

М.О. Куцевол

Теорія електричних кіл

Виконання курсової роботи

Міністерство освіти і науки України
Вінницький державний технічний університет

М. О. Куцевол

Теорія електричних кіл

Виконання курсової роботи

Затверджено Ученою радою Вінницького державного технічного університету як навчальний посібник для студентів бакалаврських напрямків “Телекомунікації” та “Електронні апарати”. Протокол № 6 від 30 січня 2003 р.

Вінниця ВДТУ 2003

Рецензенти:

С. М. Зленко, доктор технічних наук, професор
Ю. А. Карпов, доктор технічних наук, професор
І.П. Паламарчук, кандидат технічних наук, доцент

Рекомендовано до видання Ученою радою Вінницького державного технічного університету Міністерства освіти і науки України.

Куцевол М.О.

К 95 **Теорія електричних кіл. Виконання курсової роботи.** Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2003. – 74 с.

В навчальному посібнику приведені варіанти завдань для комплексного аналізу лінійних кіл. Теоретичний матеріал посібника викладений з максимальним наближенням до структури курсової роботи і містить в собі детальні пояснення та приклади розрахунків.

Посібник призначений для студентів бакалаврських напрямків “Телекомунікації” і “Електронні апарати” денної та заочної форми навчання і буде корисним для студентів суміжних спеціальностей.

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Завдання до курсової роботи	5
1.1 Зміст завдання	5
1.2 Варіанти завдань	5
2 Короткі теоретичні відомості	26
2.1 Метод контурних струмів	26
2.2 Метод вузлових потенціалів	28
2.3 Метод еквівалентного генератора	30
2.4 Комплексна потужність	32
2.5 Баланс потужностей	33
2.6 Топографічна діаграма	34
2.7 Первинні A - та Y - параметри і вторинні параметри чотириполюсника	35
2.8 Комплексний коефіцієнт передачі за напругою, АЧХ і ФЧХ електричного кола	39
2.9 Перехідна характеристика	43
2.10 Спектральний аналіз електричних сигналів	51
2.11 Методи дослідження реакції кола на складну вхідну дію.....	56
2.12 Моделювання АЧХ, ФЧХ і перехідної характеристики кола	63
3 Методичні вказівки до виконання окремих завдань курсвої роботи	67
Література	68
Додаток А.....	69
Додаток Б.....	70
Додаток В.....	71
Додаток Г.....	72
Додаток Д.....	73

ВСТУП

Виконання курсової роботи є важливим етапом вивчення дисципліни, на якому студент мусить показати, як він засвоїв теоретичний матеріал і чи здатний застосувати його на практиці.

Курсова робота передбачає виконання комплексного завдання, в якому студент всебічно аналізує розгалужене електричне коло, розраховуючи струми і напруги методом комплексних амплітуд з використанням найбільш вживаних методів аналізу під час дії на коло гармонічної ЕРС і, досліджуючи коло як пасивний чотириполюсник, знаходить первинні та вторинні його параметри.

Значний обсяг роботи складає дослідження частотних властивостей лінійного електричного кола та спектральний аналіз сигналів.

Завершальним етапом роботи є аналіз реакції кола на складну вхідну дію операторним і часовим методами, моделювання частотних та перехідної характеристик з допомогою моделювальної програми Electronics Workbench (V.5.12).

Окремі завдання роботи, хоча і взаємозв'язані, але викладені так, що студент може зразу виконувати більшу їх частину, оскільки відповідний теоретичний матеріал вивчив в попередньому триместрі.

Незважаючи на це, теоретичні положення посібника викладені досить детально і просто та супроводжуються прикладами розрахунку.

Матеріал посібника також може бути використаний студентами для підготовки до практичних занять і окремих розділів теоретичного курсу.

1 ЗАВДАННЯ ДО КУРСОВОЇ РОБОТИ

1.1 Зміст завдання

1.1.1 Визначити струми в колі та напруги на елементах кола під час дії гармонічної ЕРС, використавши метод контурних струмів та метод вузлових потенціалів.

1.1.2 Визначити вихідний струм методом еквівалентного генератора напруги та методом еквівалентного генератора струму.

1.1.3 Скласти баланс потужностей, використавши струми, одержані методом контурних струмів та методом вузлових потенціалів.

1.1.4 Побудувати топографічну діаграму напруг кола.

1.1.5 Визначити A - та Y - параметри кола, скласти рівняння зв'язку, розрахувати характеристичні опори, коефіцієнт розповсюдження і його складові.

1.1.6 Визначити комплексний коефіцієнт передачі кола за напругою, АЧХ і ФЧХ та побудувати їх графіки.

1.1.7 Визначити перехідну характеристику кола і побудувати її графік.

1.1.8 Виконати спектральний аналіз сигналів.

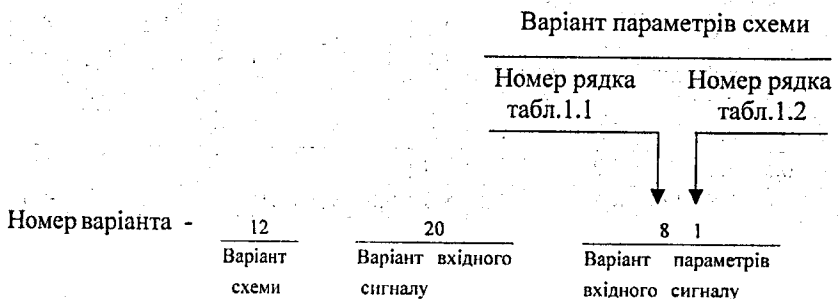
1.1.9 Визначити реакцію кола на складну вхідну дію операторним та часовим методами. Побудувати графіки вихідної напруги для кожного з методів.

1.1.10 Провести моделювання АЧХ, ФЧХ та перехідної характеристики кола.

1.1.11 Зробити висновки по роботі.

1.2 Варіанти завдань

Вибір даних до заданого варіанта здійснюється за такою схемою:



Амплітуда гармонічної ЕРС вказана в табл.1.3, початкова фаза – в табл. 1.2

1.2.1 Параметри кіл і вхідних сигналів

Таблиця 1.1 – Параметри пасивних елементів кіл

	R ₁ кОм м	R ₂ кОм	R ₃ кОм	R ₄ кОм	R ₅ кОм	R ₆ кОм	R ₇ кОм	R ₈ кОм	R ₉ кОм	C ₁ нФ	C ₂ нФ	C ₃ нФ	C ₄ нФ	C ₅ нФ
0	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
1	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5
2	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	0,8	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
3	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	0,8	0,9	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
4	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	0,8	0,9	1,0	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0
5	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	0,8	0,9	1,0	1,1	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5
6	1,4	1,5	1,6	1,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	8,0	8,5	9,0	9,5	5,0
7	1,5	1,6	1,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	8,5	9,0	9,5	5,0	5,5
8	1,6	1,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	9,0	9,5	5,0	5,5	6,0
9	1,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	9,5	5,0	5,5	6,0	6,5

Таблиця 1.2 – Параметри пасивних елементів кіл та значення початкової фази гармонічної ЕРС

	C ₆ нФ	C ₇ нФ	C ₈ нФ	C ₉ нФ	L ₁ мГн	L ₂ мГн	L ₃ мГн	L ₄ мГн	L ₅ мГн	L ₆ мГн	L ₇ мГн	L ₈ мГн	L ₉ мГн	Ψ, °
0	7,5	8,0	8,5	9,0	8,0	8,5	9,0	9,5	10	11	12	13	14	5
1	8,0	8,5	9,0	9,5	8,5	9,0	9,5	10	11	12	13	14	15	-10
2	8,5	9,0	9,5	5,0	9,0	9,5	10	11	12	13	14	15	8,0	20
3	9,0	9,5	5,0	5,5	9,5	10	11	12	13	14	15	8,0	8,5	-30
4	9,5	5,0	5,5	6,0	10	11	12	13	14	15	8,0	8,5	9,0	40
5	5,0	5,5	6,0	6,5	11	12	13	14	15	8,0	8,5	9,0	9,5	-50
6	5,5	6,0	6,5	7,0	12	13	14	15	8,0	8,5	9,0	9,5	10	60
7	6,0	6,5	7,0	7,5	13	14	15	8,0	8,5	9,0	9,5	10	11	-70
8	6,5	7,0	7,5	8,0	14	15	8,0	8,5	9,0	9,5	10	11	12	80
9	7,0	7,5	8,0	8,5	15	8,0	8,5	9,0	9,5	10	11	12	13	-90

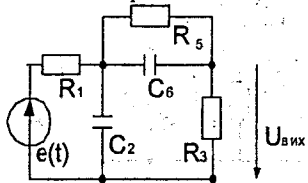
Таблиця 1.3 – Варіанти параметрів сигналів

Вари- ант.	E_m , В	T , мкс	t_i , мкс	Вари- ант.	E_m , В	T , мкс	t_i , мкс
00	100	50,0	1,1	25	125	52,5	3,6
01	101	50,1	1,2	26	126	52,6	3,7
02	102	50,2	1,3	27	127	52,7	3,8
03	103	50,3	1,4	28	128	52,8	3,9
04	104	50,4	1,5	29	129	52,9	4,0
05	105	50,5	1,6	30	130	53,0	4,1
06	106	50,6	1,7	31	131	53,1	4,2
07	107	50,7	1,8	32	132	53,2	4,3
08	108	50,8	1,9	33	133	53,3	4,4
09	109	50,9	2,0	34	134	53,4	4,5
10	110	51,0	2,1	35	135	53,5	4,6
11	111	51,1	2,2	36	136	53,6	4,7
12	112	51,2	2,3	37	137	53,7	4,8
13	113	51,3	2,4	38	138	53,8	4,9
14	114	51,4	2,5	39	138	53,9	5,0
15	115	51,5	2,6	40	140	54,0	5,1
16	116	51,6	2,7	41	141	54,1	5,2
17	117	51,7	2,8	42	142	54,2	5,3
18	118	51,8	2,9	43	143	54,3	5,4
19	119	51,9	3,0	44	144	54,4	5,5
20	120	52,0	3,1	45	145	54,5	5,6
21	121	52,1	3,2	46	146	54,6	5,7
22	122	52,2	3,3	47	147	54,7	5,8
23	123	52,3	3,4	48	148	54,8	5,9
24	124	52,4	3,5	49	149	54,9	6,0

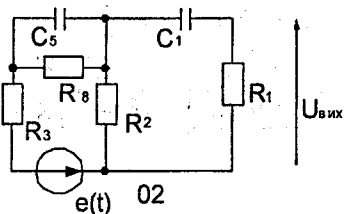
Продовження таблиці 1.3

Вариант	E_m , В	T , мкс	t_i , мкс	Вариант	E_m , В	T , мкс	t_i , мкс
50	150	55,0	6,1	75	175	57,5	8,6
51	151	55,1	6,2	76	176	57,6	8,7
52	152	55,2	6,3	77	177	57,7	8,8
53	153	55,3	6,4	78	178	57,8	8,9
54	154	55,4	6,5	79	179	57,9	9,0
55	155	55,5	6,6	80	180	58,0	9,1
56	156	55,6	6,7	81	181	58,1	9,2
57	157	55,7	6,8	82	182	58,2	9,3
58	158	55,8	6,9	83	183	58,3	9,4
59	159	55,9	7,0	84	184	58,4	9,5
60	160	56,0	7,1	85	185	58,5	9,6
61	161	56,1	7,2	86	186	58,6	9,7
62	162	56,2	7,3	87	187	58,7	9,8
63	163	56,3	7,4	88	188	58,8	9,9
64	164	56,4	7,5	89	189	58,9	10
65	165	56,5	7,6	90	190	59,0	11
66	166	56,6	7,7	91	191	59,1	12
67	167	56,7	7,8	92	192	59,2	13
68	168	56,8	7,9	93	193	59,3	14
69	169	56,9	8,0	94	194	59,4	15
70	170	57,0	8,1	95	195	59,5	16
71	171	57,1	8,2	96	196	59,6	17
72	172	57,2	8,3	97	197	59,7	18
73	173	57,3	8,4	98	198	59,8	19
74	174	57,4	8,5	99	199	59,9	20

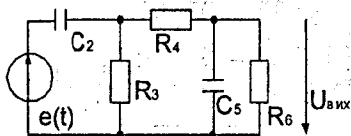
1.2.2 Варіанти схем.



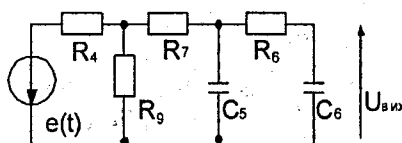
01



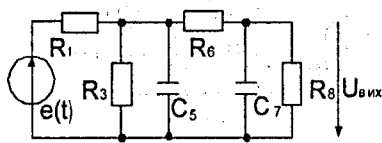
02



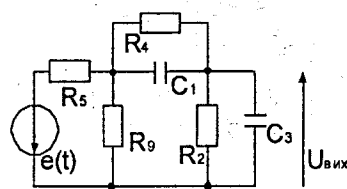
03



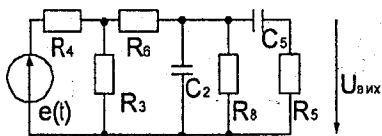
04



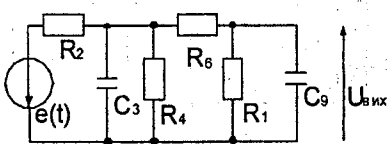
05



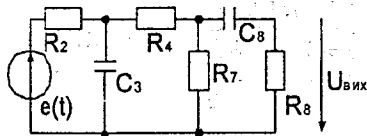
06



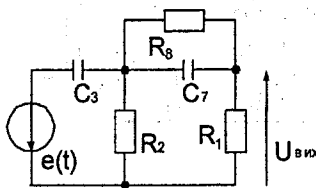
07



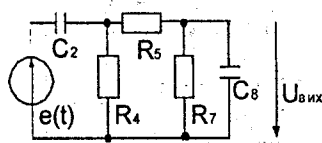
08



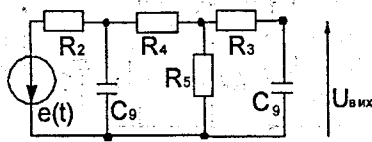
09



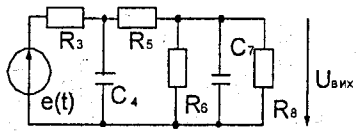
10



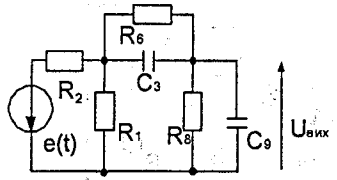
11



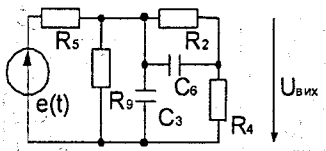
12



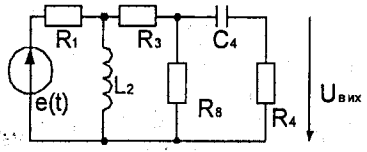
13



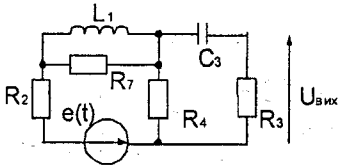
14



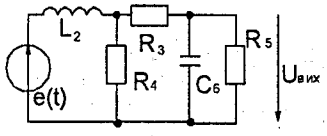
15



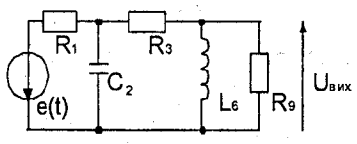
16



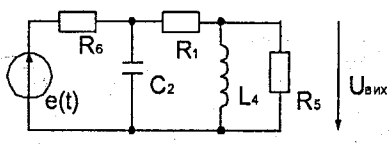
17



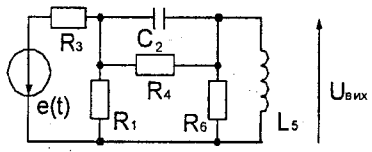
18



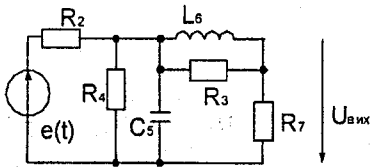
19



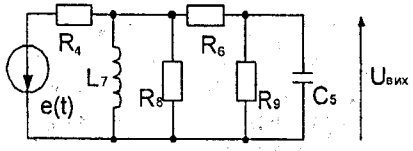
20



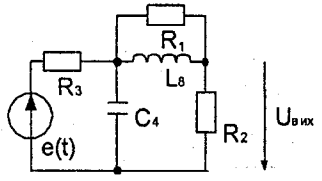
21



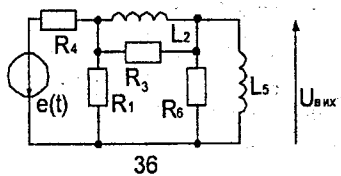
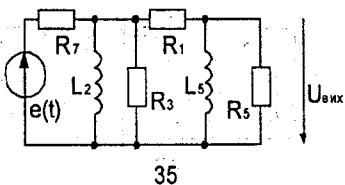
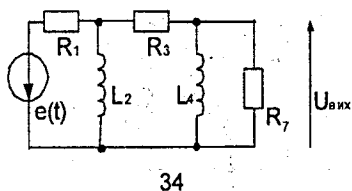
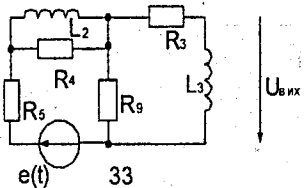
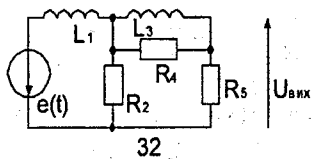
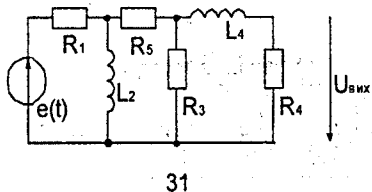
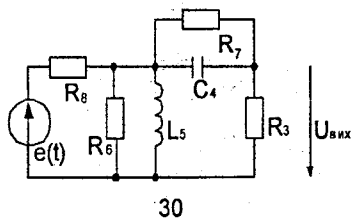
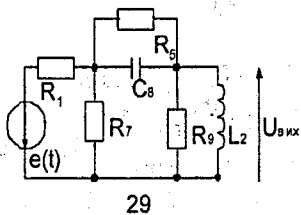
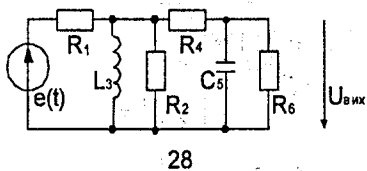
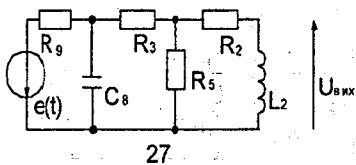
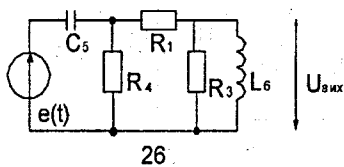
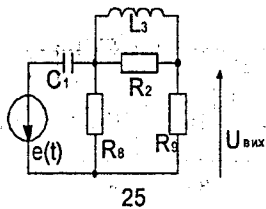
22

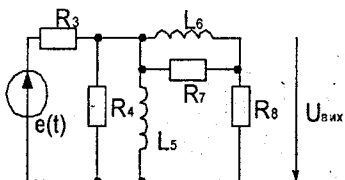


23

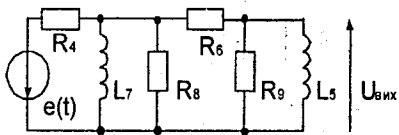


24

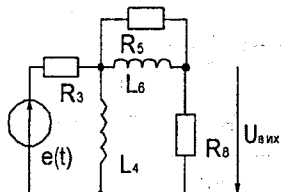




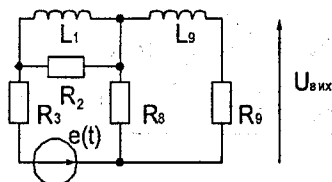
37



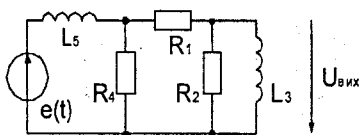
38



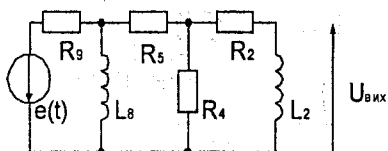
39



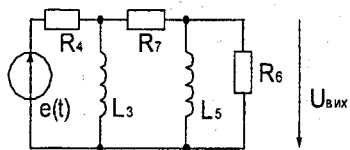
40



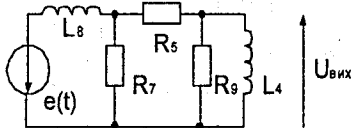
41



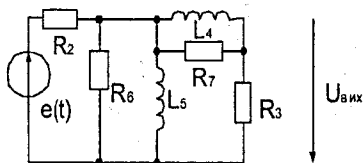
42



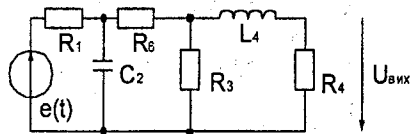
43



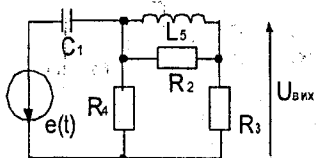
44



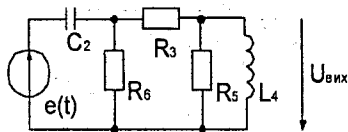
45



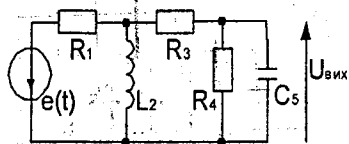
46



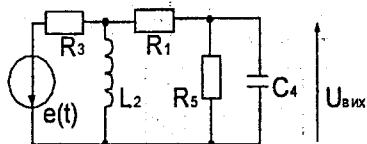
47



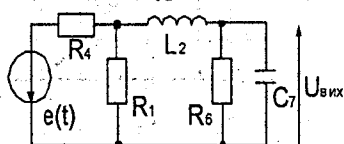
48



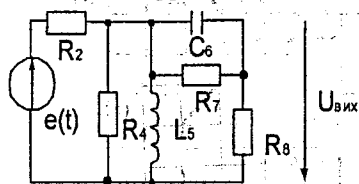
49



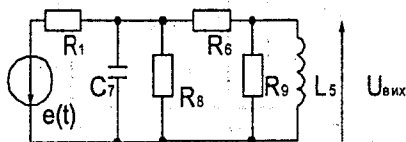
50



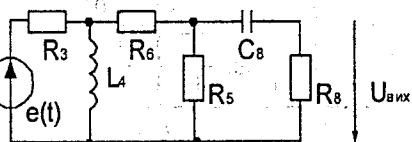
51



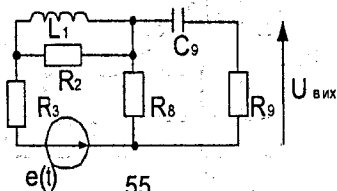
52



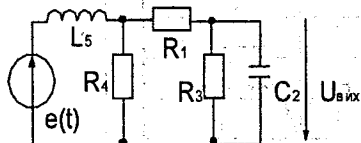
53



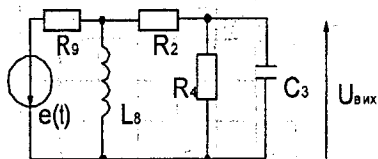
54



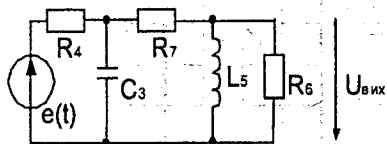
55



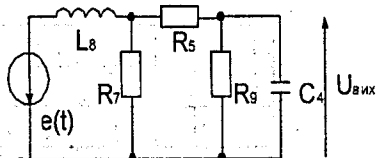
56



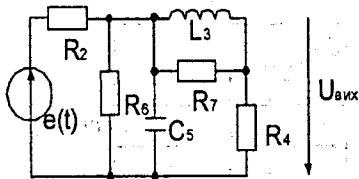
57



58

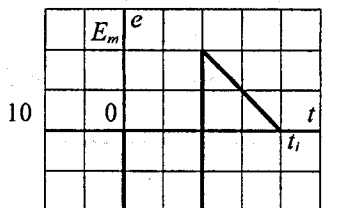
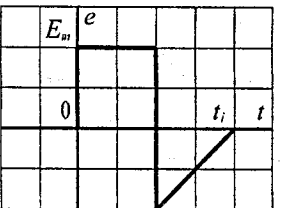
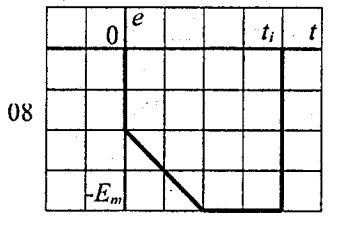
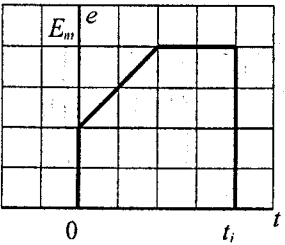
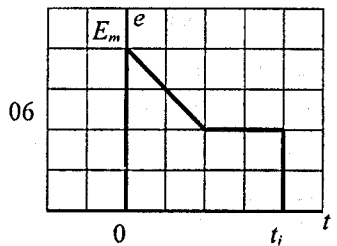
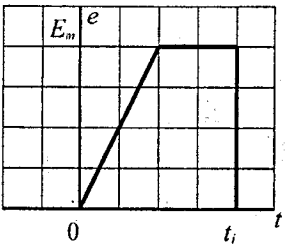
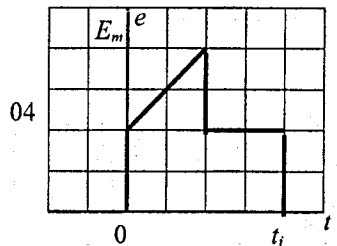
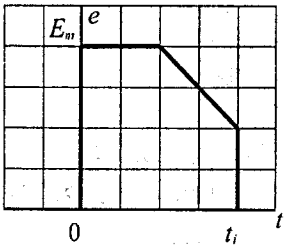
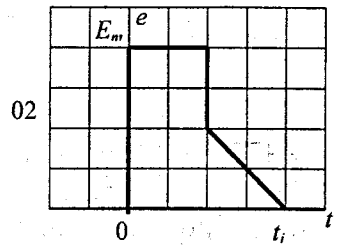
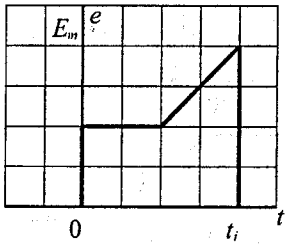


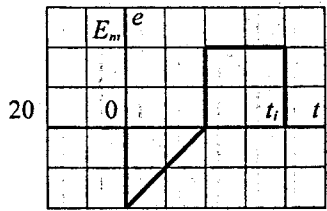
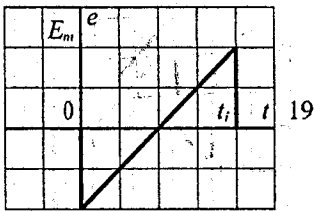
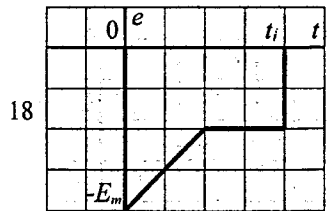
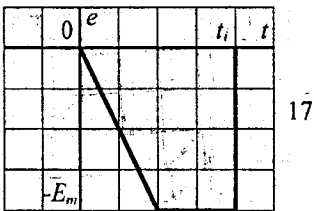
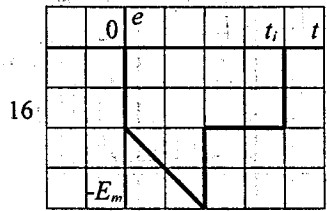
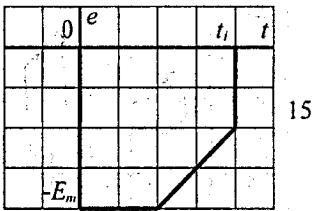
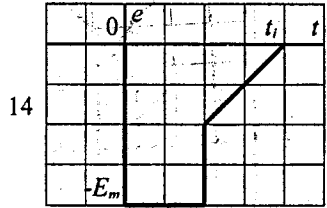
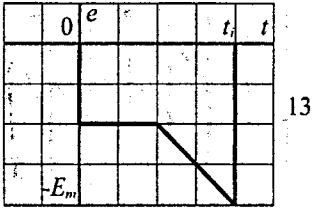
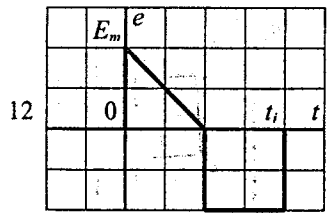
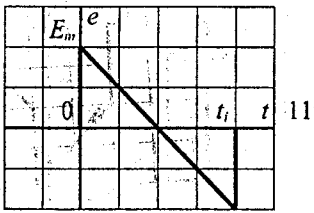
59

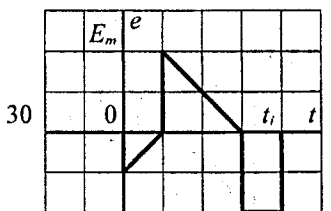
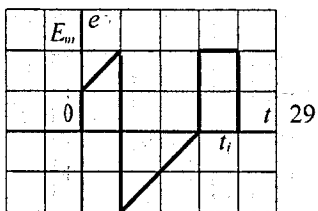
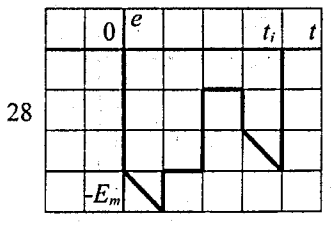
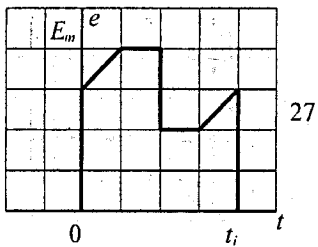
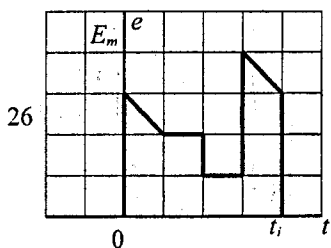
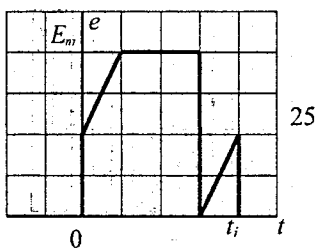
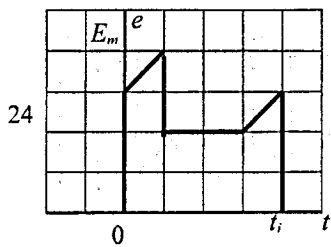
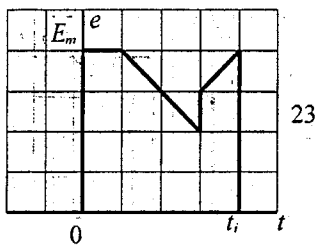
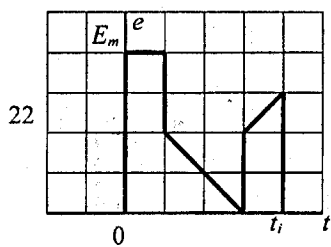
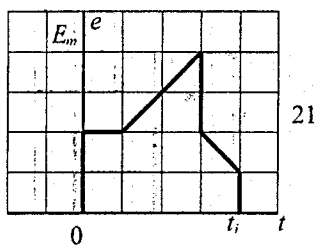


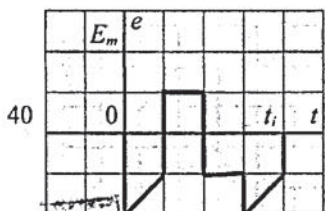
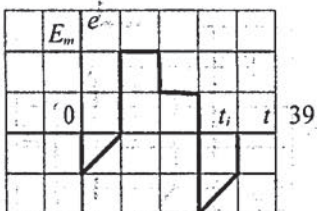
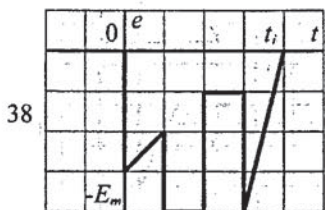
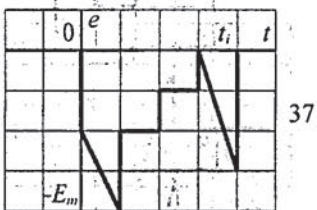
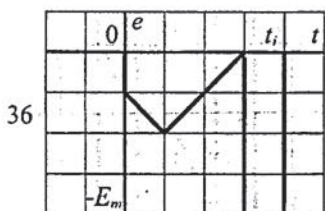
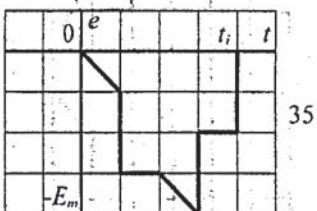
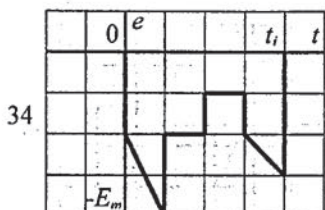
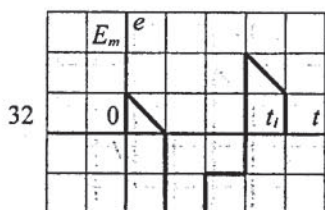
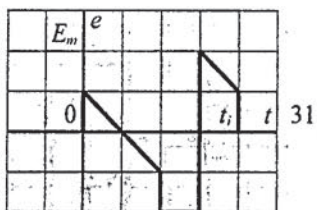
60

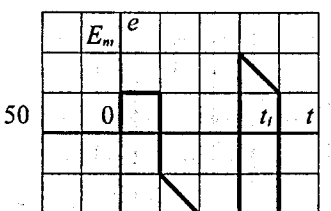
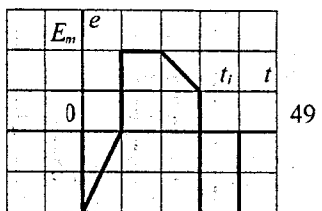
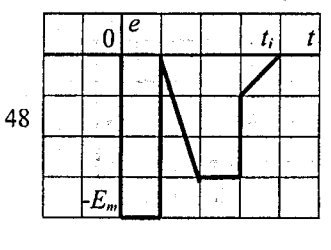
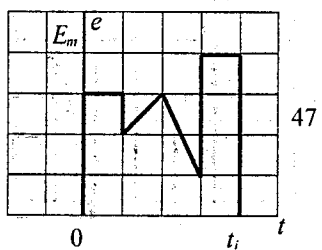
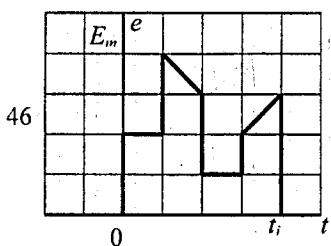
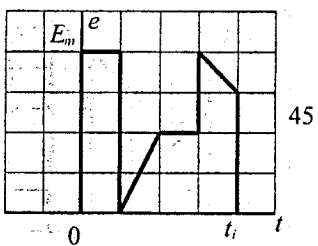
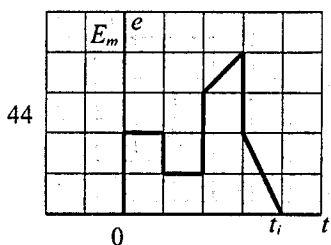
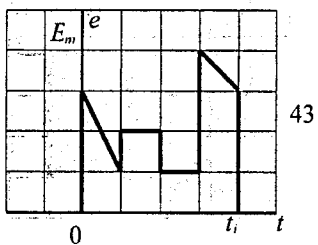
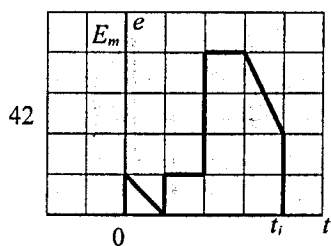
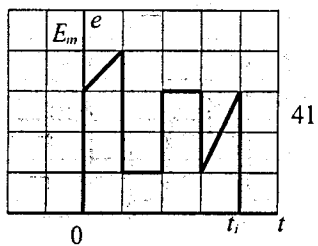
1.2.3 Варіанти неперіодичних сигналів

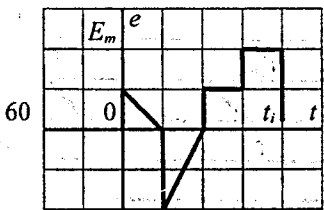
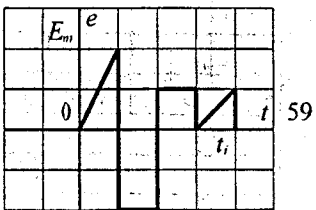
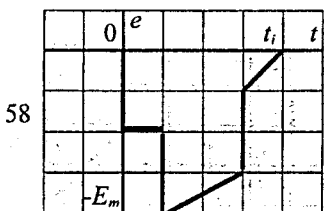
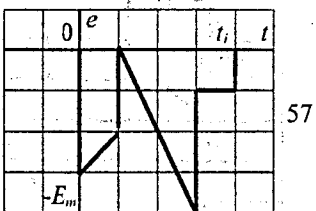
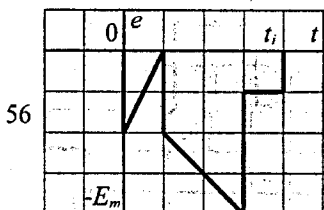
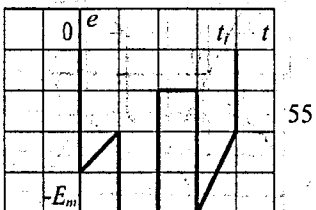
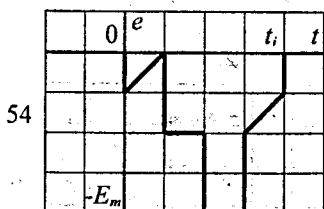
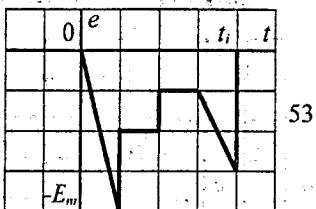
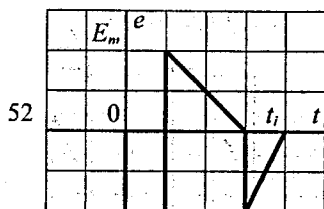
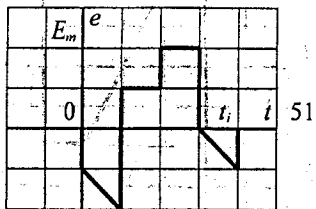




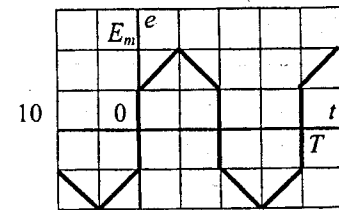
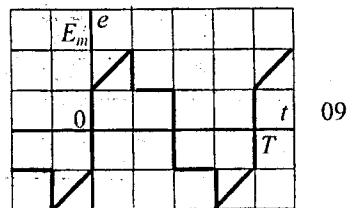
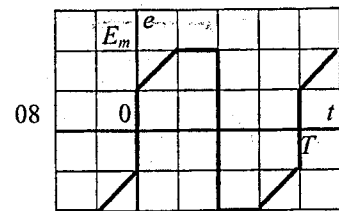
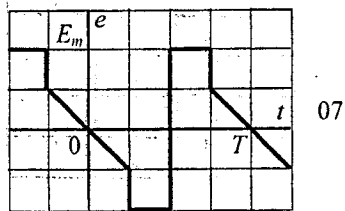
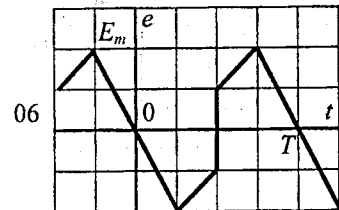
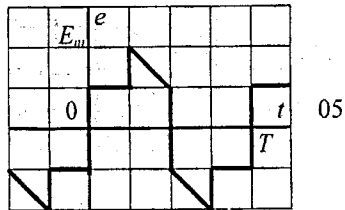
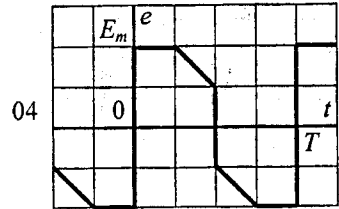
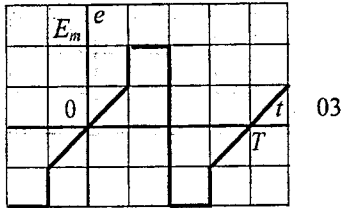
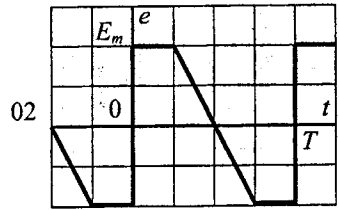
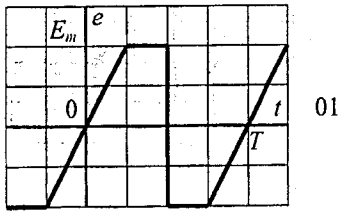


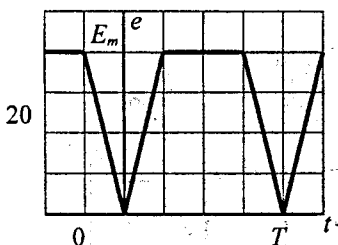
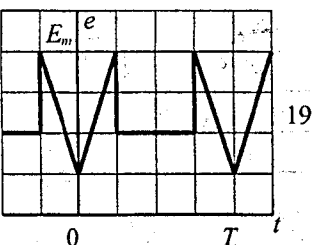
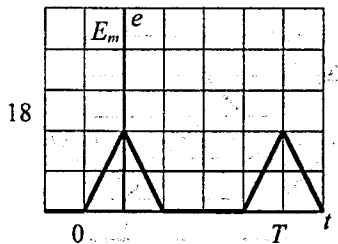
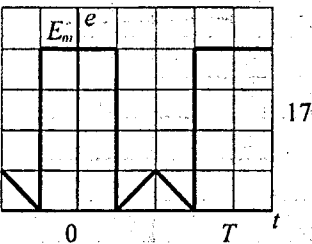
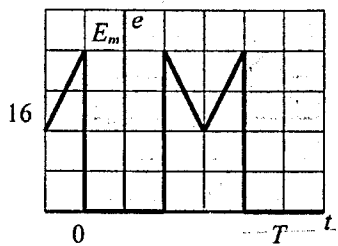
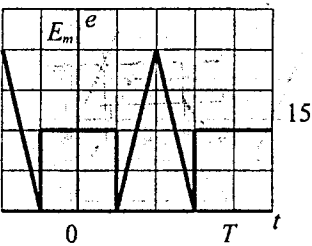
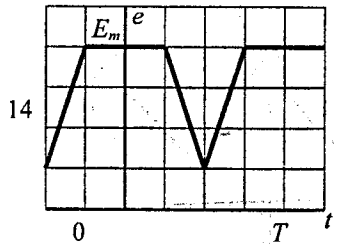
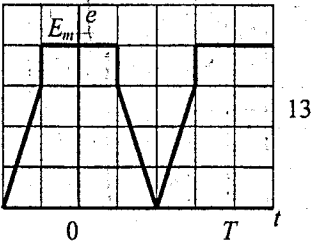
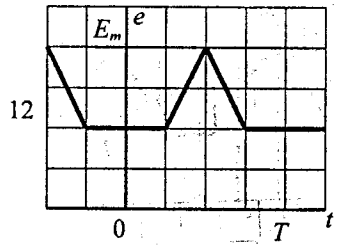
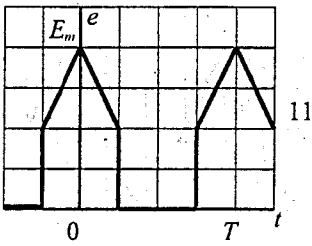


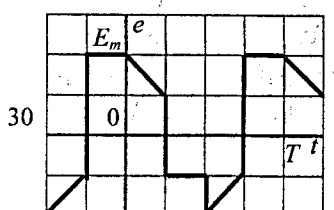
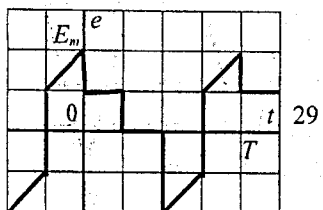
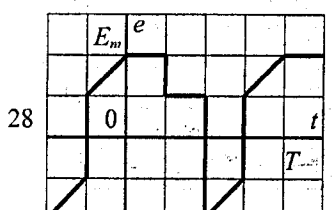
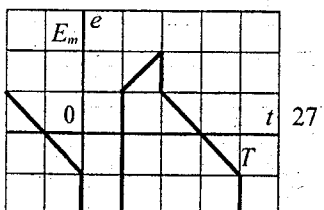
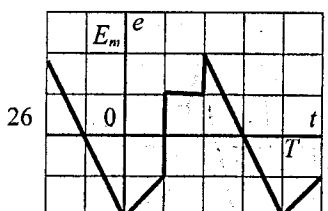
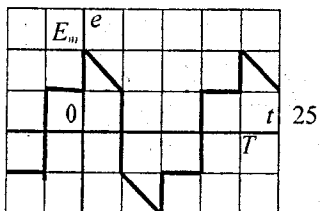
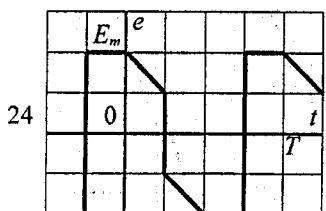
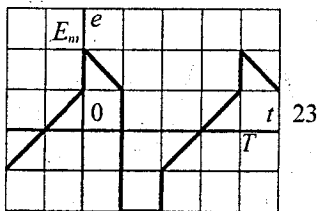
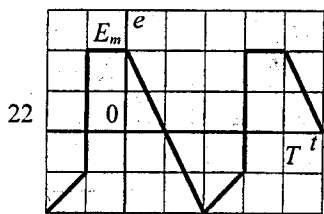
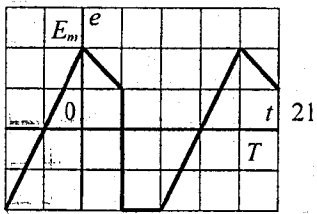


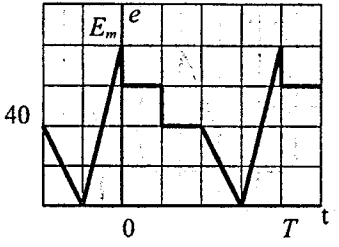
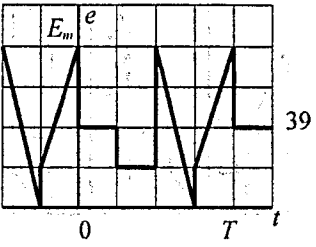
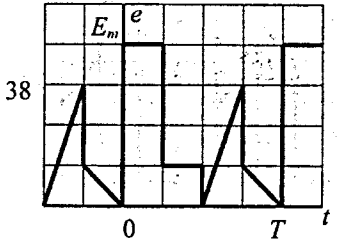
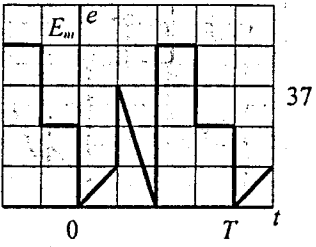
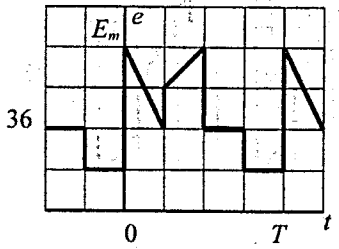
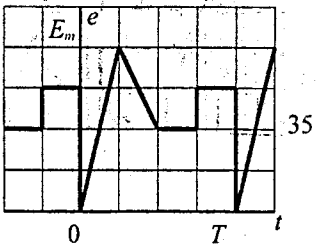
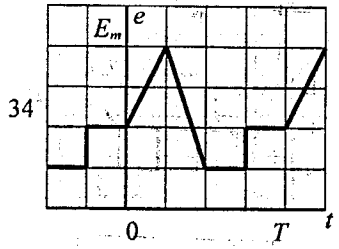
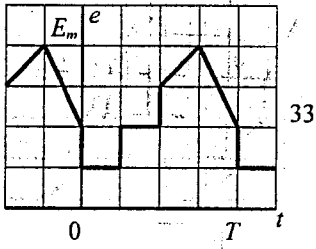
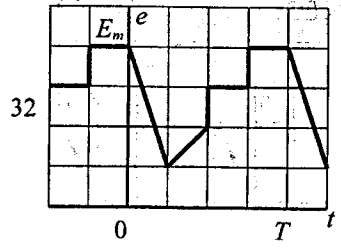
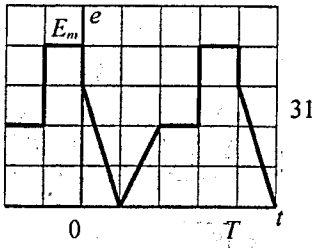


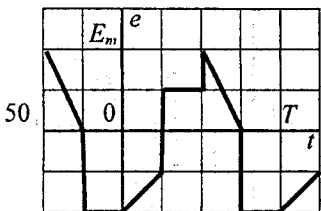
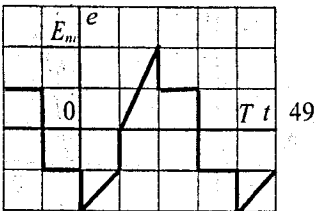
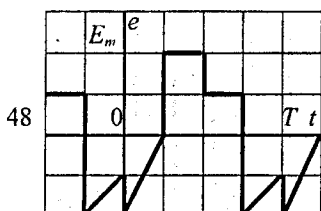
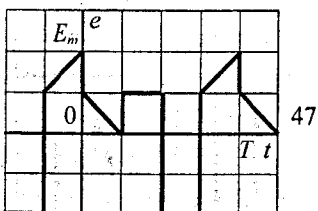
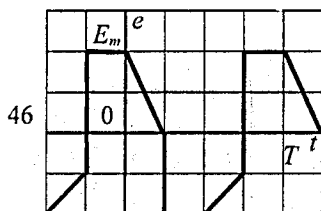
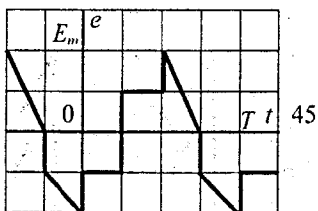
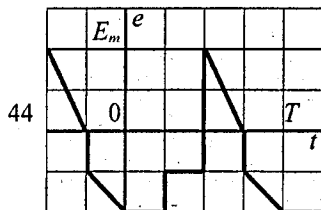
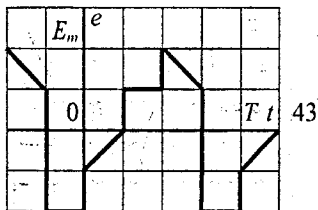
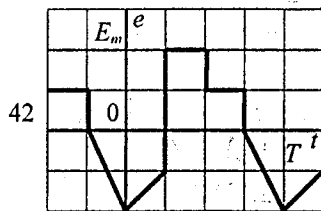
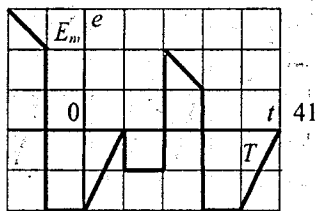
1.2.4 Варіанти періодичних сигналів

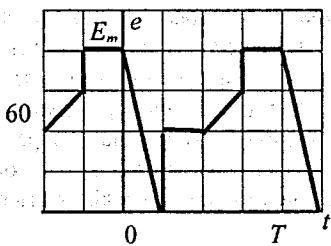
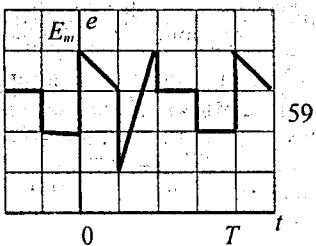
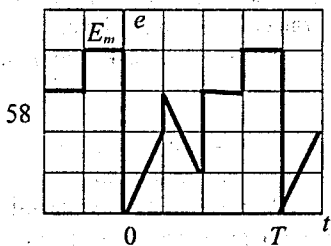
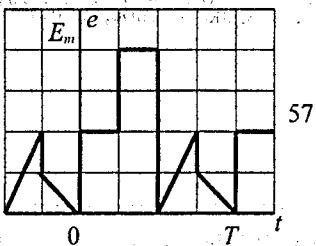
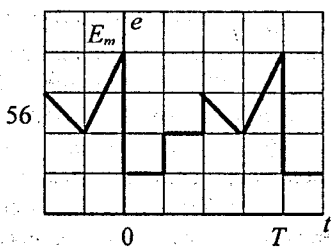
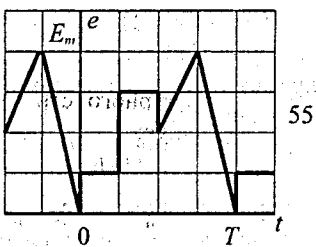
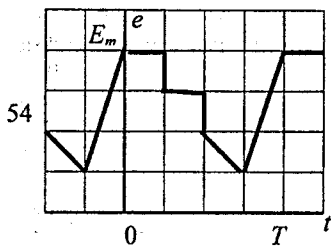
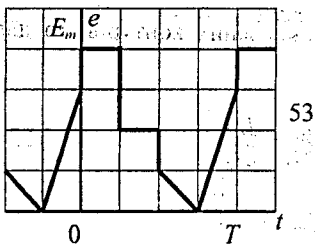
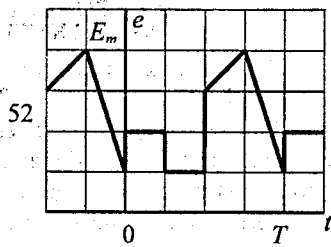
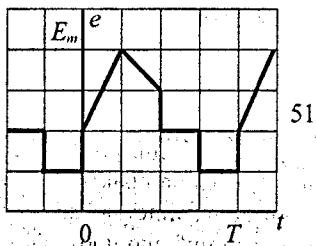












2 КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1 Метод контурних струмів

Метод контурних струмів є одним з основних методів розрахунку складних електричних кіл, якими широко користуються на практиці. Цей метод полягає в тому, що замість струмів в гілках на підставі другого закону Кірхгофа визначаються умовні “контурні струми”, що протікають в контурах.

Якщо задане електричне коло має p незалежних контурів, то для нього система рівнянь матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned} j_1 Z_{11} + j_2 Z_{12} + \dots + j_n Z_{1n} &= \dot{E}_{11}, \\ j_1 Z_{21} + j_2 Z_{22} + \dots + j_n Z_{2n} &= \dot{E}_{22}, \\ \dots & \dots \\ j_1 Z_{m1} + j_2 Z_{m2} + \dots + j_n Z_{mn} &= \dot{E}_{mm} \end{aligned} \quad (2.1)$$

де j_1, j_2, \dots, j_n – невідомі контурні струми;

$\dot{E}_{11}, \dot{E}_{22}, \dots, \dot{E}_{mm}$ – контурні електрорушійні сили в контурах $1, 2, \dots, n$.

Контурна електрорушійна сила – алгебраїчна сума ЕРС, що діють в контурі. ЕРС, напрям яких збігається з напрямом контурного струму, беруться зі знаком плюс, в іншому випадку – зі знаком мінус;

$Z_{11}, Z_{22}, \dots, Z_{mm}$ – власні опори контурів $1, 2, \dots, n$. В рівняннях (2.1) власні опори беруться завжди зі знаком плюс;

$Z_{12} = Z_{21}; Z_{1n} = Z_{n1}$ – спільні опори контурів: першого і другого, першого і n -го. Якщо напрями контурних струмів в спільних опорах збігаються, то опори в рівняння (2.1) входять зі знаком плюс, в іншому випадку – зі знаком мінус.

Кількість незалежних контурів:

$$n = p - q + 1,$$

де p – кількість гілок;

q – кількість вузлів.

Рівняння (2.1) записані для випадку, коли джерелами енергії є джерела напруги. За наявності в електричній схемі джерел струму вони можуть бути замінені еквівалентними джерелами напруги. Якщо провідності джерел струму дорівнюють нулю, то доцільно вибрати струми цих джерел в якості контурних; тоді кількість невідомих контурних струмів і відповідно кількість рівнянь скоротиться на кількість відомих струмів (як правило, струми джерел струму задаються). Якщо задане електричне коло має паралельні гілки, то потрібно замінити їх еквівалентним комплексним опором. Це зменшить кількість контурів і відповідно зменшить кількість рівнянь в системі (2.1).

Приклад 2.1

Виконати аналіз кола методом контурних струмів.

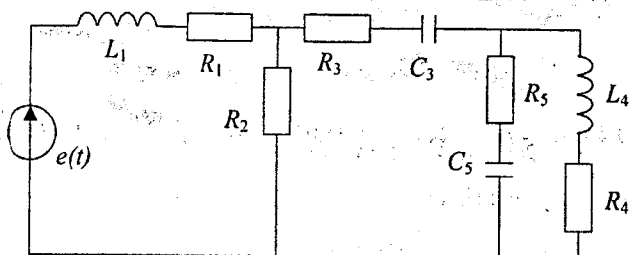


Рисунок 2.1

Початкові дані: $R_1 = 25 \text{ Ом}$; $R_2 = 40 \text{ Ом}$; $R_3 = 30 \text{ Ом}$; $R_4 = 80 \text{ Ом}$;
 $R_5 = 10 \text{ Ом}$; $C_3 = 15 \text{ мкФ}$; $C_5 = 20 \text{ мкФ}$; $L_1 = 55 \text{ мГн}$; $L_4 = 105 \text{ мГн}$; $T = 2,5 \text{ мс}$;
 $E_m = 127 \text{ В}$; $\Psi = 40^\circ$.

Знаходимо додатково: $\omega = 2\pi/T = 2531,274 \text{ рад/с}$.

Комплексні опори гілок кола:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1 = 25 + j \cdot 138,23 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 = 40 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 - j \cdot \frac{1}{\omega C_3} = 30 - j26,526 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_4 = R_4 + j\omega L_4 = 80 + j \cdot 263,894 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_5 = R_5 - j \cdot \frac{1}{\omega C_5} = 10 - j \cdot 19,894 \text{ Ом}.$$

Замінимо схему еквівалентною (рис 2.2.)

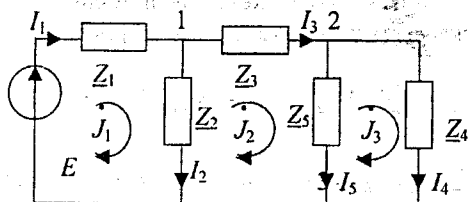


Рисунок 2.2

Система рівнянь для розрахунку невідомих струмів буде такою:

$$\begin{aligned} j_1 \underline{Z}_{11} - j_2 \underline{Z}_{12} - j_3 \underline{Z}_{13} &= E, \\ -j_1 \underline{Z}_{21} + j_2 \underline{Z}_{22} - j_3 \underline{Z}_{23} &= 0, \\ -j_1 \underline{Z}_{31} - j_2 \underline{Z}_{32} + j_3 \underline{Z}_{33} &= 0. \end{aligned}$$

$Y_{12} = Y_{21}$; $Y_{1m} = Y_{m1}$ - провідності між першим і другим та між першим і m -ним вузлами відповідно;

$J_{11}, J_{22}, \dots, J_{mm}$ - задавальні струми першого, другого та m -ного вузлів відповідно. Ці струми дорівнюють алгебраїчній сумі струмів джерел струму, які під'єднуються до відповідного вузла. Струми, направлені до вузла, беруться зі знаком плюс, в іншому випадку - зі знаком мінус.

Система рівнянь (2.2) записана для кола, в якому є тільки джерела струму. Якщо в колі є джерела напруги, їх необхідно перетворити в еквівалентні джерела струму.

За наявності однієї гілки з ЕРС і нескінченно великою провідністю доцільно прийняти рівним нулю потенціал одного з вузлів, до яких під'єднана ця гілка. Тоді потенціал іншого вузла стає відомим і кількість невідомих потенціалів зменшується на один. Метод вузлових потенціалів має перевагу перед методом контурних струмів, якщо кількість рівнянь, складених за цим методом буде меншою.

Приклад 2.2

Виконати аналіз кола методом вузлових потенціалів. Схема рис. 2.2. має три вузли, тому за умови $\phi_3 = 0$, потрібно скласти систему з двох вузлових рівнянь:

$$\begin{aligned} \phi_1 Y_{11} - \phi_2 Y_{12} &= J_{11}, \\ -\phi_1 Y_{21} + \phi_2 Y_{22} &= J_{22}. \end{aligned}$$

Знаходимо коефіцієнти системи, та задавальні струми:

$$Y_{11} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} = 0,045 + j \cdot 9,536 \cdot 10^{-3} \text{ См};$$

$$Y_{22} = \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4} + \frac{1}{Z_5} = 0,04 + j \cdot 0,053 \text{ См};$$

$$Y_{12} = Y_{21} = \frac{1}{Z_3} = 0,019 + j \cdot 0,017 \text{ См};$$

$$\begin{aligned} J_{11} &= E_m Y_1 = 0,695 - j \cdot 0,578 \text{ А}; \\ J_{22} &= 0 \text{ А}. \end{aligned}$$

Підставимо одержані вирази в систему:

$$\begin{aligned} \phi_1(0,045 + j \cdot 9,536 \cdot 10^{-3}) - \phi_2(0,019 + j \cdot 0,017) &= 0,695 - j \cdot 0,578; \\ -\phi_1(0,019 + j \cdot 0,017) + \phi_2(0,04 + j \cdot 0,053) &= 0. \end{aligned}$$

Розв'язуючи її одним з відомих способів, одержуємо:

$$\begin{aligned} \phi_1 &= 16,505 - j \cdot 17,871 \text{ В}, \\ \phi_2 &= 4,717 - j \cdot 7,82 \text{ В}. \end{aligned}$$

Знаходимо струми в гілках:

$$\dot{I}_{m1} = (-\dot{\phi}_1 + \dot{E}_m) \cdot Y_1 = 0.799 - j \cdot 0.44 = 0.912 \cdot e^{-j28.82^\circ} \text{ A},$$

$$\dot{I}_{m2} = \dot{\phi}_1 Y_2 = 0.608 \cdot e^{-j47.276^\circ} \text{ A},$$

$$\dot{I}_{m3} = (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2) \cdot Y_3 = 0.387 + j \cdot 6.953 \cdot 10^{-3} = 0.387 \cdot e^{j1.03^\circ} \text{ A},$$

$$\dot{I}_{m4} = \dot{\phi}_2 Y_4 = -0.022 - j \cdot 0.025 = 0.033 \cdot e^{-j132.0370^\circ} \text{ A},$$

$$\dot{I}_{m5} = \dot{\phi}_2 Y_5 = 0.409 + j \cdot 0.032 = 0.41 \cdot e^{j4.412^\circ} \text{ A}.$$

2.3 Метод еквівалентного генератора

Метод еквівалентного генератора базується на теоремі про еквівалентне джерело.

Теорема про еквівалентне джерело часто застосовується під час аналізу електричних кіл. З допомогою цієї теореми складне електричне коло з довільною кількістю джерел електричної енергії приводиться до кола з одним джерелом, в результаті чого розрахунок кола спрощується.

Існують два варіанти теореми про еквівалентне джерело: варіант з джерелом напруги і варіант з джерелом струму.

Теорема про еквівалентне джерело напруги

Струм в будь-якій гілці mn лінійного електричного кола не зміниться, якщо електричне коло, до якого під'єднана ця гілка, замінити еквівалентним джерелом напруги; ЕРС цього джерела повинна дорівнювати напрузі між полюсами m і n розімкненої гілки mn , а внутрішній опір еквівалентного джерела повинен дорівнювати вхідному опору пасивного електричного кола зі сторони полюсів m і n при розімкненій гілці mn .

Реалізація методу еквівалентного генератора напруги здійснюється за алгоритмом, проілюстрованим рис. 2.1

Під час знаходження \underline{Z}_i необхідно з досліджуваного електричного кола вилучити всі джерела енергії, залишивши їх внутрішні опори.

Струм в досліджуваній гілці mn дорівнює:

$$i = \frac{U_{xx}}{\underline{Z}_i + \underline{Z}} \quad (2.3)$$

Теорема про еквівалентне джерело струму

Струм в будь-якій гілці mn лінійного електричного кола не зміниться, якщо електричне коло, до якого під'єднана ця гілка, замінити еквівалентним джерелом струму; струм цього джерела повинен

дорівнювати струму, що проходить між закороченими полюсами m і n , а внутрішня провідність джерела повинна дорівнювати вхідній провідності пасивного електричного кола (без джерел енергії) зі сторони полюсів m і n , якщо розімкнена гілка mn .

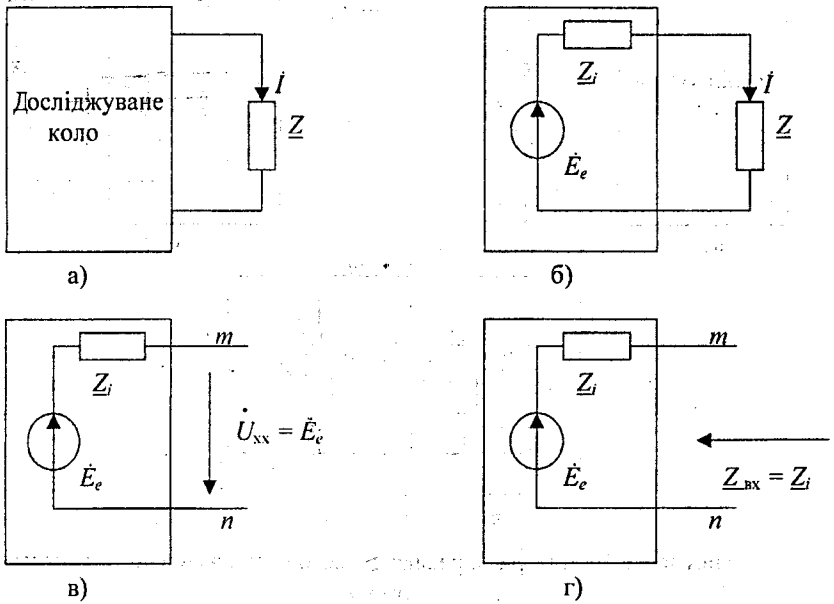


Рисунок 2.1 – Алгоритм реалізації методу еквівалентного генератора напруги

Внутрішня провідність \underline{Y}_i джерела струму дорівнює:

$$\underline{Y}_i = \frac{1}{\underline{Z}_i}$$

Внутрішній опір \underline{Z}_i джерела напруги знаходиться так, як і в попередньому випадку.

Струм в досліджуваній гілці mn дорівнює:

$$i = i_{к.з} \frac{\underline{Y}}{\underline{Y}_i + \underline{Y}}, \quad (2.4)$$

де $\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}}$ - провідність гілки mn , См;

$I_{кз}$ – струм короткого замикання.

Реалізація методу еквівалентного джерела струму здійснюється за алгоритмом, проілюстрованим на рис.2.2.

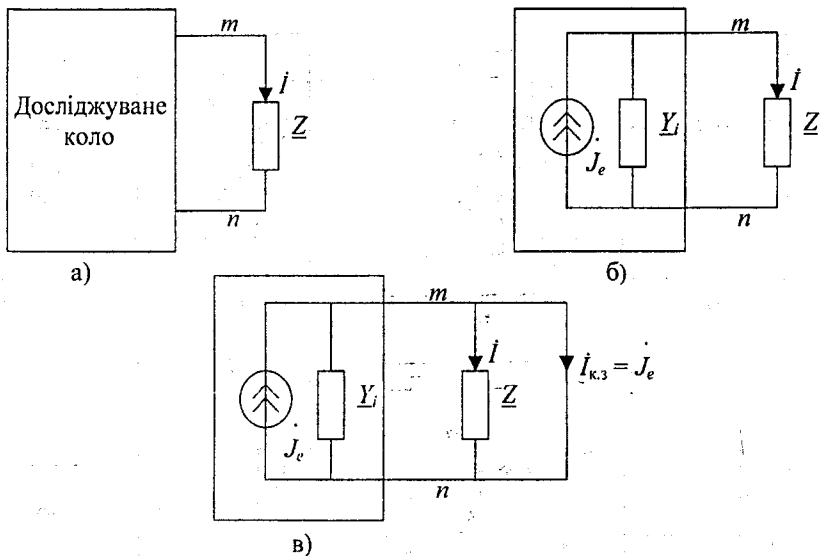


Рисунок 2.2 – Алгоритм реалізації методу еквівалентного генератора струму

2.4 Комплексна потужність

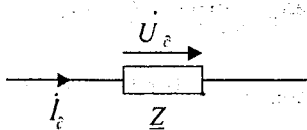


Рисунок 2.3 – Фрагмент електричного кола

Якщо струм, що протікає через комплексний опір Z , (рис.2.3) та напруга, що утворюється при цьому на опорі, дорівнюють:

$$\dot{I}_c = I_\delta e^{j\psi_i}, \quad \dot{U}_\delta = U_\delta e^{j\psi_u},$$

то комплексна потужність опору Z може бути визначена таким чином:

$$\tilde{S} = \dot{U}_\delta \dot{I}_c = U_\delta e^{j\psi_u} \cdot I_\delta e^{-j\psi_i} = U_\delta I_\delta e^{j(\psi_u - \psi_i)} = S e^{j\varphi}, \quad (2.5)$$

де \tilde{S} - комплексна потужність опору \underline{Z} , ВА;

$I_{\tilde{c}} = I_c e^{-j\psi_i}$ - комплексне діюче спряжене значення струму в опорі \underline{Z} , А;

S - повна потужність кола, ВА;

$\varphi = \psi_u - \psi_i$ - аргумент комплексної потужності (кут фазового зсуву між напругою \tilde{U}_c і струмом \tilde{I}_c , він же аргумент комплексного опору \underline{Z} °,

Комплексна потужність (2.5) за допомогою формули Ейлера може бути приведена до алгебраїчної форми

$$\tilde{S} = S \cos \varphi + j S \sin \varphi = P + jQ, \quad (2.6)$$

де $P = S \cos \varphi$ - активна потужність, Вт;

$Q = S \sin \varphi$ - реактивна потужність, Вар.

2.5. Баланс потужностей

Якщо електричне коло має джерела енергії та її споживачів, то справедливим буде таке співвідношення:

$$\sum_{k=1}^n (\tilde{E}_{\partial k} I_{\partial k} + \tilde{U}_{\partial k} J_{\partial k} = \sum_{d=1}^m [I_{\partial d}^2 R_d + j I_{\partial d}^2 (X_{Ld} - X_{Cd})], \quad (2.7)$$

де $\tilde{U}_{\partial k}$ - напруга на джерелі струму;

$J_{\partial k}$ - комплексне діюче значення струму, спряжене струмові джерела струму $\tilde{I}_{\partial k}$;

$\sum_{k=1}^n \tilde{E}_{\partial k} I_{\partial k}$ - алгебраїчна сума комплексних потужностей джерел

ЕРС: тут додатними будуть ті складові, для яких напрями дії ЕРС \tilde{E} і відповідного струму $\tilde{I}_{\partial k}$ збігаються, в іншому випадку доданок від'ємний;

$\sum_{k=1}^n \tilde{U}_{\partial k} J_{\partial k}$ - алгебраїчна сума комплексних потужностей джерел

струму; тут додатними будуть ті складові, для яких напруга на джерелі струму $\tilde{U}_{\partial k}$ і його струм $\tilde{J}_{\partial k}$ збігаються за напрямком, в іншому випадку складова від'ємна;

$\sum_{d=1}^m I_{\partial d}^2 R_d$ - арифметична сума активних потужностей споживачів;

$\sum_{d=1}^m I_{\partial d}^2 (X_{Ld} - X_{Cd})$ - алгебраїчна сума реактивних потужностей

споживачів; тут додатними будуть складові, для яких $(X_{Ld} - X_{Cd}) > 0$, в іншому випадку, складові від'ємні.

2.6 Топографічна діаграма

Топографічною діаграмою називають різновид векторної діаграми, на якій відкладені комплексні потенціали окремих точок заданого кола відносно однієї точки, потенціал якої приймається рівним нулю. Таким чином, порядок розміщення векторів комплексних напруг суворо відповідає порядку розміщення елементів кола на схемі. Кінець вектора напруги на кожному попередньому елементі примикає до початку вектора напруги наступного елемента. При такій побудові векторної діаграми напруг кожній точці електричного кола відповідає певна точка на топографічній діаграмі.

Топографічна діаграма дозволяє зовсім просто знаходити напруги між будь-якими точками кола: амплітудне значення і початкова фаза напруги, що знаходиться, визначаються вектором прямої, що з'єднує відповідні точки топографічної діаграми.

На рис.2.6 зображена схема розгалуженого кола, топографічну діаграму якого необхідно побудувати. Для цього, користуючись одним із методів аналізу, знаходимо струми і напруги на всіх елементах. Після цього, виконуючи правила побудови, зазначені вище, зображимо топографічну діаграму. Однак, рекомендується перед цим провести так звану якісну побудову, щоб уникнути помилок і одночасно перевірити якість проведеного аналізу. Якісна побудова топографічної діаграми напруг передбачає попередню побудову векторної діаграми струмів (рис.2.7), яку рекомендується будувати окремо, щоб не захарашувати топографічну діаграму.

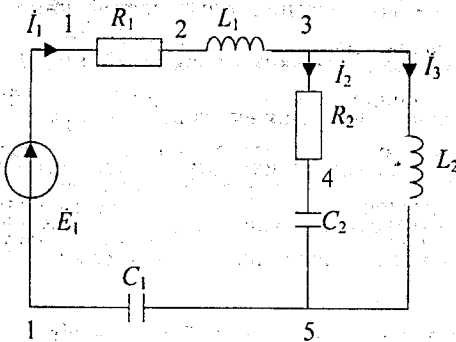


Рисунок 2.6 – Схема розгалуженого електричного кола

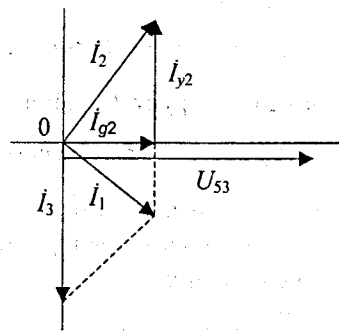


Рисунок 2.7 – Векторна діаграма струмів кола (рис.2.6)

Нехай комплексна напруга, що відкладається на паралельних гілках 2 і 3, має нульову початкову фазу (рис. 2.8) і направлена від точки 5 до точки 3 (на топографічній діаграмі вектор напруги завжди направлений від точки з нижчим потенціалом до точки з вищим потенціалом).

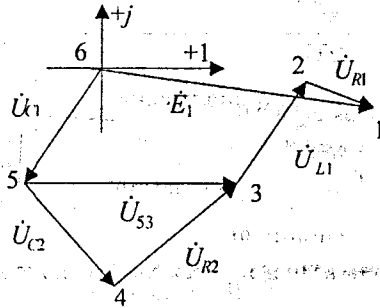


Рисунок 2.8 – Якісна топографічна діаграма напруг електричного кола зображеного на (рис.2.6)

Відносно вектора напруги U_{S3} відкладаємо вектор струму I_3 , який відстає від нього на кут 90° (рис.2.7). Оскільки струм I_2 – комплексна величина, знаходимо його через складові. Вектор дійсної складової струму другої гілки I_{d2} збігається за напрямком з вектором напруги U_{S3} , а вектор уявної складової I_{y2} випереджає напругу на кут 90° (уявна складова струму I_2 має ємнісний характер). Сума векторів цих складових утворює вектор струму I_2 . Знаходимо вектор струму I_1 як суму векторів I_3 і I_2 (за методом паралелограма).

Відносно струму I_2 з точки 5 (рис.2.8) відкладаємо вектор напруги на смності U_{C2} , який відстає від струму I_2 на кут 90° . Кінець вектора U_{C2} – це точка 4. З точки 4 в точку 3 направлений вектор напруги на опорі R_2 U_{R2} , який за напрямком збігається з вектором струму I_2 і в сумі з U_{C2} дає вектор U_{S3} . З точки 3 до точки 2 відкладаємо вектор напруги U_{L1} , який випереджає вектор струму I_1 на 90° . З точки 3 до точки 1 відкладаємо вектор напруги U_{R1} , який збігається за напрямком з вектором I_1 . Від точки 6 до точки 5 будемо вектор напруги U_{C1} , який відстає від струму I_1 на 90° . Між точками 6 і 1 будемо вектор ЕРС E_1 .

2.7 Первинні А- та Y- параметри і вторинні параметри чотириполюсника

Чотириполюсником називають частину електричного кола, що має дві пари полюсів, які можуть бути вхідними і вихідними (рис.2.9).

Рівняння чотириполюсника в формі А:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2, \\ \dot{I}_1 &= C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2. \end{aligned} \quad (2.8)$$

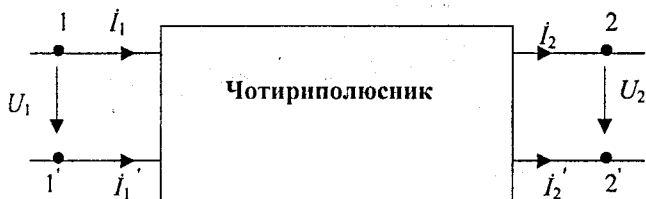


Рисунок 2.9 – Узагальнене зображення чотириполюсника

В рівняннях (2.8) коефіцієнти \dot{A} , \dot{B} , \dot{C} і \dot{D} називаються A -параметрами чотириполюсника. Комплексні коефіцієнти \dot{A} і \dot{D} є безрозмірними величинами. Комплексний коефіцієнт \dot{B} вимірюється в омах, комплексний коефіцієнт \dot{C} - в сименсах.

A -параметри чотириполюсника знаходять з дослідів холостого ходу (хх) і короткого замикання (кз):

а) дослід холостого ходу ($I_2 = 0$). З рівнянь (2.8) знаходимо:

$$\dot{A} = \frac{\dot{U}_{1XX}}{\dot{U}_{2XX}}, \quad \dot{C} = \frac{\dot{I}_{1XX}}{\dot{U}_{2XX}}; \quad (2.9)$$

б) дослід короткого замикання ($\dot{U}_2 = 0$)

$$\dot{B} = \frac{\dot{U}_{1КЗ}}{\dot{I}_{2КЗ}}, \quad \dot{D} = \frac{\dot{I}_{1КЗ}}{\dot{I}_{2КЗ}}. \quad (2.10)$$

Через A -параметри можна одержати інші параметри чотириполюсника.

Виразимо Y -параметри чотириполюсника через A -параметри. Для цього спочатку запишемо рівняння чотириполюсника в формі Y

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \underline{Y}_{11}\dot{U}_1 + \underline{Y}_{12}\dot{U}_2, \\ \dot{I}_2 &= \underline{Y}_{21}\dot{U}_1 + \underline{Y}_{22}\dot{U}_2, \end{aligned} \quad (2.11)$$

де \underline{Y}_{11} – вхідна провідність чотириполюсника під час передачі сигналу від полюсів 1-1 до полюсів 2-2;

\underline{Y}_{22} – вихідна провідність чотириполюсника під час передачі сигналу від полюсів 1-1 до полюсів 2-2;

\underline{Y}_{12} – передатна провідність під час передачі сигналу від полюсів 2-2 до полюсів 1-1;

\underline{Y}_{21} – передатна провідність під час передачі сигналу від полюсів 1-1 до полюсів 2-2'.

З врахуванням того, що $i_2 = -i_2'$ (рис.2.7) рівняння (2.8) будуть такими:

$$U_1 = A\dot{U}_2 - B\dot{i}_2', \quad (2.12)$$

$$i_1 = C\dot{U}_2 - D\dot{i}_2'. \quad (2.13)$$

З (2.12) знаходимо i_2'

$$\dot{i}_2' = \frac{A}{B}\dot{U}_2 - \frac{1}{B}\dot{U}_1 = -\frac{1}{B}\dot{U}_1 + \frac{A}{B}\dot{U}_2. \quad (2.14)$$

Рівняння (2.14) підставимо в (2.13)

$$\dot{i}_1 = C\dot{U}_2 - D\left(-\frac{1}{B}\dot{U}_1 + \frac{A}{B}\dot{U}_2\right) = C\dot{U}_2 + \frac{D}{B}\dot{U}_1 - \frac{AD}{B}\dot{U}_2 = \frac{D}{B}\dot{U}_1 - \frac{AD - BC}{B}\dot{U}_2. \quad (2.15)$$

Рівняння (2.14) і (2.15) об'єднаємо в систему:

$$i = \frac{D}{B}\dot{U}_1 - \frac{AD - BC}{B}\dot{U}_2, \quad (2.16)$$

$$\dot{i}_2' = -\frac{1}{B}\dot{U}_1 + \frac{A}{B}\dot{U}_2.$$

Систему (2.16) порівняємо з (2.11) і приходимо до висновку, що

$$\underline{Y}_{11} = \frac{D}{B}; \quad \underline{Y}_{12} = -\frac{AD - BC}{B}; \quad (2.17)$$

$$\underline{Y}_{21} = -\frac{1}{B}; \quad \underline{Y}_{22} = \frac{A}{B}.$$

Відомо, що якщо $\underline{Y}_{21} = \underline{Y}_{12}$ чотириполосник називається оборотним. З (2.17) очевидно, що для оборотного чотириполосника справедлива рівність

$$AD - BC = 1. \quad (2.18)$$

Рівняння (2.18) називають рівнянням зв'язку чотириполосника.

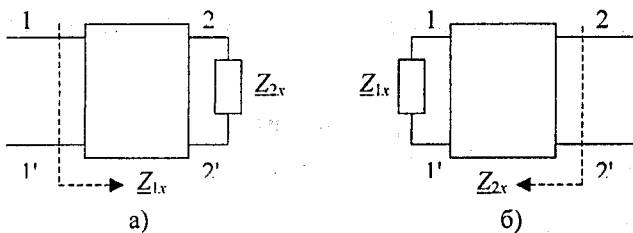


Рисунок 2.10

Для будь-якого чотириполосника можна підібрати два опори, які будуть відповідати таким умовам (рис.2.10,а,б): 1) при ввімкненні на вихід чотириполосника опору Z_{2x} його вхідний опір дорівнює Z_{1x} ; 2) при ввімкненні на вхід чотириполосника опору Z_{1x} його вхідний опір зі сторони вихідних полюсів дорівнює Z_{2x} . Такі опори називаються характеристичними.

Характеристичні опори можна виразити через A -параметри:

$$Z_{1x} = \sqrt{\frac{\dot{A}\dot{B}}{\dot{C}\dot{D}}} ; Z_{2x} = \sqrt{\frac{\dot{D}\dot{B}}{\dot{C}\dot{A}}} \quad (2.19)$$

Характеристичні опори є такими параметрами, які не можна виміряти безпосередньо. Вони не є чимось таким, що було б “всередині” чотириполосника, а є параметричними величинами, що визначаються непрямым шляхом, наприклад за формулою (2.19).

Для симетричного чотириполосника, для якого $\dot{A} = \dot{D}$,

$$Z_{1x} = Z_{2x} = \sqrt{\frac{\dot{B}}{\dot{C}}}$$

Третім характеристичним параметром чотириполосника є коефіцієнт розповсюдження $\dot{\Gamma}$.

Нехай чотириполосник узгоджений на виході, тобто

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = Z_{2x} = \sqrt{\frac{\dot{B}\dot{D}}{\dot{A}\dot{C}}}$$

При цьому знайдемо співвідношення $\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2}$ і $\frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2}$.

$$\begin{aligned} \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} &= \frac{\dot{A}\dot{U}_2 + \dot{B}\dot{I}_2}{\dot{U}_2} = \dot{A} + \dot{B} \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2} = \dot{A} + \dot{B} \frac{1}{Z_{2x}} = \\ &= \dot{A} + \dot{B} \sqrt{\frac{\dot{A}\dot{C}}{\dot{B}\dot{D}}} = \sqrt{\frac{\dot{A}}{\dot{D}}} (\sqrt{\dot{A}\dot{D}} + \sqrt{\dot{B}\dot{C}}) = m(\sqrt{\dot{A}\dot{D}} + \sqrt{\dot{B}\dot{C}}), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{I_1}{I_2} &= \frac{\dot{C}U_2 + \dot{D}I_2}{I_2} = \dot{C} \frac{U_2}{I_2} + \dot{D} = \dot{C}Z_{2x} + \dot{D} = \dot{C} \sqrt{\frac{\overline{B\dot{D}}}{\overline{A\dot{C}}}} + \dot{D} = \\ &= \sqrt{\frac{\overline{D}}{\overline{B}}} (\sqrt{\overline{B\dot{C}}} + \sqrt{\overline{A\dot{D}}}) = \frac{1}{m} (\sqrt{\overline{A\dot{D}}} + \sqrt{\overline{B\dot{C}}}), \end{aligned}$$

де $m = \sqrt{\frac{\overline{A}}{\overline{D}}}$ - коефіцієнт трансформації чотириполосника.

Ми бачимо, що вирази $\frac{1}{m} \frac{U_1}{U_2}$ і $m \frac{I_1}{I_2}$ рівні одній і тій же величині

$\sqrt{\overline{A\dot{D}}} + \sqrt{\overline{B\dot{C}}}$, тому вони дорівнюють один одному. Величина $\sqrt{\overline{A\dot{D}}} + \sqrt{\overline{B\dot{C}}}$ в загальному вигляді є комплексним числом. Це число зручно подати в показниковій формі:

$$\sqrt{\overline{A\dot{D}}} + \sqrt{\overline{B\dot{C}}} = ke^{jb} = e^a e^{jb} = e^{\dot{\Gamma}}. \quad (2.20)$$

Величина $\dot{\Gamma} = a + jb$ називається коефіцієнтом розповсюдження чотириполосника. З виразу

$$\dot{\Gamma} = a + jb = \ln(\sqrt{\overline{A\dot{D}}} + \sqrt{\overline{B\dot{C}}})$$

видно, що коефіцієнт розповсюдження чотириполосника повністю визначається його A -параметрами.

З виразу (2.20) очевидно, що $a = \ln k$.

Дійсна складова коефіцієнта розповсюдження a - називається власним згасанням чотириполосника, уявна складова b - коефіцієнтом фази чотириполосника.

2.8 Комплексний коефіцієнт передачі за напругою, АЧХ і ФЧХ електричного кола

В загальному вигляді комплексний коефіцієнт передачі за напругою електричного кола:

$$\dot{K}_n = \frac{\dot{U}_{\text{вих}}}{\dot{U}_1}, \quad (2.21)$$

де $\dot{U}_{\text{вих}}$ - комплексна напруга на виході кола;

\dot{U}_1 - комплексна напруга на вході кола.

Комплексний коефіцієнт передачі за напругою залежить тільки від параметрів даного кола і визначається в показниковій формі

$$\dot{K}_n = K_n(\omega) e^{j\varphi(\omega)},$$

де $K_n(\omega)$ - амплітудно-частотна характеристика кола (АЧХ);

$\varphi(\omega)$ - фазо-частотна характеристика кола (ФЧХ).

Аналитично визначаючи K_u для будь-якої частоти, необхідно (вважаючи \dot{U}_1 відомим) виразити $\dot{U}_{\text{вих}}$ через \dot{U}_1 і параметри кола. Одержане значення розділити на \dot{U}_1 . Таким чином, невідоме значення \dot{U}_1 скорочується, а одержаний вираз подається в показниковій формі, що дає можливість виділити з комплексного коефіцієнта передачі за напругою АЧХ і ФЧХ кола.

Використовуючи одержані вирази $K(\omega)$ і $\varphi(\omega)$ та підставивши в них ряд значень, можна побудувати графіки АЧХ і ФЧХ.

Приклад 2.3.

Нехай задана схема (рис. 2.11). Визначити комплексний коефіцієнт передачі кола за напругою і його складові.

Початкові дані: $R_1=10$ Ом; $R_3=20$ Ом; $R_4=30$ Ом; $C_2=0.01$ мкФ; $C_4=5$ нФ; $E_m=10$ В; $T=20$ мкс.

Знаходимо $U_{\text{вих}}$ в операторній формі

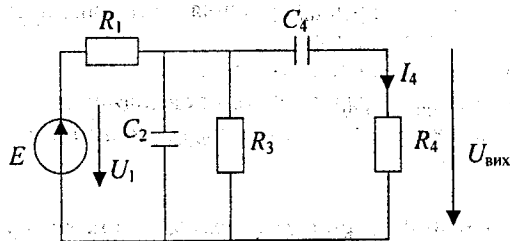


Рисунок 2.11

$$U_{\text{вих}}(p) = I_4(p) R_4.$$

$I_4(p)$ виразимо через елементи кола та E , скориставшись методом еквівалентного генератора струму

$$I_4(p) = I_{\text{КЗ}}(p) \frac{Y_4(p)}{Y_i(p) + Y_4(p)}$$

$$I_{\text{КЗ}}(p) = \frac{E}{R_1}; \quad Y_i(p) = \frac{1}{R_1} + pC_2 + \frac{1}{R_3} = \frac{R_1 + R_3 + pR_1R_3C_2}{R_1R_3};$$

$$Y_u(p) = \frac{1}{R_4 + \frac{1}{pC_4}} = \frac{pC_4}{pR_4C_4 + 1} = \frac{pR_4R_4C_4 + R_1 + pR_3R_4C_4 + R_3 + p^2R_1R_3R_4C_2C_4}{R_1R_3(pR_4C_4 + 1)}$$

$$I_4(p) = \frac{E}{R_1} \frac{pC_4}{pR_4C_4 + 1} \frac{pR_1R_3C_2 + pR_1R_3C_4}{R_1R_3(pR_4C_4 + 1)} \frac{R_1R_3(pR_4C_4 + 1)}{p^2R_1R_3R_4C_2C_4 + p(R_1R_4C_4 + R_3R_4C_4 + R_1R_3C_2 + R_1R_3C_4) + R_1 + R_3}$$

Знаходимо вихідну напругу

$$U_{\text{вих}}(p) = I_4(p)R_4 = \frac{EpR_3R_4C_4}{p^2R_1R_3R_4C_2C_4 + p(R_1R_4C_4 + R_3R_4C_4 + R_1R_3C_2 + R_1R_3C_4) + R_1 + R_3};$$

коефіцієнт передачі в операторній формі

$$K_u(p) = \frac{U_{\text{вих}}(p)}{E} = \frac{pR_3R_4C_4}{p^2R_1R_3R_4C_2C_4 + p(R_1R_4C_4 + R_3R_4C_4 + R_1R_3C_2 + R_1R_3C_4) + R_1 + R_3}$$

Підставляємо значення елементів схеми і одержуємо:

$$K_u(p) = \frac{p3 \cdot 10^{-6}}{p^23 \cdot 10^{-13} + p7,5 \cdot 10^{-6} + 30} \quad (2.22)$$

Знаходимо комплексний коефіцієнт передачі кола, замінивши в виразі (2.22) p на $j\omega$:

$$\begin{aligned} K_u(j\omega) &= \frac{j\omega3 \cdot 10^{-6}}{(j\omega)^23 \cdot 10^{-13} + j\omega7,5 \cdot 10^{-6} + 30} = \frac{j\omega3 \cdot 10^{-6}}{-\omega^23 \cdot 10^{-13} + j\omega7,5 \cdot 10^{-6} + 30} = \\ &= \frac{j\omega3 \cdot 10^{-6}}{(30 - \omega^23 \cdot 10^{-13}) + j\omega7,5 \cdot 10^{-6}} = \frac{\omega3 \cdot 10^{-6}}{\omega7,5 \cdot 10^{-6} - j(30 - \omega^23 \cdot 10^{-13})} = \\ &= \frac{3 \cdot 10^{-6}\omega}{\sqrt{(\omega7,5 \cdot 10^{-6})^2 + (30 - \omega^23 \cdot 10^{-13})^2}} \cdot e^{-j \arctg\left(\frac{30 - \omega^23 \cdot 10^{-13}}{\omega7,5 \cdot 10^{-6}}\right)} = \\ &= \frac{3 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{(\omega \cdot 7,5 \cdot 10^{-6})^2 + (30 - \omega^2 \cdot 3 \cdot 10^{-13})^2}} \cdot e^{-j \arctg\left(\frac{30 - \omega^2 \cdot 3 \cdot 10^{-13}}{\omega \cdot 7,5 \cdot 10^{-6}}\right)} = \\ &= \frac{3 \cdot 10^{-6} \cdot \omega}{\sqrt{(\omega \cdot 7,5 \cdot 10^{-6})^2 + (30 - \omega^2 \cdot 3 \cdot 10^{-13})^2}} \cdot e^{j \arctg\left(\frac{30 - \omega^2 \cdot 3 \cdot 10^{-13}}{\omega \cdot 7,5 \cdot 10^{-6}}\right)} \end{aligned}$$

З виразу (2.23) визначаємо АЧХ і ФЧХ кола:

$$K(\omega) = \frac{3 \cdot 10^{-6} \omega}{\sqrt{\omega^2 \cdot 5,625 \cdot 10^{-11} + (30 - \omega^2 \cdot 3 \cdot 10^{-13})^2}}; \quad (2.24)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg\left(\frac{30 - \omega^2 \cdot 3 \cdot 10^{-13}}{\omega \cdot 7.5 \cdot 10^{-6}}\right). \quad (2.25)$$

За виразами (2.24) і (2.25), складаємо таблицю 2.1. і будемо графіки АЧХ і ФЧХ (рис.2.12 і рис. 2.13 відповідно).

Таблиця 2.1.

$\omega, \text{рад/с}$	0	$1 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^7$
$K(\omega)$	0	0,4	0,343	0,274	0,222	0,185	0,158
$\varphi(\omega), ^\circ$	90	-74,476	-82,694	-85,183	-86,401	-87,126	-87,607

Продовження табл. 2.1

$\omega, \text{рад/с}$	$7 \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^7$	$9 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^8$	$1,2 \cdot 10^8$	$1,4 \cdot 10^8$	$1,6 \cdot 10^8$
$K(\omega)$	0,137	0,121	0,108	0,098	0,082	0,071	0,062
$\varphi(\omega), ^\circ$	87,95	88,207	88,407	88,566	88,806	88,976	89,104

Продовження табл. 2.1

$\omega, \text{рад/с}$	$1,8 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^8$	$3,5 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^8$
$K(\omega)$	0,055	0,05	0,04	0,033	0,029	0,025
$\varphi(\omega), ^\circ$	89,204	-89,284	-89,427	-89,522	-89,642	-89,682

Продовження табл. 2.1

$\omega, \text{рад/с}$	$4,5 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^8$	$5,5 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^8$	$8 \cdot 10^8$
$K(\omega)$	0,022	0,02	0,018	0,017	0,014	0,012
$\varphi(\omega), ^\circ$	-89,714	-89,284	-89,427	-89,522	-89,591	-89,821

Продовження табл. 2.1

$\omega, \text{рад/с}$	$9 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^9$
$K(\omega)$	0,011	0,00998
$\varphi(\omega), ^\circ$	-89,841	-89,857

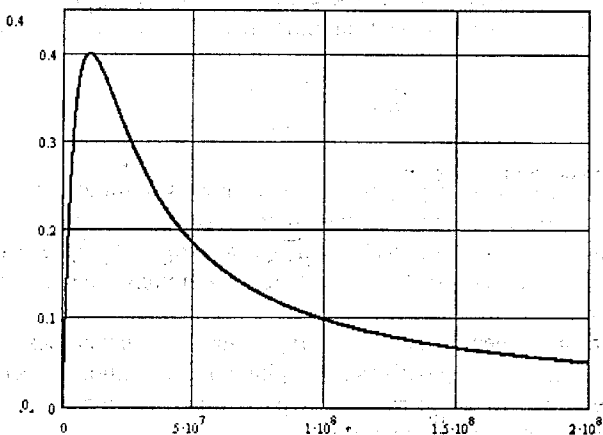


Рисунок 2.12 – Амплітудно-частотна характеристика досліджуваного кола

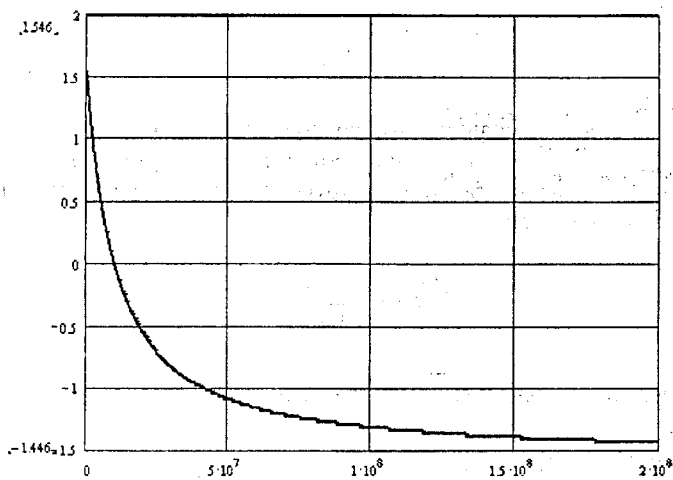


Рисунок 2.13 – Фазо-частотна характеристика досліджуваного кола

2.9 Перехідна характеристика

Перехідні характеристики лінійних електричних кіл є їх реакцією на одиничний стрибок, що діє на вході кола. Якщо на вході чотириполюсника діє напруга у вигляді одиничного стрибка $1(t)$, то

вихідна напруга є перехідною характеристикою. Перехідна характеристика $h(t)$ визначається як відношення вихідної напруги до одиничного стрибка напруги:

$$h(t) = \frac{u_{\text{вих}}(t)}{1(t)}. \quad (2.26)$$

Експериментально перехідну характеристику лінійного електричного кола $h(t)$ можна одержати на екрані осцилографа, якщо подати на вхід кола прямокутний імпульс напруги, тривалість якого t_i набагато більша постійної часу кола τ (тобто $t_i \gg \tau$), а напругу з виходу кола подати на вхід осцилографа.

Аналітично перехідна характеристика визначається під час вирішення інтегро-диференціального рівняння лінійного електричного кола. Результат знаходиться операторним методом. Перехідна характеристика – функція безрозмірна.

Якщо на вході кола діє одиничний стрибок напруги $1(t)$, а на виході визначається часова функція струму то реакцією кола буде перехідна провідність $y(t)$:

$$y(t) = \frac{i_{\text{вих}}(t)}{1(t)}. \quad (2.27)$$

Перехідна провідність вимірюється в сименсах.

Якщо на вході діє одиничний стрибок струму $1_i(t)$, а на виході визначається часова функція напруги $U_{\text{вих}}(t)$, то реакцією кола буде перехідний опір $Z(t)$:

$$Z(t) = \frac{u_{\text{вих}}(t)}{1_i(t)}. \quad (2.28)$$

Перехідний опір вимірюється в омах.

Приклад 2.4

Визначимо перехідну характеристику лінійного електричного кола, зображеного на рис.2.14. Складемо диференціальне рівняння кола.

Якщо на вході діє одиничний стрибок напруги $1(t)$, то за другим законом Кірхгофа:

$$L \frac{di}{dt} + iR = 1(t), \quad (2.29)$$

де i – струм, що тече в колі під дією одиничного стрибка напруги.

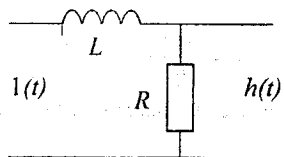


Рисунок 2.14 – Коло LR

Розв'язок рівняння (2.29) дорівнює сумі загального розв'язку однорідного рівняння і окремого розв'язку неоднорідного рівняння:

$$i = i_{\text{вл}} + i_{\text{пр}}, \quad (2.30)$$

де $i_{\text{вл}}$ – вільна складова струму;

$i_{\text{пр}}$ – примусова складова струму.

Однорідне рівняння для вільної складової має вигляд

$$L \frac{di_{\text{вл}}}{dt} + Ri_{\text{вл}} = 0. \quad (2.31)$$

На підставі (2.31) записуємо характеристичне рівняння:

$$Lp + R = 0,$$

звідки:

$$p = -\frac{R}{L} = -\frac{1}{\tau},$$

де $\tau = \frac{L}{R}$ – постійна часу кола.

Загальний розв'язок в цьому випадку дорівнює:

$$i_{\text{вл}} = Ae^{pt} = Ae^{-t/\tau},$$

де A – постійна інтегрування.

Примусова складова струму $i_{\text{пр}}$ може бути визначена для кола в стаціонарному режимі (через нескінченно великий час після початку вхідної дії). Оскільки на вході кола в цей час діє постійна напруга, то на струм впливає тільки активний опір R :

$$i_{\text{пр}} = \frac{l(t)}{R}. \quad (2.32)$$

Аналітичний вираз струму в колі має вигляд:

$$i = \frac{1(t)}{R} + Ae^{-t/\tau} \quad (2.33)$$

Постійну інтегрування A визначаємо з початкової умови, якщо: $t = 0$
 $i(0) = 0$.

З врахуванням початкових умов вираз (2.33) буде таким:

$$0 = \frac{1(t)}{R} + A \quad (2.34)$$

З (2.34) знаходимо:

$$A = -\frac{1(t)}{R}$$

Значення A підставляємо в (2.33):

$$i = \frac{1(t)}{R} - \frac{1(t)}{R} e^{-t/\tau} = \frac{1(t)}{R} (1 - e^{-t/\tau})$$

Вихідна напруга:

$$U_{\text{вих}}(t) = iR = 1(t)(1 - e^{-t/\tau})$$

Знайдене значення $U_{\text{вих}}(t)$ підставляємо в (2.26):

$$h(t) = \frac{1(t)(1 - e^{-t/\tau})}{1(t)} = 1 - e^{-t/\tau}$$

Задаємось значеннями t і будуємо графік $h(t)$ (рис.2.15)

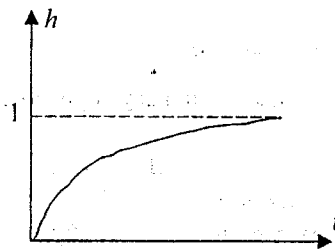


Рисунок 2.15 – Графік перехідної характеристики

Приклад 2.5

Визначимо перехідну характеристику операторним методом.

Операторна перехідна характеристика кола

$$h(p) = \frac{K(p)}{p}, \quad (2.35)$$

де $K(p)$ - операторний коефіцієнт передачі електричного кола.

Знаходимо операторний коефіцієнт передачі кола рис.2.14.

$$K(p) = \frac{U_{\text{вих}}(p)}{U_1(p)}. \quad (2.36)$$

Знаходимо $U_{\text{вих}}(p)$, але спочатку необхідно знайти комплексний опір кола, операторний опір $z(p)$, струм $I(p)$ та вихідну напругу $U_{\text{вих}}(p)$.

Комплексний опір:

$$Z(j\omega) = R + j\omega L. \quad (2.37)$$

В виразі (2.37) $j\omega$ замінюємо на p і одержуємо операторний опір:

$$Z(p) = R + pL. \quad (2.38)$$

Знаходимо струм $I(p)$:

$$I(p) = \frac{U_1}{Z(p)} = \frac{U_1}{R + pL}$$

і вихідну напругу $U_{\text{вих}}(p)$:

$$U_{\text{вих}} = I(p)R = \frac{U_1 R}{R + pL}$$

Останній вираз підставляємо в (2.36):

$$K(p) = \frac{R}{R + pL}. \quad (2.39)$$

Знаходимо остаточно операторну перехідну характеристику:

$$h(p) = \frac{K(p)}{p} = \frac{R}{p(R + pL)} = \frac{N(p)}{pM(p)}. \quad (2.40)$$

Оригінал перехідної характеристики знайдемо з допомогою формули розкладання. Для виразу (2.40) вона матиме вигляд:

$$h(t) = \frac{N(0)}{M(0)} + \frac{N(p)}{pM'(p)} \cdot e^{pt}, \quad (2.41)$$

де $N(0)$ – значення виразу $N(p)$, якщо $p = 0$;
 $M(0)$ – значення виразу $M(p)$, якщо $p = 0$;
 $M'(p)$ – значення похідної від $M(p)$;
 p – корінь рівняння $M(p) = 0$.

Знаходимо p :

$$R + pL = 0; \quad p = -\frac{R}{L} = -1/\tau.$$

Визначаємо складові виразу (2.41)

$$N(0) = R; \quad M(0) = R; \quad M'(p) = L$$

і остаточно його значення:

$$h(t) = \frac{R}{R} + \frac{R}{-R/L} e^{-\frac{R}{L}t} = 1 - e^{-t/\tau}. \quad (2.42)$$

Вираз (2.42) повністю збігається з виразом, одержаним класичним методом.

Операторний метод має значні переваги перед класичним під час аналізу складних кіл.

Якщо зображення розшукуваного струму чи напруги має вигляд раціонального дробу:

$$\frac{N(p)}{M(p)} = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m}{p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n} \quad (2.43)$$

до того ж многочлени (відносно p) $N(p)$ і $M(p)$ відповідають таким умовам: степінь $N(p)$ менша степені $M(p)$, a_k і b_k – дійсні числа, а корені p_1, p_2, \dots, p_n рівняння $M(p) = 0$ різні, то оригінал визначається виразом

$$f(t) = \sum_{k=1}^n \frac{N(p_k)}{M'(p_k)} e^{p_k t}. \quad (2.44)$$

Якщо зображення має вигляд:

$$F(p) = \frac{N(p)}{p(M(p))},$$

то оригінал визначається виразом:

$$f(t) = \frac{N(0)}{M(0)} + \sum_{k=1}^n \frac{N(p_k)}{p_k \cdot M'(p_k)} e^{p_k t}. \quad (2.45)$$

Якщо серед коренів $M(p)=0$ є комплексно-спряжені корені \dot{p}_k і p_k^* , то під час визначення відповідних їм значень, що знаходяться під знаком суми в рівняннях (2.44) і (2.45) достатньо визначити складову для одного з цих коренів, наприклад p_k , а для спряженого кореня p_k^* необхідно взяти спряжене значення цієї складової. Сума, що відповідає цим двом доданкам, дорівнює подвоєному значенню дійсної частини, знайденої для одного з коренів. Якщо коренів тільки два \dot{p}_1 і p_2^* ; то оригінал знайдеться з виразу:

$$f(t) = 2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{N(\dot{p}_1)}{M'(\dot{p}_1)} e^{\dot{p}_1 t} \right\}, \quad (2.46)$$

$$\text{якщо } F(p) = \frac{N(p)}{M(p)}.$$

Приклад 2.4

Знаходимо операторну перехідну характеристику кола рис. 2.11. Для цього скористаємось одержаним в п. 2.8. виразом для $K(p)$.

$$h(p) = K(p)/p = \frac{p \cdot 3 \cdot 10^{-6}}{p(p^2 \cdot 3 \cdot 10^{-13} + p \cdot 7.5 \cdot 10^{-6} + 30)} = \frac{3 \cdot 10^{-6}}{p^2 \cdot 3 \cdot 10^{-13} + p \cdot 7.5 \cdot 10^{-6} + 30} = \frac{N(p)}{M(p)}. \quad (2.47)$$

Знаходимо корені знаменника виразу (2.47)

$$M(p) = p^2 \cdot 3 \cdot 10^{-13} + p \cdot 7.5 \cdot 10^{-6} + 30 = 0, \\ p^2 + p \cdot 2.5 \cdot 10^7 + 10^{14} = 0$$

$$P_{1,2} = -12.5 \cdot 10^6 \pm \sqrt{1.5625 \cdot 10^{14} - 10^{14}} = -12.5 \cdot 10^6 \pm 7.5 \cdot 10^6 \\ P_1 = -5 \cdot 10^6; \quad P_2 = -20 \cdot 10^6;$$

Оскільки

$$h(p) = \frac{N(p)}{M(p)},$$

а корені знаменника дійсні, від'ємні і різні, формула розкладання матиме вигляд:

$$h(t) = \frac{N(p_1)}{M'(p_1)} e^{p_1 t} + \frac{N(p_2)}{M'(p_2)} e^{p_2 t}. \quad (2.48)$$

$$\text{де: } N(p_1) = N(p_2) = 3 \cdot 10^6,$$

$$M(p) = p \cdot 6 \cdot 10^{-13} + 7,5 \cdot 10^{-6},$$

$$M'(p_1) = -5 \cdot 10^6 \cdot 6 \cdot 10^{-13} + 7,5 \cdot 10^{-6} = 4,5 \cdot 10^{-6},$$

$$M'(p_2) = -20 \cdot 10^6 \cdot 6 \cdot 10^{-13} + 7,5 \cdot 10^{-6} = -4,5 \cdot 10^{-6}.$$

Підставимо одержані значення в вираз (2.48)

$$h(t) = \frac{3 \cdot 10^{-6}}{4,5 \cdot 10^{-6}} \cdot e^{-5 \cdot 10^6 t} + \frac{3 \cdot 10^{-6}}{-4,5 \cdot 10^{-6}} \cdot e^{-20 \cdot 10^6 t} = 0,667 \cdot e^{-5 \cdot 10^6 t} - 0,667 \cdot e^{-20 \cdot 10^6 t} \quad (2.49)$$

З виразу (2.49) розраховуємо значання $h(t)$ в межах часу $t = 0 \div 1,5 \cdot 10^{-6}$ с. Результати розрахунку заносимо в табл. 2.2 та будемо графік рис. 2.16.

Таблиця 2.2.

t, c	0	$1 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-8}$
$h(t)$	0	0,088	0,156	0,208	0,246	0,274	0,293	0,306

Продовження таблиці 2.2

t, c	$8 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$
$h(t)$	0,312	0,315	0,314	0,306	0,291	0,273	0,253	0,233

Продовження таблиці 2.2

t, c	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$4,5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$5,5 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-7}$
$h(t)$	0,187	0,147	0,115	0,09	0,07	0,055	0,043	0,033

Продовження таблиці 2.2

t, c	$6,5 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-7}$	$7,5 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$8,5 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-7}$
$h(t)$	0,026	0,02	0,016	0,012	$9,514 \cdot 10^{-3}$	$7,41 \cdot 10^{-3}$

Продовження таблиці 2.2

t, c	$9,5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$
$h(t)$	$5,771 \cdot 10^{-3}$	$4,494 \cdot 10^{-3}$	$3,028 \cdot 10^{-3}$	0

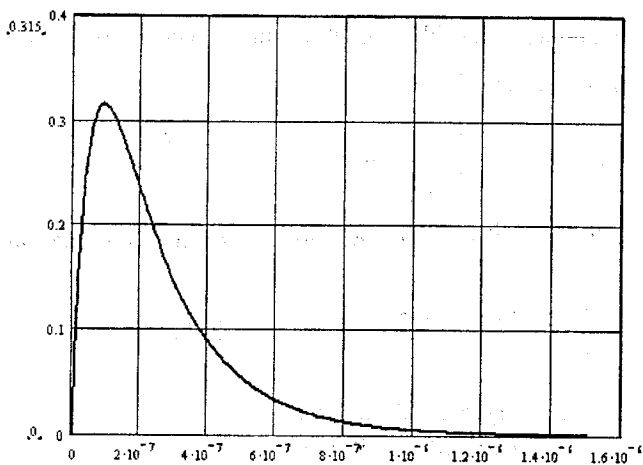


Рисунок 2.16 – Графік перехідної характеристики

2.10 Спектральний аналіз електричних сигналів

2.10.1 Спектральний аналіз періодичних сигналів

Періодичний сигнал можна подати сумою гармонічних коливань, кожне з яких має свою амплітуду, частоту і початкову фазу. Спектр періодичного сигналу графічно зображується двома спектральними діаграмами: амплітуд (амплітудний спектр) і початкових фаз (фазовий спектр) гармонік.

Спектр періодичних сигналів визначається з допомогою ряду Фур'є. Якщо математична функція, що відображує періодичний сигнал, відповідає умовам Діріхле, то сигнал $s(t)$ може бути розкладений на гармонічні складові (гармоніки):

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_n \cos n \Omega_1 t + b_n \sin n \Omega_1 t), \quad (2.50)$$

де $\frac{a_0}{2}$ - постійна складова сигналу;

$\Omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ - частота першої гармоніки;

T - період сигналу;

n - номер гармонічної складової (може бути тільки цілим числом).

Під $s(t)$ тут розуміють миттєві значення струму, напруги, напруженості електромагнітного поля і т. ін. Як впливає з виразу (2.50),

спектр періодичного сигналу є дискретним. Коефіцієнти ряду $\frac{a_0}{2}$, a_n і b_n визначаються з формул:

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) dt, \quad a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) \cos n \Omega_1 t dt, \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) \sin n \Omega_1 t dt. \quad (2.51)$$

Значно зручнішим і нагляднішим є другий вид розкладання в ряд Фур'є:

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin(n\Omega_1 t + \Psi_n) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \cos(n\Omega_1 t - \chi_n),$$

де A_{mn} - амплітуда n -ї гармоніки;

Ψ_n - початкова фаза n -ї синусної гармоніки;

χ_n - початкова фаза n -ї косинусної гармоніки.

Амплітуда і початкові фази гармонік дорівнюють:

$$A_{mn} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad \Psi_n = \arctg \frac{a_n}{b_n}, \quad \chi_n = \arctg \frac{b_n}{a_n}. \quad (2.52)$$

В багатьох випадках використовується комплексний ряд Фур'є

$$s(t) = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{S}_{mn} e^{jn\Omega_1 t}, \quad (2.53)$$

де \dot{S}_{mn} - комплексна амплітуда комплексного ряду Фур'є.

Комплексна амплітуда комплексного ряду Фур'є:

$$\dot{S}_{mn} = a_n - jb_n = S_{mn} e^{-j\chi_n}, \quad (2.54)$$

де $S_{mn} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ - модуль комплексної амплітуди комплексного ряду Фур'є, дорівнює A_{mn} ;

$\chi_n = \arctg \frac{b_n}{a_n}$ - аргумент комплексної амплітуди комплексного ряду

Фур'є.

Для побудови спектральних діаграм періодичних сигналів необхідно використати значення A_{mn} , Ψ_n і χ_n .

Якщо періодичний сигнал має той чи інший вид симетрії, то розкладання в ряд Фур'є спрощується. Окрім цього, під час знаходження коефіцієнтів ряду та постійної складової симетричних сигналів необхідно інтегрувати на половині періоду і помножити результат на два.

Якщо ж сигнал $s(t)$ протягом періоду має різні аналітичні вирази (рис.2.17), під час розрахунку коефіцієнтів ряду інтегрування проводиться по окремих частинах періоду, що відповідають різним аналітичним виразам.

Наприклад:

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \left(\int_0^{t_1} s_1(t) dt + \int_{t_1}^T s_2(t) dt \right). \quad (2.55)$$

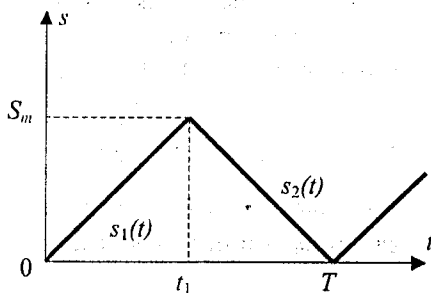


Рисунок 2.17 – Складний періодичний сигнал

2.10.2 Спектральний аналіз неперіодичних сигналів

2.10.2.1 Спектральний аналіз з використанням прямого перетворення Фур'є

Суть спектрального аналізу за Фур'є полягає в заміні заданої функції часу сумою нескінченно великої кількості гармонічних коливань, амплітуди яких нескінченно малі, а аргументи сусідніх гармонік відрізняються на нескінченно мале значення.

На практиці використовувати нескінченно малі величини незручно, тому для аналізу неперіодичних сигналів використовують формулу прямого перетворення Фур'є:

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (2.56)$$

де $S(j\omega)$ - спектральна густина досліджуваного неперіодичного сигналу;

$s(t)$ – аналітичний вираз досліджуваного неперіодичного сигналу.

Застосувавши формулу Ейлера, вираз (2.56) приводиться до алгебраїчної форми комплексного числа:

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) (\cos \omega t - j \sin \omega t) dt =$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cos \omega t dt - j \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \sin \omega t dt = S_{\delta}(\omega) - j S_{\nu}(\omega). \quad (2.57)$$

Маючи дійсну і уявну складові спектральної густини, можна перетворити її в показникову форму:

$$S(j\omega) = S(\omega) e^{j\psi(\omega)}, \quad (2.58)$$

де $S(\omega)$ і $\psi(\omega)$ - спектральні характеристики сигналу (відповідно модуль і аргумент спектральної густини).

Модуль спектральної густини та її аргумент знаходяться за формулами:

$$S(\omega) = \sqrt{S_{\delta}^2(\omega) + S_{\nu}^2(\omega)}, \quad \psi(\omega) = \arctg \frac{S_{\nu}(\omega)}{S_{\delta}(\omega)}. \quad (2.59)$$

Під час розрахунку $S(\omega)$ і $\psi(\omega)$ необхідно задатись рядом значень $\omega = (\omega_1 \div 20\omega_1)$, а значення ω_1 знайти з такого виразу:

$$\omega_1 = \frac{\pi}{5t_i}, \quad (2.60)$$

де t_i - тривалість імпульсу.

2.10.2.2 Спектральний аналіз операторним методом

Операторний метод може бути застосований двома способами:

а) з використанням прямого перетворення Лапласа:

$$S(p) = \int_0^{\infty} s(t) e^{-pt} dt, \quad (2.61)$$

де $p = c + j\omega$ - оператор Лапласа;

б) з використанням операторних зображень за Лапласом найбільш часто живаних простих електротехнічних функцій, для яких складені таблиці.

Другим способом досліджуваний складний неперіодичний сигнал потрібно розкласти на прості функції часу (рис.2.18).

Перший сигнал описується виразом:

$$e_1(t) = \frac{E_m}{t_1} t \cdot 1(t).$$

Його зображення за Лапласом:

$$E_1(p) = \frac{E_m}{t_1 p^2}.$$

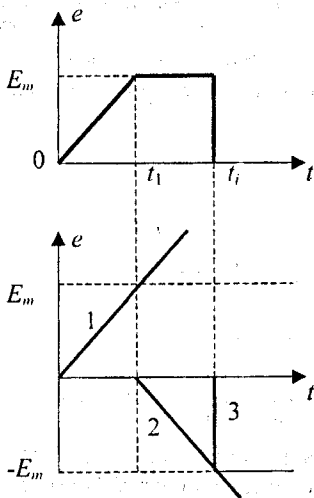


Рисунок 2.18 – Розкладення складного неперіодичного сигналу на прості функції часу

Другий сигнал описується виразом:

$$e_2(t) = -\frac{E_m}{t_1} \cdot 1(t - t_1).$$

Його зображення за Лапласом:

$$E_2(p) = -\frac{E_m}{t_1 p^2} e^{-pt_1}$$

Третій сигнал описується виразом:

$$e_3(t) = -E_m 1(t - t_i),$$

а його зображення за Лапласом:

$$E_3(p) = -\frac{E_m}{p} e^{-pt_i}$$

За принципом суперпозиції зображення всього складного сигналу дорівнює сумі зображень його складових:

$$E(p) = E_1(p) + E_2(p) + E_3(p). \quad (2.62)$$

У виразі (2.62) оператор p можна замінити на $j\omega$, якщо сигнал діє на додатній напівосі часу. Після цього одержане значення $E(j\omega)$ перетворюється спочатку в алгебраїчну форму, а далі за алгоритмом, описаним в пункті 2.10.2.1.

2.11 Методи дослідження реакції кола на складну вхідну дію

Найбільш часто використовують три методи дослідження реакції кола на складну вхідну дію: спектральний, операторний, часовий.

2.11.1 Спектральний метод

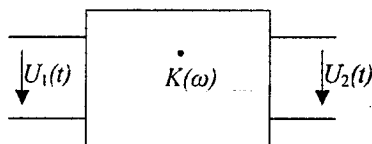


Рисунок 2.19 – Лінійне коло у вигляді чотириполюсника

Під час розв'язання задачі аналізу спектральним методом повинен бути відомий комплексний коефіцієнт передачі кола $K(j\omega)$ (рис.2.19).

Вхідна дія розкладається на елементарні сигнали, що є гармонічними коливаннями з різними амплітудами, частотами і початковими фазами.

Якщо вхідна дія є неперіодичною, то амплітуда елементарного гармонічного коливання в спектрі сигналу визначається через спектральну густину. Для вхідної дії амплітуда елементарного гармонічного коливання дорівнює:

$$d\dot{U}_1 = \frac{1}{\pi} S_1(j\omega) d\omega,$$

де $S(j\omega)$ – спектральна густина вхідного сигналу, визначена за допомогою прямого перетворення Фур'є:

$$S_1(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u_1(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (2.63)$$

Оскільки комплексний коефіцієнт передачі електричного кола \dot{K}_u дорівнює відношенню комплексних амплітуд на виході і на вході кола і визначається формулою (2.21), то елементарна амплітуда в спектрі вихідного сигналу $d\dot{U}_2$ визначається за формулою:

$$d\dot{U}_2 = \dot{K}_u d\dot{U}_1 = \dot{K}_u \frac{1}{\pi} S_1(j\omega) d\omega,$$

$$d\dot{U}_2 = \frac{1}{\pi} S_2(j\omega) d\omega,$$

$$S_2(j\omega) = S_1(j\omega) \dot{K}_u, \quad (2.64)$$

де $S_2(j\omega)$ - спектральна густина реакції кола.

Отже спектральна густина реакції кола $S_2(j\omega)$ дорівнює добутку спектральної густини вхідної дії $S_1(j\omega)$ на комплексний коефіцієнт передачі кола K . Записуючи комплексні величини, що входять в рівняння (2.64), в показниковій формі одержуємо:

$$S_2(\omega) e^{j\psi_2(\omega)} = S_1(\omega) e^{j\psi_1(\omega)} K(\omega) e^{j\varphi(\omega)},$$

$$S_2(\omega) e^{j\psi_2(\omega)} = S_1(\omega) K(\omega) e^{j[\psi_1(\omega) + \varphi(\omega)]}. \quad (2.65)$$

Прирівнюємо модулі комплексних величин в виразі (2.65):

$$S_2(\omega) = S_1(\omega) K(\omega). \quad (2.66)$$

Модуль спектральної густини реакції кола $S_2(j\omega)$ дорівнює добутку модулів спектральної густини вхідної дії і комплексного коефіцієнта передачі кола.

Прирівнюємо аргументи комплексних величин в рівнянні (2.65)

$$\psi_2(\omega) = \psi_1(\omega) + \varphi(\omega). \quad (2.67)$$

Аргумент спектральної густини реакції кола дорівнює сумі аргументів спектральної густини вхідної дії і комплексного коефіцієнта передачі кола.

Визначивши $S_2(j\omega)$, застосуємо зворотнє перетворення Фур'є на виході кола:

$$s_2(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_2(j\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (2.68)$$

2.11.2 Операторний метод

Під час розв'язання задачі аналізу операторним методом повинен бути відомим коефіцієнт передачі кола в операторній формі $K(p)$ (рис.2.20).

Вхідна дія розбивається на елементарні сигнали, що є згасаючими коливаннями. Це еквівалентно перетворенню вхідної дії за Лапласом:

$$U_1(p) = \int_0^{\infty} u_1(t) e^{-pt} dt, \quad (2.69)$$

де $p = c + j\omega$ – оператор Лапласа (якщо $c = 0$, $p = j\omega$).

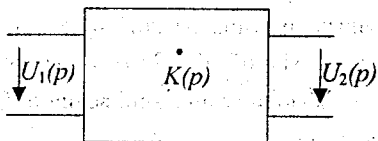


Рисунок 2.20 – Лінійне коло у вигляді чотириполюсника

На згасання коливань вказує множник e^{-ct} , що знаходиться в множителі $e^{-pt} = e^{-ct} \cdot e^{-j\omega t}$ підінтегральної функції. Потім знаходиться реакція кола на кожний елементарний сигнал, тобто зображення вихідного сигналу за Лапласом.

$$U_2(p) = U_1(p) \cdot K(p) \quad (2.70)$$

Для додавання всіх елементарних сигналів на виході кола застосовуємо зворотне перетворення Лапласа до зображення $U_2(p)$:

$$u_2(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} U_2(p) e^{pt} dp \quad (2.71)$$

Значно швидше можна досягти мети, розбивши вхідну дію на складові ($e_{11}(t)$, $e_{12}(t)$... $e_{1n}(t)$), що мають табличні зображення за Лапласом (рис. 2.19).

Складові вхідного сигналу:

$$e_{11}(t) = \frac{E_m}{t_i} t \cdot 1(t);$$

$$e_{12}(t) = \left(-\frac{E_m}{t_i} t + 0,5 E_m\right) \cdot 1\left(t - \frac{t_i}{2}\right);$$

$$e_{13}(t) = 0,5 E_m \cdot 1\left(t - \frac{t_i}{2}\right);$$

$$e_{14}(t) = -E_m \cdot 1\left(t - t_i\right).$$

Зображення за Лапласом цих складових:

$$E_{11}(p) = \frac{E_m}{t_i p^2};$$

$$E_{12}(p) = -\frac{E_m}{t_i p^2} \cdot e^{-p \frac{t_i}{2}};$$

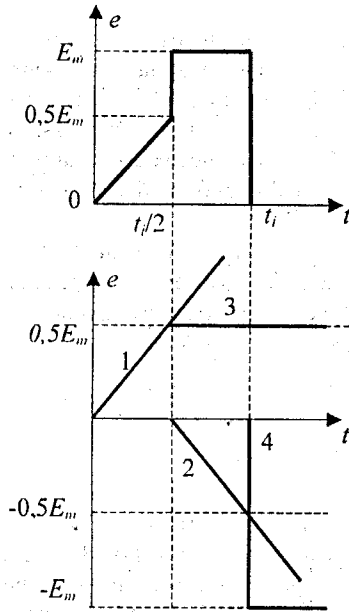


Рисунок 2.21

$$E_{13}(p) = \frac{E_m}{2p} \cdot e^{-p \frac{t_i}{2}};$$

$$E_{14}(p) = -\frac{E_m}{p} \cdot e^{-p t_i}.$$

Після цього знаходимо реакцію кола на кожну складову в операторній формі:

$$\begin{aligned} U_{21}(p) &= E_{11}(p)K(p); \quad U_{22}(p) = E_{12}(p)K(p); \\ U_{23}(p) &= E_{13}(p)K(p); \quad U_{24}(p) = E_{14}(p)K(p). \end{aligned} \quad (2.72)$$

Знаходимо зображення реакції кола за принципом суперпозиції:

$$U_2(p) = U_{21}(p) + U_{22}(p) + U_{23}(p) + U_{24}(p) \quad (2.73)$$

Застосувавши до виразу (2.60) формулу розкладання, знаходимо $u_2(t)$.

2.11.3 Часовий метод

Під час розв'язання задачі аналізу часовим методом повинна бути відома одна з часових характеристик кола ($h(t)$ - перехідна характеристика або ж $g(t)$ - імпульсна характеристика). В залежності від того, яка з часових характеристик кола відома, використовують два варіанти розв'язання задачі аналізу. Нехай відома перехідна характеристика $h(t)$ кола (рис.2.22,а) (яку, до речі, необхідно знайти в одному з пунктів курсової роботи).

В цьому випадку вхідна напруга $u_1(t)$ наближено замінюється сумою стрибків напруги (рис.2.22,б). Кожен зі стрибків зсунутий відносно сусіднього на один і той же час $\Delta\tau$. Моменти стрибків позначені $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$..

Вхідна напруга при цьому дорівнює :

$$u_1(t) \approx U_1(0) \cdot 1(t) + \Delta_1 U_1(\tau_1) \cdot 1(t - \tau_1) + \Delta_2 U_1(\tau_2) \cdot 1(t - \tau_2) + \dots \quad (2.74)$$

$$\dots + \Delta_k U_1(\tau_k) \cdot 1(t - \tau_k) + \dots$$

Знак наближеної рівності стоїть тому, що ступінчаста напруга, що утворена з стрибків, відрізняється від дійсної. Зменшуючи часові інтервали $\Delta\tau$ і тим самим збільшуючи кількість стрибків в визначеному інтервалі часу, можна збільшувати ступінь наближення ступінчастої напруги до дійсної.

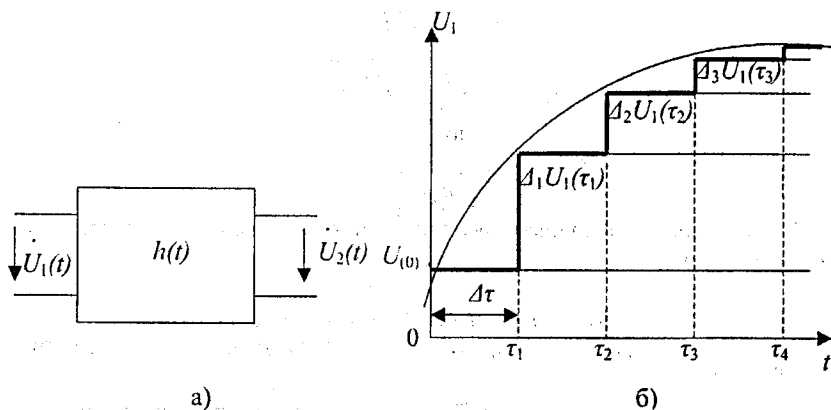


Рисунок 2.22 – Подання складної вхідної дії послідовністю стрибків напруги

Напруга на виході кола від кожного стрибка на вході визначається через перехідну характеристику кола $h(t)$:

$$\begin{aligned}
 \Delta_0 U_2(t) &= U_1(0) \cdot h(t), \\
 \Delta_1 U_2(t) &= \Delta_1 U_1(\tau_1) \cdot h(t - \tau_1), \\
 \Delta_2 U_2(t) &= \Delta_2 U_1(\tau_2) \cdot h(t - \tau_2), \\
 &\text{-----} \\
 \Delta_k U_2(t) &= \Delta_k U_1(\tau_k) \cdot h(t - \tau_k).
 \end{aligned}
 \tag{2.75}$$

Згідно з принципом суперпозиції вихідна напруга дорівнює сумі елементарних вихідних напруг, що визначаються з виразу (2.75):

$$u_2(t) \approx U_1(0)h(t) + \sum_k \Delta_k U_1(\tau_k)h(t - \tau_k). \tag{2.76}$$

Оскільки вхідна напруга $u_1(t)$ визначається за формулою (2.74) наближено, то вираз (2.76) також є наближеним. Для одержання точного виразу вихідної напруги домножимо і розділимо вираз під знаком суми на часовий проміжок $\Delta\tau$ і визначимо межу суми якщо $\Delta\tau \rightarrow 0$:

$$u_2(t) = U_1(0)h(t) + \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \sum_k \frac{\Delta_k U_1(\tau_k)}{\Delta\tau} h(t - \tau_k) \Delta\tau;$$

оскільки

$$\lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \sum_k \frac{\Delta_k U_1(\tau_k)}{\Delta\tau} = \frac{dU_1(\tau)}{d\tau} = U_1'(\tau);$$

$$\lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \sum_k f(\tau_k, t) \Delta\tau = \int_0^t f(\tau, t) d\tau$$

(індекс k опускаємо, бо він під час інтегрування не має сенсу), то

$$u_2(t) = U_1(0) h(t) + \int_0^t U_1'(\tau) h(t - \tau) d\tau, \tag{2.77}$$

де $U_1(0)$ - початкове значення вхідної напруги;

$U_1'(\tau) = \left. \frac{dU_1(t)}{dt} \right|_{t=\tau}$ - похідна вхідної напруги, в якій t змінено на τ ;

$h(t - \tau)$ - перехідна характеристика, в якій t замінено на $(t - \tau)$.

Вираз (2.77) називається формулою інтеграла Дюамеля. Є декілька різновидів цієї формули. Цей вираз дозволяє визначити відгук кола на відому дію на його вході.

Якщо вхідна напруга $u_1(t)$ має різні вирази на різних інтервалах часу (рис.2.23) і окрім того має або не має стрибків, то інтервал інтегрування

розбивається на окремі ділянки, а реакцію кола, що розраховується за інтегралом Дюамеля, записують для окремих інтервалів часу.

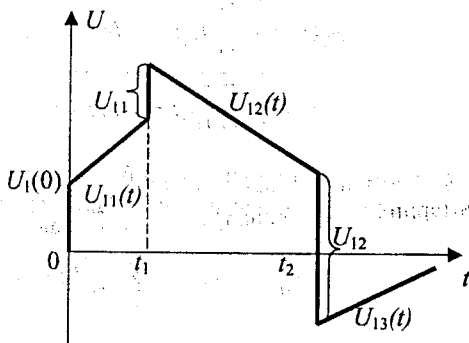


Рисунок 2.23 – Складна вхідна дія

Для напруги (рис.2.23) матимемо:

а) на першому інтервалі часу від 0 до t_1 (не включаючи стрибок U_{11})

$$u_2(t) = U_1(0)h(t) + \int_0^t u_1'(\tau)h(t-\tau)d\tau ; \quad (2.78)$$

б) на другому проміжку часу від t_1 до t_2 (не виключаючи стрибок U_{12}):

$$u_2(t) = U_1(0)h(t) + \int_0^{t_1} u_1'(\tau)h(t-\tau)d\tau + U_{11}h(t-t_1) + \int_{t_1}^t u_{12}'(\tau)h(t-\tau)d\tau ; \quad (2.79)$$

в) на третьому проміжку часу від t_2 до ∞ :

$$u_2(t) = U_1(0)h(t) + \int_0^{t_1} u_{11}'(\tau)h(t-\tau)d\tau + U_{11}h(t-t_1) + \int_{t_1}^{t_2} u_{12}'(\tau)h(t-\tau)d\tau - U_{12}h(t-t_2) + \int_{t_2}^t u_{13}'(\tau)h(t-\tau)d\tau , \quad (2.80)$$

де складова $-U_{12}h(t-t_2)$ обумовлена від'ємним стрибком вхідної напруги в момент t_2 .

Оскільки аналіз передбачає визначення вихідної напруги після закінчення вхідної дії, то необхідно користуватись виразами (2.78 - 2.80).

2.12 Моделювання АЧХ, ФЧХ і перехідної характеристики кола

Моделювання рекомендується виконувати за допомогою моделювальної програми Electronics Workbench (v.5.12.).

На панелі керування розміщені основні робочі вікна, за допомогою яких утворюється потрібна схема, під'єднуються генератор вхідного сигналу, вимірювач частотних характеристик і осцилограф.

З вікна Instruments вибираємо функціональний генератор (Function Generator) (рис.2.24).

Цей прилад дозволяє формувати гармонічний, трикутний і прямокутний сигнали. Для його роботи потрібно задати умовну робочу частоту (Frequency), необхідні амплітуду (Amplitude), робочий цикл (Duty cycle) і початкову фазу (Offset). Щоб одержати гармонічний сигнал та прямокутний імпульсний з шпаруватістю 2 робочий цикл має дорівнювати 50%.

З вікна Basic вибираємо необхідні електричні елементи кола, з яких формуємо електричну схему:

- а) опір (Resistor);
- б) ємність (Capacitor);
- в) індуктивність (Inductor).

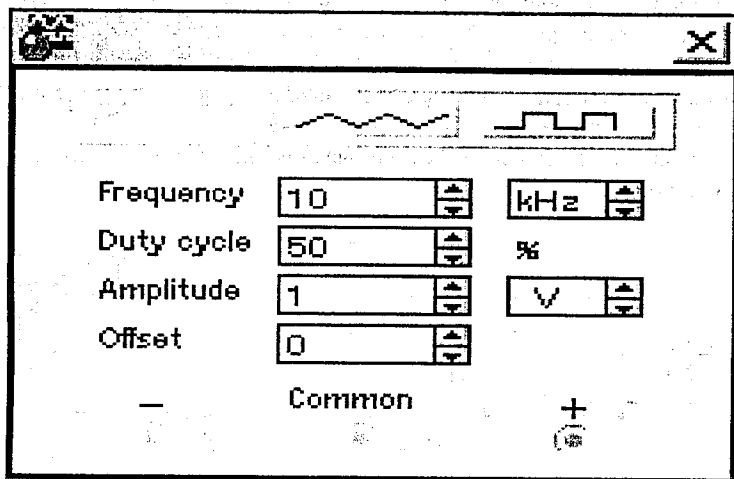


Рисунок 2.24 – Передня панель функціонального генератора

Для цього за допомогою маніпулятора “миша” наводимо курсор на потрібний елемент, натискаємо ліву клавішу маніпулятора і не відпускаючи її, переносимо потрібний елемент на набірне поле (основне робоче вікно). Аналогічним чином вибираємо всі потрібні елементи. Для

задання необхідних параметрів вибраному елементу потрібно навести на нього курсор і подвійно натиснути на ліву клавішу маніпулятора. Відкриється вікно властивостей елемента, в якому робимо відповідні зміни параметрів.

Щоб з'єднати між собою елементи в схему, необхідно маніпулятором підвести курсор до виводу елемента. При цьому на виводі утворюється жирна чорна точка. Натиснувши і не відпускаючи ліву клавішу маніпулятора (курсор при цьому зникає), ведемо лінію до виводу потрібного елемента (при з'єднанні на виводі другого елемента знову утворюється чорна жирна точка) і відпускаємо ліву клавішу.

Примітка. Утворена схема має бути обов'язково заземлена (вибрати вікно Sources з панелі інструментів, а потім взяти елемент "земля" – Ground).

З вікна Instruments вибираємо вимірювач частотних характеристик (ВЧХ) (Bode Plotter), переносимо його в основне робоче вікно і під'єднуємо до досліджуваної схеми (рис.2.25). Для того, щоб задати необхідні параметри ВЧХ, наводимо курсор в робочому вікні на нього і подвійно натискаємо на ліву клавішу. На екрані з'являється передня панель приладу, на якій, натиснувши клавішу Magnitude, одержимо вимірювач АЧХ (рис.2.26), натиснувши клавішу Phase, - вимірювач ФЧХ (рис.2.27):

Вертикальна (Vertical) і горизонтальна (Horizontal) осі вимірювача можуть бути задані в логарифмічному Log і лінійному Lin масштабах, який визначається початковим (*I*) та кінцевим (*F*) значеннями. Початкові і кінцеві значення вертикальних і горизонтальних масштабів попередньо необхідно встановити в максимальне значення і поступово зменшувати, щоб одержати оптимальне зображення графіка.

Запуск схеми, здійснюється одночасним натисканням клавіш Ctrl+G на клавіатурі.

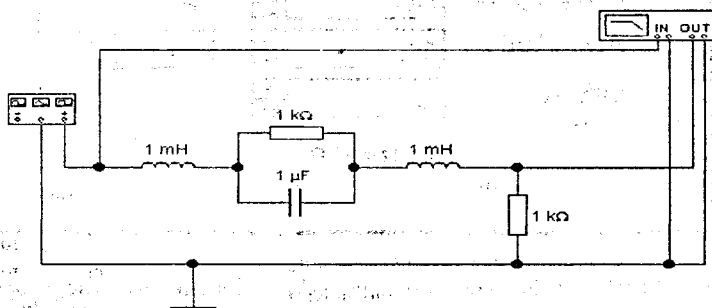


Рисунок 2.25 – Досліджувана схема з генератором на вході і вимірювачем частотних характеристик (ВЧХ) на виході

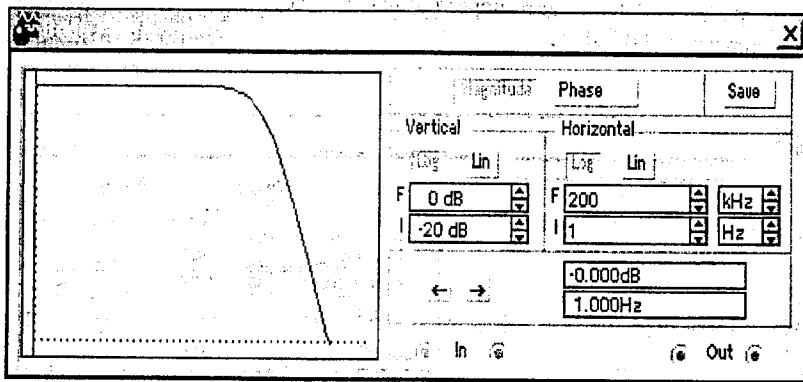


Рисунок 2.26 – Передня панель вимірювача АЧХ

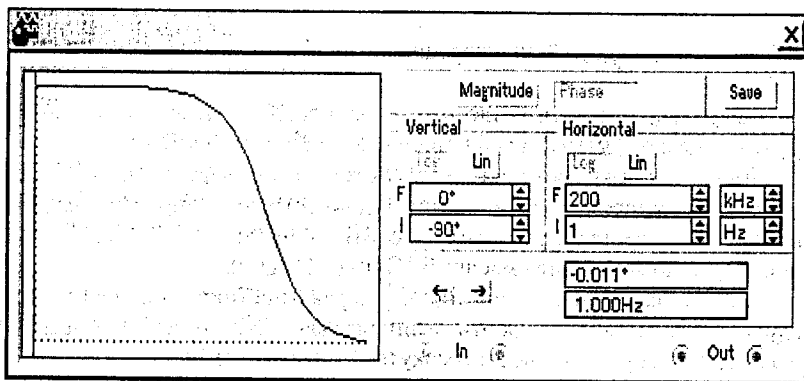


Рисунок 2.27 – Передня панель вимірювача ФЧХ

З вікна Instruments вибираємо осцилограф (рис.2.28.) (Oscilloscope) і під'єднуємо його канал *A* (Channel *A*) до виходу схеми, попередньо встановивши потрібний масштаб по осі *Y* і по осі *X*.

На панелі осцилографа вибираємо клавішу параметрів *Y/T*, оскільки нам необхідно на осі *X* мати час.

Часова розгортка може змінюватись в межах 0,1 нс/под.(0,1ns/Div)-1с/под.(1s/Div). Щоб одержати оптимальне зображення одного періода вихідного сигналу, частоту розгортки потрібно узгодити з частотою функціонального генератора.

Наприклад, якщо досліджується сигнал частотою 1кГц, часова розгортка повинна бути близькою до 0,1мс. При цьому можна спостерігати

один період сигналу. Один період сигналу частотою 10 кГц потребує часової розгортки 0,01 мс.

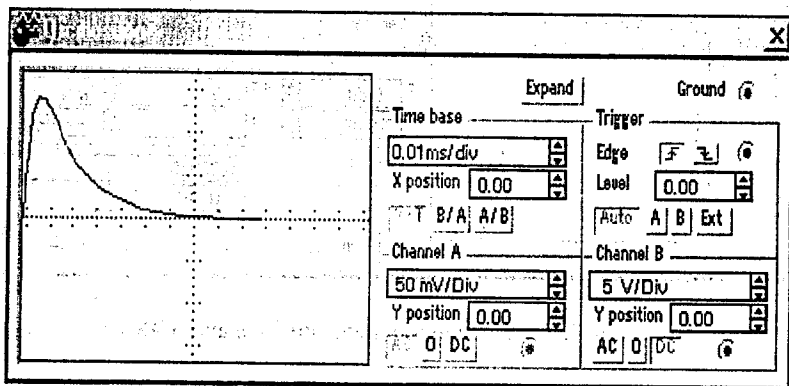


Рисунок 2.28 – Передня панель осцилографа

Канал вертикального підсилення осцилографа дозволяє змінювати масштаб в межах 0,01 мВ/под. (0,01 mV/Div) – 5 кВ/под. (5 kV/Div).

Щоб одержати оптимальне зображення по вертикалі, необхідно установити масштаб узгодити з амплітудою сигналу. Наприклад, вхідний сигнал змінного струму амплітудою 3В заповнює екран осцилографа повністю, якщо встановити масштаб 1В/под. (1 V/Div).

Для дослідження перехідної характеристики рекомендується використовувати режим роботи осцилографа "DC" (постійний струм), оскільки досліджуватиметься прямокутний сигнал зі зміною амплітуди від 0 до заданого значення.

На передній панелі розміщені також регулятори зміщення зображення по горизонталі (X position) та по вертикалі (Y position).

Отримавши відповідні графіки на екранах приладів (АЧХ і ФЧХ – на вимірювачі частотних характеристик, перехідну характеристику – на осцилографі), наводимо курсор на вікно Display Graphs основної панелі і натискаємо ліву клавішу маніпулятора. На екрані дисплея з'являється розгорнуте зображення графіка, після чого його можна роздрукувати, задавши оптимальний масштаб по осях.

3 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ОКРЕМИХ ЗАВДАНЬ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Перед аналізом кола методом контурних струмів при можливості спростити коло, замінивши паралельно з'єднані гілки еквівалентною. Струми в цих гілках знайти за формулою подільника струмів.

Під час побудови топографічної діаграми скористатись комплексними напругами, одержаними в першому пункті завдання.

Виконуючи другий пункт завдання, зробити розрахунок заданого струму методом еквівалентного генератора напруги та методом еквівалентного генератора струму.

Під час визначення комплексного коефіцієнта передачі кола за напругою спочатку знайти операгорний коефіцієнт передачі за напругою. Одержавши робочі вирази для АЧХ і ФЧХ, розрахувати їх значення в діапазоні частот за допомогою ЕОМ.

Перехідну характеристику кола рекомендується визначати операторним методом, розрахунок її миттєвих значень з робочого виразу виконувати за допомогою ЕОМ.

Для визначення вихідної напруги операторним та часовим методами скористатись одержаними раніше виразами для $K(p)$ і $h(t)$. Вихідну напругу визначати у відповідності з принципом суперпозиції.

Метою моделювання є визначення моделей АЧХ, ФЧХ і перехідної характеристики кола та порівняння їх з розрахованими значеннями.

В розділі "Висновки" необхідно проаналізувати використані методи з точки зору їх трудомісткості і точності на підставі розрахунку та побудови топографічної діаграми і складання балансу потужностей. На підставі аналізу АЧХ і ФЧХ, перехідної характеристики зробити висновки стосовно частотних властивостей досліджуваного кола.

Під час аналізу одержаних A - та Y -параметрів зробити висновки про оборотність чи необоротність кола, підкріпивши висновок перевіркою рівняння зв'язку.

Порівняти між собою графіки реакції кола, одержані різними методами.

Всі графічні залежності будувати на аркушах в альбомному варіанті.

ЛІТЕРАТУРА

1. Атабеков Г.Н. Основы теории цепей: Учеб. для вузов. - М.: Энергия, 1969.
2. Баскаков С.Н. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для вузов по спец. "Радиотехника". -2-е изд. перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1988.
3. Зернов Н.В., Карпов В.Г. Теория радиотехнических цепей. -2-е изд. перераб. и доп. -Л.: Энергия, 1972.
4. Теорія кіл і сигналів. Виконання курсової роботи: Навч. пос./ М.О. Куцевол. -Вінниця:ВДТУ, 1999.
5. Шебес М.Р., Каблукова М.В. Задачник по теории линейных электрических цепей: Учеб. пособ. для электротехнич., радиотехнич. спец. вузов. -4-е изд., перераб. и доп. -М.: Высш. шк., 1990.

Додаток А

Приклад оформлення титульного аркуша курсової роботи

Вінницький державний технічний університет
Інститут радіотехніки, зв'язку та приладобудування

Факультет радіотехніки і телекомунікацій
Кафедра радіотехніки

АНАЛІЗ ЛІНІЙНИХ КІЛ

Курсова робота з дисципліни “Теорія електричних кіл ”
ВДТУ. 6.0924.12.20.81.56 КР

Перевірив:
доцент кафедри радіотехніки

Куцевол М.О.

Виконав:
студент групи ІТСМ-02

Степаненко С.С.

2003

Додаток Б
Приклад оформлення другого аркуша курсової роботи

Зміст

1 Завдання до курсової роботи	3
2 Аналіз лінійного кола під час дії на його вході гармонічної ЕРС	5
2.1 Розрахунок методом контурних струмів	7
2.2 Розрахунок методом вузлових потенціалів.....	9
2.3 Розрахунок методом еквівалентного генератора	12
2.4 Розрахунок комплексних напруг на елементах кола.....	13
3 Баланс потужностей	14
4 Побудова топографічної діаграми.....	16
5 Розрахунок A - та Y - параметрів кола, характеристичних опорів та коефіцієнта розповсюдження.....	18
6 Визначення комплексного коефіцієнта передачі за напругою, АЧХ і ФЧХ кола та побудова їх графіків.....	20
7 Визначення перехідної характеристики і побудова її графіка	38
8 Спектральний аналіз електричних сигналів	40
8.1 Спектральний аналіз неперіодичного сигналу	40
8.2 Спектральний аналіз періодичного сигналу	43
9 Визначення реакції кола на складну вхідну дію і побудова її графіків.....	44
9.1 Визначення реакції кола операторним методом	44
9.2 Визначення реакції кола часовим методом	46
10 Моделювання АЧХ, ФЧХ і перехідної характеристики кола	47
Висновки	49
Література	50

1 ЗАВДАННЯ ДО КУРСОВОЇ РОБОТИ

1.1 Зміст завдання

1.1.1 Визначити струми в колі та напруги на елементах кола під час дії гармонічної ЕРС, використавши метод контурних струмів та метод вузлових потенціалів.

1.1.2 Визначити заданий струм методом еквівалентного генератора напруги та методом еквівалентного генератора струму.

1.1.3 Скласти баланс потужностей, використавши струми, одержані методом контурних струмів та методом вузлових потенціалів.

1.1.4 Побудувати топографічну діаграму напруг кола.

1.1.5 Визначити A - та Y -параметри кола, скласти рівняння зв'язку, знайти характеристичні опори, коефіцієнт розповсюдження і його складові.

1.1.6 Визначити коефіцієнт передачі кола за напругою, АЧХ і ФЧХ та побудувати їх графіки.

1.1.7 Визначити перехідну характеристику кола та побудувати її графік.

1.1.8 Виконати спектральний аналіз електричних сигналів.

1.1.9 Визначити реакцію кола на дію вхідного неперіодичного сигналу операторним та часовим методами. Побудувати графіки вихідної напруги для кожного з методів.

1.1.10 Провести моделювання АЧХ, ФЧХ та перехідної характеристики кола.

1.1.11 Зробити висновки по роботі.

Додаток Г
 Приклад оформлення четвертого аркуша курсової роботи

1.2 Початкові дані (Варіант 21.12.67)

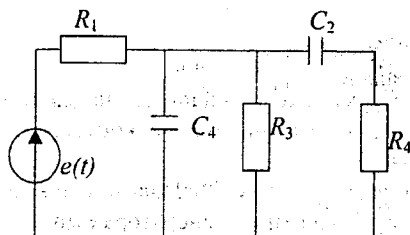


Рисунок 1.1 – Схема досліджуваного кола

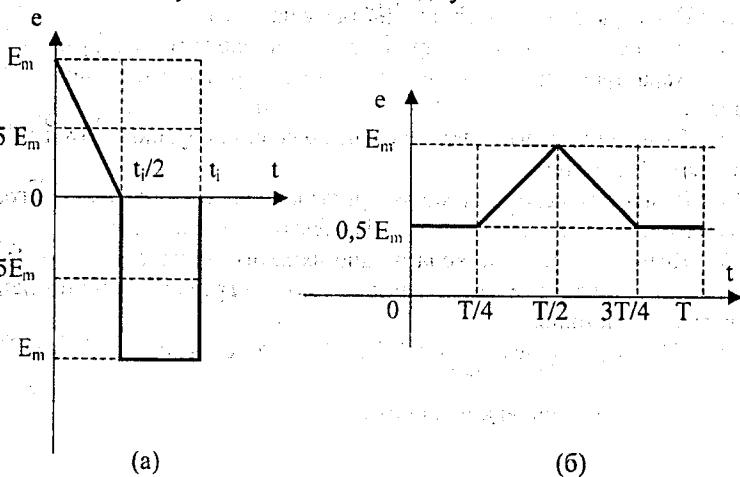


Рисунок 1.2 Неперіодичний (а) та періодичний (б) сигнали

Параметри елементів кола та вхідного сигналу

$E_m = 10\text{В}$; $T = 20\text{мкс}$; $t_1 = 1,6\text{мкс}$; $R_1 = 10\text{кОм}$; $R_3 = 20\text{кОм}$; $R_4 = 30\text{кОм}$;
 $C_2 = 1\text{нФ}$; $C_4 = 5\text{нФ}$; $\psi = 40^\circ$

Термін виконання роботи – дванадцятий навчальний тиждень

Завдання видав
 доцент кафедри РТ

Куцевол М.О.

Завдання отримав
 ст. гр. 1ТСМ-02

Степаненко С.С.

Додаток Д

Приклад оформлення п'ятого аркуша курсової роботи

2 АНАЛІЗ ЛІНІЙНОГО КОЛА ПІД ЧАС ДІЇ НА ЙОГО ВХОДІ ГАРМОНІЧНОЇ ЕРС

2.1 Розрахунок методом контурних струмів

Початкові дані:

$$E_m = 10\text{В}; T = 20\text{мкс}; t_i = 1,6\text{мкс}; R_1 = 10\text{кОм}; R_3 = 20\text{кОм}; R_4 = 30\text{кОм}; \\ C_2 = 1\text{нФ}; C_4 = 5\text{нФ}; \psi = 40^\circ$$

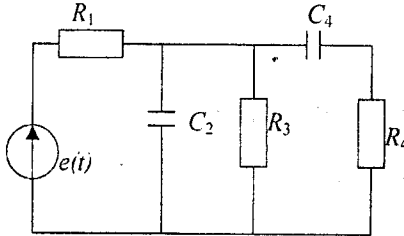


Рисунок 2.1 – Схема досліджуваного кола

Знаходимо додатково:

$$\dot{E}_m = E_m e^{j\psi} = 10 e^{j40^\circ} \text{ В}; \omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{20 \cdot 10^{-6}} = 3,1415926535 \times 10^5 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

$$X_2 = \frac{1}{\omega C_2} = 318,30986183791 \text{ Ом}; X_4 = \frac{1}{\omega C_4} = 636,619772367582 \text{ Ом.}$$

Комплексні опори гілок кола

$$\underline{Z}_1 = R_1 = 10 \text{ Ом}; \underline{Z}_2 = -jX_2 = -j 318,3098618379 \text{ Ом}$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 = 20 \text{ Ом}; \underline{Z}_4 = R_4 - jX_4 = 30 - j 636,6197723675 \text{ Ом}$$

Для спрощення кола (перетворення його з триконтурного до двоконтурного) виконаємо еквівалентне перетворення другої і третьої гілки в одну з еквівалентним опором \underline{Z}_{23} .

$$\underline{Z}_{23} = \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \frac{X_2 R_3 e^{-j90^\circ} e^{j \arctg \frac{X_2}{R_3}}}{\sqrt{R_3^2 + X_2^2}} = 9,9213536361 - j1,2516956603 \text{ Ом.}$$

Навчальне видання

Микола Олександрович Куцевол

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

Виконання курсової роботи

Навчальний посібник

Оригінал-макет підготовлений автором

Редактор С. А. Малішевська

Навчально-методичний відділ ВДТУ

Свідоцтво Держкомінформу України

серія ДК № 746 від 25.12.2001р.

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВДТУ

Підписано до друку 15.04.03.

Формат 29,7 × 42 1/4

Друк різнографічний

Наклад 85 прим.

Зам. № 2003 - 057

Гарнітура Times New Roman

Папір офсетний

Ум. др. арк. 3.04

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі

Вінницького державного технічного університету

Свідоцтво Держкомінформу України

серія ДК № 746 від 25.12.2001 р.

21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95