що визначається за довідковими даними стабілітрону.

Задача 1.

Для схеми, наведеної на рис. 4.3, визначити вихідну напругу $U_{вих}$ для двох варіантів (1, 2) підключення вхідної напруги.

Вихідні дані для розв'язання задачі: $U_{вх} = 10\text{ В}$, $R = 1\text{ кОм}$.

Для кожного варіанта навести розв'язання задачі з використанням ідеальних параметрів діода ($R_{пр} = 0$, $R_{обр} = \infty$) та реальних ($R_{пр} = 10\text{ Ом}$, $R_{обр} = 100\text{ кОм}$).

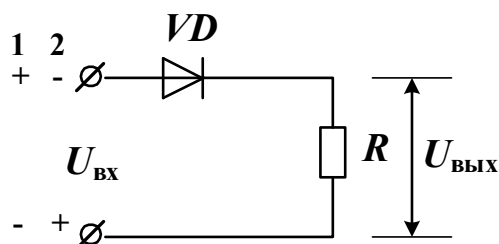


Рисунок 4.3 – Схема підключення діода

Рішення.

У першому варіанті включення $U_{вх}$ діод включений у прямому напрямку, тобто відкритий. Якщо параметри діоду можна прийняти ідеальними, то в цьому випадку падіння напруги на відкритому діоді дорівнює нулю, отже, $U_{вих.1} = U_{вх} = 10 \text{ В}$.

Для обліку впливу $R_{пр}$ необхідно спочатку визначити струм, що протікає в ланцюзі під дією вхідної напруги: $I = U_{вх}/(R_{пр} + R)$, а потім вихідна напруга: $U_{вих.1} = I R$.

У другому варіанті діод закритий. При ідеальних параметрах діода струм у ланцюзі не проходить, отже, $U_{вих.2} = 0$.

Задача 2.

Для схеми, наведеної на рис. 1.4 визначити вихідну напругу для двох варіантів підключення вхідної напруги.

Вихідними для вирішення завдання є значення $U_{вх}$, R , R_n , параметри діоду $R_{пр}$ і $R_{обр}$.

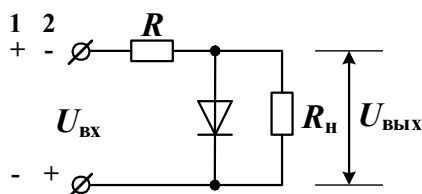


Рисунок 4.4 – Схема підключення діоду

Рішення.

У першому варіанті включення $U_{вх}$ діод включений у прямому напрямку, отже, використовуючи задане значення $R_{пр}$, знаходимо:

$$R_{вых.1} = R_{пр} \parallel R_n = \frac{R_{пр} \cdot R_n}{R_{пр} + R_n},$$

а потім вихідна напруга:

$$U_{вых.1} = \frac{U_{вх} \cdot R_{вых.1}}{R + R_{вых.1}}.$$

У другому варіанті діод включений у зворотному напрямку. Вихідну напругу визначаємо аналогічним чином, але при визначенні $R_{вих.2}$ використовуємо опір зміщеного назад діоду $R_{обр}$.

Задача 3.

Для схеми (рис. 4.5) визначити вихідну напругу $U_{вих}$ і струм I , що протікає у ланцюзі.

Вихідними для вирішення завдання є такі дані: $U_{вх} = 30 \text{ В}$, $R = 1 \text{ кОм}$, $R_H = 20 \text{ кОм}$.
Параметри діоду задані падінням напруги у відкритому стані $U_{пр} = 1,5 \text{ В}$.

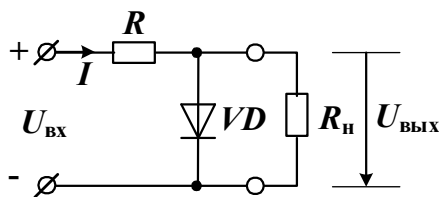


Рисунок 4.5 – Схема підключення діоду

Рішення.

Діод включений у прямому напрямку, отже, його опір незначний і його можна розглядати як джерело напруги, що задає на виході схеми напруга $U_{вих} \approx U_{пр}$. Струм у ланцюзі визначається переважно опором R і з урахуванням падіння напруги на діоді його можна визначити наступним чином:

$$I = (U_{вх} - U_{пр}) / R$$

Задача 4.

Визначити напругу $U_{вих}$ на виході схеми, наведеної на рис. 1.6 для двох варіантів полярності включення вхідної напруги $U_{вх}$.

Параметри діоду задані опором відкритого діоду $R_{пр}$ та опором закритого діоду $R_{обр}$ (табл. 4.1).

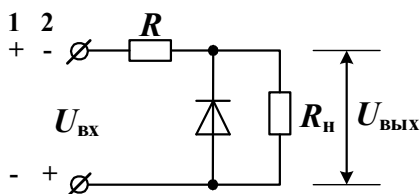


Рисунок 4.6 – Схема підключення діоду

Таблица 4.1

$U_{вх}, \text{ В}$	$R, \text{ кОм}$	$R_H, \text{ кОм}$	$R_{пр}, \text{ Ом}$	$R_{обр}, \text{ кОм}$
5	1	2	20	100

Рішення.

Вихідний опір схеми $R_{вих}$ 1 для 1-го варіанта включення вхідної напруги $U_{вх}$ (закритого діоду) дорівнює:

$$R_{\text{вых1}} = R_{\text{обр}} \parallel R_{\text{н}} = \frac{R_{\text{обр}} \cdot R_{\text{н}}}{R_{\text{обр}} + R_{\text{н}}} = \frac{100 \cdot 2}{100 + 2} = 1,96 \text{ (кОм)}.$$

Вихідна напруга $U_{\text{вих}} \text{ обр}$ для 1-го варіанта включення вхідної напруги $U_{\text{вх}}$:

$$U_{\text{вых1}} = \frac{U_{\text{вх}} \cdot R_{\text{вых1}}}{R_{\text{вых1}} + R} = \frac{5 \cdot 1,96}{1,96 + 1} = 3,3 \text{ (В)}.$$

Вихідний опір $R_{\text{вих 2}}$ схеми для 2-го варіанта включення вхідної напруги $U_{\text{вх}}$ (прямозмещеного діода) дорівнює:

$$R_{\text{вых2}} = R_{\text{пр}} \parallel R_{\text{н}} = \frac{R_{\text{пр}} \cdot R_{\text{н}}}{R_{\text{пр}} + R_{\text{н}}} = \frac{20 \cdot 2000}{20 + 2000} = 19,8 \text{ (Ом)}.$$

Вихідна напруга $U_{\text{вих 2}}$ для 2-го варіанта включення вхідної напруги $U_{\text{вх}}$:

$$U_{\text{вых2}} = \frac{U_{\text{вх}} \cdot R_{\text{вых2}}}{R_{\text{вых2}} + R} = \frac{5 \cdot 19,8}{19,8 + 1000} = 0,097 \text{ (В)}.$$

Задача 5.

Стабілізація напруги на навантаженні (рис. 4.7) здійснюється стабілітроном КС210Е, у якого $U_{\text{ст}} = 10 \text{ В}$.

Вихідні дані на вирішення завдання наведено у табл. 4.2:

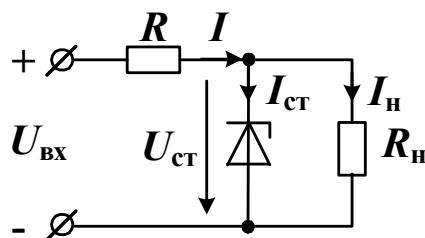


Рисунок 4.7 – Схема підключення стабілітрону

Таблиця 4.2.

$U_{\text{ст}}, \text{ В}$	$I_{\text{ст min}}, \text{ мА}$	$I_{\text{ст max}}, \text{ мА}$	$R, \text{ кОм}$	$R_{\text{н}}, \text{ кОм}$
10	3	13	1	2

Визначити допустимі межі зміни вхідної напруги $U_{\text{вх min}}$ та $U_{\text{вх max}}$.

Рішення.

Вхідна напруга визначається виразом:

$$U_{вх} = U_{ст} + R \cdot (I_{ст} + I_H).$$

Враховуючи, що $I_H = U_{ст} / R_H$ та підставляючи значення мінімального та максимального струму стабілітрона, отримаємо:

$$U_{вх \min} = U_{ст} + R \cdot (I_{ст \min} + U_{ст} / R_H) = 18 \text{ В.}$$

$$U_{вх \max} = U_{ст} + R \cdot (I_{ст \max} + U_{ст} / R_H) = 28 \text{ В.}$$

Задача 6.

Розрахувати опір резистора R у схемі (рис. 4.8) та перевірити, чи буде забезпечена стабілізація у всьому діапазоні зміни вхідної напруги.

Вихідні дані на вирішення завдання наведено у табл. 4.3.

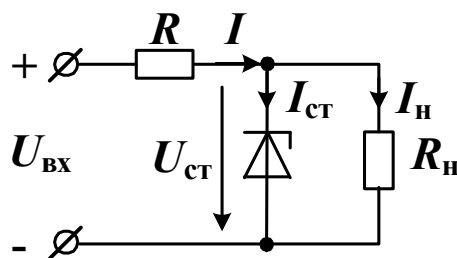


Рисунок 4.8

Таблиця 4.3.

$U_{вх \min}, \text{В}$	$U_{вх \max}, \text{В}$	$R_H, \text{кОм}$	$U_{ст}, \text{В}$	$I_{ст \min}, \text{мА}$	$I_{ст \max}, \text{мА}$
10	16	1	6	6	30

Рішення.

Напруга на виході схеми визначається напругою стабілізації стабілітрона $U_{ст}$.

Опір резистора R визначимо наступним чином:

$$R = (U_{вх \text{ ср}} - U_{ст}) / (I_{ст \text{ ср}} + U_{ст} / R_H),$$

де

$$U_{вх \text{ ср}} = (U_{вх \min} + U_{вх \max}) / 2 = 13 \text{ В};$$

$$I_{ст \text{ ср}} = (I_{ст \min} + I_{ст \max}) / 2 = 18 \text{ мА.}$$

Тоді $R = (13 - 6) / (0,018 + 6 / 1000) = 292 \text{ Ом}$.

Визначимо допустиме мінімальне та максимальне значення вхідної напруги для розрахованого значення резистора R :

$$U_{вх \text{ min доп}} = (I_{ст \text{ min}} + U_{ст} / R_n) \cdot R + U_{ст} = 9,5 \text{ В};$$

$$U_{вх \text{ max доп}} = (I_{ст \text{ max}} + U_{ст} / R_n) \cdot R + U_{ст} = 16,5 \text{ В}.$$

Допустимі межі забезпечують ширший діапазон зміни вхідної напруги порівняно із заданим. Отже, опір розрахованого резистора задовольняє умову завдання.

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 5

АНАЛІТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК РОБОЧОГО РЕЖИМУ ТРАНЗИСТОРІВ

Метою заняття є ознайомлення з методикою розрахунку електричних параметрів біполярних та польових транзисторів, а також отримання навичок розрахунку струмів та напруги транзисторів, що визначають їх режим роботи у конкретних схемах.

При підготовці до заняття необхідно повторити матеріал з принципу роботи транзисторів, можливих режимів їх роботи, характеристик та параметрів відповідно до схеми включення.

5.1 Методичні вказівки

При розрахунку режимів роботи транзисторів у схемах використовують закони Ома і Кірхгофа, враховуючи їх властивості та звертаючи увагу на полярність напруги, що підводяться до схем.

При включенні транзистора по схемі із загальною базою (ЗБ) зв'язок вихідного струму колектора з вхідним струмом емітера встановлюється таким співвідношенням:

$$I_k = \alpha \cdot I_e + I_{kbo}, \quad (5.1)$$

де $\alpha = \Delta I_k / \Delta I_e$ - коефіцієнт передачі по струму схеми з ЗБ;

I_{kbo} – зворотний тепловий струм.

Для схеми включення із загальним емітером (ЗЕ) зв'язок між вхідним струмом бази та вихідним струмом колектора описується рівнянням:

$$I_k = \beta \cdot I_b + I_{keo}, \quad (5.2)$$

де $\beta = \Delta I_k / \Delta I_b$ - коефіцієнт передачі струму схеми з ЗЕ (у системі формальних h -параметрів цей коефіцієнт позначається як h_{21e});

I_{keo} – зворотний тепловий струм.

Слід брати до уваги, що при включенні транзистора за схемою з ЗЕ тепловий струм зростає:

$$I_{keo} = I_{kbo} \cdot (1 + h_{21e}). \quad (5.3)$$

При наближених розрахунках режимів роботи, якщо транзистор працює за нормальної температури, струм $I_{кбо}$ часто приймають рівним нулю. Коефіцієнт може бути прийнятий рівним одиниці, а падіння напруги на переходах насиченого транзистора рівними нулю.

При розрахунку режимів роботи польових транзисторів з керуючим р-n переходом необхідно враховувати наступні співвідношення, що зв'язують значення струму стоку I_c та крутизну характеристики S зі значенням напруги між затвором та витоком $U_{зи}$:

$$I_c = I_{снач} \cdot \left(1 - \frac{U_{зи}}{U_{зиотс}} \right)^2; \quad (5.4)$$

$$S_{поч} = 2 \cdot I_{с поч} / U_{зи відс}; \quad (5.5)$$

$$S = S_{поч} (1 - U_{зи} / U_{зи відс}), \quad (5.6)$$

де $I_{с поч}$ - початковий струм стоку, під яким розуміють струм при $U_{зи} = 0$ і напрузі на стоку, що перевищує напругу насичення;

$U_{зи відс}$ - напруга між затвором та витоком, при якому $I_c = 0$.

5.2 Завдання для аудиторних занять

Задача 1. Транзистор типу р-n-р включений за схемою з ЗЕ. У якому режимі працює транзистор, якщо:

- а) $U_{бе} = -0,4$ В, $U_{ке} = -0,2$ В;
- б) $U_{бе} = -0,4$ В, $U_{ке} = -10$ В;
- в) $U_{бе} = 0,4$ В, $U_{ке} = -10$ В.

Рішення. Режим роботи транзистора можна визначити, знаючи, яким чином зміщені емітерний та колекторний переходи:

а) транзистор працює в режимі насичення, тому що на емітерному переході пряма напруга; на колекторному переході $U_{кб} = U_{ке} - U_{бе} = 0,2$ В, тобто перехід так само прямо зміщений;

б) транзистор працює в активному режимі, оскільки на емітерному переході пряма напруга, а на колекторному зворотному ($-9,6$ В);

в) на обох переходах зворотні напруги, отже, транзистор працює у режимі відсічення.

Задача 2. У схемі, наведеній на рис. 5.1 визначити напругу між колектором та базою транзистора $U_{кб}$.

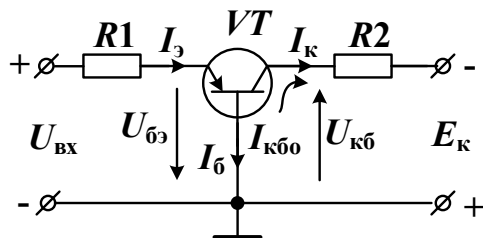


Рисунок 5.1 – Схема підсилювача на транзисторі, зібраного за схемою з загальною базою

Параметри транзистора задані коефіцієнтом передачі струму α і зворотним тепловим струмом $I_{кбо}$.

Дані на вирішення завдання наведено у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані

E_k , В	$U_{вх}$, В	R_1 , кОм	R_2 , кОм	$U_{бэ}$, В	$I_{кбо}$, мкА	α
20	2	2	5	0,2	10	0,98

Рішення. За другим законом Кірхгофа:

$$E_k = I_k R_2 + U_{кб},$$

$$U_{вх} = I_e \cdot R_1 + U_{бе},$$

з другого рівняння знаходимо:

$$I_e = \frac{U_{вх} - U_{бе}}{R_1} = \frac{2 - 0,2}{2} = 0,9 \text{ (мА)}$$

$$I_k = \alpha \cdot I_e + I_{кбо} = 0,98 \cdot 0,9 + 0,01 = 0,882 + 0,01 = 0,892 \text{ (мА)},$$

з першого рівняння знаходимо:

$$U_{кб} = E_k - I_k R_2 = 20 - 0,892 \cdot 5 = 20 - 4,46 = 15,54 \text{ (В)}.$$

Задача 3. Визначити мінімальне значення вхідної напруги $U_{вх}$, при якому транзистор в схемі на рис 5.2 буде працювати в режимі насичення

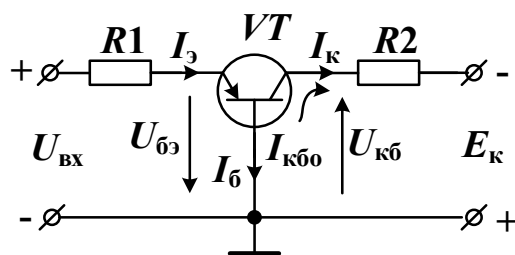


Рисунок 5.2 –Схема підсилювача, зібраного за схемою з загальною базою

Параметри транзистора задані коефіцієнтом передачі по току α і зворотним тепловим струмом $I_{кбо}$.

Дані для рішення задачі приведені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Вихідні дані

E_k , В	R_1 , кОм	R_2 , кОм	α	$I_{кбо}$, мкА	$U_{вх}$, В
16	2	4	0,99	20	?

Рішення. В режимі насичення переходи транзистора відкриті, тому падіння напруги на них $U_{кб} \approx U_{бэ} \approx 0$ В.

По другому закону Кірхгофа:

$$U_{вх} = I_b \cdot R_1 + U_{бэ} = I_b \cdot R_1,$$

$$E_k = I_k \cdot R_2 + U_{кб} = I_k \cdot R_2.$$

Із другого рівняння знаходимо I_k :

Із рівняння для струму I_k :

$$I_k = \alpha \cdot I_b + I_{кбо},$$

Находимо:

$$I_b = \frac{I_k - I_{кбо}}{\alpha} = \frac{4 - 0,02}{0,99} = 4,02 \text{ (мА)}$$

підставив значення струму I_3 в перше рівняння находимо:

$$U_{BX} = I_3 \cdot R_1 = 4,02 \cdot 2 = 8,04 \text{ (В)}.$$

Задача 4. Розрахувати опір резистора R_1 у схемі (Рис. 5.3) таким чином, щоб при заданих параметрах схеми транзистор переходив у насичення.

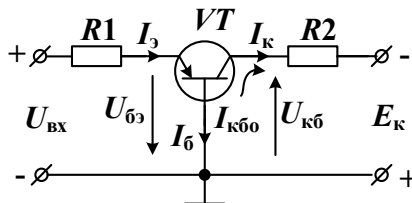


Рисунок 5.3 – Схема підсилювача, зібраного за схемою з загальною базою

Таблиця 5.3 – Вихідні дані

$U_{BX},$ В	$E_K,$ В	$R_1,$ кОм	$R_2,$ кОм	α	$I_{КБ0},$ мкА
6	18	?	3	0,99	10

Рішення. У режимі насичення переходи транзистора відкриті (прямо зміщені), тому падіння напруги на них $U_{КБ} \approx U_{БЭ} \approx 0$ Ст.

За другим законом Кірхгофа:

$$U_{BX} = I_E R_1 + U_{БЭ} = I_3 R_1,$$

$$E_K = I_K R_2 + U_{КБ} = I_K R_2.$$

З другого рівняння знаходимо I_K :

$$I_K = \frac{E_K}{R_2} = \frac{18}{3} = 6 \text{ (мА)}.$$

Із рівняння для току I_K :

$$I_K = \alpha \cdot I_3 + I_{КБ0}$$

знаходимо

$$I_3 = \frac{I_k - I_{кбо}}{\alpha} = \frac{6 - 0,01}{0,99} = 6,05 \text{ (мА)},$$

Із першого рівняння знаходимо $R1$:

$$R1 = U_{вх} / I_3 = 6 / 6,05 = 1 \text{ (кОм)}$$

Задача 5. Визначити мінімальне значення вхідної напруги $U_{вх}$, при якому транзистор в схемі на рис 5.4 буде працювати в режимі насичення

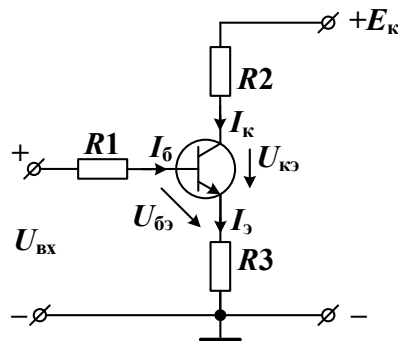


Рисунок 5.4 – Схема підсилювача, зібраного за схемою з загальним емітером

Параметри транзистора задані коефіцієнтом передачі струму h_{21e} .

Дані на вирішення завдання наведено у табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – Вихідні дані

$E_k,$ В	$R1,$ кОм	$R2,$ кОм	$R3,$ кОм	h_{21e}
24	1	3	2	20

Рішення. Відповідно до 2-го закону Кірхгофа можна скласти рівняння для вхідного та вихідного ланцюга схеми:

$$U_{вх} = I_б R1 + U_{бе} + I_э R3 = I_б R1 + I_б (h_{21e} + 1) R3;$$

$$E_k = I_k R2 + U_{ке} + I_э R3 = I_б h_{21e} R2 + I_б (h_{21e} + 1) R3.$$

У режимі насичення переходи транзистора відкриті та падіння напруги на них:

$$U_{ке} \approx 0 \text{ та } U_{бе} \approx 0.$$

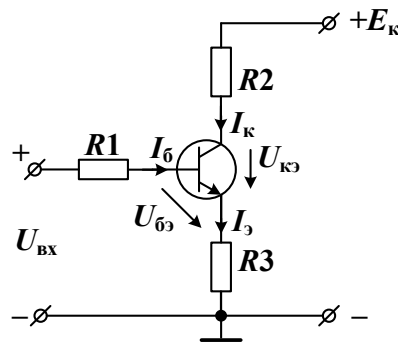
З другого рівняння визначаємо струм бази:

$$I_{\text{б}} = \frac{E_{\text{к}}}{h_{21\text{э}} \cdot R_2 + (h_{21\text{э}} + 1) \cdot R_3} = \frac{24}{20 \cdot 3 + (20 + 1) \cdot 2} = 0,235 \text{ (мА)}.$$

Підставляємо значення струму $I_{\text{б}}$ у перше рівняння та отримуємо:

$$U_{\text{вх}} = I_{\text{б}} \cdot R_1 + I_{\text{б}} \cdot (h_{21\text{э}} + 1) \cdot R_3 = 0,235 \cdot 1 + 0,235 \cdot (20 + 1) \cdot 2 = 10,1 \text{ (В)}.$$

Задача 6. У схемі, наведеній на рис. 5.5 визначити вхідний опір схеми. Параметри транзистора задані коефіцієнтом передачі струму $h_{21\text{э}}$.



исунок 5.5 – Схема підсилювача, зібраного за схемою з загальним емітером

Дані на вирішення завдання наведено у табл. 5.5.

Таблица 5.5 – Вихідні дані

$E_{\text{к}}, \text{В}$	$R_1, \text{кОм}$	$R_2, \text{кОм}$	$R_3, \text{кОм}$	$h_{21\text{э}}$
20	10	5	1	100

Рішення. $R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / I_{\text{вх}}$. Вхідним струмом у цій схемі є струм бази $I_{\text{б}}$. Складемо рівняння для вхідного ланцюга:

$$U_{\text{вх}} = I_{\text{е}} R_3 + I_{\text{б}} R_1 \text{ або } U_{\text{вх}} = I_{\text{б}} (h_{21\text{э}} + 1) R_3 + I_{\text{б}} R_1.$$

Підставивши вирази для $U_{\text{вх}}$ і $I_{\text{вх}}$ після скорочення $I_{\text{б}}$ отримаємо вираз визначення вхідного опору:

$$R_{вх} = (h_{21e} + 1) \cdot R_3 + R_1.$$

Після підстановки чисельних значень отримаємо $R_{вх} = 111 \text{ кОм}$.

Задача 7. У схемі, наведеній на рис. 5.6, визначити струм в кола колектора I_k і вхідний опір. Параметри транзистора задані коефіцієнтом передачі струму h_{21e} .

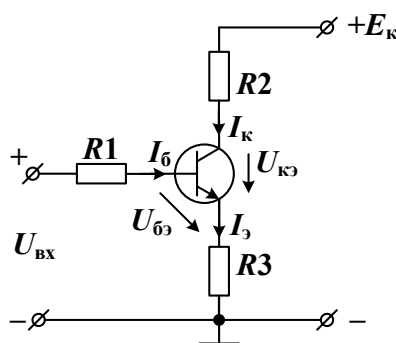


Рисунок 5.6 – Схема підсилювача, зібраного за схемою з загальним емітером

Дані на вирішення завдання наведено у табл. 5.6.

Таблиця 5.6 – Вихідні дані

$E_k, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$h_{21э}$	$U_{кэ}, \text{В}$
24	2	5	3	29	10

Рішення. Для схеми в активному режимі задано $U_{кэ} = 10 \text{ В}$, а $U_{бэ}$ не задано, тому приймаємо $U_{бэ} = 0$.

Відповідно до 2-го закону Кірхгофа можна скласти рівняння для вхідного та вихідного ланцюга схеми:

$$U_{вх} = I_b R_1 + U_{бэ} + I_э R_3 = I_b R_1 + I_b (h_{21e} + 1) R_3;$$

$$\begin{aligned} E_k &= I_k R_2 + U_{ке} + I_э R_3 = I_k R_2 + U_{ке} + (I_k + I_b) R_3 = \\ &= I_k R_2 + U_{ке} + (I_k + I_k / h_{21e}) R_3 = I_k R_2 + U_{ке} + I_k (1 + 1 / h_{21e}) R_3. \end{aligned}$$

З другого рівняння визначаємо струм колектора:

$$I_k = \frac{E_k - U_{кэ}}{R_2 + (1 + 1 / h_{21э}) \cdot R_3} = \frac{24 - 10}{5 + (1 + 1/29) \cdot 3} = 1,728 \text{ (мА)}.$$

Тоді

$$I_6 = I_K / h_{21e} = 1,728 / 29 = 0,06 \text{ (мА)}.$$

Підставляємо це значення в перше рівняння та отримуємо:

$$U_{BX} = I_6 \cdot R_1 + I_6 \cdot (h_{21e} + 1) \cdot R_3 = 0,06 \cdot 2 + 0,06 \cdot (29 + 1) \cdot 3 = 5,52 \text{ (В)}.$$

$$R_{BX} = U_{BX} / I_6 = 5,52 / 0,06 = 92 \text{ (кОм)}.$$

або

$$R_{BX} = R_3 (h_{21e} + 1) + R_1 = 3 \cdot (29 + 1) + 2 = 92 \text{ (кОм)}.$$

Задача 8. В схемі, що наведена на рис. 5.7, визначити напругу між колектором та емітером $U_{кэ}$ транзистора.

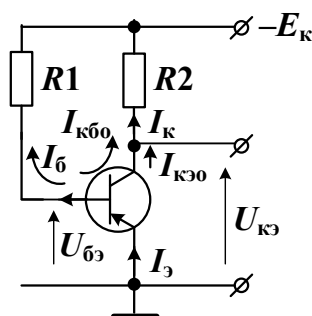


Рисунок 5.7 – Схема підсилювача, зібраного за схемою з загальним емітером

Параметри транзистора задані коефіцієнтом передачі струму h_{21e} і зворотним тепловим струмом $I_{кб0}$.

Дані на вирішення завдання наведено у табл. 5.7.

Таблиця 5.7 – Вихідні дані

$E_k,$ В	$R_1,$ кОм	$R_2,$ кОм	$U_{бэ},$ В	$h_{21э}$	$I_{кб0},$ мкА	$U_{кэ},$ В	$I_k,$ мА
15	200	2	0,3	50	10	?	?

Рішення. Складемо рівняння для вихідного ланцюга, куди входить напруга, яку необхідно знайти:

$$E_k = I_k R_2 + U_{ке}.$$

Для визначення струму колектору, який у цій схемі залежить від струму бази, складемо рівняння для вхідного ланцюга:

$$E_k = I_b \cdot R_1 + U_{бэ}.$$

З отриманого рівняння знаходимо струм бази:

$$I_b = (E_k - U_{бэ}) / R_1 = 0,0735 \text{ (мА)}.$$

Тоді

$$I_k = I_b \cdot h_{21э} + I_{кео} = I_b \cdot h_{21э} + I_{кбо} \cdot (h_{21э} + 1) = 0,0735 \cdot 50 + 10 \cdot 10^{-2} \cdot (50 + 1) = 4,185 \text{ (мА)}.$$

напруга

$$U_{ке} = E_k - I_k R_2 = 6,63 \text{ (В)}.$$

Задача 9. У схемі, наведеній на рис. 5.8 розрахувати опори резисторів R_1 та R_2 .

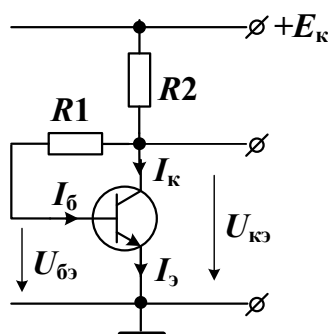


Рисунок 5.8 – Схема підсилювача, зібраного за схемою з загальним емітером

Дані на вирішення завдання наведено у табл. 5.8.

Таблиця 5.8. Вихідні дані

E_k , В	$U_{бэ}$, В	$U_{кэ}$, В	I_k , мА	$h_{21э}$	$I_{кбо}$, мкА
15	0	5	10	50	15

Рішення. У цій схемі, на відміну від попередньої, резистор R_1 підключений не до шини живлення, а до колектора транзистора. В результаті по резисторі R_2 протікають два струми - струм колектора і струм бази.

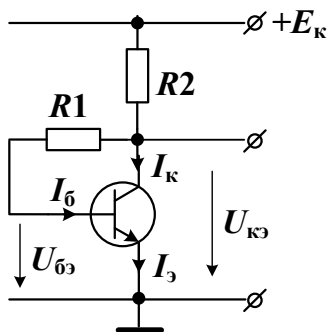


Рисунок 5.8 – Схема підсилювача, зібраного за схемою з загальним емітером

Запишемо рівняння для вихідного ланцюга:

$$E_k = U_{кэ} + (I_k + I_б) \cdot R_2.$$

Для даної схеми справедливо, що $U_{ке} = I_б R_1$ (т. до. перехід база-емітер відкритий, $U_{бе}$ приймаємо рівним нулю).

З рівняння для струму колектора:

$$I_k = h_{21e} \cdot I_б + I_{кбо} \cdot (1 + h_{21e})$$

визначимо струм бази:

$$I_б = [I_k - I_{кбо} \cdot (1 + h_{21e})] / h_{21e} = 0,185 \text{ мА}.$$

Тоді

$$R_1 = U_{ке} / I_б = 27 \text{ кОм}, R_2 = (E_k - U_{ке}) / (I_k + I_б) = 980 \text{ Ом}.$$

Задача 10. У схемі, наведеній на рис. 5.9., визначити напругу $U_{ке}$ при розімкненому та замкнутому ключі.

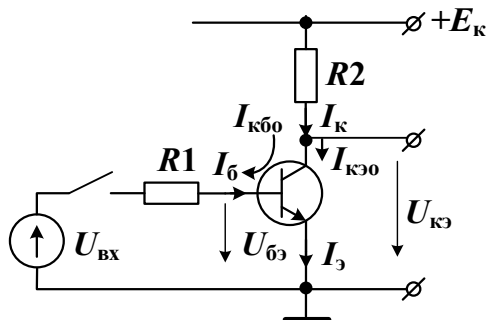


Рисунок 5.9 – Схема підсилювача, зібраного за схемою з загальним емітером

Вихідні дані на вирішення завдання наведено у табл. 5.9.

Таблиця 5.9 – Вихідні дані

$E_k,$ В	$U_{вх},$ В	$R_1,$ кОм	$R_2,$ кОм	$h_{21э}$	$I_{кбо},$ мкА	$U_{кэ},$ В
20	1	10	5	50	20	?

Рішення. Напругу визначатимемо за рівнянням:

$$U_{ке} = E_k - I_k R_2.$$

Значення струму I_k залежить від стану транзистора, яке залежить від положення ключа. При розімкненому ключі $I_b = 0$, транзистор знаходиться в режимі відсікання і $I_k = I_{кбо}$.

Тоді

$$U_{кэ} = 20 - 20 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^3 = 19,9 \text{ В.}$$

При замкнутому ключі

$$I_b = U_{вх}/R_1 = 0,1 \text{ мА.}$$

Струм колектора

$$I_k = h_{21э} I_b + I_{кбо} \cdot (1 + h_{21э}) = 50 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} + 20 \cdot 10^{-6} (1 + 50) = 5,12 \text{ мА.}$$

Тоді

$$U_{ке} = 20 - 5,12 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^3 = -5,6 \text{ В.}$$

Отриманий результат показує, що транзистор знаходиться в режимі насичення (струм колектора перевищує максимально можливе для цієї схеми значення, що дорівнює $I_{k \max} = E_k / R_2$), а отже, $U_{ке} \approx 0$.

Задача 11. У схемі включення польового транзистора, наведеної рис. 4.10 визначити напругу $U_{зи}$, крутість транзистора S в заданій робочій точці, опору резисторів R_i , R_c .

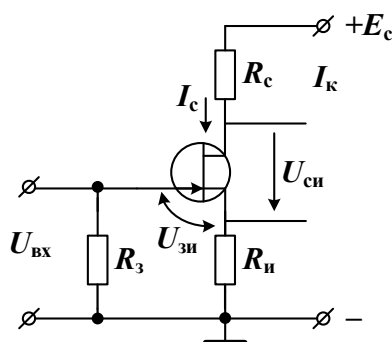


Рисунок 5.10 – Схема включення польового транзистора

Параметри транзистора: $I_c \text{ поч} = 1,8 \text{ мА}$, $U_{отс} = -2 \text{ ст.}$

Вихідні дані на вирішення завдання наведено у табл. 5.10.

Таблиця 5.10. Вихідні дані

$E_c,$ В	$I_c,$ мА	$U_{си},$ В	$I_{c \text{ нач}},$ мА	$U_{отс},$ В
20	1	5	1,8	2

Рішення. З рівняння отримаємо вираз визначення $U_{зи}$:

$$U_{зи} = (1 - \sqrt{\frac{I_c}{I_{снач}}}) U_{отс} = (1 - \sqrt{\frac{1 \cdot 10^{-3}}{1,8 \cdot 10^{-3}}}) \cdot (-2) = -0,51 \text{ В.}$$

Для визначення крутості використовуємо наступні вирази:

$$S_{нач} = 2 \cdot I_{снач} / U_{отс} = 2 \cdot 1,8 \cdot 10^{-3} / 2 = 1,8 \text{ мА / В};$$

$$S = S_{нач} \cdot (1 - U_{зи} / U_{отс}) = 1,8 \cdot 10^{-3} (1 - 0,51 / 2) = 1,35 \text{ мА / В.}$$

Напруга між затвором і витоком $U_{зи}$ в даній схемі створюється за рахунок падіння напруги на резисторі R_i при протіканні струму стоку, тобто.

$$U_{зи} = I_c R_i.$$

Звідси

$$R_i = U_{зи} / I_c = 0,51 / 1 \cdot 10^{-3} = 510 \text{ Ом.}$$

Для визначення опору резистора R_C складаємо рівняння для вихідного ланцюга згідно із законом Кірхгофа:

$$E_c = I_c R_s + U_{ci} + I_c R_i.$$

Тоді

$$R_c = (E_c - U_{ci} - I_c R_i) / I_c = (20 - 5 - 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,51 \cdot 10^3) / 1 \cdot 10^{-3} = 14,5 \text{ кОм.}$$

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 6

РОЗРАХУНОК ТИПОВИХ СХЕМ ПІДСИЛЮВАЧІВ НА ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧАХ

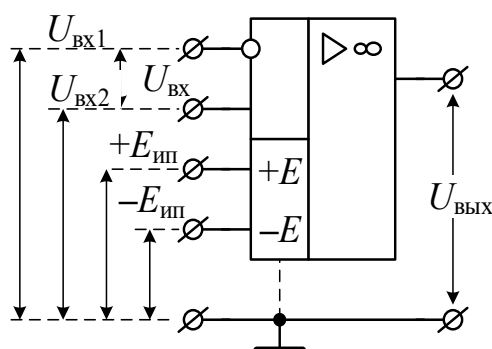
Метою заняття є вивчення методики розрахунку підсилювачів постійного струму (ППС), виконаних на операційних підсилювачах (ОП).

Під час підготовки до заняття необхідно вивчити принципи побудови ППС, їхні параметри, характеристики, особливості режимів роботи. Необхідно також вивчити властивості ОП і типові схеми їхнього включення в безінерційні лінійні ланцюги.

6.1 Методичні вказівки

Операційний підсилювач - це підсилювач з великим коефіцієнтом посилення і безпосередніми зв'язками між каскадами, який застосовують здебільшого як активний елемент у схемах з негативним зворотним зв'язком (НЗЗ). За досить великого коефіцієнта посилення ОП за напругою передавальна характеристика пристрою разом із ланцюгами НЗЗ може бути функцією тільки параметрів ланцюгів НЗЗ і не залежати від параметрів ОП. Крім того, такі підсилювачі мають дуже велике значення вхідного опору $R_{вх}$ і низьке значення вихідного $R_{вих}$. Завдяки практично ідеальним характеристикам ОП реалізація різних схем на їхній основі виявляється значно простішою, ніж на окремих транзисторах.

Спрощене умовне графічне зображення ОП наведено на рис. 6.1. Вхідний каскад ОП виконується у вигляді диференціального підсилювача, тому інтегральна мікросхема (ІМС) ОП має 2 входи. Вхід $U_{вх1}$, напруга на якому зміщена на 180° за фазою відносно вихідної напруги, називається інверсним. Вхід $U_{вх2}$, напруга на якому збігається за фазою з вихідною, називають прямим.



Рисунк 6.1 – Умовне графічне зображення ОП

Вхідним сигналом підсилювача є різниця між напругами на цих входах.

$$U_{вх} = U_{вх1} - U_{вх2}.$$

Вхідні сигнали подаються і, відповідно, вихідні знімаються щодо однієї спільної шини.

Для живлення цих ІМС використовують два джерела, які вмикаються послідовно, а середня точка між ними з'єднується із загальною шиною. При використанні спрощеного зображення ОП джерела живлення не відображаються на схемах. ОП тим точніше реалізує задану для нього конкретною схемою ввімкнення функцію, чим ближче числові значення його параметрів відповідають параметрам ідеального ОП.

Амплітудну характеристику ОП наведено на рис. 6.2.

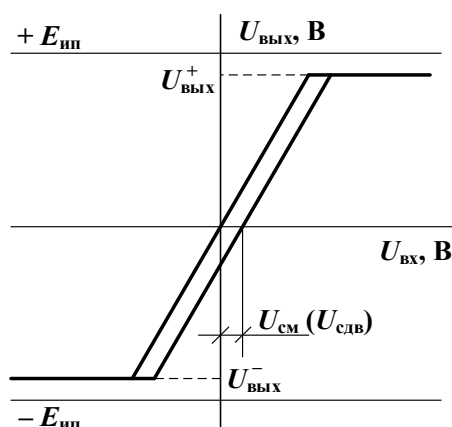


Рисунок 6.2 – Амплітудна характеристика ОП

Ідеальним називають ОП, який характеризується такими значеннями параметрів:

- напруга зсуву нуля $U_{см} = 0$ В;
- напруга на виході підсилювача $U_{вих} = 0$ В при $U_{вх} = 0$ В;
- вхідний опір $R_{вх} = \infty$;
- вхідний струм $I_{вх} = 0$ А;
- диференціальний коефіцієнт підсилення $K_{Uд} = \infty$;
- коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу $K_{ос\ сф} = \infty$;
- частота одиничного підсилення $f_T = \infty$ Гц;
- швидкість наростання вихідної напруги $V_{U_{вих}} = \infty$ В/мкс;
- час наростання вихідної напруги $t = 0$ с;
- вихідний опір $R_{вих} = 0$ Ом.

Насправді ідеальних ОП не існує. Для того, щоб можна було оцінити, на скільки той чи інший ОП близький до ідеалу, наводяться технічні характеристики підсилювачів.

Нахил характеристики визначається диференціальним коефіцієнтом посилення ОУ за напругою:

$$K_{U_d} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}} = \begin{cases} \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ1}}}, & \text{при } U_{\text{ВХ2}} = \text{const} \\ \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ2}}}, & \text{при } U_{\text{ВХ1}} = \text{const} \end{cases}$$

Під час розгляду типових схем з ОП зазвичай користуються ідеальною моделлю ОП. У разі потреби параметри типових схем уточнюють з урахуванням реальних значень параметрів ОП.

Інвертуючий підсилювач (рис. 6.3, а) являє собою ОП, охоплений ланцюгом паралельної НЗЗ за напругою на резисторах R2 і R1.

У разі використання ідеальної моделі ОП параметри такого підсилювача можна визначити таким чином:

коефіцієнт підсилення: $K_{U_{\text{інв}}} \approx -R_2 / (R_1 + R_{\text{вн}})$;

вхідний опір: $R_{\text{вх.інв}} \approx R_1$;

вихідний опір: $R_{\text{вих.інв}} \approx 0$.

Опір резистора R3 з метою зменшення струмового дрейфу рекомендується обирати таким чином: $R_3 = R_1 \parallel R_2$.

Неінвертуючий підсилювач (рис. 6.3, б) являє собою ОУ, охоплений ланцюгом послідовного НЗЗ за напругою на резисторах R2 і R1.

За ідеального ОП коефіцієнт підсилення такого підсилювача:

коефіцієнт посилення: $K_{U_{\text{неінв}}} \approx 1 + R_2/R_1$;

вхідний опір: $R_{\text{вх.неінв}} = R_{\text{вхОУ}} \cdot (1 + \gamma K_{U_{\text{ОУ}}})$;

вихідний опір: $R_{\text{вих.неінв}} = R_{\text{вихОУ}} / (1 + \gamma K_{U_{\text{ОУ}}})$;

де

$\gamma = R_1/(R_1 + R_2)$.

З урахуванням реальних параметрів ОУ вхідний опір підсилювача зростає, а вихідний зменшується.

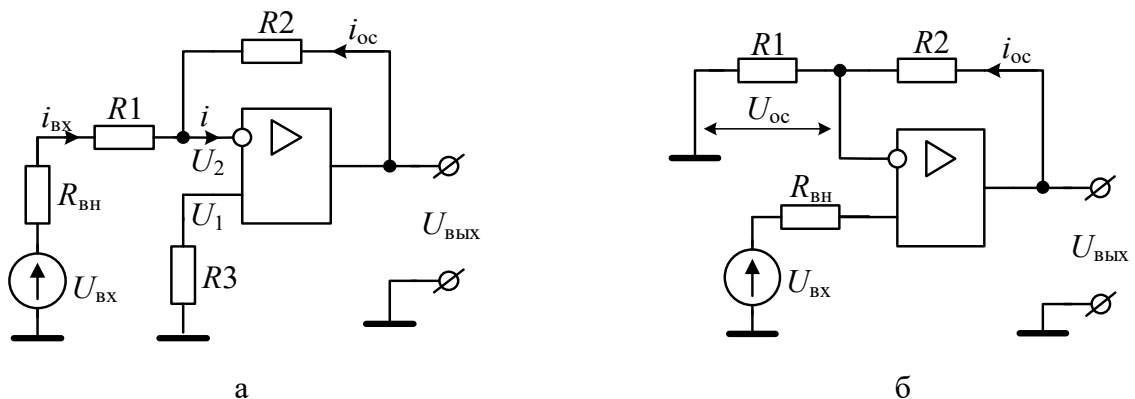


Рисунок 6.3 – Схеми інвертуючого (а) і неінвертуючого (б) підсилювачів на ОП

В інвертуючому суматорі (рис. 6.4, а) вихідна напруга пов'язана з вхідними таким співвідношенням:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -R_3 \cdot (U_{\text{ВХ1}} / R_1 + U_{\text{ВХ2}} / R_2).$$

Опір резистора R_4 рекомендується визначати аналогічно резистору R_3 у схемі інвертуючого суматора:

$$R_4 = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3.$$

ОП (рис. 6.4, б) підсилює різницю сигналів, прикладених до входів ОП. Якщо дотримується умова попарної рівності опорів: $R_1 = R_2$, $R_3 = R_4$, то

$$U_{\text{ВЫХ}} = A \cdot (U_{\text{ВХ2}} - U_{\text{ВХ1}}),$$

де $A = R_3 / R_1$.

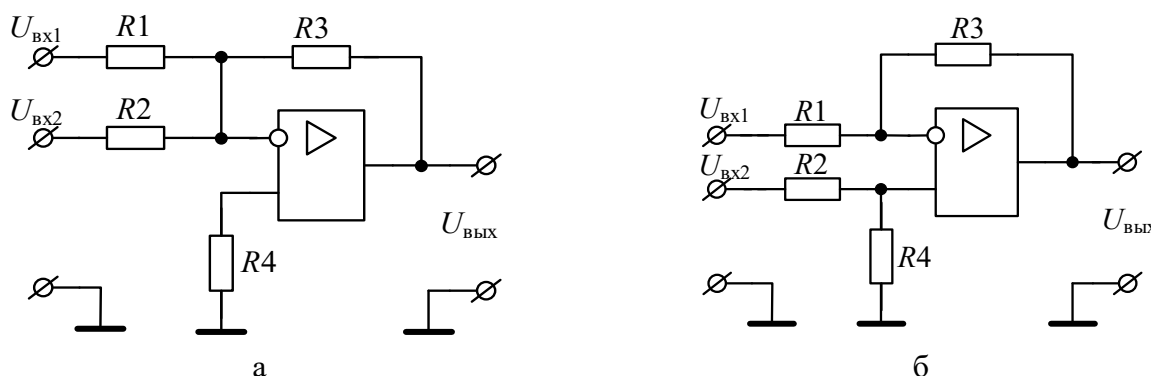


Рисунок 6.4 – Схеми на ОП суми та різниці сигналів

6.2 Задачі для аудиторних занять

Тип задачі та вихідні дані визначаються табл. 6.1 відповідно до номера варіанта. Вид схеми обирається таким чином: для задачі № 1 - схема, наведена на рис. 6.5 а; для задачі № 2 - схема на рис. 6.5 б.

У задачах передбачається визначення елементів або параметрів типових схем підсилювачів на ОУ.

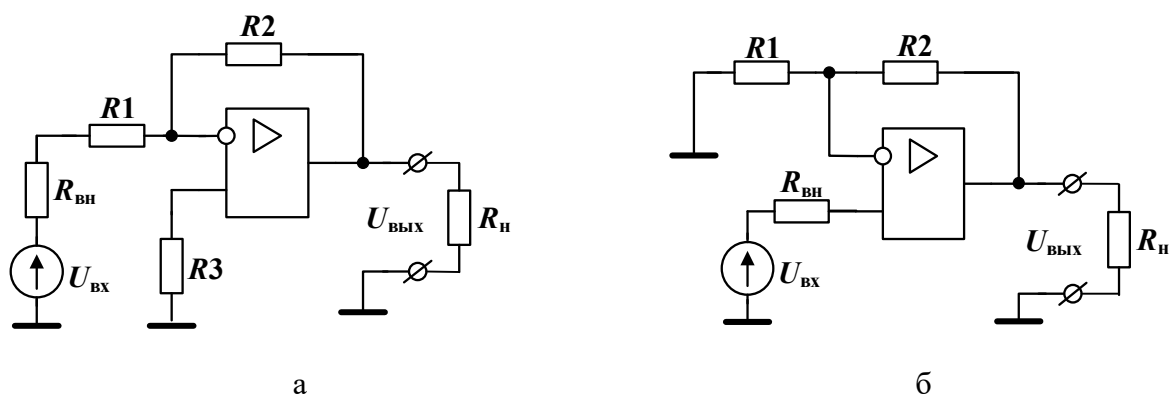


Рисунок 6.5 – Схеми інвертуючого (а) і неінвертуючого (б) підсилювачів на ОП

Таблиця 6.1 – Дані для рішення задач типу 1, 2

№ варіанту	Тип задачі	$R_{ВХ}, \geq$ кОм	K_U	$R_{ВН},$ Ом	Тип ОУ	$R_1,$ кОм	$R_2,$ кОм	$R_H,$ кОм
1	1	3	40	100	140УД6	-	-	3
1	2	-	-	300	140УД8	5	100	5
2	1	5	20	200	140УД7	-	-	4
2	2	-	-	400	153УД3	6	80	2.5
3	1	4	30	500	153УД5	-	-	3.5
3	2	-	-	200	544УД1	4	120	6
4	1	2	50	100	153УД6	-	-	4.5
4	2	-	-	300	533УД1	8	150	4.2
5	1	5	25	400	533УД2	-	-	3.2
5	2	-	-	100	157УД1	10	100	4.2
6	1	4	30	500	140УД10	-	-	2.8
6	2	-	-	200	140УД12	2	60	4.8
7	1	3	35	300	544УД2	-	-	5.1
7	2	-	-	500	154УД3	8	80	5.8
8	1	3	40	400	574УД1	-	-	5.4
8	2	-	-	100	140УД11	4	120	6.2
9	1	2	45	200	553УД1	-	-	6.4
9	2	-	-	400	154УД1	5	100	2.9
10	1	2	50	300	553УД2	-	-	6.5
10	2	-	-	500	140УД6	6	90	3.1
11	1	6	20	100	140УД6	-	-	3.3
11	2	-	-	300	140УД8	4	80	5.2
12	1	5	25	200	140УД7	-	-	3.6
12	2	-	-	400	153УД3	5	90	3
13	1	2	52	100	153УД5	-	-	4
13	2	-	-	300	533УД1	10	150	3.5
14	1	4	25	400	153УД6	-	-	5
14	2	-	-	100	533УД2	10	100	4.5
15	1	3	50	500	544УД1	-	-	2.5
15	2	-	-	200	140УД10	2	60	6
16	1	3	35	300	157УД1	-	-	4.2
16	2	-	-	500	544УД2	8	80	2.8
17	1	3	40	400	140УД12	-	-	3.2
17	2	-	-	100	574УД1	4	120	4.2
18	1	2	45	200	154УД3	-	-	4.8

18	2	-	-	400	553УД1	5	100	5.4
19	1	2	50	300	140УД11	-	-	5.1
19	2	-	-	500	553УД2	6	90	5.8
20	1	5	20	100	154УД1	-	-	6.2
20	2	-	-	300	140УД6	4	80	6.5
21	1	5	25	200	140УД6	-	-	6.4
21	2	-	-	400	140УД7	5	90	2.9
22	1	2	52	100	140УД8	-	-	3.1
22	2	-	-	300	153УД6	10	150	5.2
23	1	4	25	400	153УД3	-	-	3.3
23	2	-	-	100	544УД1	-	-	3
24	1	3	50	500	153УД5	-	-	3.6
24	2	-	-	300	533УД2	1	63	5
25	1	3	44	200	533УД1	-	-	4
25	2	-	-	400	1401УД2	2	82	2.5
26	1	4	28	500	157УД1	-	-	3.5
26	2	-	-	200	544УД2	3	76	6
27	1	4	32	100	140УД12	-	-	4.5
27	2	-	-	300	574УД1	4	91	4.2
28	1	6	18	400	154УД3	-	-	3.2
28	2	-	-	100	553УД1	5	120	4.2
29	1	3	36	500	140УД11	-	-	2.8
29	2	-	-	200	140УД6	4	80	3
30	1	5	20	500	153УД5	-	-	5
30	2	-	-	400	140УД8	2	100	3.2
31	1	4	30	100	153УД6	-	-	4
31	2	-	-	500	153УД3	4	120	4
32	1	2	50	100	553УД2	-	-	4.8
32	2	-	-	600	153УД1	7	140	5.4
32	1	3	40	200	154УД1	-	-	5.1
32	2	-	-	800	140УД6	5	100	5.8
33	1	2	60	500	140УД7	-	-	6.2
33	2	6	20	400	140УД8	-	-	6.4

Таблица 6.2 – Параметры ИМС ОП

Тип ОП	$K_{УОУ}$	$R_{ВХ}$, МОм	$I_{ВХ\ max}$, мА	$U_{ВХ\ max}$, В	F_1 , МГц
140УД6	$70 \cdot 10^3$	2	6	12	1
140УД7	$50 \cdot 10^3$	0.4	5	10.5	0.8
140УД8	$50 \cdot 10^3$	20	10	10	3
153УД3	$25 \cdot 10^3$	0.4	5	10	1
153УД5	$100 \cdot 10^3$	1	5	10	0.1
153УД6	$50 \cdot 10^3$	0.3	5	10	0.7
544УД1	$100 \cdot 10^3$	10	5	10	1
533УД1	$15 \cdot 10^3$	0.5	5	10	1
533УД2	$20 \cdot 10^3$	0.5	5	10	1
140УД12	$100 \cdot 10^3$	5	2.4	12	1
157УД1	$50 \cdot 10^3$	1	60	12	0.5
140УД10	$50 \cdot 10^3$	0.4	6	12	15
544УД2	$20 \cdot 10^3$	10	5	10	15
574УД1	$50 \cdot 10^3$	10000	5	10	10

154УДЗ	$8 \cdot 10^3$	1	5	10	15
140УД11	$50 \cdot 10^3$	0.4	6	12	15
553УД1	$15 \cdot 10^3$	0.2	5	10	1
553УД2	$20 \cdot 10^3$	0.3	5	10	1
154УД1	$150 \cdot 10^3$	1	5.5	11	1
153УД1	$20 \cdot 10^3$	0.2	5	10	1

У завданні № 1 необхідно виконати такі дії:

1) Визначити опори резисторів R_1 , R_2 , (R_3) таким чином, щоб забезпечити задане значення коефіцієнта передачі K_U з урахуванням впливу внутрішнього опору джерела сигналу $R_{вн}$, а також необхідне значення вхідного опору схеми $R_{вх}$. Під час виконання розрахунків приймати параметри ОУ такими, що відповідають ідеальній моделі;

2) Перерахувати параметри підсилювача з урахуванням реальних параметрів ІМС ОП. Параметри ІМС ОП наведено в табл. 6.2. Для виконання цих розрахунків рекомендується використовувати такі формули:

- для інвертуючого підсилювача:

$$K_{U_{\text{инв}}} = \frac{-R_2 / R_1}{1 + \frac{1}{K_{U_{\text{ОУ}}}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_{\text{вхОУ}}}\right)}, \quad R_{\text{вхинв}} = R_1 + \frac{R_{\text{вхОУ}} \cdot R_2}{R_{\text{вхОУ}} (1 + K_{U_{\text{ОУ}}}) + R_2};$$

- для неінвертуючого підсилювача:

$$K_{U_{\text{неинв}}} = 1 + |K_{U_{\text{инв}}}|, \quad R_{\text{вхнеинв}} = R_{\text{вхОУ}} \cdot (1 + \gamma \cdot K_{U_{\text{ОУ}}}),$$

де $\gamma = R_1 / (R_1 + R_2)$

3) Перевірити умови нормального функціонування схеми підсилювача. Для цієї мети визначити максимальне значення вихідного струму ІМС ОП, використовуючи для цього максимально можливе значення вихідної напруги ОП. Порівняти отримане значення струму з максимально можливим значенням вихідного струму мікросхеми, заданим у табл. 6.2.

4) Зобразити графіки амплітудно-частотної (АЧХ) і амплітудної характеристик (АХ) підсилювача з урахуванням параметрів ІМС ОП і параметрів підсилювача. Під час зображення графіка АЧХ коефіцієнт посилення виражати в децибелах; для частоти використовувати десятикратне збільшення на кожен поділ. При цьому врахувати, що типи ІМС, які використовують ОП, мають внутрішню частотну корекцію, отже, нахил характеристики становить 20 дБ/дек. Визначити за отриманими графіками смугу пропускання підсилювача і максимальне значення вхідної напруги, за якого забезпечується лінійна залежність вихідної напруги від вхідної.

Порядок дій при розв'язанні задачі № 2 відрізняється тільки змістом першого пункту:

1) Визначити параметри підсилювача: коефіцієнт передачі K_U , вхідний опір $R_{вх}$, вихідний опір $R_{вих}$, приймаючи при цьому параметри ІМС ОП ідеальними.

Після цього виконати дії, зазначені в п. 2, 3 і 4 для задачі № 1.

Приклади

1. Визначити опори резисторів R_1 , R_2 , (R_3) для схеми інвертуючого підсилювача на ОП (рис. 6.5, а) таким чином, щоб забезпечити значення коефіцієнта передавання $K_U = 50$ з урахуванням впливу внутрішнього опору джерела сигналу $R_{вн} = 100$ Ом, а також необхідне значення вхідного опору схеми $R_{вх} = 2$ кОм.

Рішення.

1) З урахуванням властивостей даного типу підсилювача приймаємо: $R_1 = R_{вх} = 2$ кОм.

Визначаємо опір у ланцюзі ОС: $R_2 = (R_1 + R_{вн}) \cdot K_U = 105$ (кОм).

Для вирівнювання опорів по обох входах ОУ і зменшення струмового дрейфу необхідно, щоб: $R_3 = (R_1 + R_{вн}) \parallel R_2 = (R_1 + R_{вн}) \cdot R_2 / (R_1 + R_{вн} + R_2) = 2,06$ (кОм).

Приймаємо $R_3 = 2$ кОм.

2) Здійснюємо перерахунок параметрів інвертуючого підсилювача за формулами п. 2 з урахуванням реальних параметрів ІМС ОП, наведених у табл. 6.2.

3). Перевіряємо умови нормального функціонування схеми підсилювача. Для цієї мети визначаємо максимальний струм, який протікатиме на виході використовуваної в цій схемі ІМС ОП 140УД8 за умови, що $R_n = 3$ кОм. Струм розраховуємо за формулою:

$$I_{вих\ max} = U_{вих\ max} / R_n + U_{вих\ max} / R_2 = 10 / (3 \cdot 10^3) + 10 / (105 \cdot 10^3) = 3,4 \text{ (мА)},$$

який не перевищує максимального значення струму для даної мікросхеми, що дорівнює 10 мА.

4) Будуємо графіки амплітудної (АХ) і амплітудно-частотної характеристик (АЧХ) підсилювача. АХ - це залежність $U_{вих} = f(U_{вх})$. Нахил цієї характеристики визначається коефіцієнтом підсилення підсилювача; максимальне значення $U_{вих}$ обмежується параметрами ІМС. З урахуванням властивостей підсилювача його амплітудна характеристика має такий вигляд, як показано на рис. 6.6, а. Максимальне значення вхідної напруги можна визначити аналітично:

$$U_{вх\ max} = U_{вих\ max} / K_U = 10 / 50 = 0,2 \text{ (В)},$$

що підтверджується побудованим графіком.

АЧХ - це залежність $KU_{дБ} = \varphi(f_{вх})$. Під час побудови цієї характеристики на осі абсцис значення частоти в кожній наступній точці змінюється відносно попередньої подекадно (з десятикратним збільшенням). Від точки, що відповідає частоті одиничного підсилення ОП (F_1), проводять лінію під нахилом 20 дБ/дек до перетину з лінією, яка відповідає коефіцієнту підсилення ІМС ОП. Частота зрізу $f_{ср}$ відповідає коефіцієнту підсилення на ОП. Оскільки ці типи підсилювачів належать до виду ППС ($f_n = 0$), отримане значення $f_{ср}$ і визначає смугу пропускання підсилювача.

Аналітично значення цієї частоти можна отримати в такий спосіб:

$$f_{ср} = F_1 / KU_{дБ} = 1 \cdot 10^6 / 34 = 29,4 \text{ кГц},$$

где $KU_{дБ} = 20 \lg KU$.

Отримання значення цієї частоти з графіка показано на рис. 6.6, б).

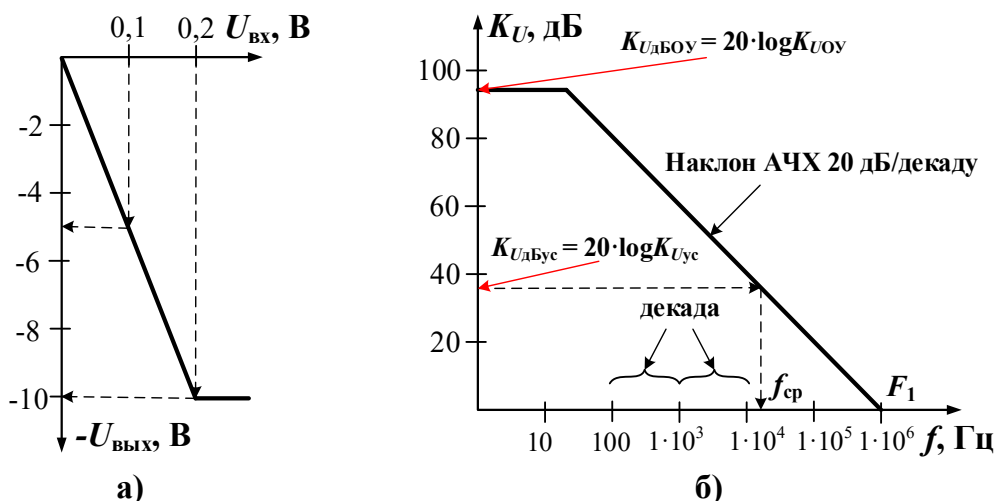


Рисунок 6.6 – Характеристики підсилювача, що відповідають розглянутому прикладу:

а) – АХ; б) – АЧХ

2. Визначити опори резисторів R_1 , R_2 , R_3 , вхідний і вихідний опори в інвертуючому підсилювачі на ОП (рис. 6.3, а), якщо $K_{інв} = 50$, $R_{вн} = 100$ Ом. Прийняти модель ОП ідеальною.

Рішення. Для отримання високої стабільності коефіцієнта підсилення опір R_1 рекомендується вибирати з умови $R_{вн} \ll R_1 \ll R_{вхОУ}$: $R_1 = (1 \dots 10) \text{ кОм}$.

Обираємо $R_1 = 5,1 \text{ кОм}$.

Визначаємо опір у ланцюзі НЗЗ: $R_2 = (R_1 + R_{вн}) \cdot K_{інв} = 260 \text{ (кОм)}$.

Для вирівнювання опорів по обох входах ОП та зменшення струмового дрейфу необхідно, щоб $R_3 = (R_1 + R_{вн}) \cdot R_2 / (R_1 + R_{вн} + R_2) = 5,1 \text{ (кОм)}$.

Вхідний опір підсилювача – $R_{вх} \approx R_1 = 5,1 \text{ (кОм)}$.

Вихідний опір $R_{вих} \approx 0$.

3. Визначити коефіцієнт підсилення по напрузі K_U , вхідний і вихідний опори в неінвертуючому підсилювачі на ОП (рис. 6.3. б), якщо $R_1 = 2 \text{ кОм}$, $R_2 = 48 \text{ кОм}$. У схемі використано ОП типу 153УД5А з $K_{УОУ} \geq 12500$, $R_{вхОУ} \geq 1 \text{ МОм}$, $R_{вихОУ} \geq 150 \text{ Ом}$.

Рішення.

Коефіцієнт підсилення: $K_U = 1 + R_2 / R_1 = 25$.

Для розрахунку вхідного і вихідного опорів підсилювача визначимо коефіцієнт зворотного зв'язку: $\gamma = R_1 / (R_1 + R_2) = 0,038$.

Тоді вхідний опір підсилювача: $R_{вх.неінв} = R_{вхОУ} \cdot (1 + \gamma \cdot K_{УОУ}) = 473 \text{ (МОм)}$.

Вихідний опір: $R_{вих.неінв} = R_{вихОУ} / (1 + \gamma \cdot K_{УОУ}) = 0,3 \text{ (Ом)}$.

4. У схемі підсумовувального підсилювача (рис. 6.4. а) розрахувати опори резисторів R_1 , R_2 , так, щоб забезпечувалася така залежність вихідної напруги: $U_{вих} = -(2U_{вх1} + 3U_{вх2})$.

Опір резистора $R_3 = 120 \text{ кОм}$.

Рішення.

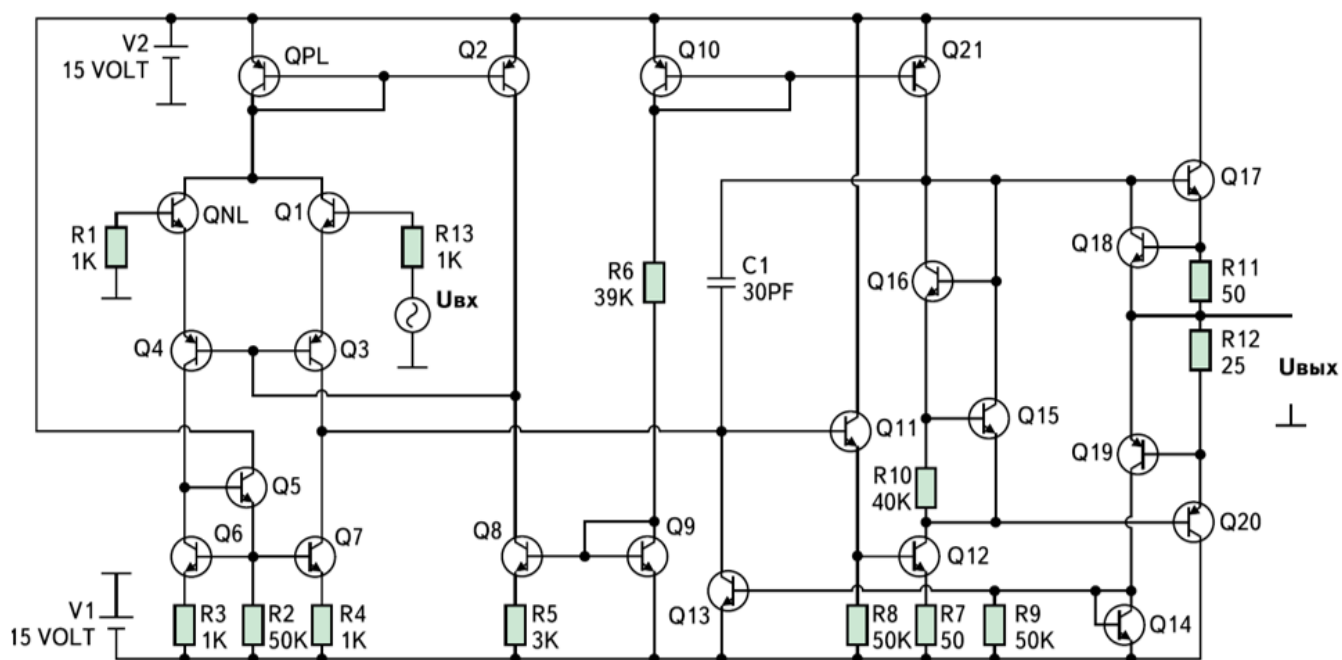
Коефіцієнт для $U_{вх1}$ у розглянутій схемі $R_3 / R_1 = 2$, тоді, $R_1 = R_3 / 2 = 60 \text{ (кОм)}$.

Коефіцієнт для $U_{вх2}$ - $R_3 / R_2 = 3$, отже, $R_2 = R_3 / 3 = 40 \text{ (кОм)}$.

5. Для схеми підсилювача різниці (рис. 6.4. б) визначити величину $U_{вих}$, якщо $U_{вх1} = 0,2 \text{ В}$, $U_{вх2} = -0,1 \text{ В}$, $R_3 = R_4 = 120 \text{ кОм}$, $R_1 = R_2 = 10 \text{ кОм}$.

Рішення.

Якщо в схемі підсилювача різниці дотримуються такі умови: $R_1 = R_2$ і $R_3 = R_4$, то $U_{вих} = R_3 / R_1 (U_{вх2} - U_{вх1}) = 12 \cdot (-0,1 - 0,2) = -3,6 \text{ (В)}$.



Схемотехнічна модель операційного підсилювача UA741

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 7

РОЗРАХУНОК СХЕМ МУЛЬТИВІБРАТОРІВ НА ОП

Метою заняття є вивчення методики розрахунку часових і амплітудних параметрів, а також розрахунок елементів схем генераторів прямокутних імпульсів, які працюють в автоколивальному і режимі очікування, виконаних на ОП.

Під час підготовки до заняття необхідно вивчити принцип роботи, особливості схемної побудови автоколивальних мультівібраторів (АМВ) і мультівібраторів, що очікують, (ММВ) або одновібраторів, виконаних на ОП, а також вплив значень елементів схем на значення часових та амплітудних параметрів сформованих імпульсів.

7.1 Методичні вказівки

Автоколивальні мультівібратори не мають жодного стійкого стану, а періодично перебувають в одному з двох квазістійких станів. При цьому вони генерують імпульси прямокутної або близької до прямокутної форми, амплітуда, тривалість і частота повторень яких залежать від параметрів компонентів схеми мультівібратора.

Типова схема автоколивального мультівібратора на ОУ наведена на рис. 7.1, а.

Під час подавання напруги живлення в момент часу t_0 вхід 1 ОУ за змінним струмом заземлено конденсатором C , а на вхід 2 за ланцюгом зворотного зв'язку надходить невелика напруга (позитивна або від'ємна), оскільки на виході ОП завжди є напруга зсуву.

Різниця напруг між входами 1 і 2 переводить ОУ в режим обмеження (насичення) коли, наприклад, $U_{\text{вих}} \approx E^+$, то $U_2 = U_{\text{пор1}}$. Конденсатор C починає заряджатися (рис. 7.1, б) з постійною часу $\tau_3 = RC$. Напруга на ньому змінюється, прагнучи до значення E^+ .

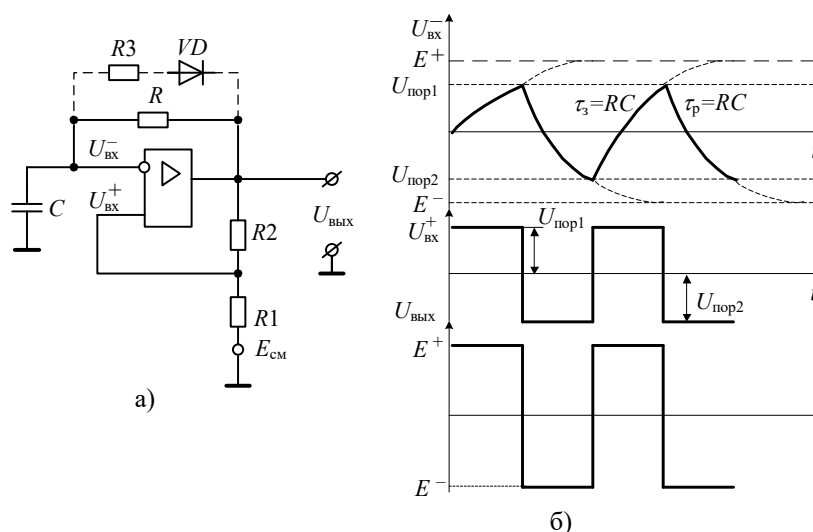


Рисунок 7.1 – АМВ на ОП та часова діаграма його роботи

При $U_C = U_{пор1}$ вихідна напруга змінюється стрибком, досягаючи своєї негативної межі E^- . Напруга на другому вході U_2 стає від'ємною і утримує схему в стані обмеження, коли $U_{вих} = E^-$. Конденсатор C перезаряджається і напруга на ньому прагне до значення E^- . За $U_C = U_{пор2}$ відбувається стрибок вихідної напруги до позитивного рівня. Порогові напруги $U_{пор1}$ і $U_{пор2}$ формуються з вихідної напруги $U_{вих}$:

$$U_{пор1} = \frac{ER_1}{R_1 + R_2}, \quad U_{пор2} = \frac{-ER_1}{R_1 + R_2}.$$

Тривалість формованих імпульсів t_{i1} і t_{i2} визначають за формулою:

$$t_{и}^+ = t_{и}^- = R \cdot C \cdot \ln \left(1 + \frac{2R_1}{R_2} \right).$$

Для зміни співвідношення між тривалостями імпульсів $t_{и1}$ і $t_{и2}$ використовують певні комбінації включення діода VD . Тривалість фронтів імпульсів визначають параметри ІМС ОП:

$$\tau_{и}^+ = \tau_{и}^- = U_{вих} / V_U \text{ ОП},$$

де $U_{вих} = 2 \cdot U_{вих} \text{ ОП}$ - амплітуда імпульсів, яка визначається напругою обмеження ОУ, V_U ОП - швидкість наростання вихідної напруги ОУ.

Мультивібратори, що очікують, - це пристрої, здатні по черзі перебувати в одному з двох станів: тривалому стійкому і короткочасному (квазістійкому). Для переходу з тривало стійкого стану в квазістійкий на вхід схеми подається зовнішній імпульс, що запускає, після якого вона формує на виході імпульс, тривалість і амплітуда якого визначаються параметрами схеми, а потім самостійно повертається в початковий стан (загальмовується).

Якщо використовувати тільки момент закінчення квазістійкого стану, який може мати регульовану тривалість, то тривалість вихідного імпульсу визначить затримку вихідного сигналу відносно фронту вхідного імпульсу, тобто мультивібратор працює як схема регульованої затримки сигналу.

У схемі мультивібратора на ОП (рис. 7.2, а) у початковому стійкому стані діод $VD1$ відкритий, конденсатор розряджений, а ОП перебуває в стані насичення з максимальною негативною напругою на виході.

Часова діаграма роботи схеми наведена на рис. 7.2, б. Під час подавання на прямий вхід ОП пускового імпульсу позитивної полярності з амплітудою:

$$U_{\text{зап}} \geq \alpha \cdot U_{\text{вих max}},$$

$$\text{де } \alpha = R_1 / (R_1 + R_2))$$

ОП перемикатиметься в стан насичення з максимальною позитивною напругою на виході, діод закриється і конденсатор почне заряджатися.

Як тільки напруга на конденсаторі і, отже, на інверсному вході сягне рівня $\alpha \cdot U_{\text{вих max}}$, тобто напруги на входах ОП зрівняються, ОП знову перемикатиметься в протилежний стан. Після розряду конденсатора до рівня порогової напруги діода, останній відкриється, зашунтує діод, і мультивібратор готовий до приймання наступного імпульсу запуску.

$$\text{Тривалість вихідного імпульсу визначається рівнянням: } t_{\text{и}} = R \cdot C \cdot \ln \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right),$$

а час відновлення

$$t_{\text{в}} = R \cdot C \cdot \ln \left(1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right).$$

Підключення додаткового ланцюга з R_3 і VD зменшує час відновлення схеми.

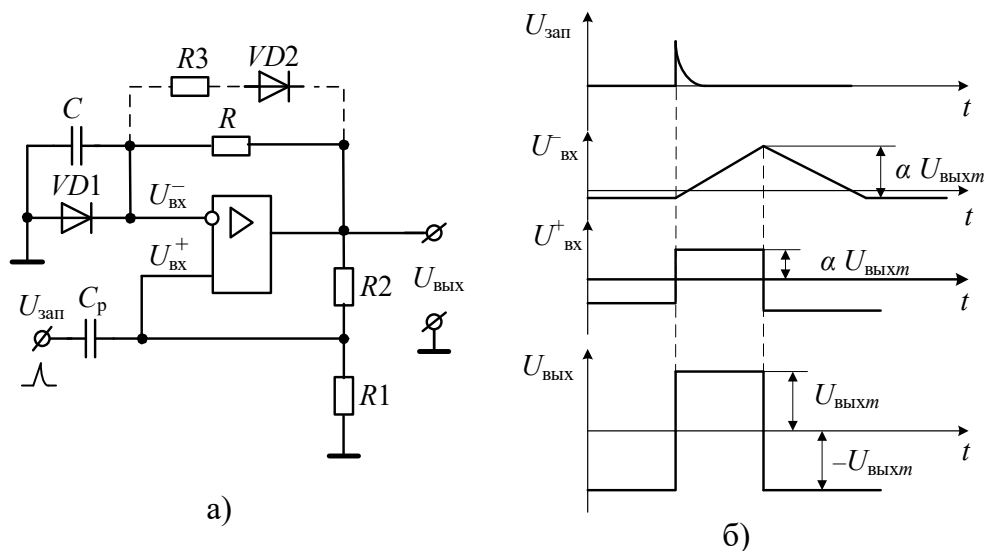


Рисунок 7.2 – Мультивібратор на ОП та часова діаграма його роботи

Амплітуда сформованого імпульсу дорівнює подвійній максимальній напрузі на виході ОП $U_{\text{вих max}}$ ОП, а тривалість фронтів:

$$t_{\phi}^+ = t_{\phi}^- = 2U_{\text{вых ОУ}} / V_{\text{ОП}},$$

де $V_{\text{оп}}$ – швидкість наростання вихідної напруги ОП.

7.2 Задачі для аудиторних занять

Тип задачі, що розв'язується, і вихідні дані визначаються за табл. 7.1 відповідно до номера варіанта. Вид схеми обирають таким чином: для задачі № 1 - схема АМВ, наведена на рис. 7.3, а; для задачі № 2 - схема ЖМВ, наведена на рис. 7.3, б.

У задачах передбачається вибір за певними вимогами типу ОП з табл. 7.2, розрахунок елементів схеми та перевірка її безпечного функціонування.

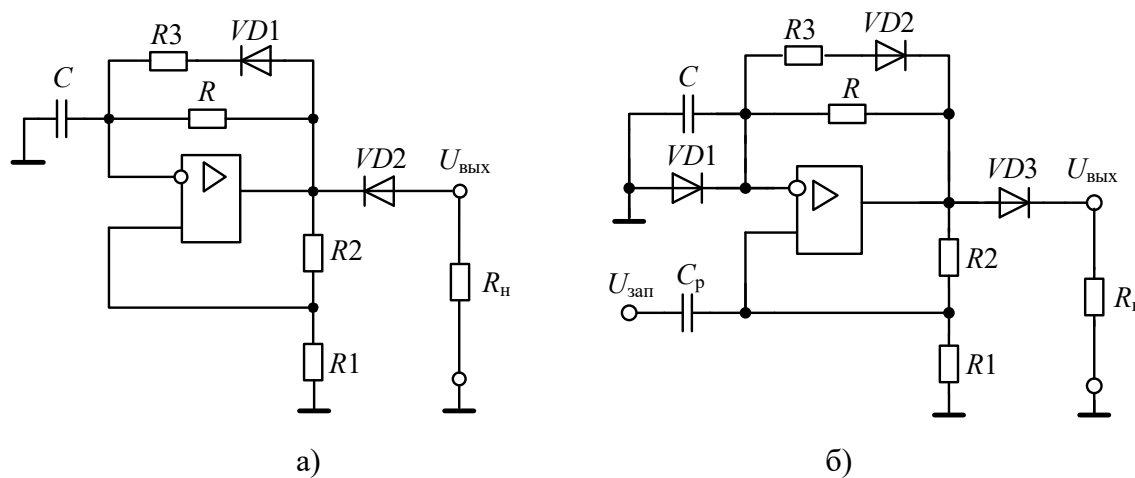


Рисунок 7.3 – Схеми АМВ (а) и ЖМВ (б)

Таблиця 7.1 – Вихідні дані для розв'язання задач № 1 и № 2.

№ вар.	Тип зад.	t_{ϕ}^{+}/t_{ϕ} мкс	f , кГц	f_{max} , кГц	$t_{и}^{+}/t_{и}^{-}$	$t_{и}$, мкс	$U_{выхт}$, В	Знак имп.	$R_{и}$, кОм
1	1	0.25	30	-	1/2	-	9	+	3
1	2	0.3	-	150	-	4	11	+	1.4
2	1	0.28	50	-	1/3	-	10	-	1.5
2	2	0.35	-	100	-	7	12	-	2.5
3	1	0.38	40	-	3/4	-	10	+	3.5
3	2	0.5	-	80		9	12	+	2
4	1	0.4	20	-	3/2	-	11	-	3
4	2	0.8	-	60		12	13	-	2.2
5	1	0.45	50	-	4/2	-	11	+	3.2
5	2	0.5	-	120	-	5	9	+	2.4
6	1	0.6	45	-	2/4	-	10	-	2.8
6	2	0.9	-	90	-	9	10	-	1.8
7	1	1	35	-	1/5	-	10	+	2.1
7	2	0.8	-	100	-	8	12	+	1.3
8	1	0.5	60	-	1/4	-	11	-	24
8	2	0.5	-	130	-	5	9	-	2.2
9	1	0.85	45	-	5/1	-	10	+	2.4
9	2	0.4	-	75	-	10	10	+	2.9
10	1	0.9	50	-	1/2	-	12	-	2.5
10	2	0.3	-	110	-	6	11	-	3.1
11	1	0.25	65	-	2/1	-	12	+	3.3
11	2	0.3	-	100	-	6	8	+	3.2
12	1	0.28	55	-	3/1	-	10	-	3.6
12	2	0.35	-	70	-	9	11	-	3
13	1	0.38	28	-	1/2	-	9	+	4
13	2	0.8	-	50	-	15	10	-	3.5
14	1	0.4	48	-	3/1	-	12	-	5
14	2	0.45	-	60	-	13	10	+	4.5
15	1	0.5	35	-	4/1	-	13	+	2.5
15	2	0.6	-	85	-	10	11	-	3
16	1	0.5	63	-	1/4	-	12	+	2.2
16	2	1	-	100	-	9	10	+	2.8
17	1	0.9	47	-	2/1	-	9	-	3.2
17	2	0.5	-	80	-	8	11	-	1.2
18	1	0.8	62	-	3/4	-	12	+	1.8
18	2	0.85	-	95	-	7	11	+	1.4
19	1	0.5	42	-	2/4	-	10	-	1.1
19	2	0.9	-	110	-	6	12	-	0.8
20	1	0.4	58	-	2/5	-	13	+	3.2
20	2	0.25	-	140	-	4	10	+	3.5
21	1	0.3	55	-	4/3	-	11	-	3.4
21	2	0.28	-	100	-	8	9	-	3.9
22	1	0.3	44	-	3/4	-	10	+	3.1
22	2	0.4	-	66		12	12	-	3.2
23	1	0.35	28	-	3/2	-	10	-	3.3
23	2	0.5	25	-	4/2	-	9	+	3
24	1	0.38	-	85		9	11	+	3.6
24	2	0.45	-	130	-	5	12	+	1.5

25	1	0.8	43	-	2/4	-	10	—	1.4
25	2	0.6	-	95	-	9	10	—	2.5
26	1	0.5	45	-	1/5	-	11	+	3.5
26	2	1	-	100	-	8	10	+	2
27	1	0.9	60	-	1/4	-	12	—	1.9
27	2	0.5	-	130	-	5	8	—	2.2
28	1	0.8	55	-	5/1	-	11	+	3.2
28	2	0.85	-	80	-	10	12	+	3.4
29	1	0.5	40	-	1/2	-	9	—	2.8
29	2	0.9	-	90	-	6	13	—	3

Таблиця 7.2 – Параметри ІМС ОП

Тип ОП	$V_{U_{OY}}$, В/мкс	$I_{ВЫХ\ max}$, мА	$U_{ВЫХ\ OY\ max}$, В
КР140УД11	50	6	12
КР544УД2	20	5	10
КР574УД1	50	5	10
AD711K	20	15	12
AD518J	70	15	12
AD744K	75	20	12
AD845K	100	30	12
OP16E	25	20	14
OP63E	50	20	14
OPA627B	55	30	14
HA5147A	35	15	12
HA-5111	50	15	12
HA-5160	120	22	12

Порядок розрахунку схеми АМВ (задача № 1):

1) Обрати тип ОП таким чином, щоб швидкість наростання вихідної напруги ОП була достатньою для формування на виході імпульсів із необхідною тривалістю фронтів, тобто виконувалася умова:

$$V_{U_{OY}} \geq 2 \cdot U_{ВЫХ\ m} / t_{фр\ ср.}$$

2) Вибрати тип ОП таким чином, щоб амплітуда вихідного імпульсу не перевищувала напругу обмеження ОП, тобто виконувалася умова:

$$U_{ВЫХ\ m} \leq U_{ВЫХ\ OY\ max.}$$

3) Обрати в схемі рис. 7.3, а напрямок діода VD1, щоб забезпечити необхідне співвідношення між тривалостями позитивного і негативного імпульсу ($t_{и}^+ / t_{и}^-$), а також напрямок діода VD2, щоб забезпечити необхідний знак вихідної напруги.

4) Розрахувати елементи схеми в такій послідовності:

- обрати опори резисторів R1 і R2, враховуючи при цьому таке - ці резистори мають бути високоомними, щоб не навантажувати вихід ОП:

$$R_1 + R_2 \approx 100 \div 200 \text{ кОм},$$

і для реалізації в схемі досить ефективного позитивного зворотного зв'язку (ПЗЗ) між ними необхідно витримувати таке співвідношення:

$$R_1 \approx (0,3 \div 0,5) \cdot R_2;$$

- за заданою частотою і необхідним співвідношенням між імпульсами визначити необхідні значення тривалостей імпульсів. Записати для них вирази через елементи схеми. Приймаючи значення ємності конденсатора С (як правило, одиниці нФ), розрахувати опори резисторів R і R3.

5) Перевірити умову нормального функціонування схеми. Для цього визначити максимальне значення струму на виході ІМС ОП і порівняти з допустимим максимальним паспортним значенням.

Порядок розрахунку схеми ЖМВ (задача № 2):

1) Вибрати тип ОП таким чином, щоб швидкість наростання вихідної напруги ОП була достатньою для формування на виході імпульсів із необхідною тривалістю фронтів, тобто виконувалася умова:

$$V_{UOY} \geq U_{вих м} / t_{\phi}.$$

2) Вибрати тип ОУ таким чином, щоб амплітуда вихідного імпульсу не перевищувала напругу обмеження ОУ, тобто виконувалася умова:

$$U_{вих м} \leq U_{вих ОУ max}.$$

3) Вибрати в схемі на рис. 7.3, б напрямок діодів VD1, VD2 і VD3, щоб забезпечити необхідний знак вихідної напруги.

4) Розрахувати елементи схеми в такій послідовності:

- обрати опори резисторів R_1 і R_2 , враховуючи при цьому таке: ці резистори мають бути високоомними, щоб не навантажувати вихід ОП

$$R_1 + R_2 \approx 100 \div 200 \text{ кОм}$$

і для реалізації в схемі досить ефективного позитивного зворотного зв'язку між ними необхідно витримувати таке співвідношення:

$$R_1 \approx (0,3 \div 0,5) \cdot R_2.$$

- за заданою максимальною частотою роботи ЖМВ і тривалістю імпульсу визначити час відновлення схеми. Записати для них вирази через елементи схеми. Приймавши значення C (як правило, одиниці нФ), розрахувати опори резисторів R і R_3 .

5) Перевірити умову нормального функціонування схеми. Для цього визначити максимальне значення струму на виході ІМС ОП і порівняти з допустимим максимальним паспортним значенням.

Приклади розрахунку схем АМВ на ОП

Приклад 1. Розрахувати схему АМВ, що формує на виході імпульси негативної полярності з частотою $f = 60$ кГц, амплітудою 11 В; співвідношення між тривалостями імпульсів на виході схеми $t_{и}^+ / t_{и}^- = 1/4$; тривалість фронтів формованих імпульсів $t_{+ф}$ і $t_{-ф}$ не повинна перевищувати 0,5 мкс; схема навантажена на $R_n = 24$ кОм.

Таблиця 7.3 – Вихідні дані

№ вар.	Тип зад.	$t_{+ф}^+ / t_{-ф}^-$, мкс	f , кГц	$t_{и}^+ / t_{и}^-$	$U_{вих м}$, В	Знак імп.	R_n , кОм
	1	0,5	60	1/4	11	–	24

Рішення

а) Обираємо тип ОУ. Для цього розрахуємо необхідну швидкість наростання вихідної напруги ОУ:

$$V_{UOY} \geq 2U_{вих м} / t_{фр} = 22 / 0,5 = 44 \text{ (В/мкс)}.$$

б) Обираємо із табл. 7.2 ОП тип AD744K.

Таблиця 7.4 – Параметри ІМС ОП

Тип ОУ	V_{UOY} , В/мкс	$I_{вих\ max}$, мА	$U_{вих\ max}$, В
AD744K	75	20	12

в) Зазначене співвідношення між тривалостями імпульсів показує, що тривалість позитивного імпульсу в чотири рази менша за тривалість негативного. Отже, під час формування позитивного імпульсу діод VD1 має бути відкритий, а під час формування негативного імпульсу - закритий. Схема, наведена на рис. 7.3, а, задовольняє заданій умові. Напрямок діода VD2 забезпечує проходження в навантаження негативної частини вихідного двополярного імпульсу.

г) Розраховуємо елементи схеми в такій послідовності:

- опори резисторів ланцюга зворотного зв'язку обираємо таким чином:

приймаємо $R_1 = 51\text{ кОм}$, $R_2 = 100\text{ кОм}$;

- для розрахунку параметрів часового ланцюга визначаємо тривалості імпульсів:

період коливальних для заданої частоти: $T = 1/f = 1/60 \cdot 10^3 = 1.667 \cdot 10^{-5}\text{ (с)} = 16,67\text{ (мкс)}$.

Згідно умови:

$$T = t_{и}^{+} + 4t_{и}^{-} = 5t_{и}^{+}.$$

Звідси

$$t_{и}^{+} = T / 5 = 3,33\text{ мкс},$$

$$t_{и}^{-} = 4t_{и}^{+} = 13,34\text{ мкс}.$$

Для цієї схеми тривалості формованих імпульсів визначаються такими виразами:

$$t_{и}^{-} = RC \cdot \ln(1 + 2R_1 / R_2);$$

$$t_{и}^{+} = R \parallel R_3 \cdot C \cdot \ln(1 + 2R_1 / R_2);$$

Приймаємо $C = 3,3\text{ нФ}$, тоді

$$\begin{aligned} R &= t_{и}^{-} / [C \ln(1 + 2R_1 / R_2)] = \\ &= 13,34 \cdot 10^{-6} / [3,3 \cdot 10^{-9} \ln(1 + 2 \cdot 51 / 100)] = 5,8\text{ (кОм)}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{\text{экв.}} &= R \parallel R_3 = t_{и}^{+} / [C \cdot \ln(1 + 2R_1 / R_2)] = \\ &= 3,33 \cdot 10^{-6} / [3,3 \cdot 10^{-9} \cdot \ln(1 + 2 \cdot 51 / 100)] = 1,44\text{ (кОм)}. \end{aligned}$$

З цього випливає, що $R_3 = \frac{R \cdot R_{\text{эКВ}}}{R - R_{\text{эКВ}}} = \frac{5,8 \cdot 1,44}{5,8 - 1,44} = 1,92 \text{ (кОм)}$.

Приймаємо $R_3 = 2 \text{ кОм}$;

д) Для перевірки умови нормального функціонування схеми визначаємо максимальне значення струму на виході ОУ:

$$I_{\text{вих max}} = U_{\text{вих max}} / R_{\text{н}} + U_{\text{вих max}} / (R_2 + R_1) + \gamma U_{\text{вих max}} / (R \parallel R_3),$$

де

$$\gamma = R_1 / (R_2 + R_1) = 51 / (51 + 100) = 0,338.$$

тоді

$$I_{\text{вих max}} = 11 / 24 + 11 / (100 + 51) + 0,338 \cdot 11 / 1,92 = 2,47 \text{ (мА)}.$$

Отримане значення менше за допустиме максимальне паспортне значення $I_{\text{вих max}} = 20 \text{ мА}$. Отже, умови нормального функціонування схеми дотримуються.

Задача 2. Для схеми АМВ (рис. 7.1, а) визначити такі параметри додатних і від'ємних імпульсів:

- тривалість $\tau_{\text{и}}$, частоту $f_{\text{вих}}$;
- шпаруватість Q , амплітуду $U_{\text{вих}}$;
- тривалості фронтів t_{ϕ}^{+} і t_{ϕ}^{-} .

Відомі такі параметри схеми: $R = R_3 = 10 \text{ кОм}$, $R_1 = R_2 = 56 \text{ кОм}$, $C = 0,01 \text{ мкФ}$.

У схемі використовується ІМС ОП типу К140УД7 з $U_{\text{вих ОУ}} = \pm 11,5 \text{ В}$, $V_{\text{УОП}} = 10 \text{ В/мкс}$.

Рішення. При формуванні імпульсів позитивної полярності ОУ перебуває в стані насичення з позитивним максимальним значенням вихідної напруги. У цьому випадку діод закритий, і тривалість імпульсу визначається таким чином:

$$t_{\text{и}}^{+} = RC \ln \left(1 + \frac{2R_1}{R_2} \right) = 10 \cdot 10^3 \cdot 0,01 \cdot 10^{-6} \cdot \ln \left(1 + \frac{2 \cdot 56 \cdot 10^3}{56 \cdot 10^3} \right) = 0,11 \text{ (мс)}.$$

Під час формування імпульсів негативної полярності ОП перебуває в стані насичення з негативним максимальним значенням вихідної напруги. У цьому разі діод відкритий, і тривалість імпульсу визначається за формулою:

$$t_{\text{и}}^{-} = \frac{R \cdot R_3}{R + R_3} C \cdot \ln \left(1 + \frac{2R_1}{R_2} \right) = 5 \cdot 10^3 \cdot 0,01 \cdot 10^{-6} \cdot \ln \left(1 + \frac{2 \cdot 56 \cdot 10^3}{56 \cdot 10^3} \right) = 0,055 \text{ (мс)}.$$

Частоту проходження вихідних імпульсів $f_{\text{вих}}$ і відповідно шпаруватість Q визначимо так:

$$f_{\text{вих}} = 1 / (t_{\text{и}}^+ + t_{\text{и}}^-) = 1 / (0,11 \cdot 10^{-3} + 0,055 \cdot 10^{-3}) = 6,06 \text{ (кГц)},$$

$$Q^+ = (t_{\text{и}}^+ + t_{\text{и}}^-) / t_{\text{и}}^+ = 0,165 \cdot 10^{-3} / 0,11 \cdot 10^{-3} = 1,5,$$

$$Q^- = (t_{\text{и}}^+ + t_{\text{и}}^-) / t_{\text{и}}^- = 0,165 \cdot 10^{-3} / 0,055 \cdot 10^{-3} = 3.$$

Амплітуда вихідних імпульсів: $U_{\text{вих}} = 2U_{\text{вихОП}} = 2 \cdot 11,5 = 23 \text{ В.}$

Тривалість фронтів: $t_{\text{ф}}^+ = t_{\text{ф}}^- = U_{\text{вих}} / V_{\text{УОУ}} = 23 / 10 \cdot 10^{-6} = 2,3 \text{ (мкс).}$

Задача 3. Для схеми АМВ на ОП (рис. 7.1, а) підібрати параметри ланцюга, що задає час, для одержання імпульсів з $f_{\text{вих}} = 20 \text{ кГц}$ за шпаруватості негативних імпульсів $Q^- = 4$. Відомі опори резисторів $R_1 = R_2 = 47 \text{ кОм.}$

Рішення. Визначимо тривалості імпульсів у такий спосіб: період коливань:

$$T = 1 / f_{\text{вих}} = 1 / (20 \cdot 10^3) = 0,05 \text{ мс.}$$

Тривалість негативних імпульсів: $t_{\text{и}}^- = T / Q^- = 0,05 \cdot 10^{-3} / 4 = 0,0125 \text{ мс.}$

Тривалість позитивних імпульсів $t_{\text{и}}^+ = T - t_{\text{и}}^- = 0,05 - 0,0125 = 0,0375 \text{ мс.}$

Задавши значенням опору резистора $R = 10 \text{ кОм}$, розрахуємо ємність конденсатора:

$$C = \frac{t_{\text{и}}^+}{R \ln(1 + \frac{2R_1}{R_2})} = \frac{0,0375 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^3 \ln(1 + \frac{2 \cdot 47 \cdot 10^3}{47 \cdot 10^3})} = 0,0034 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 3,4 \text{ нФ}$$

Використовуючи значення тривалості негативних імпульсів, визначимо опір резистора R_3 :

$$\frac{R \cdot R_3}{R + R_3} = \frac{t_{\text{и}}^-}{C \ln(1 + \frac{2R_1}{R_2})} = \frac{0,0125 \cdot 10^{-3}}{3,4 \cdot 10^{-9} \ln(1 + \frac{2 \cdot 47 \cdot 10^3}{47 \cdot 10^3})} = 3,34 \text{ кОм.}$$

звідки $R_3 = 3,3 \text{ кОм.}$

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Комп'ютерна електроніка : навч. посібник / Ю. П. Колонтаєвський ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 156 с.
2. Комп'ютерна електроніка [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології", спеціалізації "Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи та технології"/ К.К. Победаш; КПІ ім. Ігоря Сікорського. - Електронні текстові дані (1файл: 21,4 Мбайт). - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. - 364 с.
3. Каганюк О.К., Поліщук М.М., Здолбіцька Н.В., Бортник К.Я. Комп'ютерна електроніка [Текст] : навчальний посібник для здобувачів першого (бакалаврського) рівня освітньо-професійної програми «Комп'ютерна інженерія» галузь знань 12 Інформаційні технології спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія денної та заочної форм навчання / уклад. О.К. Каганюк, М.М. Поліщук, Н.В. Здолбіцька, К.Я. Бортник. – Луцьк : Луцький НТУ, 2020. – 224 с.

Навчальне видання

Кардашук Володимир Сергійович

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання практичних робіт
з дисципліни

«Комп'ютерна електроніка»

(для здобувачів вищої освіти спеціальності F3 «Комп'ютерні науки» та F7 «Комп'ютерна інженерія», що навчаються за програмою підготовки бакалаврів)

(Електронне видання)

Редактор В. С. Кардашук

Техн. редактор В. С. Кардашук

Оригінал-макет В.С. Кардашук

Підписано до друку _____

Формат 60×84¹/₁₆ Папір типограф. Гарнітура Times.

Друк офсетний. Умов. друк. арк. 2. Обл.–вид. арк. _____.

Тираж __ прим. Вид. № _____. Замов № _____. Ціна договірна.

Видавництво Східноукраїнського національного університету
імені Володимира Даля

Адреса видавництва: вул. Іоанна Павла II, 17, м. Київ, 01042

E-mail: vidavnictvosnu.ua@gmail.com