

М.О. Куцевол

Основи радіоелектроніки

Виконання курсової роботи

Міністерство освіти і науки України
Вінницький державний технічний університет

М. О. Куцевол

Основи радіоелектроніки

Виконання курсової роботи

Затверджено Ученою радою Вінницького державного технічного університету як навчальний посібник для студентів бакалаврських напрямків “Електронні апарати” та “Телекомунікації”. Протокол №7 від 28 лютого 2002 р.

Вінниця ВДТУ 2002

Рецензенти:

А.О. Новіков, доктор технічних наук, професор

О.Г. Гуцало, доктор технічних наук, професор

І.І. Хаймзон, доктор технічних наук, професор

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

Куцевол М. О.

К 95 **Основи радіоелектроніки.** Виконання курсової роботи: Навчальний посібник. – Вінниця.: ВДТУ, 2002. – 74 с.

В навчальному посібнику приведені варіанти завдань для комплексного аналізу лінійних кіл при дії на їх вході періодичного гармонічного сигналу та сигналу складної форми. Робота передбачає спектральний аналіз періодичних і неперіодичних сигналів та використання результатів аналізу для визначення вихідного сигналу операторним і часовим методами, а також визначення *A*- та *У*-параметрів досліджуваної схеми. Теоретичний матеріал посібника викладений з максимальним наближенням до структури курсової роботи і містить в собі детальні пояснення. Детальними методичними вказівками супроводжується розділ “Моделювання характеристик електричної схеми”.

Посібник призначений для студентів бакалаврських напрямків “Електронні апарати” та “Менеджмент організацій (РЗ)” 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	6
2 Короткі теоретичні відомості	27
2.1 Метод контурних струмів	27
2.2 Метод вузлових потенціалів	28
2.3 Метод еквівалентного генератора	29
2.4 Комплексна потужність	32
2.5 Баланс потужностей	33
2.6 Топографічна діаграма	34
2.7 А- та У- параметри чотириполюсника.....	37
2.8 Комплексний коефіцієнт передачі за напругою, АЧХ і ФЧХ електричного кола	40
2.9 Спектральний аналіз сигналів	41
2.10 Перехідна характеристика	46
2.11 Методи дослідження передачі сигналів через лінійні електричні кола	54
2.12 Моделювання АЧХ, ФЧХ і перехідної характеристики кола	62
3 Методичні вказівки до виконання окремих завдань курсної роботи	67
Література	69
Додаток А.....	70
Додаток Б.....	71
Додаток В.....	72
Додаток Г.....	73
Додаток Д.....	74

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 при дії на коло гармонічної ЕРС і досліджуючи коло як пасивний чотириполосник, знаходить A -та Y -параметри.

Значний обсяг роботи складає спектральний аналіз складних періодичних і неперіодичних сигналів.

Завершальним етапом роботи є аналіз проходження через задане коло складного неперіодичного сигналу 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.

Даний посібник є доповненням посібника “Теорія кіл і сигналів. Виконання курсової роботи”, виданого в 1999 році, тому їх бажано використовувати разом.

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 при 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 двічі 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 Виконати спектральний аналіз періодичного і неперіодичного сигналів з побудовою спектральних діаграм (неперіодичний сигнал проаналізувати з допомогою прямого перетворення Фур'є та з допомогою операторних зображень за Лапласом)

1.1.8 Визначити перехідну характеристику кола і побудувати її графік

1.1.9 Визначити вихідну напругу кола при дії на вході 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

1.2 Варіанти завдань

1.2.1 Параметри кіл і сигналів

Таблиця 1.1 – Параметри пасивних елементів кіл

	R ₁ кОм	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

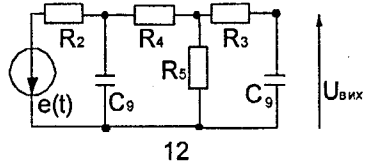
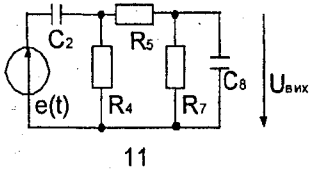
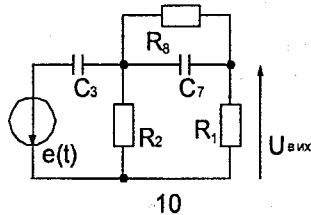
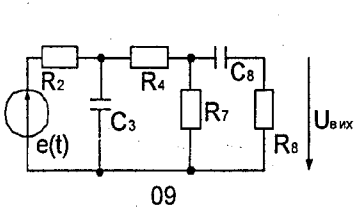
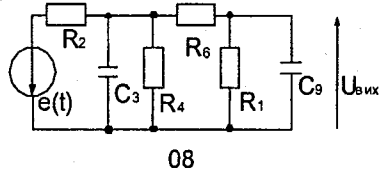
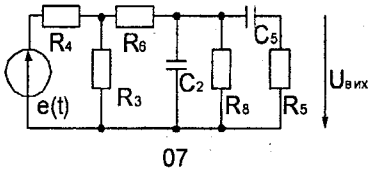
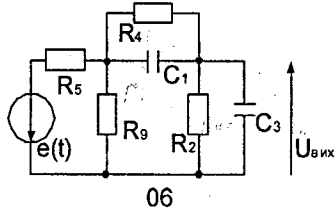
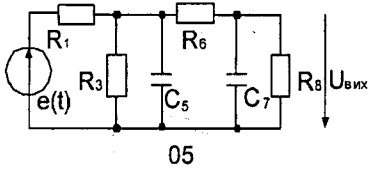
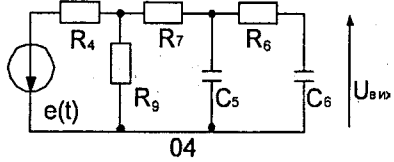
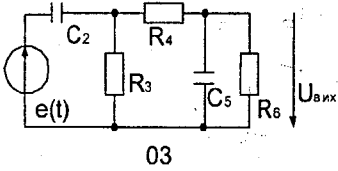
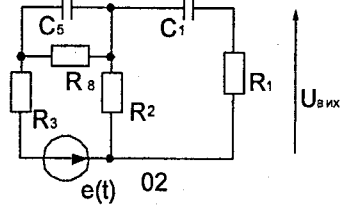
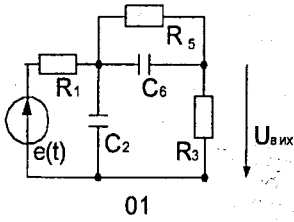
Таблиця 1.3 – Варіанти параметрів сигналів

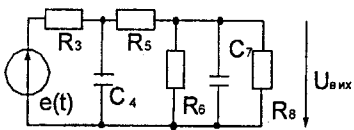
Вари- ант	E_m , В	T , мкс	t_i , мкс	Вари- ант	E_m , В	T , мкс	t_i , мкс
00	100	50,0	1,1	25	125	52,5	3,6
01	101	50,1	1,2	26	126	52,6	3,7
02	102	50,2	1,3	27	127	52,7	3,8
03	103	50,3	1,4	28	128	52,8	3,9
04	104	50,4	1,5	29	129	52,9	4,0
05	105	50,5	1,6	30	130	53,0	4,1
06	106	50,6	1,7	31	131	53,1	4,2
07	107	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

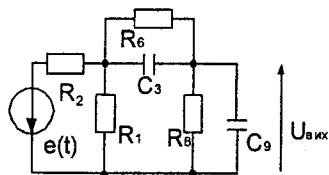
Вариант	E_m , В	T , мкс	t_i , мкс	Вариант	E_m , В	T , мкс	t_i , мкс
50	150	55,0	6,1	75	175	57,5	8,6
51	151	55,1	6,2	76	176	57,6	8,7
52	152	55,2	6,3	77	177	57,7	8,8
53	153	55,3	6,4	78	178	57,8	8,9
54	154	55,4	6,5	79	179	57,9	9,0
55	155	55,5	6,6	80	180	58,0	9,1
56	156	55,6	6,7	81	181	58,1	9,2
57	157	55,7	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

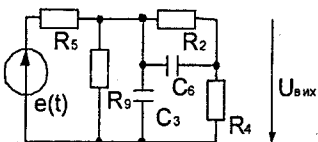




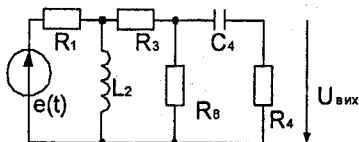
13



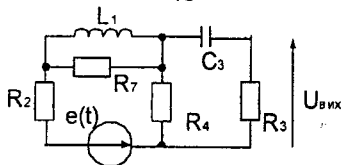
14



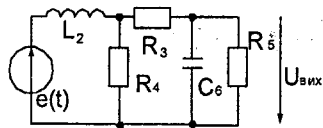
15



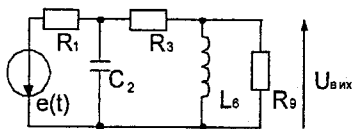
16



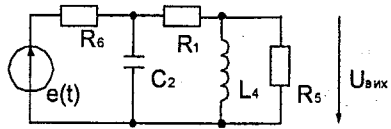
17



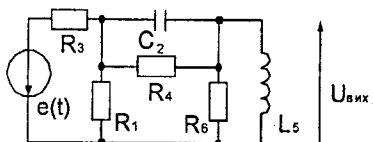
18



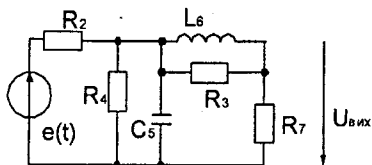
19



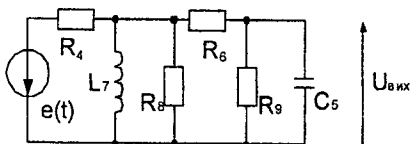
20



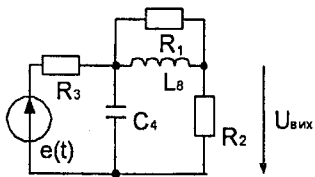
21



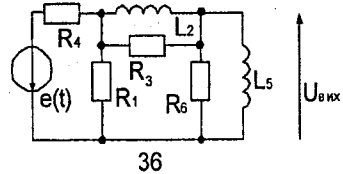
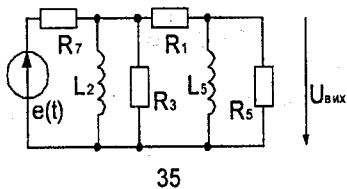
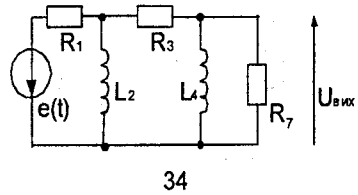
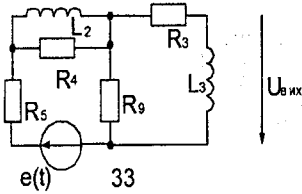
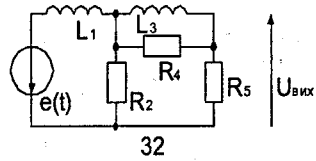
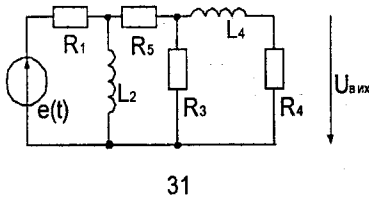
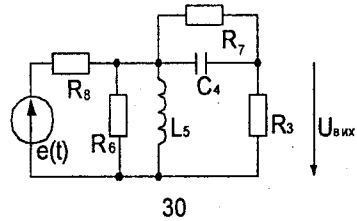
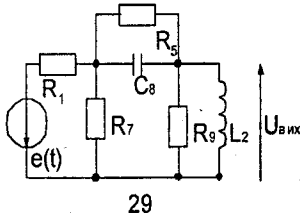
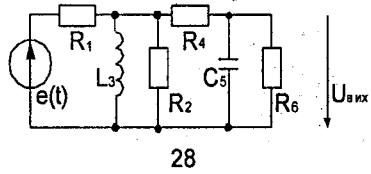
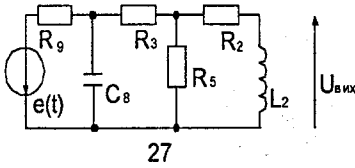
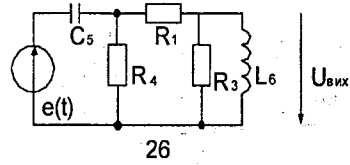
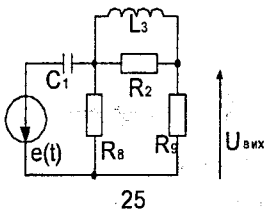
22

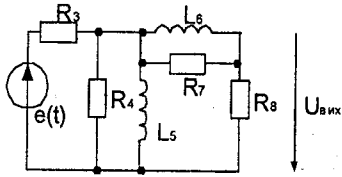


23

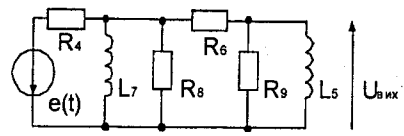


24

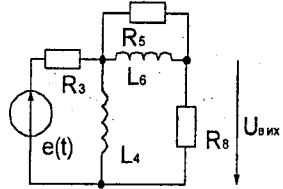




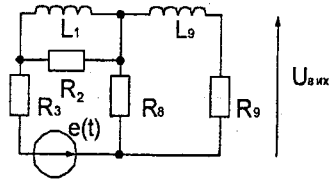
37



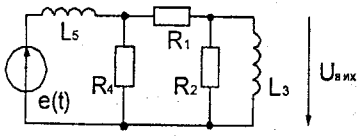
38



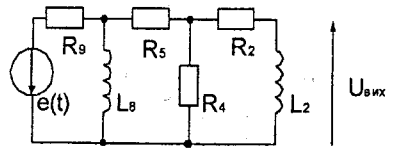
39



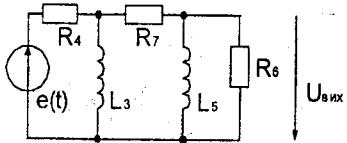
40



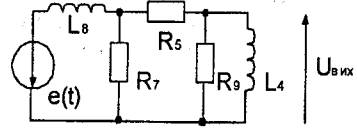
41



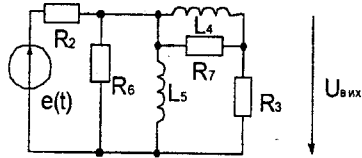
42



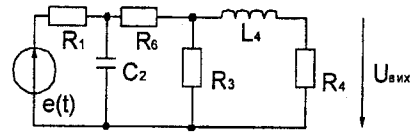
43



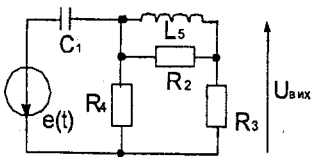
44



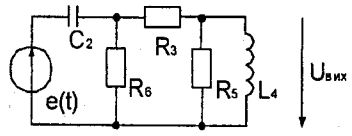
45



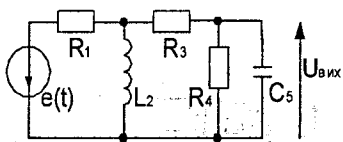
46



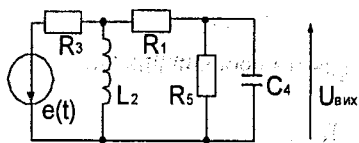
47



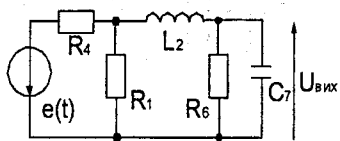
48



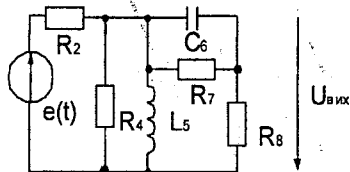
49



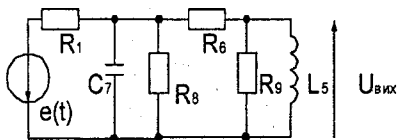
50



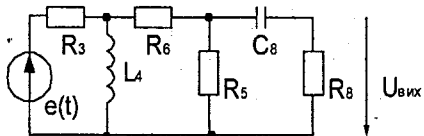
51



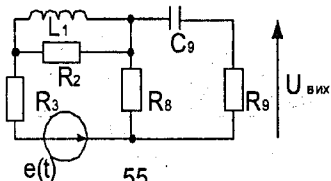
52



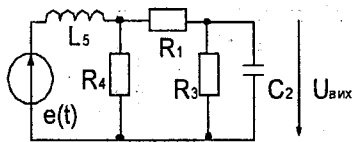
53



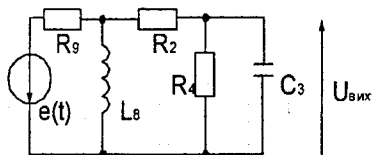
54



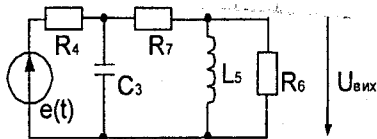
55



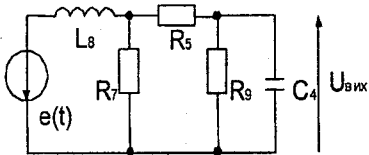
56



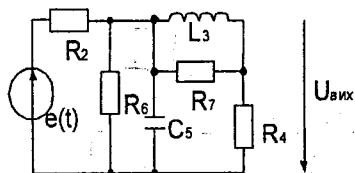
57



58

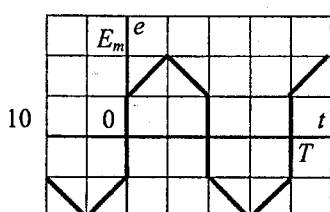
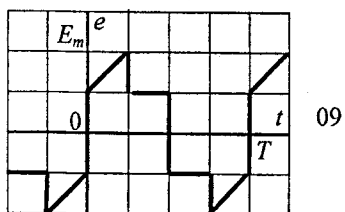
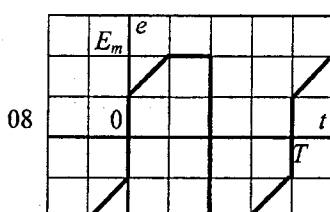
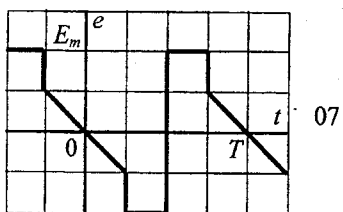
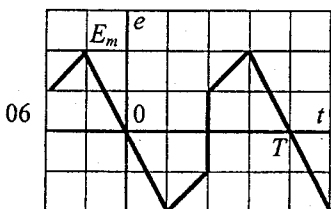
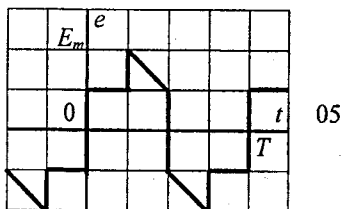
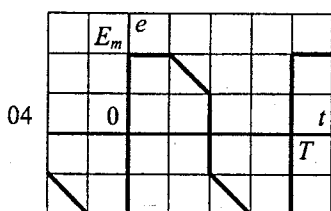
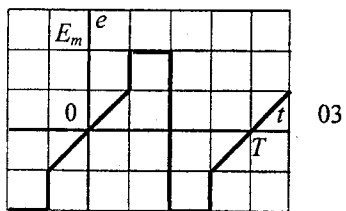
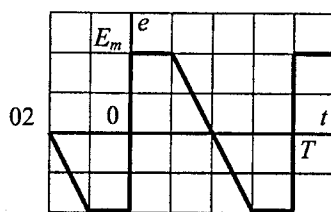
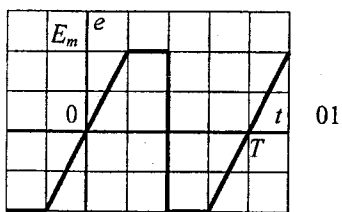


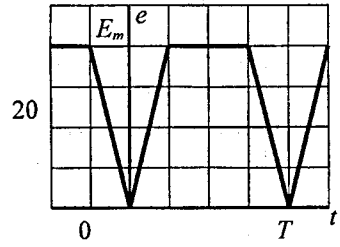
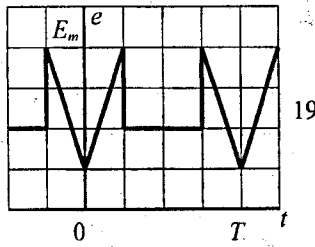
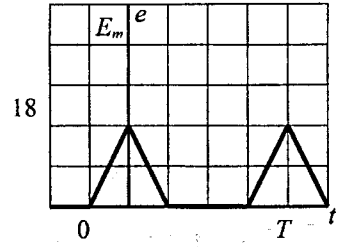
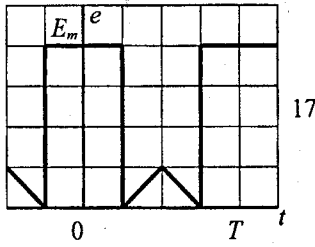
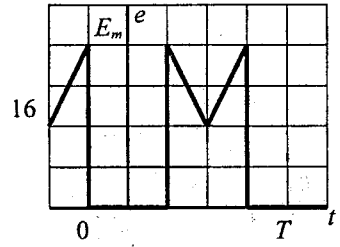
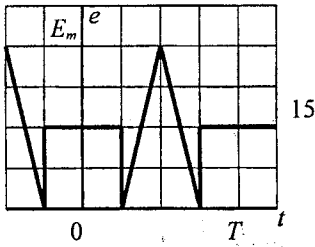
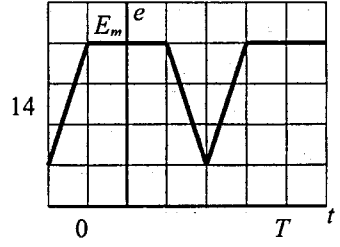
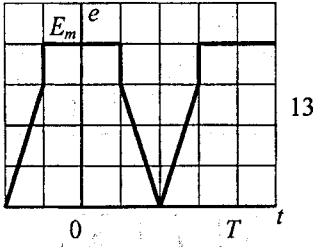
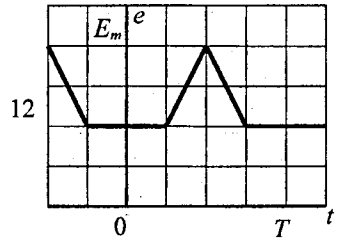
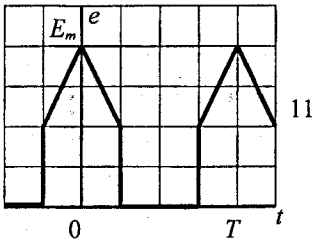
59

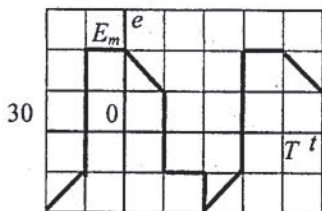
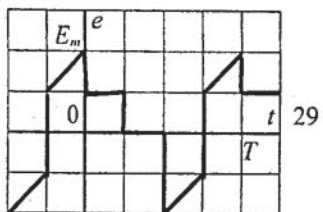
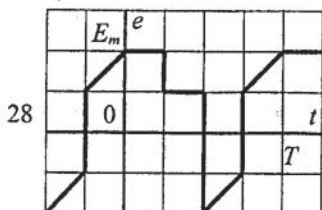
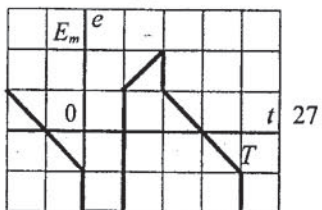
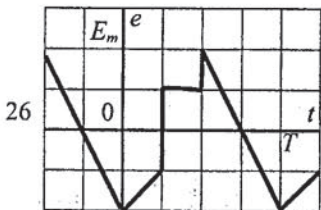
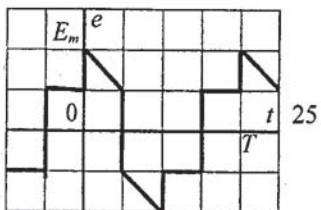
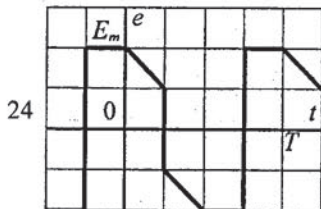
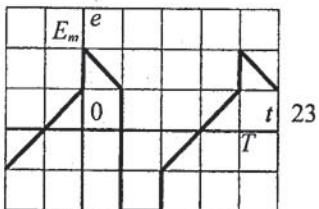
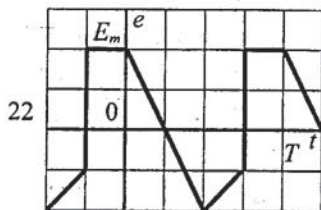
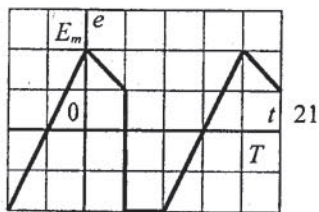


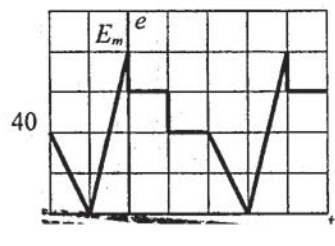
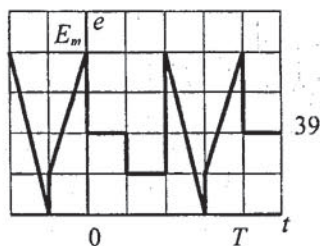
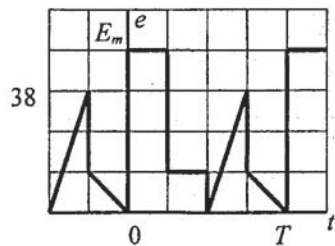
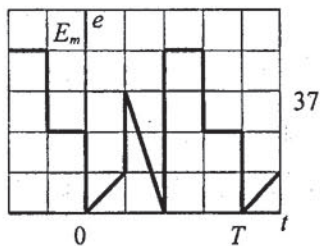
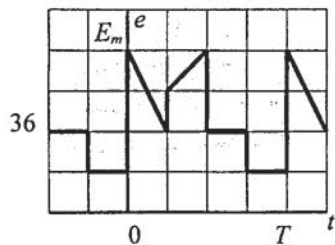
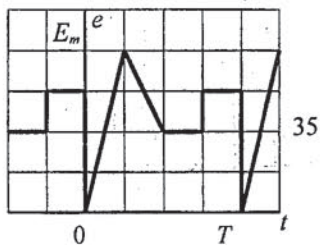
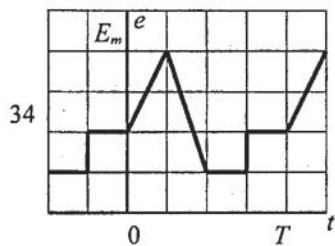
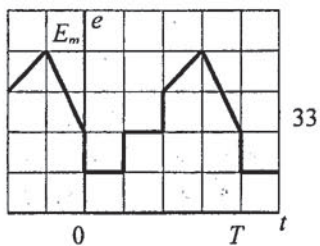
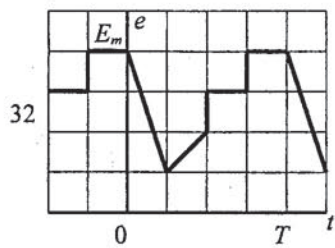
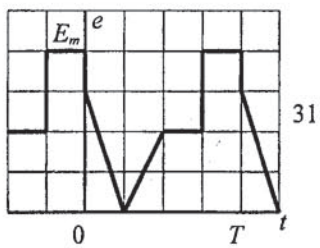
60

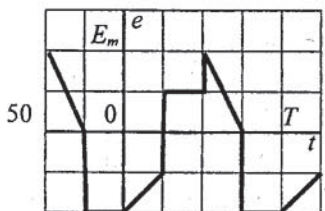
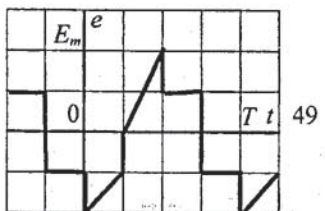
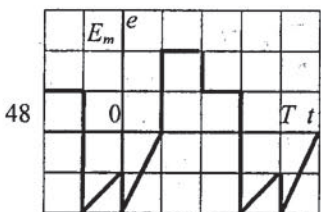
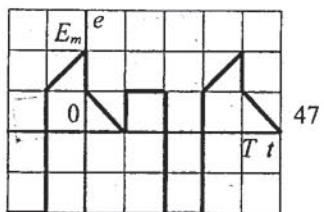
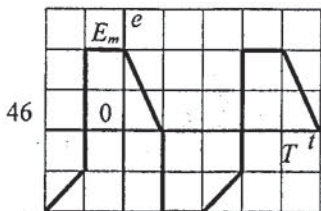
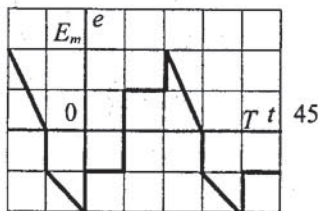
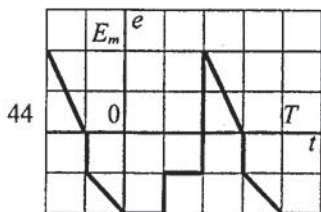
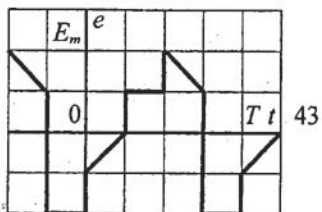
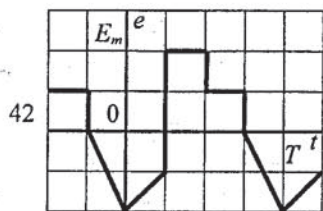
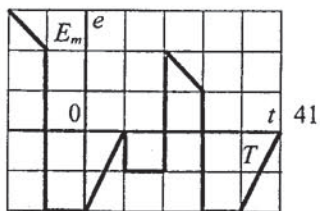
1.2.3 Варіанти періодичних сигналів

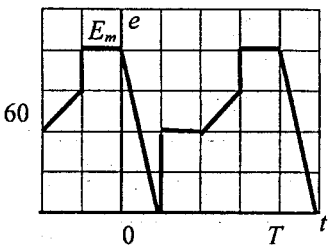
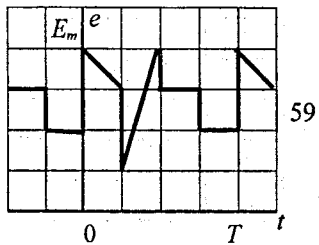
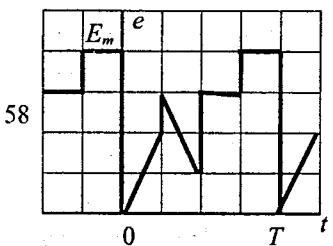
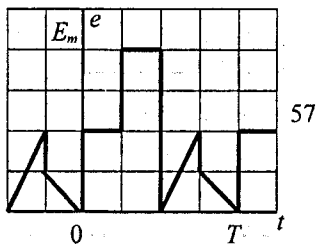
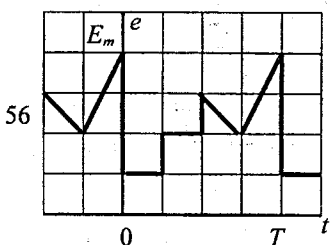
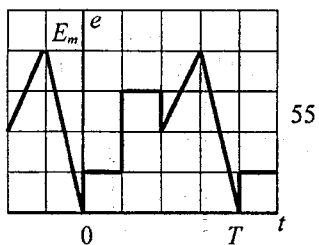
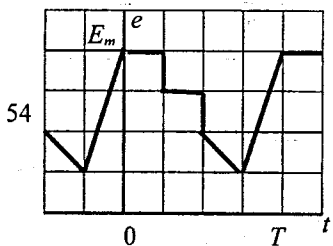
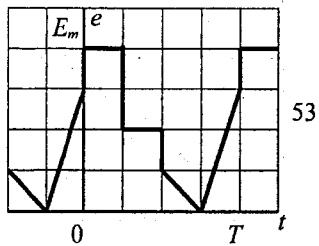
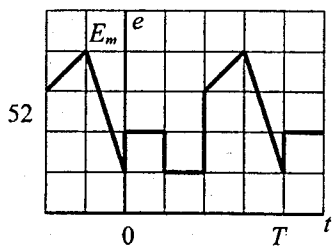
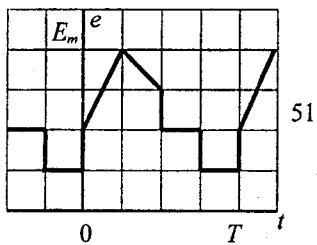




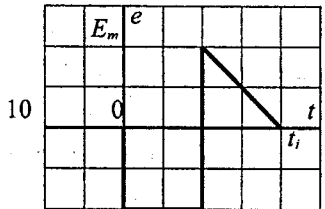
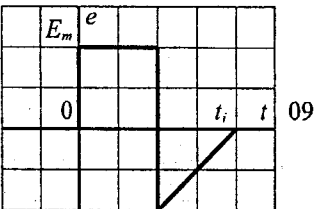
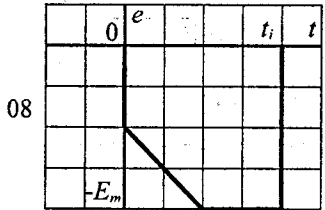
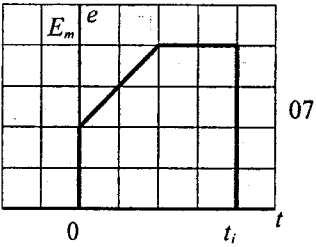
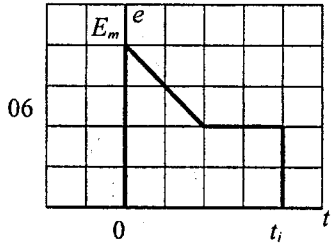
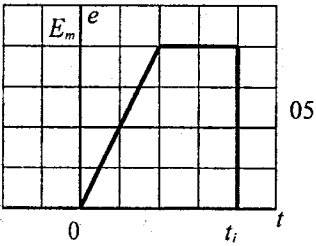
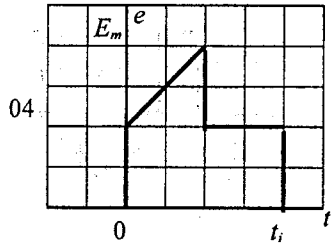
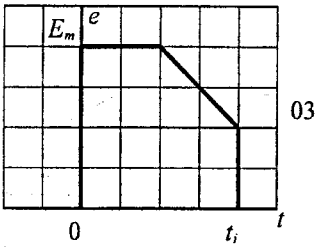
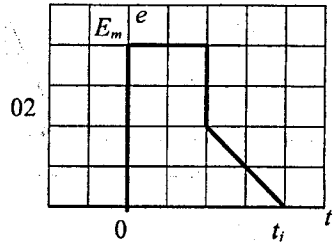
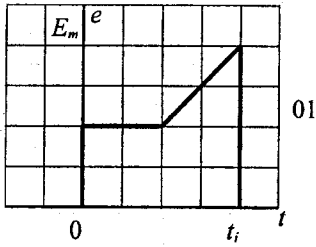


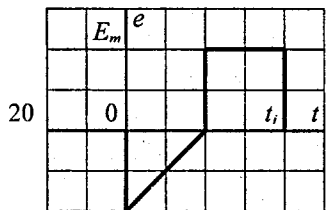
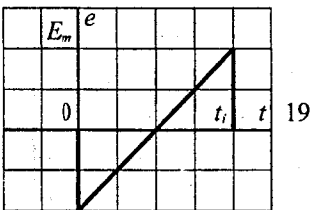
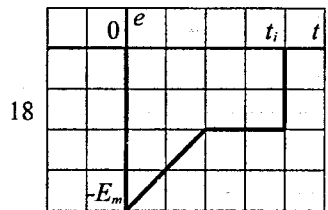
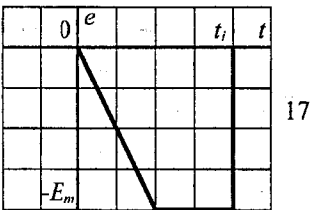
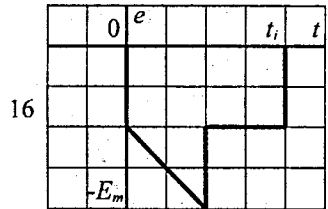
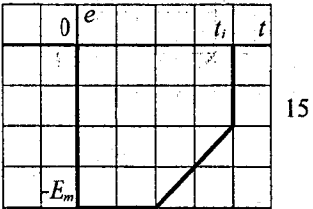
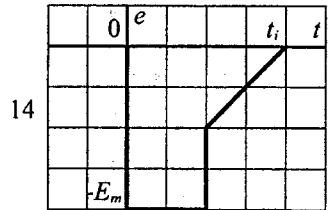
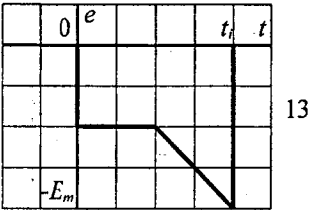
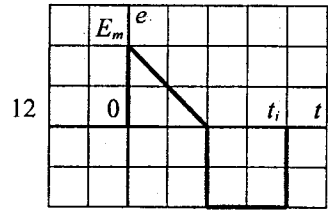
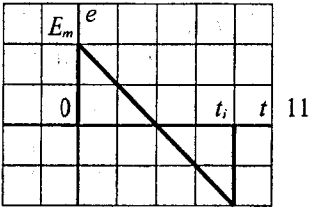


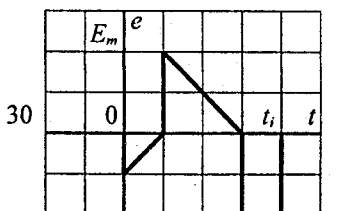
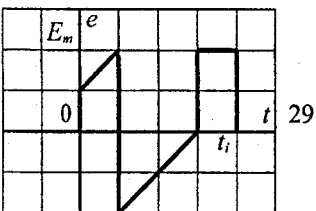
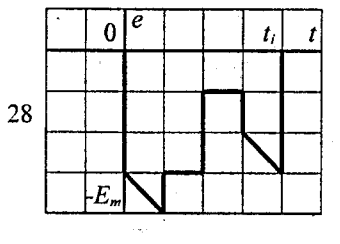
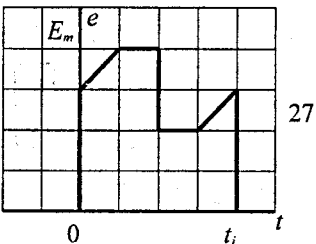
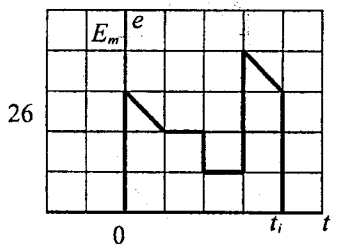
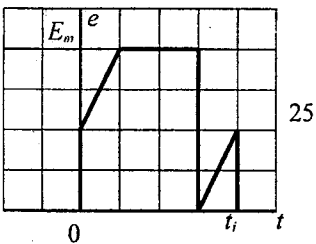
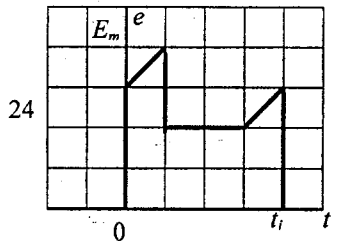
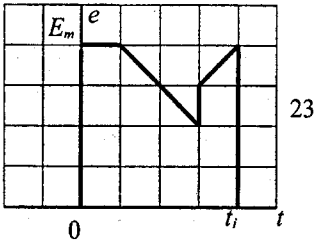
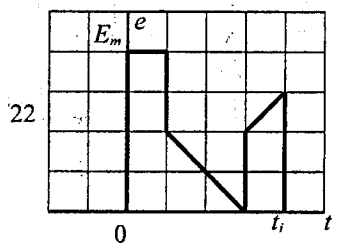
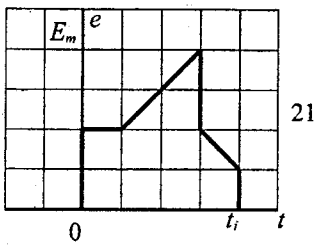


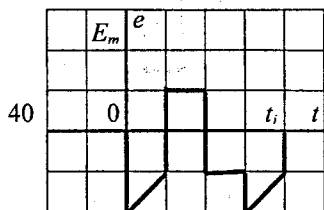
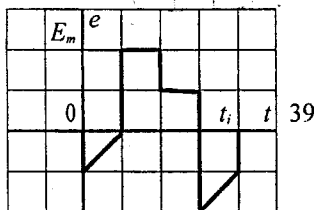
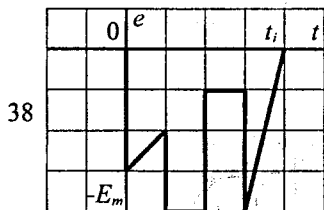
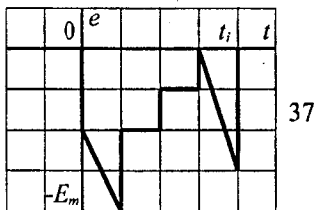
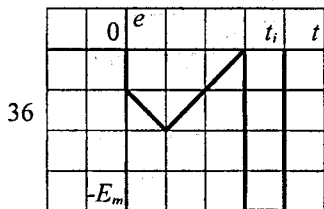
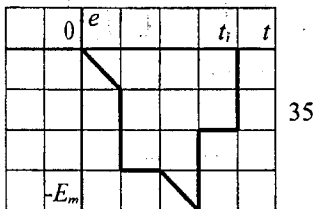
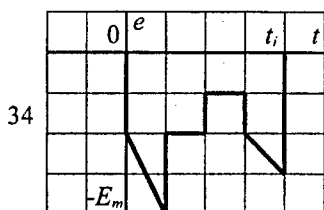
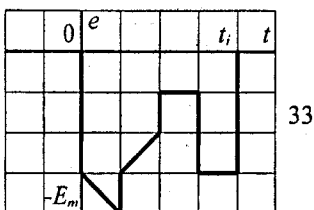
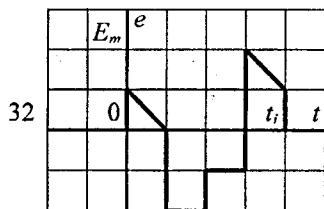
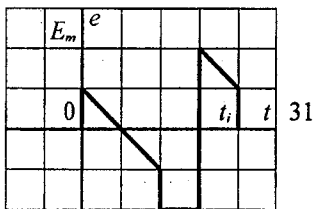


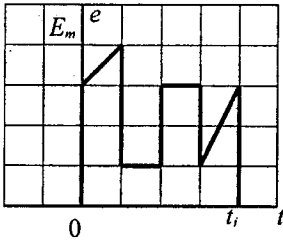
1.2.4 Варіанти неперіодичних сигналів



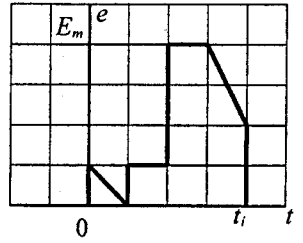




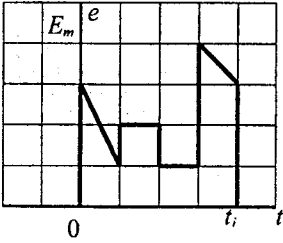




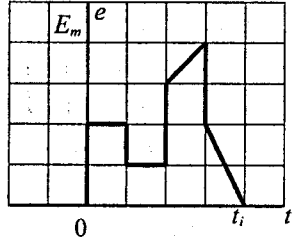
41



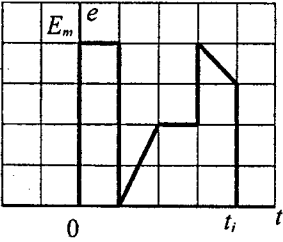
42



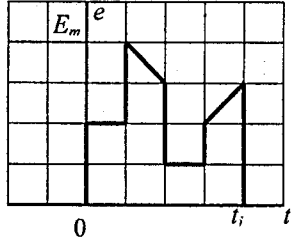
43



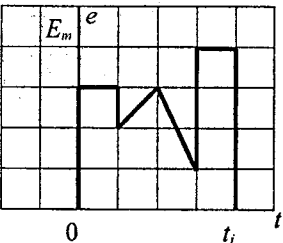
44



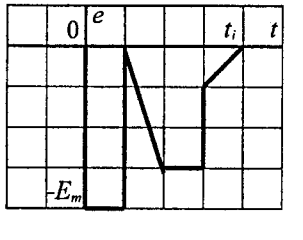
45



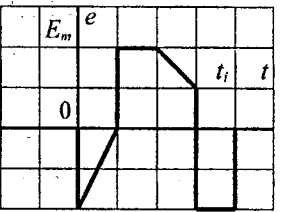
46



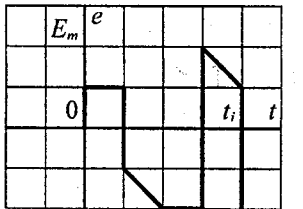
47



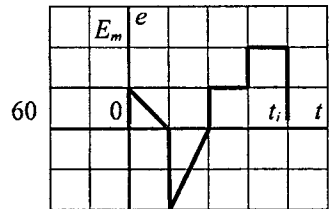
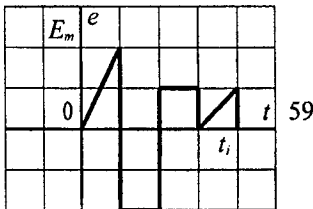
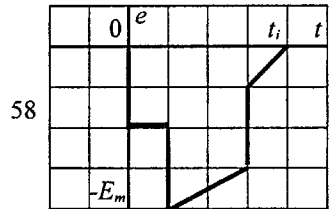
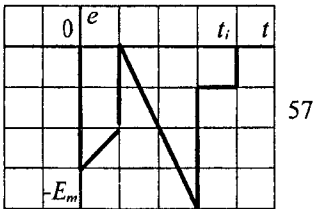
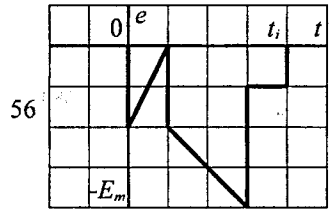
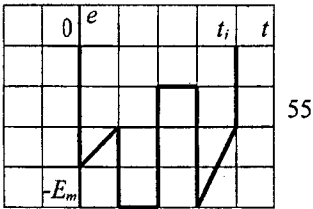
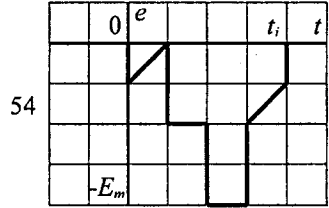
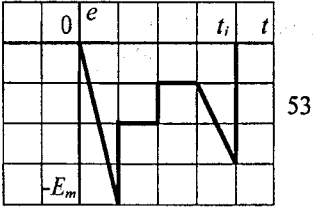
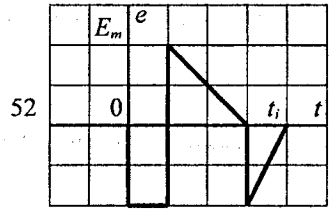
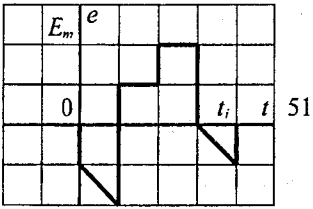
48



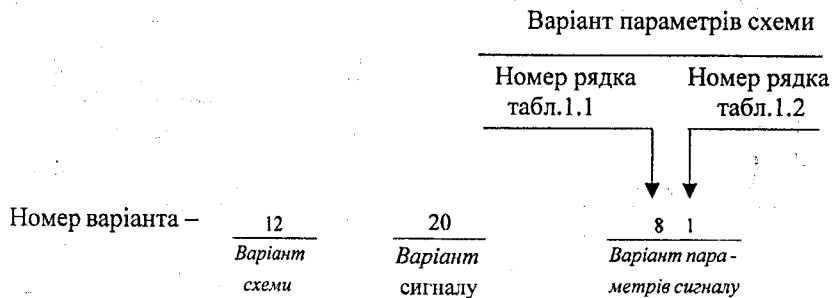
49



50



Вибір даних до заданого варіанту здійснюється за такою схемою:



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

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 n незалежних контурів, то для нього система рівнянь матиме такий вигляд:

$$\begin{aligned}j_1 Z_{11} + j_2 Z_{12} + \dots + j_n Z_{1n} &= \dot{E}_{11}; \\j_1 Z_{21} + j_2 Z_{22} + \dots + j_n Z_{2n} &= \dot{E}_{22}; \\&\dots \\j_1 Z_{n1} + j_2 Z_{n2} + \dots + j_n Z_{nn} &= \dot{E}_{nn},\end{aligned}\tag{2.1}$$

де $j_1, j_2 \dots j_n$ - невідомі контурні струми;

$\dot{E}_{11}, \dot{E}_{22}, \dots \dot{E}_{nn}$ - контурна електрорушійна сила в контурі $1, 2, \dots, n$, тобто 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;

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

$Z_{12} = Z_{21}; Z_{1n} = Z_{nn}$, спільний опір контурів: першого і другого, першого і n -го. Якщо контурні струми в спільних опорах збігаються, то опори в рівняннях (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.

$Y_{12} = Y_{21}$; $Y_{1m} = Y_{m1}$, - 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.

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

При 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.

2.3 Метод еквівалентного генератора

Метод еквівалентного генератора базується на теоремі про еквівалентне джерело.

Теорема про еквівалентне джерело часто застосовується при аналізі 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

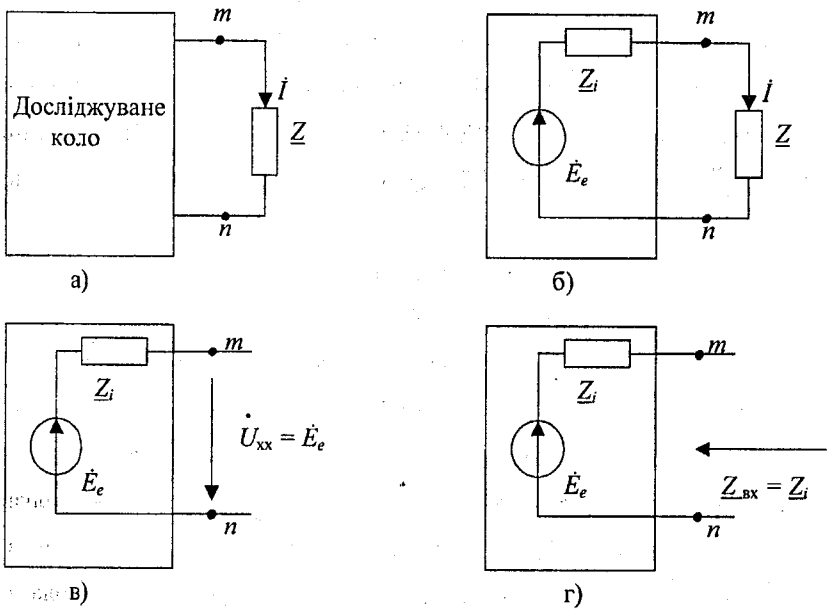


Рисунок 2.1 – Алгоритм реалізації методу еквівалентного генератора напруги

При знаходженні Z_i необхідно з досліджуваного електричного кола вилучити всі джерела енергії, залишивши їх внутрішні опори.

Струм в досліджуваній гілці m дорівнює:

$$j = \frac{\dot{U}_{xx}}{Z_i + Z} \quad (2.3)$$

Теорема про еквівалентне джерело струму

Струм в будь-якій гілці m 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 входній провідності пасивного електричного кола (без джерел енергії) зі сторони полюсів m і n при розімкненій гілці m .

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

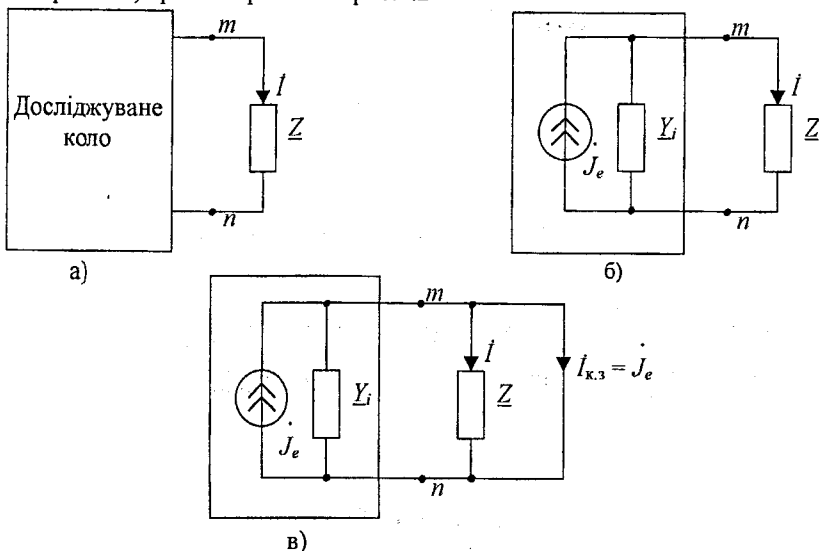


Рисунок 2.2 – Алгоритм реалізації методу еквівалентного генератора струму

Внутрішня провідність 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:

$$i = i_{\text{кз}} \frac{\underline{Y}}{\underline{Y}_i + \underline{Y}}, \quad (2.4)$$

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

2.4 Комплексна потужність

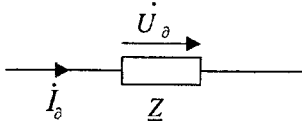


Рисунок 2.3 – Фрагмент електричного кола

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

$$\dot{I}_\delta = I_\delta e^{j\psi_i},$$

$$\dot{U}_\delta = U_\delta e^{j\psi_u},$$

то комплексна потужність опору \underline{Z} може бути визначена таким чином:

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

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

$I_\partial^* = I_\partial e^{-j\psi_i}$ - комплексне діюче спряжене значення струму в опорі Z , А;

S - повна потужність кола, ВА;

$\varphi = \psi_u - \psi_i$ - аргумент комплексної потужності, або кут фазового зсуву між напругою \dot{U}_∂ і струмом \dot{I}_∂ , або аргумент комплексного опору Z , °.

Комплексна потужність (2.5) за допомогою формули Ейлера може бути перетворена в алгебраїчну форму

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

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 споживачі, то справедливим буде таке співвідношення:

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

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

*
 $I_{\partial k}$ - комплексне дійсне значення струму, спряжене струмові джерела струму $\dot{I}_{\partial k}$;

$\sum_{k=1}^n \dot{E}_{\partial k} I_{\partial k}$ - алгебраїчна сума комплексних потужностей джерел ЕРС: тут додатними будуть ті складові, для яких напрями дії ЕРС $\dot{E}_{\partial k}$ і відповідного

*
 струму $I_{\partial k}$ збігаються, в іншому випадку доданок від'ємний;

$\sum_{k=1}^n \dot{U}_{\partial k} I_{\partial k}$ - алгебраїчна сума комплексних потужностей джерел струму; тут додатними будуть ті складові, для яких напруга на джерелі струму

*
 $\dot{U}_{\partial k}$ і його струм $I_{\partial k}$ 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'єднає відповідні точки топографічної діаграми.

На рис.2.4 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, зображуємо 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.2.5) яку рекомендується будувати окремо, щоб не захащувати топографічну діаграму.

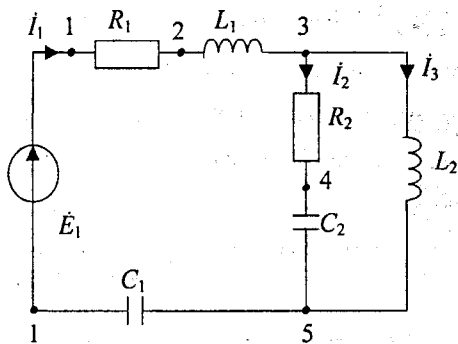


Рисунок 2.4 – Схема розгалуженого електричного кола

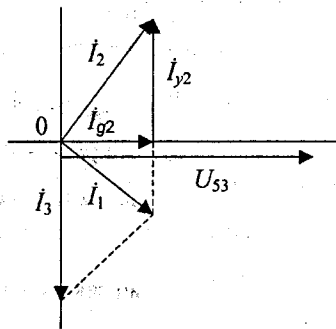


Рисунок 2.5 – Векторна діаграма струмів кола (рис.2.4)

Нехай комплексна напруга, що відкладається на паралельних гілках 2 і 3, має нульову початкову фазу (рис. 2.6) 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).

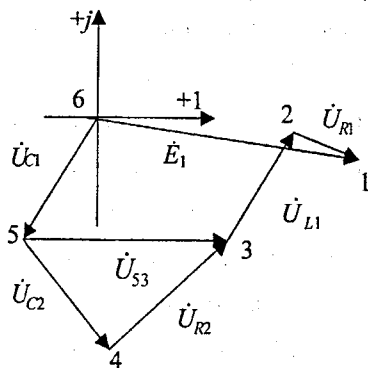


Рисунок 2.6 – Якісна топографічна діаграма напруг електричного кола, зображеного на рис. 2.4

Відносно вектора напруги U_{S3} відкладаємо вектор струму I_3 , який відстає від нього на кут 90° (рис.2.5). Оскільки струм I_2 - комплексна величина, знаходимо його через складові. Вектор дійсної складової струму другої гілки I_{22} збігається за напрямком з вектором напруги U_{S3} , а вектор уявної складової I_{21} 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.2.6) відкладаємо вектор напруги на ємності U_{C2} , який відстає від струму I_2 на кут 90° . Кінець вектора - 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 \dot{I}_1 на 90° . З точки 3 до точки 1 відкладаємо вектор напруги \dot{U}_{R1} , який збігається за напрямом з вектором \dot{I}_1 . Від точки 6 до точки 5 будемо вектор напруги \dot{U}_{C1} , який відстає від струму \dot{I}_1 на 90° . Між точками 6 і 1 будемо вектор ЕРС \dot{E}_1 .

2.7 А- та У- параметри чотириполюсника

Чотириполюсником називають частину електричного кола, що має дві пари полюсів, які можуть бути вхідними і вихідними (рис.2.7).

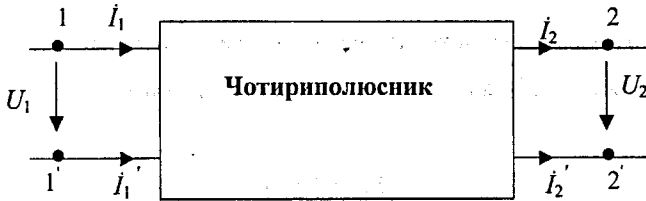


Рисунок 2.7 – Узагальнене зображення чотириполюсника

Рівняння чотириполюсника в формі А:

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

В рівняннях (2.8) коефіцієнти $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}$ і \dot{D} називаються А-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.

А – параметри чотириполюсника знаходять з дослідів холостого ходу (хх) і короткого замикання (кз):

а) дослід холостого ходу ($\dot{I}_2 = 0$). 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 ($\dot{U}_2 = 0$)

$$\dot{B} = \frac{\dot{U}_{1K3}}{\dot{I}_{2K3}}, \quad \dot{D} = \frac{\dot{I}_{1K3}}{\dot{I}_{2K3}}. \quad (2.10)$$

Через A - параметри можна одержати інші параметри чотириполосника.

Виразимо Y - параметри чотириполосника через A - параметри. Для цього спочатку запишемо рівняння чотириполосника 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 чотириполосника при передачі сигналу від полюсів 1-1 до полюсів 2-2;

\underline{Y}_{22} – вихідна провідність чотириполосника при передачі сигналу від полюсів 1-1 до полюсів 2-2;

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

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

З врахуванням того, що $\dot{I}_2 = -\dot{I}'_2$ (рис.2.7) рівняння (2.8) будуть такими:

$$\dot{U}_1 = \dot{A} \dot{U}_2 - \dot{B} \dot{I}'_2, \quad (2.12)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{C} \dot{U}_2 - \dot{D} \dot{I}'_2. \quad (2.13)$$

З (2.12) знаходимо \dot{I}_2

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

Рівняння (2.14) підставимо в (2.13)

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

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

$$\dot{I} = \frac{\dot{D}}{B} \dot{U}_1 - \frac{\dot{A} \dot{D} - \dot{B} \dot{C}}{B} \dot{U}_2, \quad (2.16)$$

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

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

$$Y_{11} = \frac{\dot{D}}{B}; \quad Y_{12} = -\frac{\dot{A} \dot{D} - \dot{B} \dot{C}}{B}; \quad (2.17)$$

$$Y_{21} = -\frac{1}{B}; \quad Y_{22} = \frac{\dot{A}}{B}.$$

Відомо, що при $Y_{21} = Y_{12}$ чотириполюсник називається оборотним. З (2.17) очевидно, що для оборотного чотириполюсника справедлива рівність

$$\dot{A}\dot{D} - \dot{B}\dot{C} = 1 \quad (2.18)$$

Рівняння (2.18) називають рівнянням зв'язку чотириполюсника.

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

В загальному вигляді комплексний коефіцієнт передачі за напругою електричного кола:

$$\dot{K}_u = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}, \quad (2.19)$$

де \dot{U}_2 - 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

$$\dot{K}_u = K_u(\omega) e^{j\varphi(\omega)},$$

де $K_u(\omega)$ - АЧХ кола;

$\varphi(\omega)$ - ФЧХ кола.

При аналітичному визначенні \dot{K}_u для будь-якої частоти необхідно (вважаючи \dot{U}_1 відомим) виразити \dot{U}_2 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 ω , можна побудувати графіки АЧХ і ФЧХ.

2.9 Спектральний аналіз сигналів

2.9.1 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):

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_n \cos n\Omega_1 t + b_n \sin n\Omega_1 t), \quad (2.21)$$

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 (2.21),

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

визначаються з формул:

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) dt, \quad a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) \cos n\Omega_1 t dt, \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) \sin n\Omega_1 t dt. \quad (2.22)$$

Значно зручнішим і нагляднішим є другий вид розкладення 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:

$$A_{mn} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad \Psi_n = \arctg \frac{a_n}{b_n}, \quad \chi_n = \arctg \frac{b_n}{a_n}. \quad (2.24)$$

В багатьох випадках використовується комплексний ряд Фур'є

$$s(t) = \frac{1}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_{mn} e^{jn\Omega_1 t}, \quad (2.25)$$

де S_{mn} - комплексна амплітуда комплексного ряду Фур'є.

Комплексна амплітуда комплексного ряду Фур'є:

$$S_{mn} = a_n - jb_n = S_{mn} e^{-j\chi_n}, \quad (2.26)$$

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 розкладення в ряд Фур'є спрощується. Окрім цього, при знаходженні коефіцієнтів ряду та постійної складової симетричних сигналів необхідно інтегрувати на половині періоду і помножити результат на два.

Якщо ж сигнал $s(t)$ на протязі періоду має різні аналітичні вирази (рис.2.8), при розрахунку коефіцієнтів ряду інтегрування проводиться по окремих частинах періоду, що відповідають різним аналітичним виразам.

Наприклад:

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \left(\int_0^{t_1} s_1(t) dt + \int_{t_1}^T s_2(t) dt \right). \quad (2.27)$$

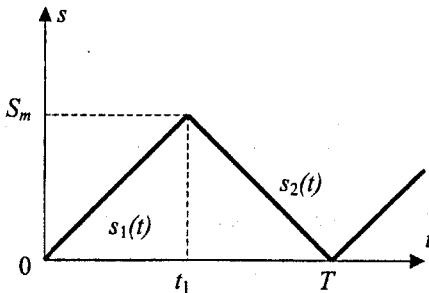


Рисунок 2.8 – Складний періодичний сигнал

2.9.2 Спектральний аналіз неперіодичних сигналів

2.9.2.1 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:

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt, \quad (2.28)$$

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

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

Застосувавши формулу Ейлера, вираз (2.28) приводиться до алгебраїчної форми комплексного числа:

$$\begin{aligned} S(j\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} s(t)(\cos\omega t - j\sin\omega t)dt = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\cos\omega t dt - j \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\sin\omega t dt = S_{\sigma}(\omega) - jS_{\psi}(\omega). \end{aligned} \quad (2.29)$$

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

$$S(j\omega) = S(\omega)e^{-j\psi(\omega)}, \quad (2.30)$$

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

Модуль спектральної густини та її аргумент знаходяться за формулами:

$$S(\omega) = \sqrt{S_{\sigma}^2(\omega) + S_{\psi}^2(\omega)}, \quad \psi(\omega) = \arctg \frac{S_{\psi}(\omega)}{S_{\sigma}(\omega)}. \quad (2.31)$$

При розрахунку $S(\omega)$ і $\psi(\omega)$ необхідно задатись рядом значень $\omega = (\omega_1 \div 20\omega_1)$, а значення ω_1 знайти за таким виразом:

$$\omega_1 = \frac{\pi}{5t_i}, \quad (2.32)$$

де t_i - тривалість імпульса.

2.9.2.2 Спектральний аналіз операторним методом

Операторний метод може бути застосований двома способами:

а) з використанням прямого перетворення Лапласа:

$$S(p) = \int_0^{\infty} s(t) e^{-pt} dt, \quad (2.33)$$

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

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

Другим способом досліджуваний складний неперіодичний сигнал потрібно розкласти на прості функції часу (рис.2.9).

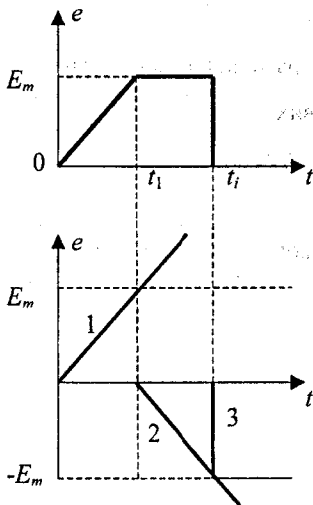


Рисунок 2.9 – Розкладення складного неперіодичного сигналу на прості функції часу

Перший сигнал описується виразом:

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

Його зображення за Лапласом:

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

Другий сигнал описується виразом:

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

Його зображення за Лапласом:

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

Третій сигнал описується виразом:

$$e_3(t) = -E_m 1(t - t_1),$$

а його зображення за Лапласом:

$$E_3(p) = -\frac{E_m}{p} e^{-pt_1}$$

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

$$E(p) = E_1(p) + E_2(p) + E_3(p). \quad (2.34)$$

У виразі (2.34) 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 2.9.2.1.

2.10 Перехідна характеристика

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

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

$$h(t) = \frac{u_2(t)}{1(t)}. \quad (2.35)$$

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 при вирішенні 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 $y(t)$:

$$y(t) = \frac{i_2(t)}{1(t)}. \quad (2.36)$$

Перехідна провідність вимірюється в сименсах.

Якщо на вході діє одиничний стрибок струму $1_i(t)$, а на виході визначається часова функція напруги $U_2(t)$, то реакцією кола буде перехідний опір $Z(t)$:

$$Z(t) = \frac{u_2(t)}{1_i(t)}. \quad (2.37)$$

Перехідний опір вимірюється в омах.

Приклад 1. Визначимо перехідну характеристику лінійного електричного кола, зображеного на рис.2.10. Складемо диференціальне рівняння кола.

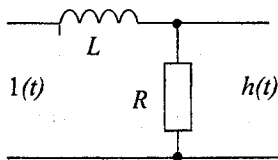


Рисунок 2.10 – Коло RL

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

$$L \frac{di}{dt} + iR = 1(t), \quad (2.38)$$

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

Розв'язок рівняння (2.38) дорівнює сумі загального розв'язку однорідного рівняння і окремого розв'язку неоднорідного рівняння:

$$i = i_{\text{вл}} + i_{\text{пр}}, \quad (2.39)$$

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

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

Однорідне рівняння для вільної складової має вигляд

$$L \frac{di_{\text{вл}}}{dt} + Ri_{\text{вл}} = 0. \quad (2.40)$$

На підставі (2.40) запишемо 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:

$$i_{\text{вл}} = Ae^{pt} = Ae^{-t/\tau}, \quad (2.41)$$

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 :

$$i_{\text{пр}} = \frac{1(t)}{R},$$

Аналітичний вираз струму в колі має вигляд:

$$i = \frac{1(t)}{R} + Ae^{-t/\tau}. \quad (2.42)$$

Постійну інтегрування A визначимо з початкової умови при $t=0$
 $i(0) = 0$.

З врахуванням початкових умов вираз (2.42) буде таким:

$$0 = \frac{1(t)}{R} + A. \quad (2.43)$$

З (2.43) знаходимо:

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

Значення A підставляємо в (2.42):

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

Вихідна напруга:

$$u_2(t) = iR = 1(t)(1 - e^{-t/\tau}).$$

Знайдене значення $u_2(t)$ підставляємо в (2.35):

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

Задаємося значеннями t і будемо графік $h(t)$ (рис.2.11)

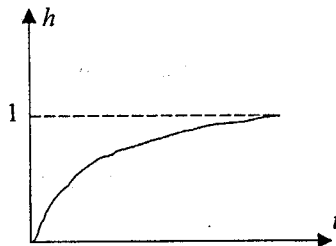


Рисунок 2.11 – Графік переходної характеристики

Приклад 2. Визначимо переходну характеристику операторним методом.

Операторна переходна характеристика кола

$$h(p) = \frac{K(p)}{p}, \quad (2.44)$$

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

Знаходимо операторний коефіцієнт передачі кола рис.2.10.

$$K(p) = \frac{U_2(p)}{U_1(p)}. \quad (2.45)$$

Знаходимо $U_2(p)$, але спочатку необхідно знайти комплексний опір кола, операторний опір $z(p)$, струм $I(p)$ та вихідну напругу $U_2(p)$.

Комплексний опір:

$$Z(j\omega) = R + j\omega L. \quad (2.46)$$

В виразі (2.46) $j\omega$ замінюємо на p і одержуємо операторний опір:

$$Z(p) = R + pL. \quad (2.47)$$

Знаходимо струм $I(p)$:

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

і вихідну напругу $U_2(p)$:

$$U_2(p) = I(p)R = \frac{U_1 R}{R + pL}$$

Останній вираз підставляємо в (2.45):

$$K(p) = \frac{R}{R + pL}. \quad (2.48)$$

Знаходимо остаточно операторну перехідну характеристику:

$$h(p) = \frac{K(p)}{p} = \frac{R}{p(R + pL)} = \frac{N(p)}{pM(p)}. \quad (2.49)$$

Оригінал перехідної характеристики знайдемо з допомогою формули розкладання. Для виразу (2.49) вона матиме вигляд:

$$h(t) = \frac{N(0)}{M(0)} + \frac{N(p)}{pM'(p)} \cdot e^{pt}, \quad (2.50)$$

де $N(0)$ - значення виразу $N(p)$ при $p = 0$;

$M(0)$ - значення виразу $M(p)$ при $p = 0$;

$M'(p)$ - значення похідної від $M(p)$;

p - корінь рівняння $M(p) = 0$.

Знаходимо p :

$$R + pL = 0;$$

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

Визначаємо складові виразу (2.50)

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

і остаточне його значення:

$$h(t) = \frac{R}{R} + \frac{R}{-\frac{R}{L}} e^{-\frac{R}{L}t} = 1 - e^{-t/\tau} \quad (2.51)$$

Вираз (2.51) повністю збігається з виразом, одержаним класичним методом.

Операторний метод має значні переваги перед класичним при аналізі складних кіл.

Якщо зображення розшукуваного струму чи напруги має вигляд раціонального дробу:

$$\frac{N(p)}{M(p)} = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n} \quad (2.52)$$

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

$$f(t) = \sum_{k=1}^n \frac{N(p_k)}{M'(p_k)} e^{p_k t}. \quad (2.53)$$

Якщо зображення має вигляд:

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

то оригінал визначається виразом:

$$f(t) = \frac{N(0)}{M(0)} + \sum_{k=1}^n \frac{N(p_k)}{p_k M'(p_k)} e^{p_k t}. \quad (2.54)$$

Якщо серед коренів $M(p)=0$ є комплексно-спряжені корені \dot{p}_k і p_k^* , то при визначенні відповідних їм значень, що знаходяться під знаком суми в рівняннях (2.53) і (2.54) 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 за виразом :

$$f(t) = 2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{N(\dot{p}_1)}{M'(\dot{p}_1)} e^{\dot{p}_1 t} \right\} \quad (2.55)$$

при $F(p) = \frac{N(p)}{M(p)}$.

2.11 Методи дослідження передачі сигналів лінійними електричними колами

Найбільш часто використовують три методи дослідження передачі сигналів через лінійні електричні кола: спектральний, операторний, часовий.

2.11.1 Спектральний метод

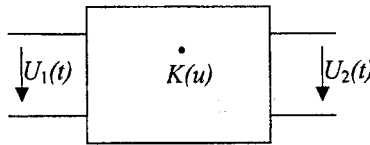


Рисунок 2.12 – Лінійне коло у вигляді чотириполюсника

При розв'язанні задачі аналізу спектральним методом повинен бути відомий комплексний коефіцієнт передачі кола $K(j\omega)$ (рис.2.12).

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

Якщо вхідний сигнал є неперіодичним, то амплітуда елементарного гармонічного коливання в спектрі сигналу визначається через спектральну густину виразом (2.28). Для вхідного сигналу 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:

$$S_1(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U_1(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (2.56)$$

Оскільки комплексний коефіцієнт передачі електричного кола \dot{K}_u дорівнює відношенню комплексних амплітуд на виході і на вході кола і визначається формулою (2.19), то елементарна амплітуда в спектрі вихідного сигналу $d\dot{U}_2$ визначається за формулою:

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

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

$$S_2(j\omega) = S_1(j\omega) \dot{K}_u, \quad (2.57)$$

де $S_2(j\omega)$ - спектральна густина вихідного сигналу.

Отже спектральна густина вихідного сигналу $S_2(j\omega)$ дорівнює добутку спектральної густини вхідного сигналу $S_1(j\omega)$ на комплексний коефіцієнт передачі кола \dot{K}_u . Записуючи комплексні величини, що входять в рівняння (2.57), в показниковій формі одержуємо:

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

$$S_2(\omega) e^{j\psi_2(\omega)} = S_1(\omega) K(\omega) e^{j[\psi_1(\omega) + \varphi(\omega)]}. \quad (2.58)$$

Прирівнюємо модулі комплексних величин в виразі (2.58):

$$S_2(\omega) = S_1(\omega) K(\omega). \quad (2.59)$$

Модуль спектральної густини вихідного сигналу $S_2(j\omega)$ дорівнює добутку модулів спектральної густини вхідного сигналу і комплексного коефіцієнта передачі кола.

Прирівнюємо аргументи комплексних величин в рівнянні (2.58)

$$\psi_2(\omega) = \psi_1(\omega) + \varphi(\omega). \quad (2.60)$$

Аргумент спектральної густини вихідного сигналу дорівнює сумі аргументів спектральної густини вхідного сигналу і комплексного коефіцієнта передачі кола.

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

$$s_2(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_2(j\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (2.61)$$

2.11.2 Операторний метод

При розв'язанні задачі аналізу операторним методом повинен бути відомим коефіцієнт передачі кола в операторній формі $K(p)$ (рис.2.13).

Вхідний сигнал розбивається на елементарні сигнали, що є згасаючими коливаннями. Це еквівалентно перетворенню вхідного сигналу за Лапласом:

$$U_1(p) = \int_0^{\infty} u_1(t) e^{-pt} dt. \quad (2.62)$$

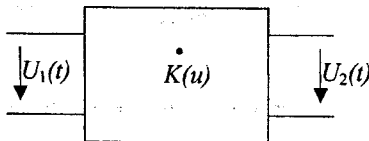


Рисунок 2.13 – Лінійне коло у вигляді чотириполусника.

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

$$U_2(p) = U_1(p) \cdot K(p). \quad (2.63)$$

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

$$u_2(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} U_2(p) e^{pt} dp \quad (2.64)$$

Значно швидше можна досягти мети, розбивши вхідний сигнал на складові ($u_{11}(t), u_{12}(t) \dots u_{1n}(t)$), що мають табличні зображення за Лапласом.

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

$$U_{21}(p) = U_{11}(p)K(p); \quad U_{22}(p) = U_{12}(p)K(p); \quad \dots \quad U_{2n}(p) = U_{1n}(p)K(p). \quad (2.65)$$

Знаходимо зображення вихідного сигналу за принципом суперпозиції:

$$U_2(p) = U_{21}(p) + U_{22}(p) + \dots + U_{2n}(p). \quad (2.66)$$

Застосувавши до виразу (2.66) формулу розкладання, знаходимо $u_2(t)$.

2.11.3 Часовий метод

При розв'язанні задачі аналізу часовим методом повинна бути відома одна з часових характеристик кола (перехідна характеристика $h(t)$ або ж

імпульсна характеристика $g(t)$. 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.2.14,а) (яку, до речі, необхідно знайти в одному з попередніх пунктів курсової роботи).

В цьому випадку вхідна напруга $u_1(t)$ наближено замінюється сумою стрибків напруги (рис.2.14,б). Кожен зі стрибків зсунутий відносно сусіднього на один і той же час $\Delta\tau$. Моменти стрибків позначені $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \dots$

Вхідна напруга при цьому дорівнює :

$$u_1(t) \approx U_1(0) \cdot 1(t) + \Delta_1 U_1(\tau_1) \cdot 1(t - \tau_1) + \Delta_2 U_1(\tau_2) \cdot 1(t - \tau_2) + \dots \quad (2.67)$$

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

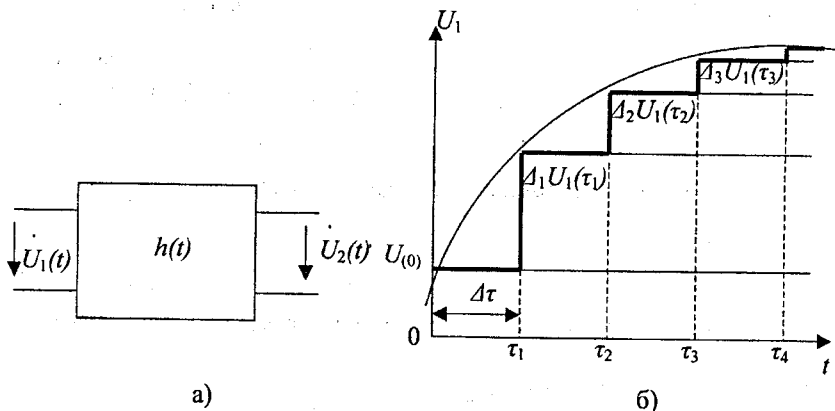


Рисунок 2.14 – Подання сигналу сумою стрибків

Знак наближеної рівності стоїть тому, що ступінчаста напруга, що утворена з стрибків, відрізняється від дійсної. Зменшуючи часові інтервали

Δt і тим самим збільшуючи кількість стрибків в визначеному інтервалі часу, можна збільшувати степінь наближення ступінчастої напруги до дійсної.

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

$$\begin{aligned} \Delta_0 U_2(t) &= U_1(0) \cdot h(t), \\ \Delta_1 U_2(t) &= \Delta_1 U_1(\tau_1) \cdot h(t - \tau_1), \\ \Delta_2 U_2(t) &= \Delta_2 U_1(\tau_2) \cdot h(t - \tau_2), \\ &\text{-----} \\ \Delta_k U_2(t) &= \Delta_k U_1(\tau_k) \cdot h(t - \tau_k). \end{aligned} \quad (2.68)$$

Згідно з принципом суперпозиції вихідна напруга дорівнює сумі елементарних вихідних напруг, що визначаються виразом (2.68):

$$u_2(t) \approx U_1(0)h(t) + \sum_k \Delta_k U_1(\tau_k)h(t - \tau_k). \quad (2.69)$$

Оскільки вхідна напруга $u_1(t)$ виражена формулою (2.67) наближено, то вираз (2.69) також є наближенням. Для одержання точного виразу вихідної напруги домножимо і розділимо вираз під знаком суми на часовий проміжок $\Delta\tau$ і визначимо межу суми при $\Delta\tau \rightarrow 0$:

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

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 при інтегруванні не має сенсу), то

$$u_2(t) = U_1(0)h(t) + \int_0^t U_1'(\tau)h(t-\tau)d\tau, \quad (2.70)$$

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

$$U_1'(\tau) = \left. \frac{dU_1(t)}{dt} \right|_{t=\tau} - \text{похідна вхідної напруги;}$$

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

Вираз (2.70) 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.2.15):

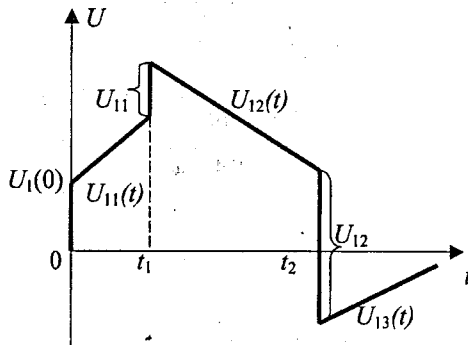


Рисунок 2.15 – Складний вхідний сигнал

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. Для виразу (рис.2.15) матимемо:

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

$$u_2(t) = U_1(0)h(t) + \int_0^t U_1'(\tau)h(t-\tau)d\tau ; \quad (2.71)$$

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

$$u_2(t) = U_1(0)h(t) + \int_0^{t_1} U_1'(\tau)h(t-\tau)d\tau + U_{11}h(t-t_1) + \int_{t_1}^t U_{12}'(\tau)h(t-\tau)d\tau ; \quad (2.72)$$

в) на третьому проміжку часу від t_2 до ∞ :

$$u_2(t) = U_1(0)h(t) + \int_0^{t_1} U_{11}'(\tau)h(t-\tau)d\tau + U_{11}h(t-t_1) + \int_{t_1}^{t_2} U_{12}'(\tau)h(t-\tau)d\tau - U_{12}h(t-t_2) + \int_{t_2}^t U_{13}'(\tau)h(t-\tau)d\tau , \quad (2.73)$$

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 (2.71)–(2.73).

2.12 Моделювання АЧХ, ФЧХ і перехідної характеристики кола

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

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

З вікна Instruments вибираємо функціональний генератор (Function Generator) (рис.2.15).

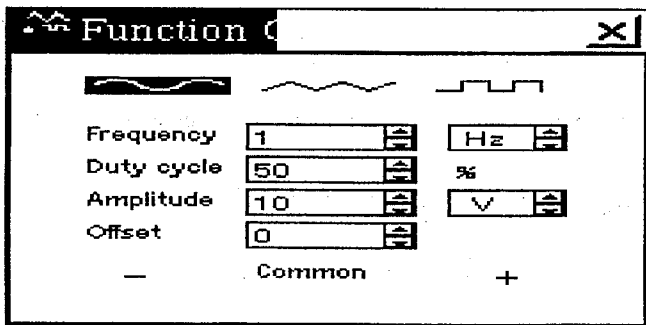


Рисунок 2.15 – Передня панель функціонального генератора

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).

Для цього з 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 схемі, 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.2.16). 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.2.17), натиснувши клавішу Phase, - вимірювач ФЧХ (рис.2.18)

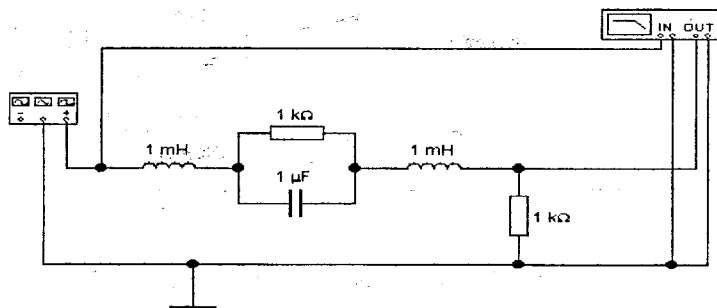


Рисунок 2.16 – Досліджувана схема з генератором на вході і вимірювачем частотних характеристик (ВЧХ) на виході

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.

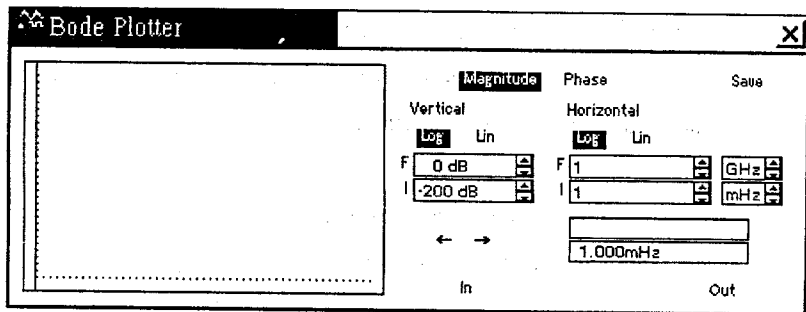


Рисунок 2.17 – Передня панель вимірювача АЧХ

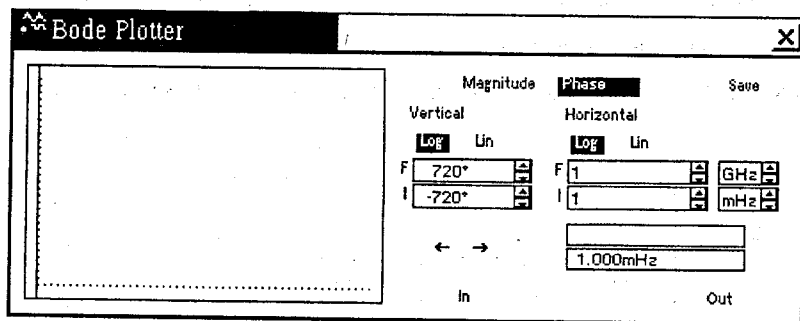


Рисунок 2.18 – Передня панель вимірювача ФЧХ

З вікна Instruments вибираємо осцилограф (рис.2.19.) (Oscilloscope) і під'єднуємо його канал A (Channel A) до виходу схеми, попередньо встановивши потрібний масштаб по осі Y і по осі X.

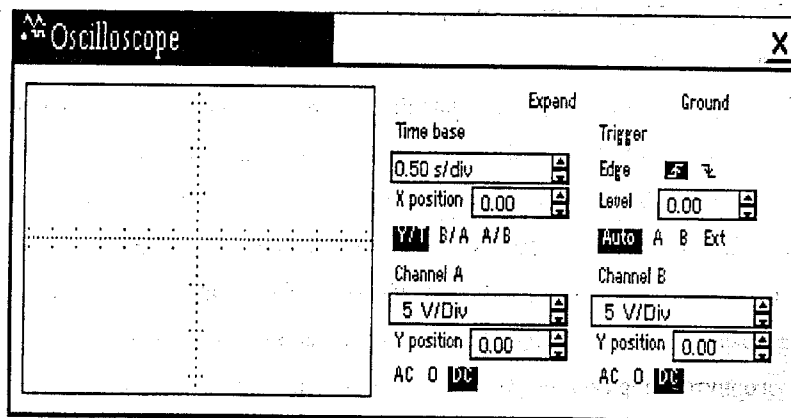


Рисунок 2.19 – Передня панель осцилографа

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

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

Наприклад, якщо досліджується сигнал частотою 1 кГц , часова розгортка повинна бути близькою до $0,1 \text{ мс}$. При цьому можна спостерігати один період сигналу. Один період сигналу частотою 10 кГц потребує часової розгортки $0,01 \text{ мс}$.

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

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

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.

При побудові топографічної діаграми скористатись комплексними напругами, одержаними в першому пункті завдання.

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

При визначенні комплексного коефіцієнта передачі кола за напругою спочатку знайти операторний коефіцієнт передачі за напругою. Одержавши робочі вирази для АЧХ і ФЧХ, розрахувати їх значення в діапазоні частот за допомогою ЕОМ.

Спектральний аналіз проводити до одержання робочих виразів. Графіки спектральних характеристик будувати на підставі розрахунків,

зроблених з допомогою ЕОМ. При розрахунку спектральних характеристик неперіодичного сигналу вибирати ω_1 зі співвідношення:

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{10t_i} = \frac{\pi}{5t_i}$$

Перехідну характеристику кола рекомендується визначати операторним методом, розрахунок її миттєвих значень за робочим виразом виконувати з 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.

При аналізі одержаних А- та У- параметрів зробити висновки про оборотність чи необоротність кола, підкріпивши висновок перевіркою тотожності рівняння зв'язку.

Аналіз періодичного і неперіодичного сигналів робити з врахуванням наявної симетрії сигналів.

Порівняти між собою графіки вихідного сигналу, 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 І СИГНАЛІВ

Курсова робота з дисципліни “Основи радіоелектроніки”
ВДТУ. 6.0910.12.20.81.56 КР

Перевірив:
доцент кафедри радіотехніки

Куцевол М.О.

Виконав:
студент групи МА – 02

Степаненко С.С.

2002

Приклад оформлення другого аркуша курсової роботи

Зміст

1	Завдання до курсової роботи	3
2	Аналіз лінійного кола при 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.....	18
6	Визначення коефіцієнта передачі за напругою, АЧХ і ФЧХ кола та побудова їх графіків	20
7	Спектральний аналіз сигналів та побудова спектральних діаграм	25
7.1	Спектральний аналіз періодичного сигналу	27
7.2	Спектральний аналіз неперіодичного сигналу	32
8	Визначення перехідної характеристики та побудова її графіка	38
9	Визначення напруги на виході кола та побудова її графіка	40
9.1	Визначення напруги на виході кола операторним методом	40
9.2	Визначення напруги на виході кола часовим методом	42
10	Моделювання АЧХ, ФЧХ і перехідної характеристики кола	44
	Висновки	46
	Література	47

Додаток В

Приклад оформлення третього аркуша курсової роботи

1 Завдання до курсової роботи.

1.1 Зміст завдання.

1.1.1 Визначити струми в колі та напруги на елементах кола при 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 коефіцієнт передачі кола за напругою, АЧХ і ФЧХ та побудувати їх графіки.

1.1.7 Виконати спектральний аналіз періодичного і неперіодичного сигналів з побудовою спектральних діаграм (неперіодичний сигнал проаналізувати з допомогою прямого перетворення Фур'є та з допомогою операторних зображень за Лапласом).

1.1.8 Визначити перехідну характеристику кола і побудувати її графік.

1.1.9 Визначити вихідну напругу кола при дії на вході 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.

Приклад оформлення четвертого аркуша курсової роботи

1.2. Початкові дані (варіант 21.12.67, Степаненко С. С.)

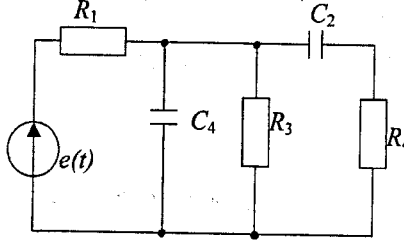


Рисунок 1.1 – Схема досліджуваного кола

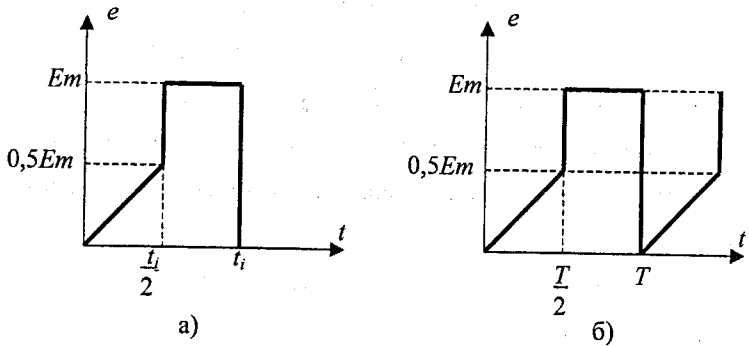


Рисунок 1.2 – Неперіодичний (а) та періодичний (б) сигнали

Параметри елементів кола та вхідних сигналів

$E_m = 10\text{В}$; $T = 20\text{мкс}$; $t_i = 1,6\text{мкс}$; $R_1 = 10\text{кОм}$; $R_3 = 20\text{кОм}$; $R_4 = 30\text{кОм}$;
 $C_2 = 0,01\text{мкФ}$; $C_4 = 5\text{нФ}$; $\psi = 40^\circ$

Термін виконання роботи – чотирнадцятий навчальний тиждень

Завдання видав

доцент кафедри РТ

Завдання отримав

студент гр. МА – 02

Куцевол М.О.

Степаненко С.С.

Додаток Д

Приклад оформлення п'ятого аркуша курсової роботи

2 Аналіз лінійного кола при дії на його вході гармонічної ЕРС

2.1 Розрахунок методом контурних струмів

Початкові дані:

$E_m = 10\text{В}; T = 20\text{мкс}; t_1 = 1,6\text{мкс}; R_1 = 10\text{кОм}; R_3 = 20\text{кОм}; R_4 = 30\text{кОм};$
 $C_2 = 0,01\text{мкФ}; C_4 = 5\text{нФ}; \Psi = 40^\circ$

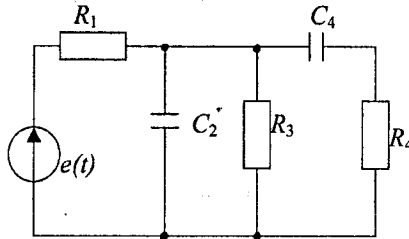


Рисунок 2.1 – Схема досліджуваного кола

Знаходимо додатково:

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

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

Комплексні опори гілок кола

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

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

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

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

Навчальне видання

Микола Олександрович Куцевол

ОСНОВИ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ
Виконання курсової роботи
Навчальний посібник

Оригінал-макет підготовлений автором

Редактор О. Д. Скалоцька

Навчально-методичний відділ ВДТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001р.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВДТУ

Підписано до друку *8.01.03р*
Формат 29,7 × 42 1/4
Друк різнографічний
Наклад *100* прим.
Зам. № *2002-260*

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
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95