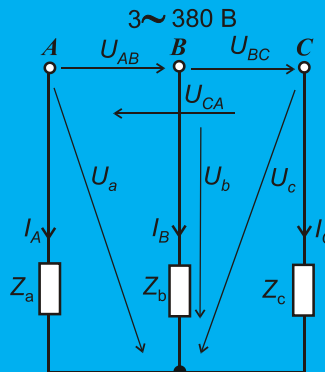
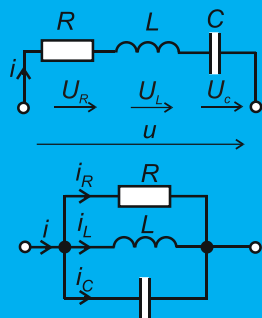
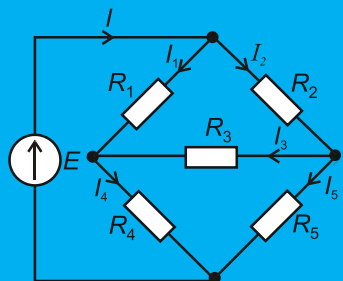
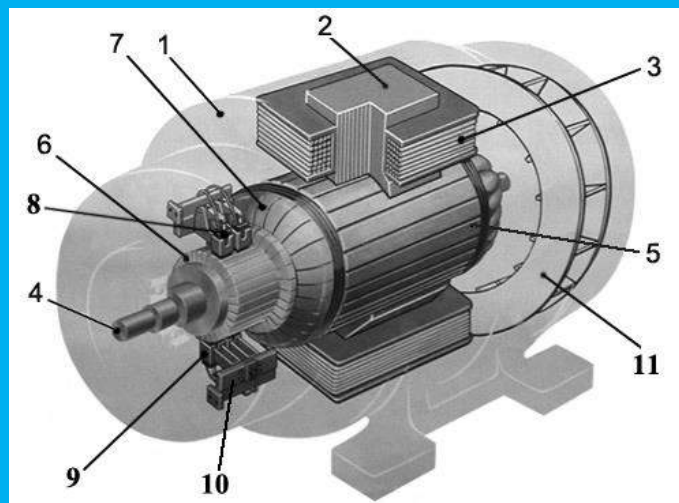




$$I = \frac{E}{R_{\text{екв}}}, R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3}, I = \frac{U}{z}, z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2},$$

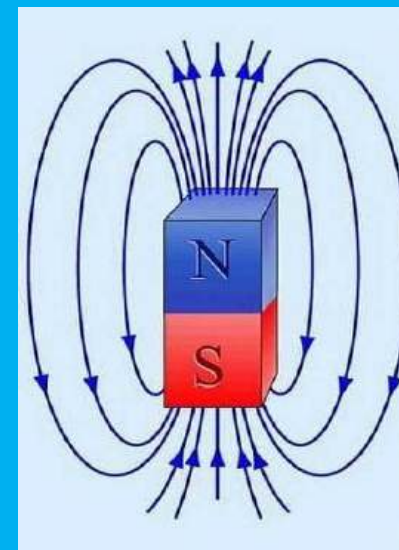
$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}, I_\phi = \frac{U_\phi}{z_\phi}, U_\phi = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}, P_\phi = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi$$



$$P_{\text{ном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}}, M_{2\text{ном}} = 9,55 \frac{P_{2\text{ном}}}{n_{\text{ном}}}, n = \frac{U_{\text{я}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}}}{C_E \Phi}$$

ЗАВДАННЯ З ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ З ПРИКЛАДАМИ ТА ПОЯСНЕННЯМИ

**В.Ф. Болюх , В.С. Марков,
І.В. Поляков, Є.В. Гончаров,
Н.В. Крюкова**



**ЗАВДАННЯ
З ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ
З ПРИКЛАДАМИ
ТА ПОЯСНЕННЯМИ**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

В.Ф. Болюх, В.С. Марков, І.В. Поляков,
Є.В. Гончаров, Н.В. Крюкова

ЗАВДАННЯ З ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ
З ПРИКЛАДАМИ ТА ПОЯСНЕННЯМИ

НАВЧАЛЬНИЙ-МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК

до розрахункових, розрахунково-графічних та курсових робіт з дисциплін:
«Електротехніка та електромеханіка», «Електротехніка та електроніка»,
«Електротехніка та основи електроніки»,
«Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка»,
«Електричне обладнання, основи електроніки»
для студентів неелектротехнічних спеціальностей
денної та заочної (дистанційної) форми навчання

В авторській редакції

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 3 від 30. 10. 2025

Харків
НТУ «ХПІ»
2025

УДК 621.3.011.7
Б 79

А в т о р с ь к и й к о л е к т и в:

В.Ф. Болюх, В.С. Марков, І.В. Поляков, Є.В. Гончаров, Н.В.Крюкова

Рецензенти:

О.Г. Середа, д-р. техн. наук, проф., Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

В.Є. Плюгін, д-р. техн. наук, проф., Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова

Болюх В.Ф.

Б 79 Завдання з електротехніки з прикладами та поясненнями : навч.-метод. посібник/ В.Ф. Болюх, В.С. Марков, І.В. Поляков та інш. — Харків: НТУ «ХПІ», 2025. — 224 с.

Наведені загальні теоретичні відомості про електричні та магнітні кола, будову, принцип дії та розрахунок характеристик електротехнічних та електронних пристроїв, а також наведені варіанти завдань та приклади розрахунку задач. Для кращого розуміння теоретичного матеріалу та методів розрахунку завдань наведені досить ґрунтовні пояснення. Призначено для самостійної роботи студентів денної та заочної (дистанційної) форми навчання над розрахунковими, розрахунково-графічними завданнями та над курсовою роботою низки електротехнічних дисциплін.

УДК 621.3.011.7

Іл. 172. Табл. 21. Бібліогр.: 8 назв.

© Болюх В.Ф., Марков В.С.,
Поляков І.В., Гончаров Є.В.,
Крюкова Н.В., 2025

ВСТУП

Виконання розрахункових завдань, у тому числі розрахунково-графічних завдань або курсових робіт, є одним з найважливіших елементів навчального процесу при вивченні інженерно-орієнтованих дисциплін, до яких належать електротехнічні дисципліни: «Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка», «Електротехніка та електроніка», «Електротехніка та основи електроніки», «Електротехніка та електромеханіка», «Електричне обладнання, основи електроніки», які викладаються кафедрою загальної електротехніки НТУ «ХП». Своєчасне та правильне виконання розрахункового завдання є необхідною умовою для отримання студентом позитивної підсумкової оцінки в кінці навчального семестру.

Наведені в навчально-методичному посібнику задачі охоплюють основні розділи електротехнічних дисциплін: розрахунок електричних кіл, розрахунок магнітних кіл та характеристик електротехнічних пристроїв, а також розрахунок електронних пристроїв. Після формулювання умови кожної задачі наводяться загальні теоретичні положення. Перед тим як приступати до розв'язання певної задачі слід ознайомитися із цими положеннями, далі йде приклад розв'язання із необхідними поясненнями. Як показав багаторічний досвід викладання електротехнічних дисциплін, наведення тільки одного прикладу розв'язання задачі замало, тому потрібні додаткові пояснення, які допомагають студентові уникнути багатьох помилок при розв'язанні задачі.

Передбачається, що студент спочатку прослухав теоретичний матеріал на лекції, потім на практичному занятті закріпив знання отримані на лекції, а потім користуючись даним навчально-методичним посібником, самостійно розв'язував задачу. Тим більш, це важливо, якщо студент не відвідував певних лекційних та практичних занять та його знання мають значні лакуни в необхідній навчальній інформації. Також це буде важливо для студентів заочно-дистанційної форми навчання, коли кількість аудиторних занять у порівнянні із денною формою навчання значно обмежена.

Також наприкінці посібника наводиться список необхідної навчальної та методичної літератури.

Іншим важливим питанням виконання розрахункових завдань є правильне та якісне оформлення самої роботи тобто індивідуального завдання. Це

важливий навик, який студент має отримати навчаючись у вищому навчальному закладі. Цим навиком не можна нехтувати. Крім того, це фактор впливає на оцінку, яку отримує студент за виконання розрахункового завдання. Тому на це треба звертати увагу та серйозно ставитися до вимог викладача щодо оформлення індивідуального завдання. Приклад титульного аркушу та правила оформлення розрахункового завдання наводиться в кінці посібника в Додатках. Прохання уважно ознайомитися з цими правилами. Ці правила ґрунтуються на документі «Система стандартів з організації навчального процесу. Загальні вимоги до виконання. СТЗВО-ХПІ-3.01-2025».

У посібнику пропонується 100 варіантів чисельних даних для кожної задачі. **Тільки викладач, який проводить практичні заняття або установчі лекції, визначає номер варіанту завдань для кожного студента!**

Автори будуть вдячні за зауваження та пропозиції щодо навчально-методичного посібника, які можна надсилати за адресою:

61002, Харків 2, вул. Кирпичова 2, НТУ «ХПІ», кафедра загальної електротехніки або електронною поштою **vladyslav.markov@khpi.edu.ua**

РОЗДІЛ 1

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

1.1. Формулювання задач на розрахунок електричних кіл постійного струму

Тільки викладач задає номер варіанту студенту для виконання завдання!

Задача 1. Розрахунок електричного кола з одним джерелом ЕРС при змішаному з'єднанні споживачів.

За заданим варіантом, якій наведено в табл. 1.1:

а) розв'язати пряму задачу: накреслити задану електричну схему (рис. 1.1) і визначити струми в усіх вітках кола методом еквівалентних перетворень;

б) розв'язати зворотну задачу: для схеми з пункту (а) за заданим струмом у вітці з опором R_1 визначити струми в усіх інших вітках, а також значення ЕРС.

Перевірити правильність розв'язання як прямої, так і зворотної задачі, склавши рівняння балансу потужностей кола.

Задача 2. Розрахунок електричного кола з одним джерелом енергії методом еквівалентного перетворення “трикутник”-“зірка”.

За заданим варіантом, якій наведено в табл. 1.2, накреслити задану електричну схему (рис. 1.2) з джерелом ЕРС у вітці між двома вузлами, які вказані у таблиці двома латинськими літерами (напряму ЕРС обрати від першого до другого вузла). Визначити струми в усіх вітках методом еквівалентних перетворень із використанням заміни “трикутника” опорів “зіркою”, або навпаки, а також скласти і перевірити рівняння балансу потужностей.

Задача 3. Розрахунок електричного кола методом контурних струмів.

За заданим варіантом, якій наведено в табл. 1.3, накреслити задану електричну схему (рис. 1.3) і визначити струми в усіх вітках методом контурних струмів, а також скласти і перевірити рівняння балансу потужностей.

Задача 4. Розрахунок електричного кола методом еквівалентного генератора.

За заданим варіантом, якій наведено в табл. 1.3, накреслити схему кола (рис. 1.3) та знайти струм у вітці з опором R_1 методом еквівалентного генератора.

Таблиця 1.1 – Вхідні дані до задачі 1

Варіант	Номер схеми за рис. 1.1	Опори, Ом						Пряма задача. E , В	Зворотна задача, I_1 , А
		R_0	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5		
1	1	1	5	10	20	15	4	120	12
2	2	2	40	20	10	40	20	130	10
3	3	1	10	15	14	7	30	200	1,8
4	4	0,5	15	30	15	17	25	180	1,5
5	5	0,5	20	20	10	36	10	90	1,6
6	6	1	4	30	70	9	30	100	10
7	7	2	20	10	10	45	20	240	1,8
8	8	1	6	45	30	24	12	140	2,5
9	9	1	4	60	15	60	40	130	10
10	10	1	6	20	10	15	16	120	6
11	11	2,5	10	30	12	60	5	270	4
12	12	2,5	4	50	30	20	15	150	3
13	13	2,5	15	8	13	10	9	90	2
14	14	1	25	15	8	5	8	135	6
15	15	2	7	18	5	10	15	90	12
16	16	1,5	7	4	3	6	5	220	3
17	17	2,5	20	35	25	5	60	140	9
18	18	1	10	6	4	12	8	100	6
19	19	2,5	24	15	10	30	6	210	3
20	20	1,2	15	9	4	21	6	135	8
21	21	1	20	10	20	8	12	110	10
22	22	2,5	20	20	24	10	25	240	1,5
23	23	1	20	15	60	20	7	100	6
24	24	2	12	30	20	30	120	200	2,5
25	25	2	15	10	17	15	7	180	5
26	26	1	15	10	40	10	50	80	9
27	27	2,5	20	20	20	5	5	150	4
28	28	2	11	5	9	8	24	150	2
29	29	1	40	15	20	10	60	220	1
30	30	1	22	10	45	40	18	200	3
31	1	0,9	6	3	4	3	7	160	5
32	2	2	6	10	5	20	90	240	2,5
33	3	1	5	20	14	3	12	140	8
34	4	2,5	10	30	60	5	50	165	8

Продовження табл. 1.1 – Вхідні дані до задачі 1

Варіант	Номер схеми за рис. 1.1	Опори, Ом						Пряма задача. $E, В$	Зворотна задача, $I_1, А$
		R_0	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5		
35	5	2	20	30	25	200	50	210	1
36	6	0,5	4	10	30	5	30	240	6
37	7	2	40	20	20	100	5	110	9
38	8	2	9	24	24	70	30	100	8
39	9	0,5	7	30	60	30	70	190	6
40	10	2	16	12	20	5	18	70	9
41	11	1	5	6	30	6	7	180	3
42	12	1	8	10	14	12	48	130	15
43	13	2	60	10	7	15	7	150	4
44	14	2,5	50	90	21	60	21	125	1,8
45	15	2	12	60	13	80	80	220	4
46	16	0,5	30	10	20	30	5	250	4,8
47	17	1	10	5	10	6	4	80	6
48	18	1	3	4	5	10	10	130	10
49	19	1	5	19	70	30	5	90	4
50	20	0,5	20	40	10	10	20	100	6
51	21	1	12	3	4	5	7	90	4
52	22	2,5	30	40	30	19	40	45	1,2
53	23	1	30	6	30	120	4	200	2,5
54	24	1	6	15	10	15	60	100	10
55	25	2,5	20	40	6	10	6	75	6
56	26	2	40	40	30	60	30	240	1,5
57	27	1	40	30	70	14	5	210	2,5
58	28	2	30	40	30	16	40	220	1
59	29	2,5	5	12	40	8	15	200	4
60	30	1	8	20	100	30	25	110	10
61	1	1	4	5	7	12	4	90	3
62	2	0,5	7	10	5	6	15	100	10
63	3	1,5	48	16	3	6	15	120	2
64	4	1	10	100	25	7	20	150	4
65	5	1	40	80	52	25	80	105	0,8
66	6	1	4	3	6	8	10	120	6
67	7	2,5	12	16	20	15	6	200	9

Продовження табл. 1.1 – Вхідні дані до задачі 1

Варіант	Номер схеми за рис. 1.1	Опори, Ом						Пряма задача. $E, В$	Зворотна задача, $I_1, А$
		R_0	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5		
68	8	1	10	15	10	20	80	180	5
69	9	1	10	10	15	80	20	90	10
70	10	2,5	5	10	30	30	10	150	8
71	11	2	20	45	30	90	10	85	2,4
72	12	4	50	45	15	60	20	120	3
73	13	3	10	10	7	40	7	60	1,6
74	14	2,5	50	90	21	60	21	125	1,8
75	15	1	14	25	16	40	40	230	3
76	16	0,5	20	60	30	20	5	130	4,8
77	17	1	15	20	10	4	14	160	2
78	18	2,5	4	10	6	20	12	220	4
79	19	2	10	38	140	60	10	180	4
80	20	1	5	10	10	15	10	110	16
81	21	2	24	6	8	10	14	180	2
82	22	1	30	10	10	10	18	100	2,5
83	23	2	60	14	20	80	18	300	2
84	24	2,5	20	30	30	15	15	100	1,5
85	25	2,5	20	40	6	10	6	75	6
86	26	1	20	20	15	30	15	150	3
87	27	2,5	35	30	70	5	9	160	2
88	28	1	10	30	10	8	20	110	6
89	29	2,5	20	10	20	50	10	75	4
90	30	2	16	40	200	60	50	220	2,5
91	1	1	3	40	50	10	6	190	5
92	2	2	5	12	3	36	6	220	7,5
93	3	2	15	35	4,5	4	60	225	14
94	4	2	8	30	20	7	80	150	6
95	5	2,5	10	8	4	30	9	120	2,5
96	6	1,5	6	20	5	16	60	180	4
97	7	1	4	5	7	30	17	260	4,5
98	8	1	2	20	80	90	10	120	10
99	9	2	6	45	30	10	15	170	7,5
100	10	2	11,5	15	10	40	24	270	6

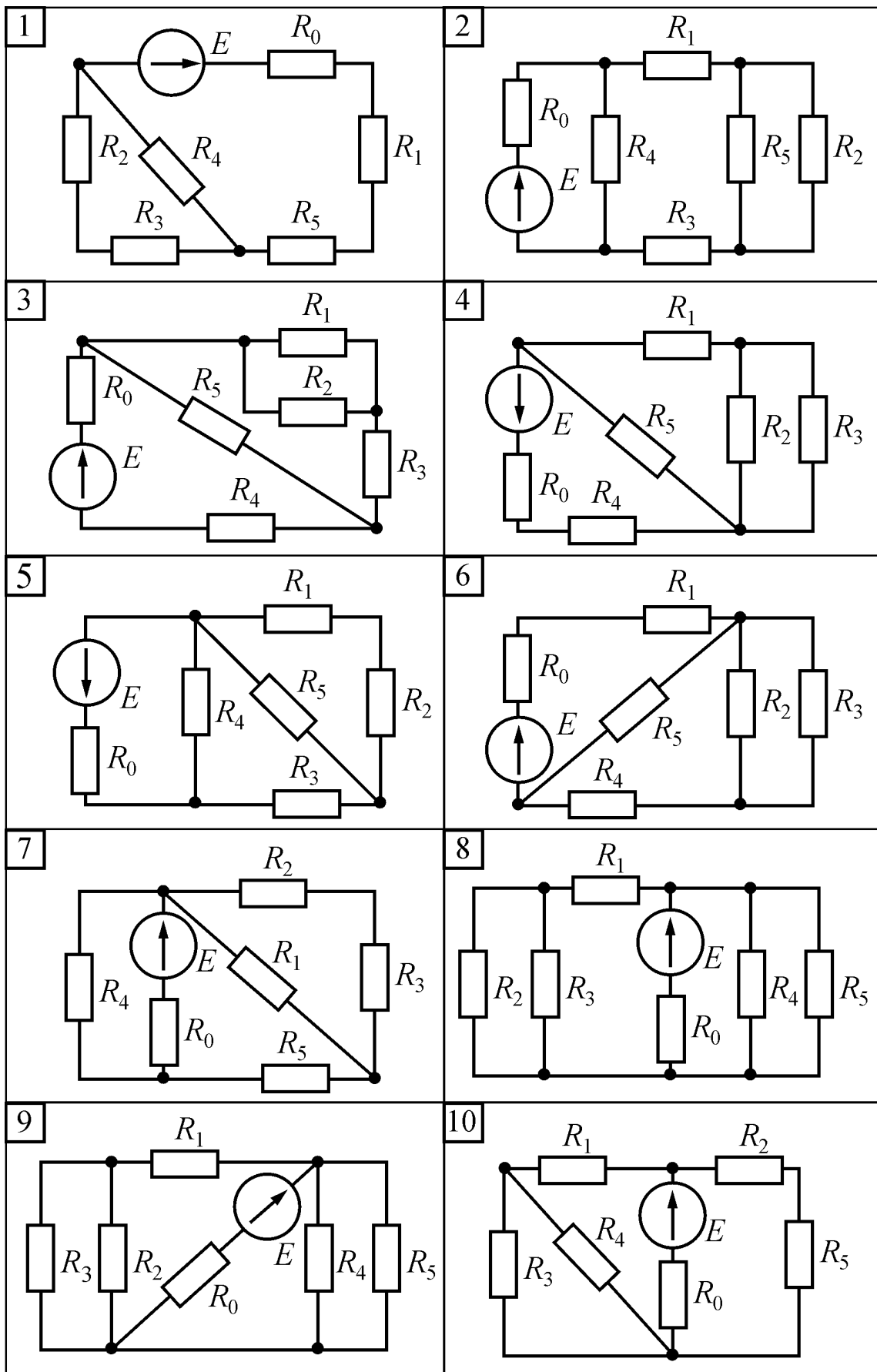


Рисунок 1.1 – Розрахункова електрична схема до задачі 1

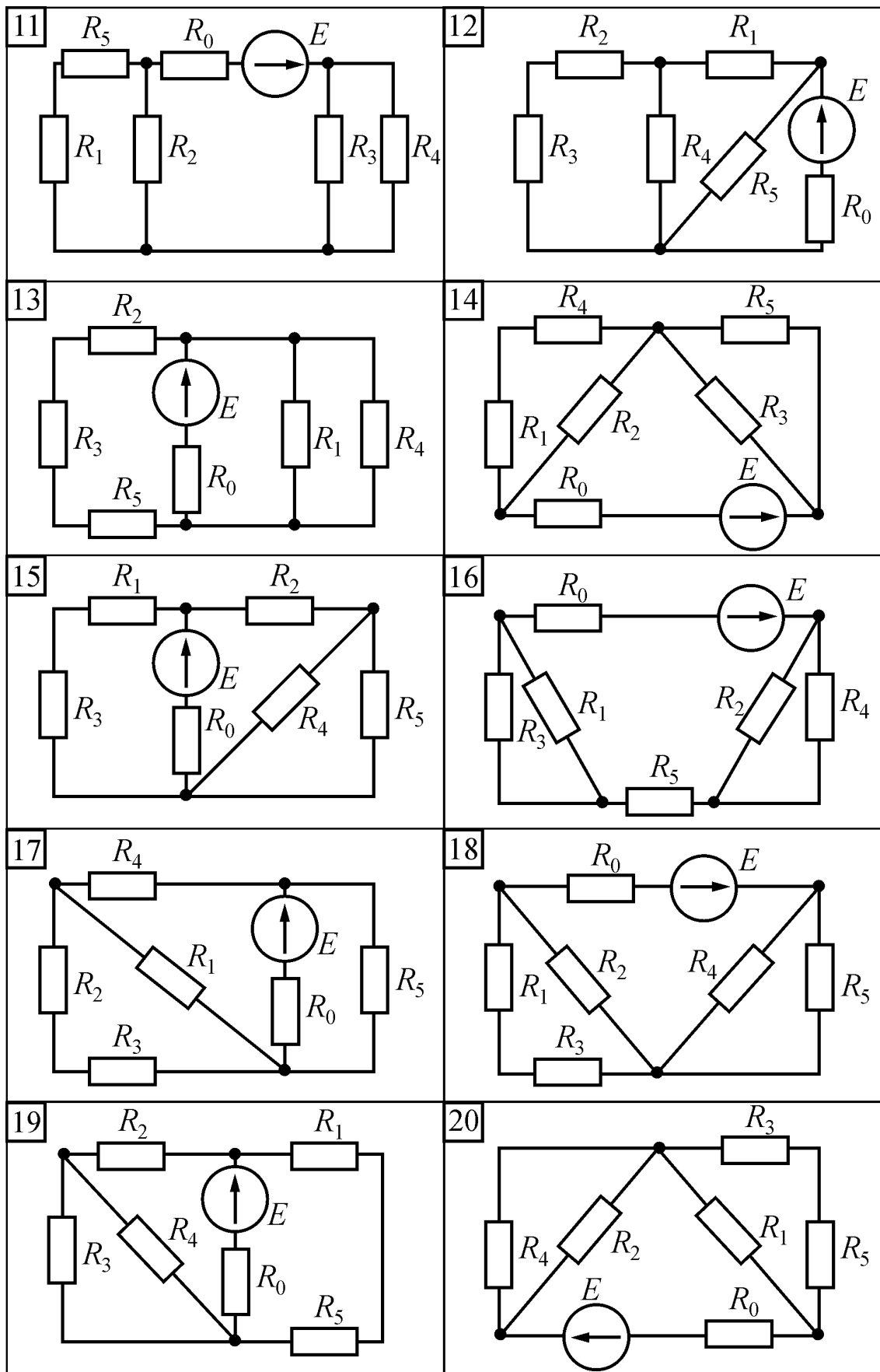


Рисунок 1.1 (продовження) – Розрахункова електрична схема до задачі 1

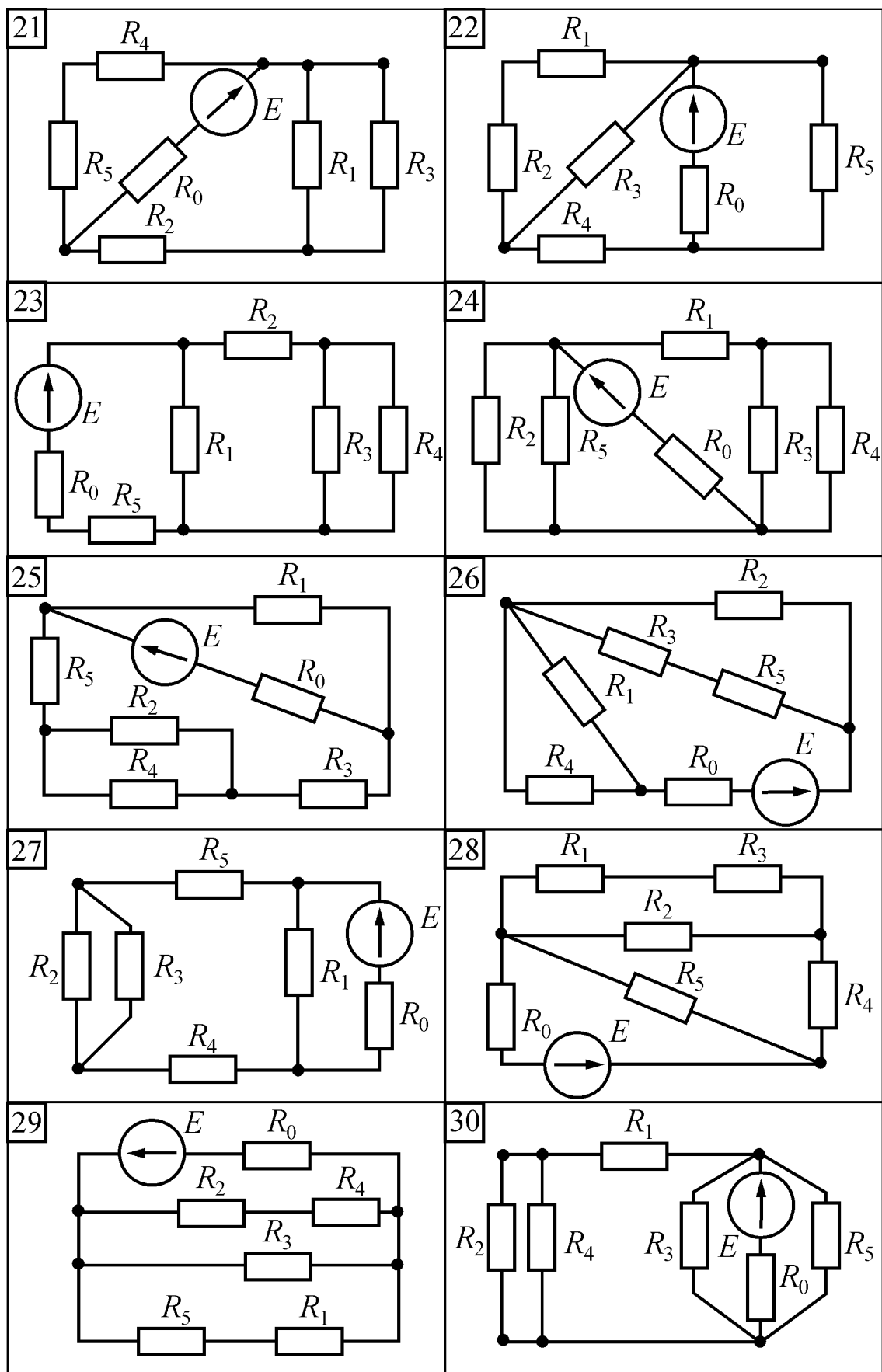


Рисунок 1.1 (продовження) – Розрахункова електрична схема до задачі 1

Таблиця 1.2 – Вхідні дані до задачі 2

Варіант	Номер схеми за рис. 1.2	Опір, Ом						ЕРС	
		R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	$E, В$	Вітка
1	1	10	40	20	8	20	20	200	bc
2	2	30	14	18	30	7	15	250	ac
3	3	30	30	14	30	70	10	160	bc
4	4	12	24	36	7	74	16	210	cd
5	5	8	10	30	30	30	20	180	bd
6	6	12	5	40	40	20	14	250	ad
7	7	20	5	30	30	30	5	150	cb
8	8	14	40	7	80	54	80	180	ac
9	9	10	20	30	65	8	50	150	bd
10	10	4	7	18	12	6	8	90	ac
11	11	20	10	10	6	85	5	175	cd
12	12	3	9	33	33	33	69	165	ad
13	13	8	36	24	11	12	24	270	bd
14	14	18	4	48	48	48	64	200	ab
15	15	25	5	13	20	5	15	300	bd
16	16	5	10	8	2	10	10	150	bc
17	17	8	20	10	20	12	5	170	bd
18	18	14	20	30	50	25	30	200	cd
19	19	3	9	6	17	4	4	285	ac
20	20	8	2	6	6	6	13	135	cd
21	21	10	4	6	5	3	10	90	ad
22	22	12	24	12	7	17	24	150	cd
23	23	19	9	33	33	33	4	135	ab
24	24	10	6	50	40	25	10	250	bd
25	25	4	28	60	14	60	60	270	bc
26	26	9	6	3	2,5	37	9	180	ad
27	27	3	5	3	2	2	3	90	ab
28	28	6	2	7	20	10	20	160	ad
29	29	2	24	24	22	24	7	180	ac
30	30	11	30	3	8	30	40	300	bc
31	1	4	5	20	30	50	9	150	ab
32	2	8	7	6	12	18	4	180	bc
33	3	4	40	30	60	90	15	210	ac
34	4	18	10	12	12	4,6	3	180	bd

Продовження табл. 1.2 – Вхідні дані до задачі 2

Варіант	Номер схеми за рис. 1.2	Опір, Ом						EPC	
		R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	E, B	Вітка
35	5	12	12	24	4,5	9	32	300	<i>ac</i>
36	6	75	5	75	4	45	75	200	<i>bd</i>
37	7	18	18	18	4	9	6	180	<i>ad</i>
38	8	14	5	28	3	8	14	145	<i>bd</i>
39	9	10	10	15	5	12	25	120	<i>cd</i>
40	10	14	6	12	36	24	8	240	<i>ad</i>
41	11	9	9	9	37	7	4	90	<i>bd</i>
42	12	8	18	36	36	36	12	240	<i>cd</i>
43	13	12	28	8	62	13	11	250	<i>bc</i>
44	14	10	20	30	30	30	3	300	<i>ad</i>
45	15	50	40	26	10	5	10	250	<i>bc</i>
46	16	51	51	13	51	43	13	225	<i>ab</i>
47	17	6	7	4	18	12	8	180	<i>bc</i>
48	18	14	20	8	50	15	30	210	<i>ac</i>
49	19	12	3	13	7	6	18	270	<i>ab</i>
50	20	1	9	6	6	24	6	120	<i>ac</i>
51	21	32	2	24	24	24	4	200	<i>bc</i>
52	22	12	3	12	4	7	24	140	<i>ac</i>
53	23	68	8	36	36	36	7	175	<i>bc</i>
54	24	5	15	10	9	15	15	300	<i>ad</i>
55	25	30	10	70	30	4	30	240	<i>ab</i>
56	26	11	27	5,5	17	18	9	240	<i>bd</i>
57	27	6	3	6	4	18	6	100	<i>bc</i>
58	28	10	20	8	10	2	5	210	<i>bd</i>
59	29	20	7	4	12	40	40	150	<i>ab</i>
60	30	9	13	27	9	9	5	300	<i>ac</i>
61	1	20	6	32	20	8	10	300	<i>bd</i>
62	2	25	15	10	5	15	15	90	<i>cd</i>
63	3	10	10	17,5	60	7,5	5	240	<i>bd</i>
64	4	2	5	10	20	10	35	200	<i>ab</i>
65	5	20	5	30	30	30	5	150	<i>cb</i>
66	6	12	5	40	40	20	14	250	<i>ad</i>
67	7	45	5	10	20	30	15	300	<i>ac</i>

Продовження табл. 1.2 – Вхідні дані до задачі 2

Варіант	Номер схеми за рис. 1.2	Опір, Ом						EPC	
		R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	E, B	Вітка
68	8	15	30	75	6	4,5	60	240	<i>ad</i>
69	9	6	42	24	24	24	5	220	<i>ac</i>
70	10	3	6	4	18	6	6	150	<i>bd</i>
71	11	18	5	12	3	12	42	215	<i>bc</i>
72	12	5	9	45	45	45	65	200	<i>bd</i>
73	13	9	18	10	8	6	12	190	<i>ad</i>
74	14	6	24	3	4	36	12	240	<i>bc</i>
75	15	10	2	6	8	10	55	180	<i>ab</i>
76	16	2	13	10	2	8	2	140	<i>cd</i>
77	17	51	11	57	10	57	57	150	<i>ac</i>
78	18	35	5	15	30	15	7	200	<i>bd</i>
79	19	12	4	8	2	6	18	120	<i>bc</i>
80	20	3	3	3	3	2	5	270	<i>bd</i>
81	21	20	5	3	5	13	25	260	<i>ab</i>
82	22	4	60	9	30	22	10	200	<i>bd</i>
83	23	5	20	25	7	2	10	155	<i>cd</i>
84	24	34	12	4	8	18	6	180	<i>ac</i>
85	25	7	12	6	12	12	86	300	<i>cd</i>
86	26	12	12	12	20	3	2	295	<i>ac</i>
87	27	20	40	15	10	20	5	200	<i>cd</i>
88	28	4	6	36	20	20	10	300	<i>ab</i>
89	29	7	24	24	7	24	22	225	<i>bc</i>
90	30	5	18	84	4	18	18	300	<i>bd</i>
91	1	1	20	2	6	20	10	225	<i>ac</i>
92	2	15	2,5	15	30	5	45	240	<i>ab</i>
93	3	65	5	45	45	45	5	170	<i>ad</i>
94	4	12	9	3	6	24	12	180	<i>bc</i>
95	5	10	7	8	4	4	11	180	<i>ab</i>
96	6	2	16	5	10	10	3	120	<i>ac</i>
97	7	15	20	15	9	2	4	125	<i>bd</i>
98	8	5	25	15	15	15	2,5	90	<i>bc</i>
99	9	26	1	10	30	10	2	235	<i>ab</i>
100	10	20	30	60	9	30	30	120	<i>bc</i>

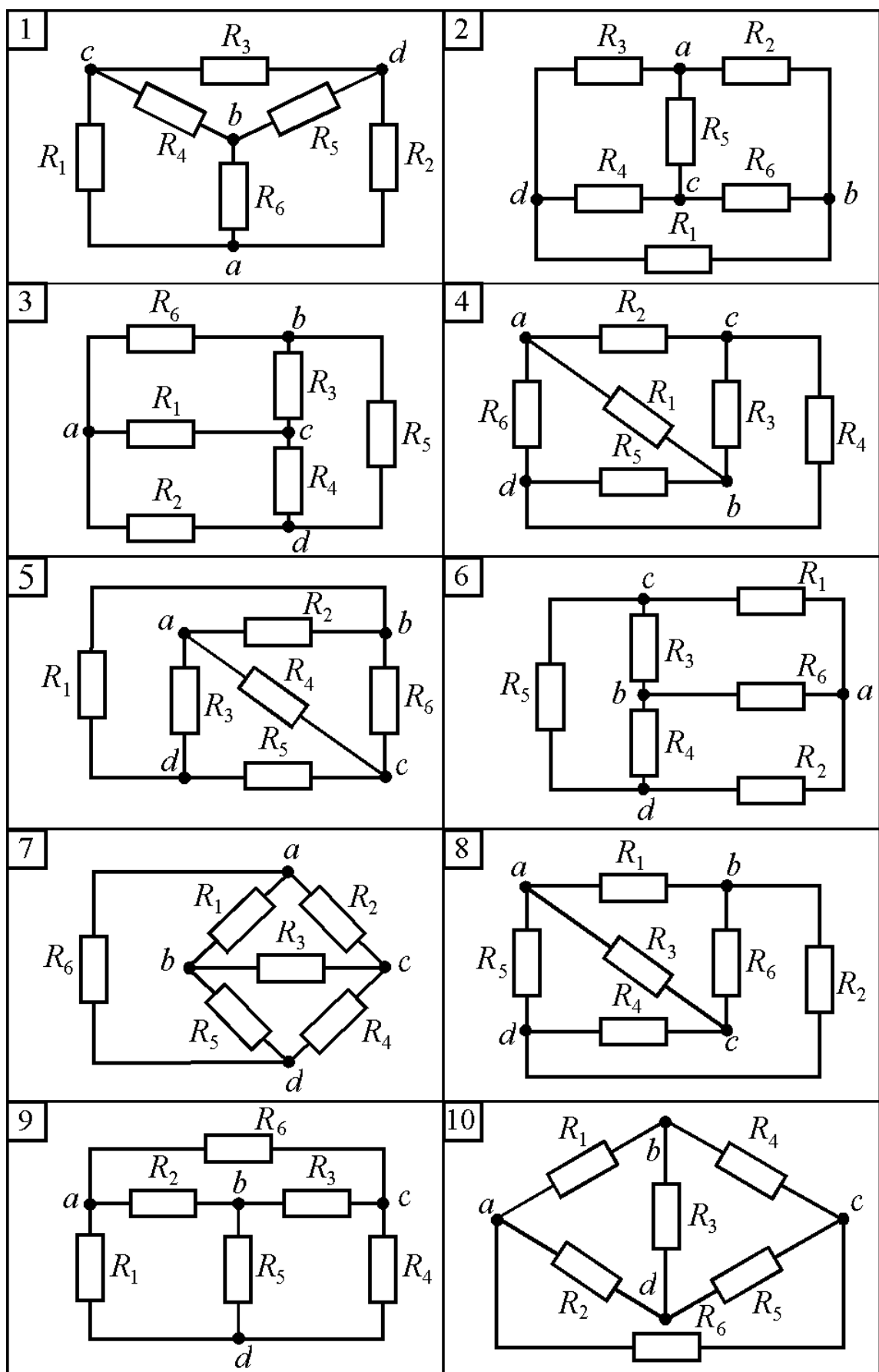


Рисунок 1.2 – Розрахункова електрична схема до задачі 2

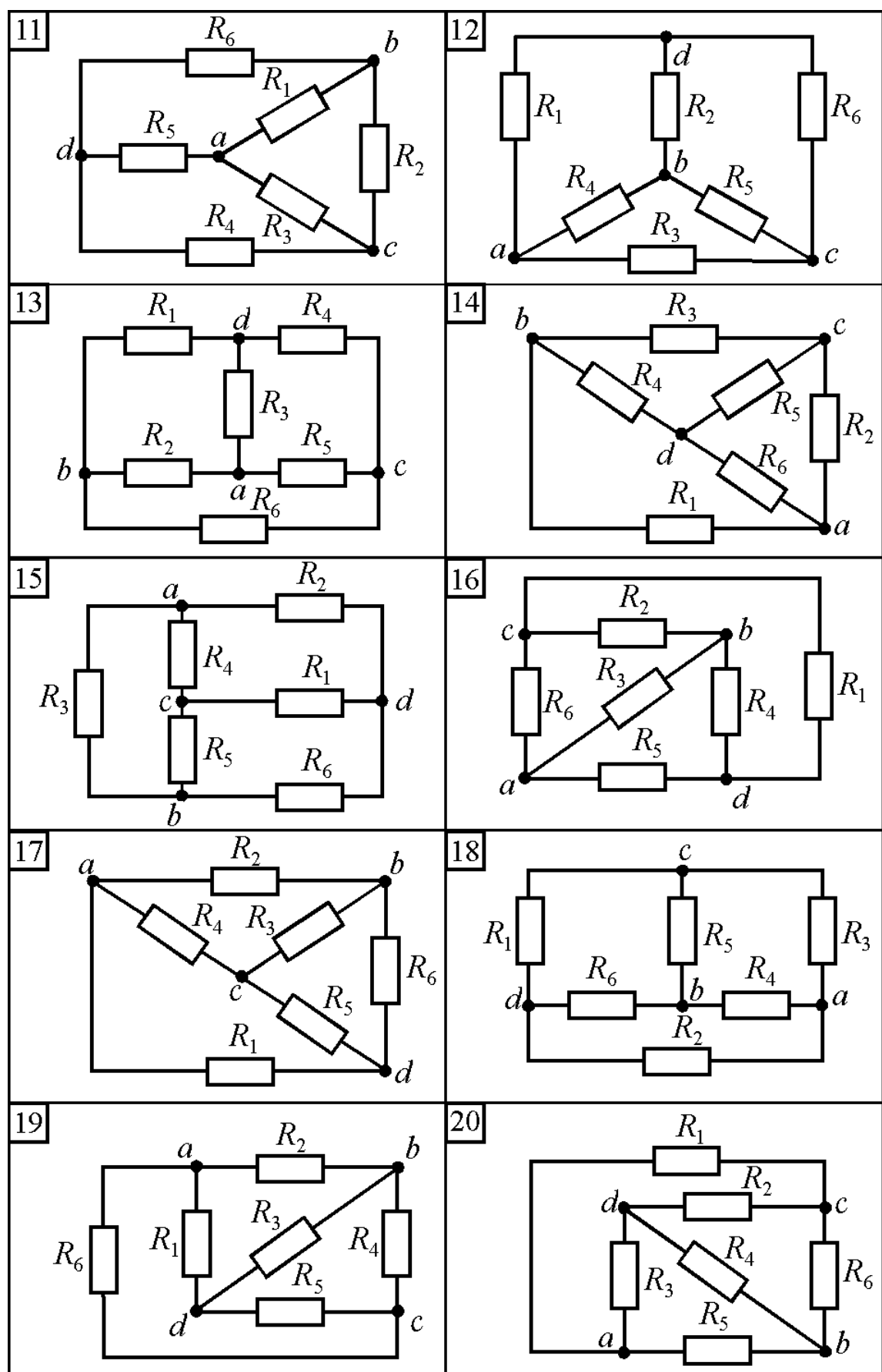


Рисунок 1.2 (продовження) – Розрахункова електрична схема до задачі 2

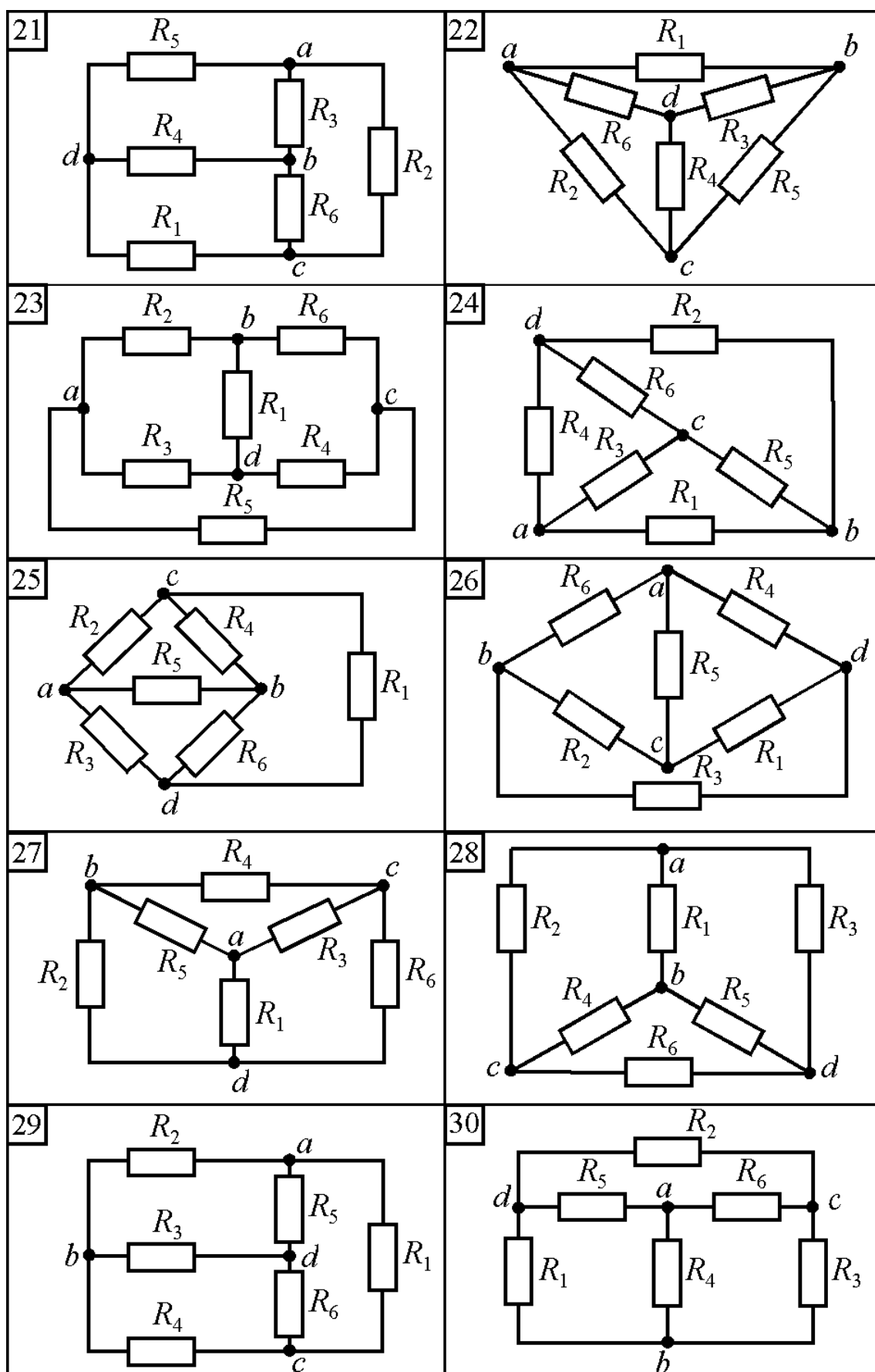


Рисунок 1.2 (продовження) – Розрахункова електрична схема до задачі 2

Таблиця 1.3 – Вхідні дані до задач 3 та 4

Варі- ант	Номер схеми за рис. 1.3	ЕРС, В		Опір, Ом					
		E_1	E_2	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
1	1	90	70	6	15	6	8	5	12
2	2	100	30	6	1	8	6	7	20
3	3	170	95	4	5	18	6	10	6
4	4	130	220	10	17	14	8	7	20
5	5	150	85	13	6	9	2	10	7
6	6	90	100	6	3	7	12	4	8
7	7	125	155	4	2	21	3	4	11
8	8	150	50	5	4	6	14	9	16
9	9	120	40	8	10	12	13	6	30
10	10	90	80	2	4	4	7	10	5
11	11	130	160	4	2	10	4	20	18
12	12	65	30	33	4	12	5	1	5
13	13	145	160	10	5	15	10	25	10
14	14	100	60	5	21	10	6	9	2
15	15	110	75	12	7	15	4	3	10
16	16	270	120	9	9	7	9	2	17
17	17	240	100	1,5	5	14	8	10	12
18	18	110	55	10	10	15	20	15	15
19	19	195	480	5	35	15	20	15	15
20	20	100	100	7,5	15	15	4	45	15
21	21	90	75	12	6	3	15	4	3
22	22	35	40	7	10	4	2	3,5	8
23	23	70	55	60	10	10	5	4	15
24	24	100	80	7	5	8	8	12	7
25	25	70	110	20	14	8	2	25	6
26	26	150	55	4	5	4,5	7	2	16
27	27	190	135	26	6	10	24	5	15
28	28	75	70	5	3	10	15	10	2
29	29	135	90	2	11	10	0,5	5	0,5
30	30	120	50	11	4	2	4	7	6
31	1	270	210	12	30	12	16	10	24
32	2	150	135	10	12	10	30	11	56
33	3	80	25	1	3	5,5	34	3	1,5
34	4	195	330	20	34	28	16	14	40

Продовження таблиці 1.3 – Вхідні дані до задач 3 та 4

Варіант	Номер схеми за рис. 1.3	ЕРС, В		Опір, Ом					
		E_1	E_2	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
35	5	130	110	9	4	20	35	4	2
36	6	140	105	12	4	5	4	15	17
37	7	55	150	4	3	10	5	15	4
38	8	110	70	5	6	40	2	1	6
39	9	140	160	10	3	6	8	16	8
40	10	40	35	1	6	5	2,5	1	12
41	11	120	40	1	6	4	11	2	1,5
42	12	40	110	14	4	15	6	3	2
43	13	125	35	12	2	25	4	3	7
44	14	185	210	6	11	5	10	9	30
45	15	90	90	6	6	6	1	4	16
46	16	125	145	6	9	5	15	2	3
47	17	110	30	5	24	6	6	6	4
48	18	150	75	1	14	5	5	1	9
49	19	130	20	8	10	6	5	15	3
50	20	70	130	10	15	16	10	17	6
51	21	120	50	10	2	4	4	6	3
52	22	105	195	15	5	5	10	20	28
53	23	90	70	60	10	10	5	9	20
54	24	100	120	3	9	8	8	12	12
55	25	80	220	15	14	8	2	25	6
56	26	300	110	8	10	9	14	4	32
57	27	200	135	20	7	10	30	5	15
58	28	150	140	10	6	20	30	20	4
59	29	270	180	4	22	20	1	10	1
60	30	240	100	22	8	4	8	14	12
61	1	180	140	3	7,5	3	4	2,5	6
62	2	50	45	5	6	5	15	5,5	28
63	3	240	75	2	6	11	68	6	3
64	4	130	220	5	8,5	7	4	3,5	10
65	5	80	80	3	21	2	6	5	11
66	6	120	150	4	4	8	10	3	5
67	7	360	300	16	8	26	14	30	27

Продовження таблиці 1.3 – Вхідні дані до задач 3 та 4

Варі- ант	Номер схеми за рис. 1.3	ЕРС, В		Опір, Ом					
		E_1	E_2	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
68	8	110	70	10	4	5	7	3	7
69	9	90	95	15	5	10	5	20	30
70	10	160	140	2	12	10	5	2	24
71	11	240	80	2	12	8	22	4	3
72	12	40	40	3	8	18	4	5	14
73	13	60	120	4	2	10	2	5	2
74	14	120	150	7	5	2	9	3	15
75	15	210	170	6	4	3	5	4	10
76	16	55	65	2	3	10	30	4	16
77	17	100	200	4	5	6	11	12	8
78	18	120	60	1	12	6	10	20	10
79	19	240	90	1	6	12	16	12	12
80	20	100	50	20	24	2	8	21	10
81	21	50	20	10	2	5	6	2,5	20
82	22	140	160	14	20	8	4	7	16
83	23	140	110	30	5	5	2,5	2	7,5
84	24	230	160	11	6	8	8	15	7
85	25	40	155	15	14	8	7	25	6
86	26	130	85	3	5	5	6	2	15
87	27	150	80	9	10	5	14	8	8
88	28	90	75	6	9	10	9	3	5
89	29	155	170	15	5	10	27	20	18
90	30	65	25	5,5	2	1	2	3,5	3
91	1	110	230	30	4	20	12	6	16
92	2	40	90	6	2	4	3	6	4
93	3	130	220	9	10	3	9	8	3
94	4	145	70	2	10	10	2	3	6
95	5	105	15	11	10	16	1	5	12
96	6	160	100	10	4	8	7	2	30
97	7	120	100	8	4	13	7	15	13,5
98	8	95	130	5	9	8	2	10	18
99	9	180	210	15	5	20	5	20	40
100	10	50	95	2	4	5	5	25	2

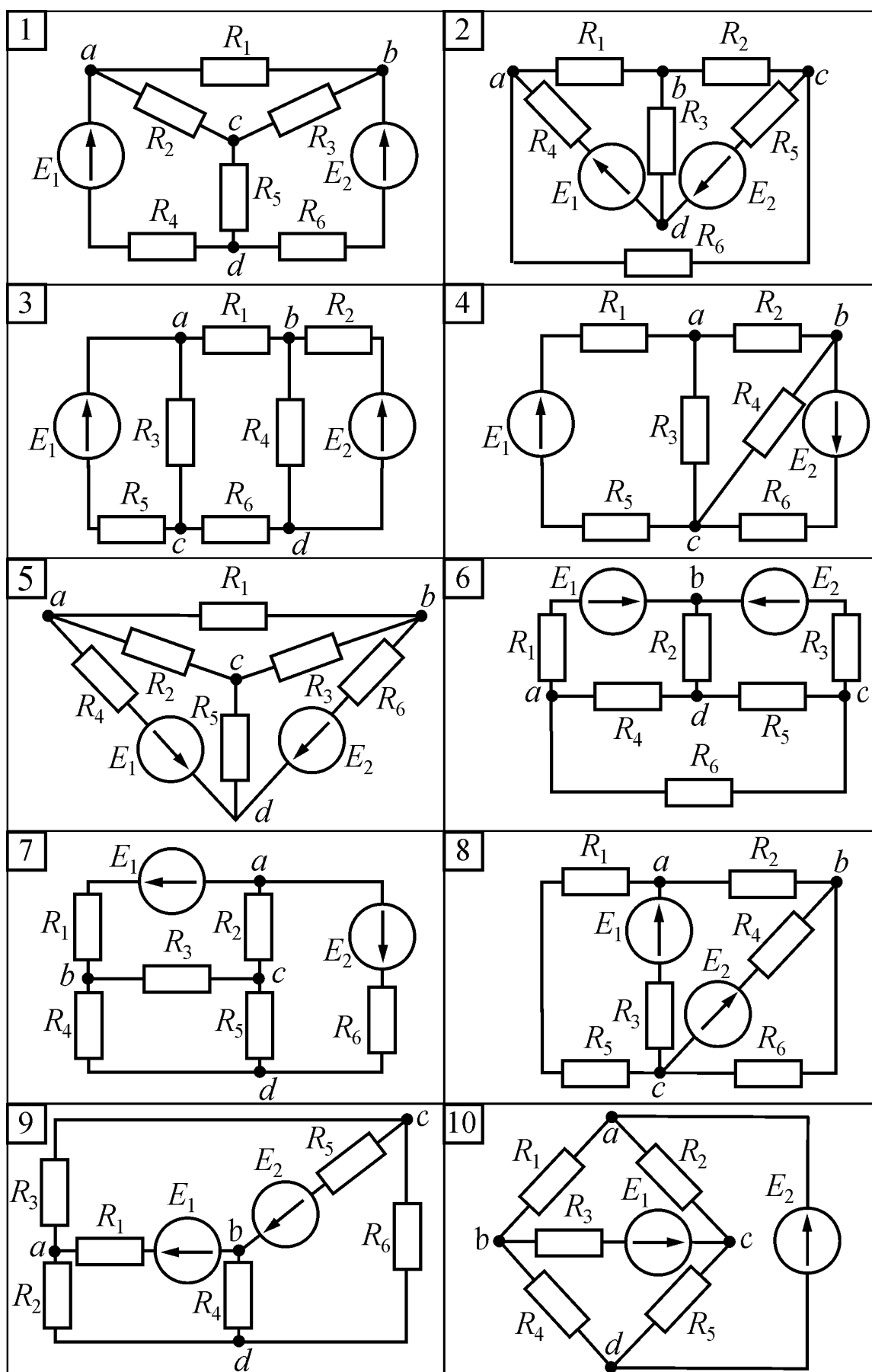


Рисунок 1.3 – Розрахункова електрична схема до задач 3,4

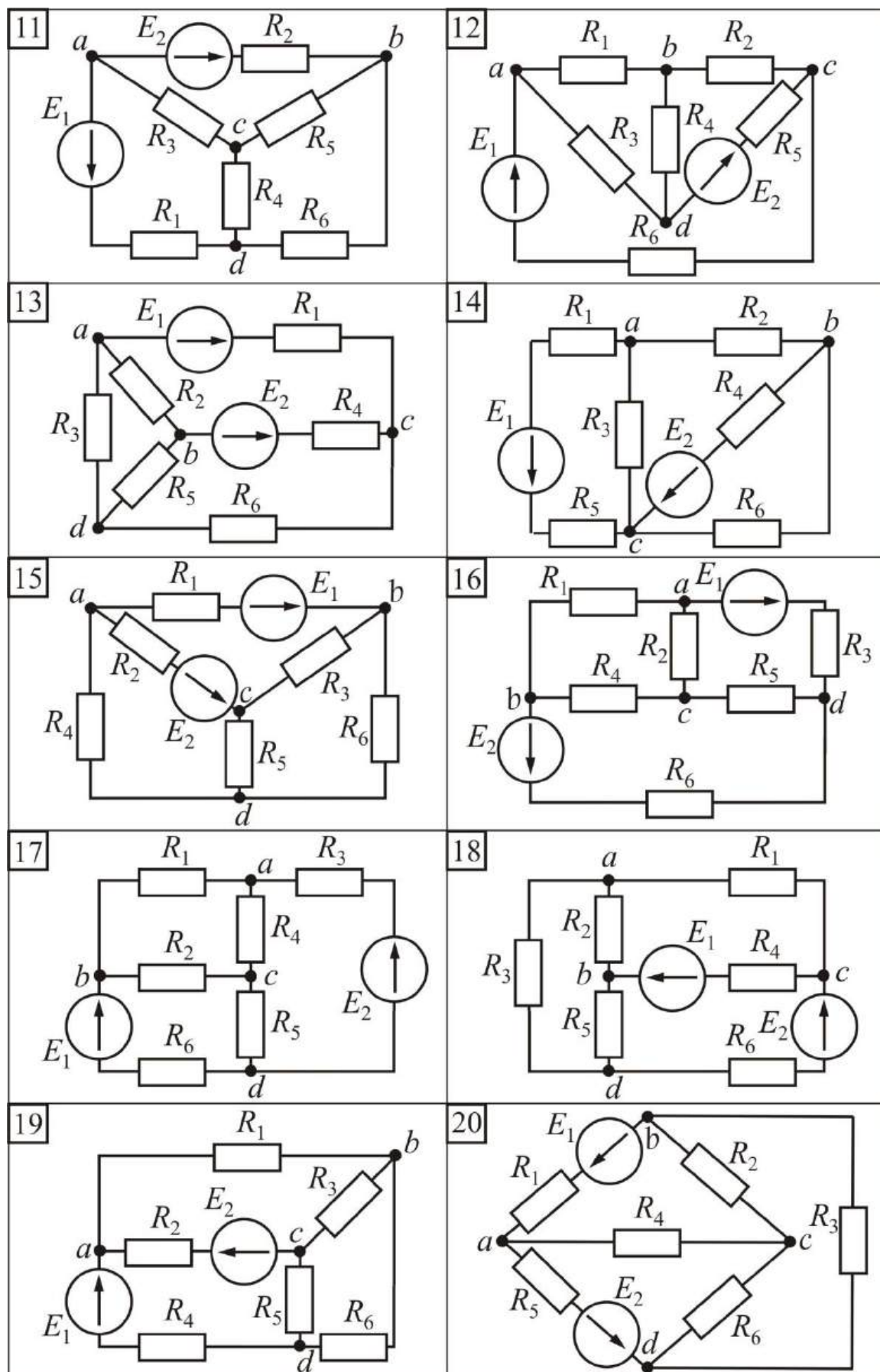


Рисунок 1.3 (продовження) – Розрахункова електрична схема до задач 3,4

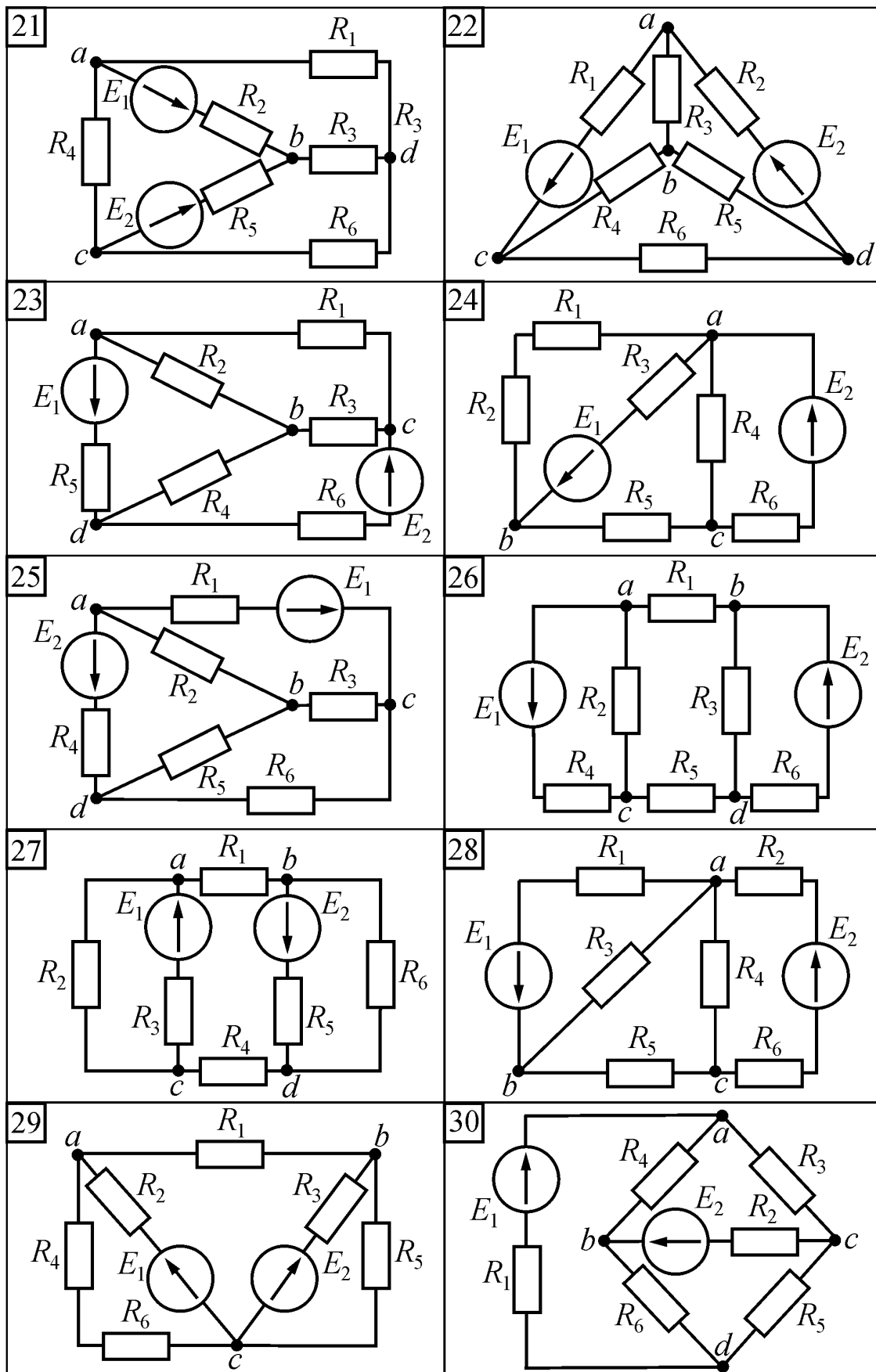


Рисунок 1.3 (продовження) – Розрахункова електрична схема до задач 3,4

1.2. Основні теоретичні положення для розв'язання задач на постійний струм

Методи розрахунку електричних кіл. Еквівалентні перетворення. Закони Кірхгофа. Розв'язання задач на основі законів Кірхгофа. Метод контурних струмів. Метод еквівалентного генератора

Розрахувати електричне коло – це означає по заданих параметрах джерел і споживачів (значення напруг, ЕРС, опорів) визначити струми у вітках (пряма задача), або по заданому струму в якій-небудь вітці визначити ЕРС джерела та струми інших віток (зворотна задача).

При розрахунку кола спочатку довільно вибирають напрямки струмів у вітках. Дійсний напрямок визначиться знаком струму, отриманим після розрахунку. Якщо в результаті розрахунку струм виявився негативним, то його напрямок протилежний обраному спочатку. Далі будуть розглянуті деякі найбільш відомі методи розрахунку електричних кіл.

Еквівалентні перетворення. Для спрощення розрахунку застосовується метод “згортання”, тобто спрощення схеми – поступова заміна групи опорів еквівалентними опорами. Еквівалентний опір – це такий опір, що, будучи включеним замість групи опорів, не викликає зміни струмів і напруг в іншій частині кола.

При послідовному з'єднанні опорів, коли між ними немає точок розгалуження (рис. 1.4), еквівалентний опір дорівнює сумі всіх опорів, тобто

$$R_{\text{екв}} = \sum_{k=1}^n R_k .$$

Зверніть увагу, що струм при послідовному з'єднанні елементів, незважаючи на кількість елементів у вітці, тільки один!

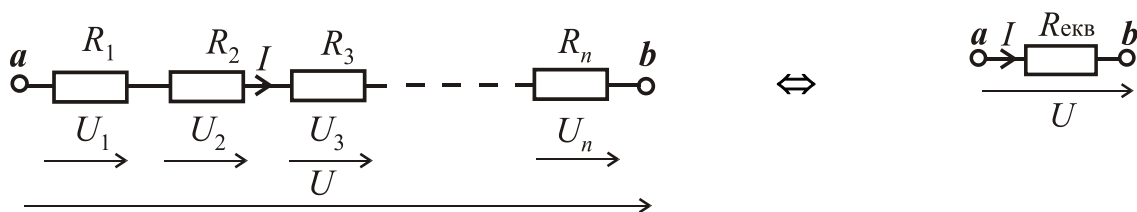


Рисунок 1.4 – Послідовне з'єднання опорів

Для паралельного з'єднання, коли опори мають дві спільні точки розгалуження або, що теж саме, знаходяться під дією однієї тієї ж самої напруги (рис. 1.5), еквівалентний опор знаходиться як:

$$R_{\text{екв}} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n 1/R_k} \text{ або } \frac{1}{R_{\text{екв}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

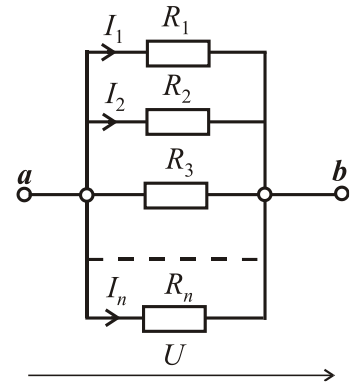


Рисунок 1.5 – Паралельне з'єднання опорів

Окремо розглянемо випадок двох паралельних опорів (рис. 1.6), коли еквівалентний опір визначається як

$$R_{\text{екв}} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

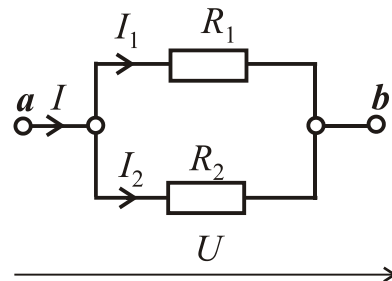


Рисунок 1.6 – Два паралельні опори

Змішане з'єднання показано на рис. 1.7. Воно поєднує послідовне та паралельне з'єднання:

$$R_{\text{екв}} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = R_1 + R_{23};$$

$$I_1 = \frac{U}{R_{\text{екв}}}.$$

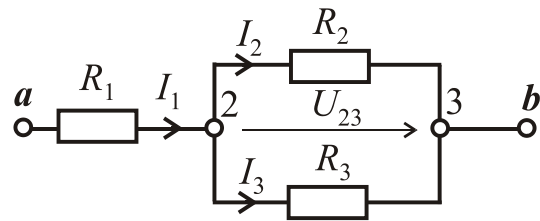


Рисунок 1.7 – Змішане з'єднання опорів

Правило розкиду струмів:

$$I_2 = \frac{U_{23}}{R_2} = I_1 \frac{R_3}{R_2 + R_3}; \quad I_3 = \frac{U_{23}}{R_3} = I_1 \frac{R_2}{R_2 + R_3},$$

$$\text{де } U_{23} = I_1 R_{23}.$$

Якщо з'єднання опорів не можна віднести до послідовного або паралельного, а об'єднані вони більш складно – у “зірку” або в “трикутник” (рис. 1.8), то для приведення до змішаного з'єднання використовуються еквівалентні перетворення “зірки” в “трикутник” або навпаки. Таким чином,

з'являється можливість скористатися методом “згортання”. Нижче наведені формули для такої еквівалентної заміни.

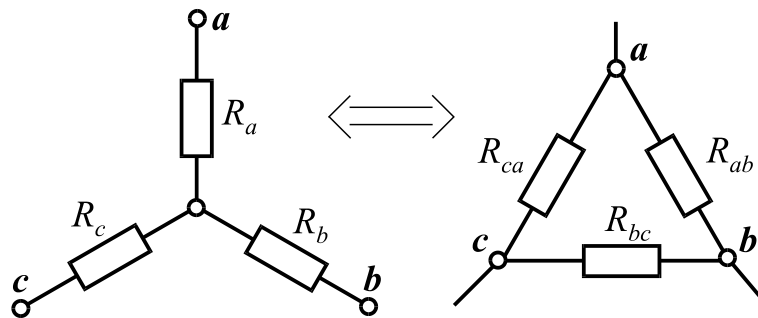


Рисунок 1.8 – З'єднання опорів у “зірку” та в “трикутник”

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a R_b}{R_c}; \\ R_{bc} = R_b + R_c + \frac{R_b R_c}{R_a}; \\ R_{ca} = R_c + R_a + \frac{R_c R_a}{R_b}. \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} R_a = \frac{R_{ab} R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}; \\ R_b = \frac{R_{ab} R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}; \\ R_c = \frac{R_{bc} R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}. \end{array} \right.$$

Іноді для розрахунку електричного кола еквівалентних перетворень недостатньо і треба застосувати методи, засновані на законах Кірхгофа.

Закони Кірхгофа

1^{ий} закон. Алгебраїчна сума струмів віток, що сходяться у вузлі електричного кола, дорівнює нулю

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0.$$

2^{ий} закон. Алгебраїчна сума ЕРС у контурі електричного кола дорівнює сумі напруг (падінь напруг) на ділянках даного контуру

$$\sum_{k=1}^n E_k = \sum_{k=1}^m R_k I_k.$$

Вузол – точка електричного кола, де з'єднуються три і більше віток.

Вітка – ділянка електричного кола, що складається з одного або декількох послідовно з'єднаних елементів, через які проходить однаковий струм.

Контур – замкнутий шлях в електричному колі, що проходить через вузли і вітки. При цьому жодна вітка, жоден вузол (крім вихідного) не повторюється двічі. Крім того, контур можна організувати довільно, замінивши будь-яку вітку напругою між двома точками електричного кола.

Один з найбільш універсальних методів розрахунку є метод, заснований на безпосередньому використанні законів Кірхгофа.

Алгоритм розв'язання задачі за допомогою законів Кірхгофа:

1) довільно приймаємо напрямки струмів у вітках і позначаємо їх, а також вибираємо незалежні контури, тобто такі, у які входить хоча б одна нова вітка, і приймаємо напрямки обходу цих контурів;

2) визначаємо кількість вузлів n у колі і за першим законом Кірхгофа записуємо $(n - 1)$ рівняння;

3) визначаємо кількість віток m і за другим законом Кірхгофа записуємо $m - n + 1$ рівняння; при цьому напругу на резисторі беремо зі знаком плюс, якщо напрям струму у вітці збігається з напрямом обходу контуру, і зі знаком мінус, якщо не збігається; ЕРС беремо позитивною, якщо по напрямку вона збігається з напрямком обходу контуру і негативною, якщо не збігається;

4) отриману систему рівнянь (причому число невідомих величин повинне дорівнювати числу рівнянь) вирішуємо одним з відомих з курсу математики методів;

5) для перевірки правильності рішення складаємо баланс потужностей джерел і споживачів

$$\sum P_{\text{дж}} = \sum P_{\text{сп}}, \text{ тобто, } \sum_{k=1}^n E_k I_k = \sum_{k=1}^m R_k I_k^2.$$

Похибка не повинна перевищувати один відсоток, тобто

$$\delta = \left| \frac{\sum P_{\text{дж}} - \sum P_{\text{сп}}}{\sum P_{\text{дж}}} \right| \cdot 100\% < 1\%.$$

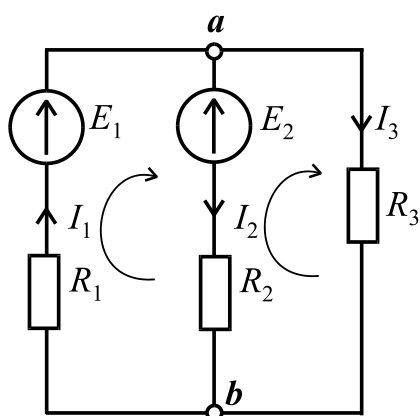


Рисунок 1.9 – Схема електричного кола, яке розраховується за законами Кірхгофа

Приклад. Визначити всі струми в вітках кола, якщо $E_1 = 100 \text{ В}$; $E_2 = 50 \text{ В}$; $R_1 = 10 \text{ Ом}$; $R_2 = 20 \text{ Ом}$; $R_3 = 15 \text{ Ом}$ (рис. 1.9) ($n = 2$, $m = 3$).

Розв'язання

$$\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 = 0; \\ E_1 - E_2 = R_1 I_1 + R_2 I_2; \\ E_2 = -R_2 I_2 + R_3 I_3. \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_1 = I_2 + I_3; \\ 50 = 10I_2 + 10I_3 + 20I_2; \\ 50 = -20I_2 + 15I_3. \end{cases} \Rightarrow$$

$$\begin{cases} I_1 = I_2 + I_3; \\ I_2 = \frac{5 - I_3}{3}; \\ 5 = -2\left(\frac{5 - I_3}{3}\right) + 1,5I_3. \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_1 = 4,23 \text{ A}; \\ I_2 = 0,38 \text{ A}; \\ I_3 = 3,85 \text{ A}. \end{cases}$$

Баланс потужностей:

$$\sum P_{\text{дж}} = E_1 I_1 - E_2 I_2 = 100 \cdot 4,23 - 50 \cdot 0,38 = 423 - 19 = 404 \text{ Вт};$$

$$\sum P_{\text{сп}} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 = 10 \cdot 4,23^2 + 20 \cdot 0,38^2 + 15 \cdot 3,85^2 = 404 \text{ Вт}.$$

Таким чином, баланс потужностей сходиться і задача розв'язана правильно. Ще раз звертаємо увагу, якщо ЕРС і струм в якій-небудь вітці спрямовані зустрічно, то в балансі потужностей перед їхнім добутком треба поставити знак мінус.

Метод контурних струмів

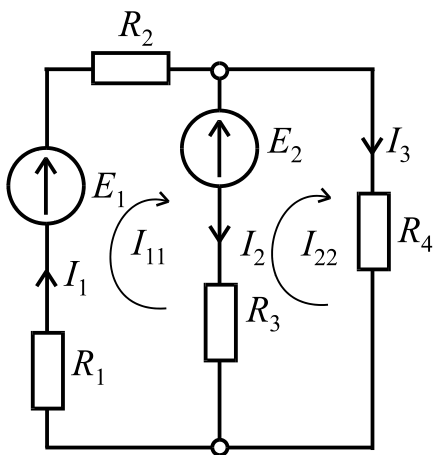


Рисунок 1.10 – Схема кола до методу контурних струмів

Під контурним струмом розуміють *фіктивний* струм в якому-небудь контурі, що однаковий для всіх елементів цього контуру. Для кожного контуру складається рівняння за другим законом Кірхгофа. Напрямок обходу контурів, як й у попередньому методі, вибираємо довільно. На рис. 1.10 контурні струми позначені як I_{11} та I_{22} . Причому, їхній напрямок співпадає з напрямком обходу контурів.

Приклад. Визначити струми в вітках, якщо відомі значення ЕРС E_1 і E_2 , а також значення опорів R_1 , R_2 , R_3 , R_4 (рис. 1.10). Згідно з методом контурних струмів записуємо:

$$\begin{cases} E_1 - E_2 = (R_1 + R_2 + R_3)I_{11} - R_3 I_{22}; \\ E_2 = -R_3 I_{11} + (R_3 + R_4)I_{22}. \end{cases}$$

Дійсні струми в вітках:

$$I_1 = I_{11}; \quad I_2 = I_{11} - I_{22}; \quad I_3 = I_{22}.$$

У загальному випадку для будь-якої складної схеми можна записати систему рівнянь:

[illegible]

де $R_{11}, R_{22}, \dots, R_{nn}$ – повні або власні опори контурів, які дорівнюють сумі опорів всіх елементів, що входять у даний контур; $R_{ik} = R_{ki}$ – взаємні опори, які дорівнюють сумі опорів спільних віток, які входять і в i -тий і в k -тий контури. Взаємні опори записуються зі знаком «+», якщо контурні струми спрямовані в одну сторону і «-», якщо – в різні сторони; $E_{11}, E_{22}, \dots, E_{nn}$ – контурні ЕРС, кожна з яких дорівнює алгебраїчній сумі всіх ЕРС відповідного контуру. Якщо ЕРС контуру збігається з напрямком обходу контуру, то вона записується зі знаком «+», у протилежному випадку зі знаком «-».

У загальному випадку знаходження контурного струму здійснюється за формулою

$$I_{kk} = \frac{\Delta_{k1}}{\Delta} E_{11} + \frac{\Delta_{k2}}{\Delta} E_{22} + \dots \frac{\Delta_{kn}}{\Delta} E_{nn},$$

де Δ – визначник системи рівнянь (1.1), який дорівнює

$$\Delta = \begin{vmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} \end{vmatrix}, \quad (1.2)$$

а Δ_{ki} – алгебраїчне доповнення, отримане з визначника викреслюванням k -того стовпця й i -того рядка і множення отриманого визначника на $(-1)^{k+1}$.

Або контурний струм можна знайти з формули

$$I_{kk} = \frac{\Delta_{kk}}{\Lambda},$$

де Δ – визначник системи рівнянь (1.1), а Δ_{kk} – визначник, отриманий з визначника Δ шляхом заміни k -того стовпця стовпцем контурних ЕРС.

Метод еквівалентного генератора.

Цим методом зручно користуватися, коли необхідно знайти струм окремої вітки в електричному колі. Наприклад, у колі на рис. 1.11 необхідно знайти струм I . Еквівалентний генератор представляють у вигляді ЕРС $E_{\text{ег}}$ і опору $R_{\text{ег}}$ (рис. 1.17). Отже, струм у виділеній вітці знаходимо так

$$I = \frac{E_{\text{ег}}}{R + R_{\text{ег}}} = \frac{U_{ab\text{xx}}}{R + R_{\text{ег}}},$$

де $U_{ab\text{xx}}$ – напруга холостого ходу між вузлами a і b .

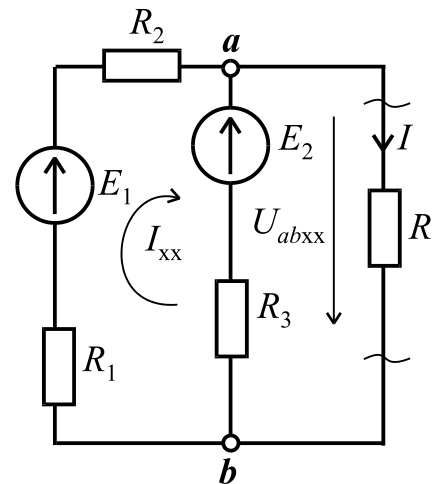


Рисунок 1.11 – Схема електричного кола в методі еквівалентного генератора

Алгоритм розв'язання за допомогою методу еквівалентного генератора:

1) розмикаємо вітку із визначеним струмом I , тобто утворюємо режим холостого ходу, тоді за другим законом Кірхгофа можна записати $U_{ab\text{xx}} = E_2 + I_{\text{xx}} R_3$;

2) шукаємо струм холостого ходу, виходячи зі схеми кола на рис. 1.17, що утворилася після розмикання вітки з опором R

$$I_{\text{xx}} = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

і визначаємо ЕРС: $E_{\text{ег}} = U_{ab\text{xx}} = E_2 + R_3 I_{\text{xx}}$;

3) приймаємо всі ЕРС рівними нулю і визначаємо опір еквівалентного генератора щодо точок a і b

$$R_{\text{ег}} = \frac{(R_1 + R_2) \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3};$$

4) тоді шуканий струм (рис. 1.12)

$$I = \frac{E_{\text{ег}}}{R_{\text{ег}} + R}.$$

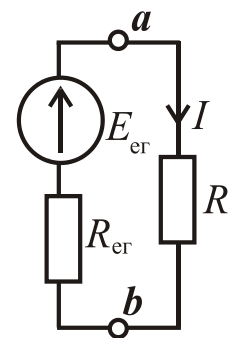


Рисунок 1.12 – Електрична схема для визначення струму

1.3. Приклади розрахунку електричних кіл постійного струму та питання для самоконтролю

Приклад 1. Розрахунок електричного кола постійного струму з одним джерелом живлення при змішаному з'єднанні споживачів.

Визначити струми в вітках електричного кола, схема якого зображена на рис. 1.13, а, якщо ЕРС $E = 120$ В; опори елементів $R_0 = 2$ Ом; $R_1 = 3$ Ом; $R_2 = 25$ Ом; $R_3 = 5$ Ом; $R_4 = 20$ Ом; $R_5 = 30$ Ом.

Перевірити правильність розв'язання, склавши рівняння балансу потужностей кола.

Розв'язання

а) пряма задача

Приймаємо позитивні напрями струмів у вітках кола, відповідно до напрямку ЕРС. Використовуємо метод послідовного згортання початкової схеми в нерозгалужену за допомогою еквівалентної заміни одних ділянок схеми другими, як це зображено на рис. 1.13, б, в, г.

Зверніть увагу, що в одній вітці, незважаючи на кількість послідовно ввімкнутих опорів, струм тільки один! Його можна позначити в будь-якому місці на лінії, яка з'єднує елементи вітки.

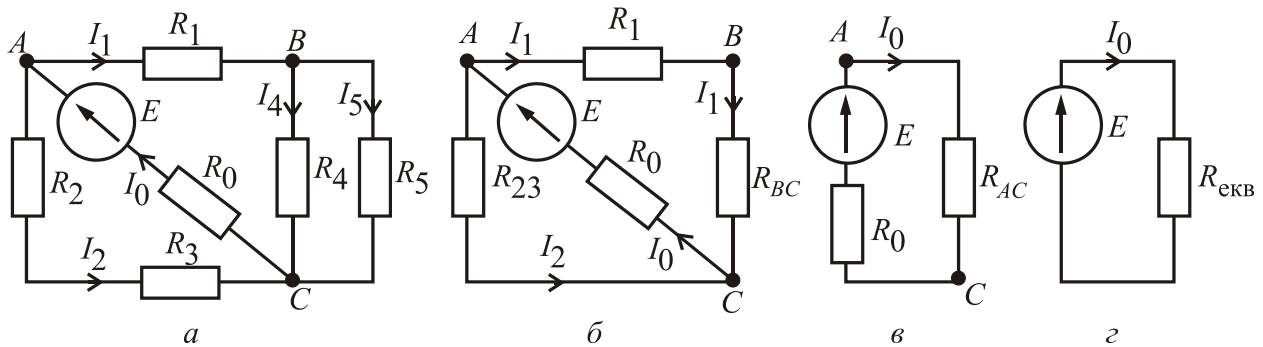


Рисунок 1.13

Визначаємо еквівалентні опори ділянок і всього кола після згортання:

$$R_{23} = R_2 + R_3 = 25 + 5 = 30 \text{ Ом};$$

$$R_{BC} = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5} = \frac{20 \cdot 30}{20 + 30} = 12 \text{ Ом};$$

$$R_{AC} = \frac{(R_1 + R_{BC}) \cdot R_{23}}{R_1 + R_{BC} + R_{23}} = \frac{(3 + 12) \cdot 30}{3 + 12 + 30} = 10 \text{ Ом}.$$

Нижній індекс для еквівалентного опору ділянок можна вибрати як комбінацію індексів опорів ділянки, наприклад, R_{23} або як комбінацію позначень вузлів, до яких приєднуються вітки із паралельними опорами.

Треба пам'ятати, що опір у вітці з джерелом ЕРС не може бути паралельний ніякому іншому опору. Його додають до отриманого еквівалентного опору всіх інших віток R_{AC} в останню чергу, щоб отримати еквівалентний опір усього кола

$$R_{\text{екв}} = R_0 + R_{AC} = 2 + 10 = 12 \text{ Ом.}$$

Визначаємо силу струму I_0 у вітці з джерелом ЕРС (рис. 1.13, з)

$$I_0 = \frac{E}{R_{\text{екв}}} = \frac{120}{12} = 10 \text{ А.}$$

Напруга на ділянці AC (рис. 1.13, в)

$$U_{AC} = R_{AC} \cdot I_0 = 10 \cdot 10 = 100 \text{ В.}$$

Струми в паралельних вітках на цій ділянці (рис. 1.13, б):

$$I_1 = \frac{U_{AC}}{R_1 + R_{BC}} = \frac{100}{3 + 12} = 6,67 \text{ А;}$$

Зверніть увагу, що струм I_1 визначається напругою ділянки кола та всім опором ділянки.

$$I_2 = \frac{U_{AC}}{R_{23}} = \frac{100}{30} = 3,33 \text{ А.}$$

Напруга на ділянці BC (рис. 1.13, б)

$$U_{BC} = R_{BC} \cdot I_1 = 12 \cdot 6,67 = 80 \text{ В.}$$

Струми в паралельних вітках (рис. 1.13, а):

$$I_4 = \frac{U_{BC}}{R_4} = \frac{80}{20} = 4 \text{ А;}$$

$$I_5 = \frac{U_{BC}}{R_5} = \frac{80}{30} = 2,67 \text{ А.}$$

Рівняння балансу потужностей кола за рис. 1.13, а:

$$P_{\text{дж}} = \sum_{k=0}^5 P_{\text{спк}},$$

де потужність джерела ЕРС

$$P_{\text{дж}} = E \cdot I_0 = 120 \cdot 10 = 1200 \text{ Вт;}$$

арифметична сума потужностей $P_{\text{спк}}$ споживачів, де $k = 6$ – кількість споживачів, визначається як:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^6 P_{\text{спк}} &= R_0 \cdot I_0^2 + R_1 \cdot I_1^2 + (R_2 + R_3) \cdot I_2^2 + R_4 \cdot I_4^2 + R_5 \cdot I_5^2 = \\ &= 2 \cdot 10^2 + 3 \cdot 6,67^2 + (25 + 5) \cdot 3,33^2 + 20 \cdot 4^2 + 30 \cdot 2,67^2 = \end{aligned}$$

$$= 200 + 133,47 + 332,66 + 320 + 213,87 = 1200 \text{ Вт.}$$

Якщо, значення потужностей джерела та сумарна потужність споживачів відрізняються, тоді треба розрахувати відносну похибку. Див. приклад №2. Відносна похибка не повинна перевищувати 1%.

б) зворотна задача

Напруга на ділянці BC (рис. 1.13, б)

$$U_{BC} = R_{BC} \cdot I_1 = 12 \cdot 4 = 48 \text{ В.}$$

Струми в паралельних вітках на цій ділянці (рис. 1.13, а):

$$I_4 = \frac{U_{BC}}{R_4} = \frac{48}{20} = 2,4 \text{ А;}$$

$$I_5 = \frac{U_{BC}}{R_5} = \frac{48}{30} = 1,6 \text{ А.}$$

Напруга на ділянці AC

$$U_{AC} = I_1 \cdot R_1 + U_{BC} = 4 \cdot 3 + 48 = 60 \text{ В.}$$

Струм у вітці з опором R_{23} (рис. 1.13, б)

$$I_2 = \frac{U_{AC}}{R_{23}} = \frac{60}{30} = 2 \text{ А.}$$

За першим законом Кірхгофа для вузла A (рис. 1.13, а, б) визначаємо струм джерела

$$I_0 = I_1 + I_2 = 4 + 2 = 6 \text{ А.}$$

Визначаємо значення ЕРС джерела (рис. 1.13, з)

$$E = R_{\text{св}} \cdot I_0 = 12 \cdot 6 = 72 \text{ В.}$$

Рівняння балансу потужностей електричного кола подібно до рівняння балансу потужностей у прямій задачі, тільки з іншими значеннями струмів та ЕРС:

$$P_{\text{дж}} = \sum_{k=1}^5 P_{\text{сп}_k},$$

де потужність джерела ЕРС

$$P_{\text{дж}} = E \cdot I_0 = 72 \cdot 6 = 432 \text{ Вт;}$$

арифметична сума потужностей споживачів:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^5 P_{\text{сп}_k} &= R_0 \cdot I_0^2 + R_1 \cdot I_1^2 + (R_2 + R_3) \cdot I_2^2 + R_4 \cdot I_4^2 + R_5 \cdot I_5^2 = \\ &= 2 \cdot 6^2 + 3 \cdot 4^2 + (25 + 5) \cdot 2^2 + 20 \cdot 2,4^2 + 30 \cdot 1,6^2 = \end{aligned}$$

$$=72 + 48 + 120 + 115,2 + 76,8 = 432 \text{ Вт.}$$

Приклад 2. Розрахунок електричного кола постійного струму з одним джерелом ЕРС методом перетворення “трикутник” – “зірка”.

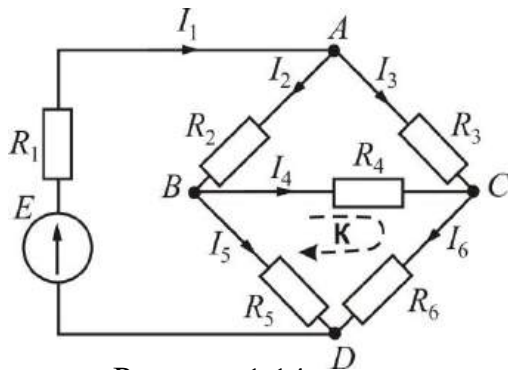


Рисунок 1.14

В електричне коло за рис. 1.14 увімкнено у вітку DA джерело ЕРС E . Напряг ЕРС від вузла D до вузла A .

Параметри елементів кола: $E = 60 \text{ В}$;
 $R_1 = 8 \text{ Ом}$; $R_2 = 10 \text{ Ом}$; $R_3 = 20 \text{ Ом}$;
 $R_4 = 15 \text{ Ом}$; $R_5 = 7 \text{ Ом}$; $R_6 = 9 \text{ Ом}$.

Визначити струми у вітках електричного кола за допомогою методу перетворення опорів, з'єднаних “трикутником”, у еквівалентну “зірку” і навпаки. Скласти рівняння балансу потужностей кола і перевірити його.

Розв'язання

Попередньо виберемо позитивні напрями струмів у вітках кола, як це показано на рис. 1.15. Перетворюємо з'єднані “трикутником” між вузлами A , B і C опори R_2 , R_3 , R_4 (рис. 1.14) на еквівалентну “зірку” з опорами R_A , R_B і R_C та центральним вузлом O (рис. 1.15).

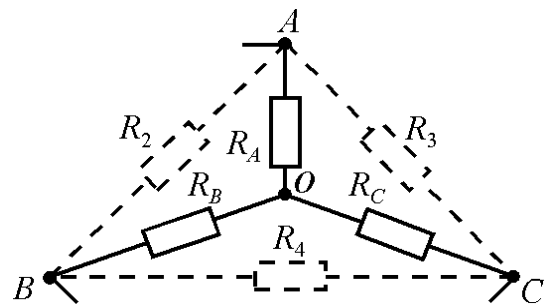


Рисунок 1.15

Визначаємо еквівалентні опори “зірки”:

$$R_A = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3 + R_4} = \frac{10 \cdot 20}{10 + 20 + 15} = 4,44 \text{ Ом};$$

$$R_B = \frac{R_2 \cdot R_4}{R_2 + R_3 + R_4} = \frac{10 \cdot 15}{10 + 20 + 15} = 3,33 \text{ Ом};$$

$$R_C = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_2 + R_3 + R_4} = \frac{20 \cdot 15}{10 + 20 + 15} = 6,67 \text{ Ом}.$$

З урахуванням проведеної вище заміни на рис. 1.16, *а* дана еквівалентна схема кола, у якій збережені напрями струмів крізь елементи, що не попали під перетворення.

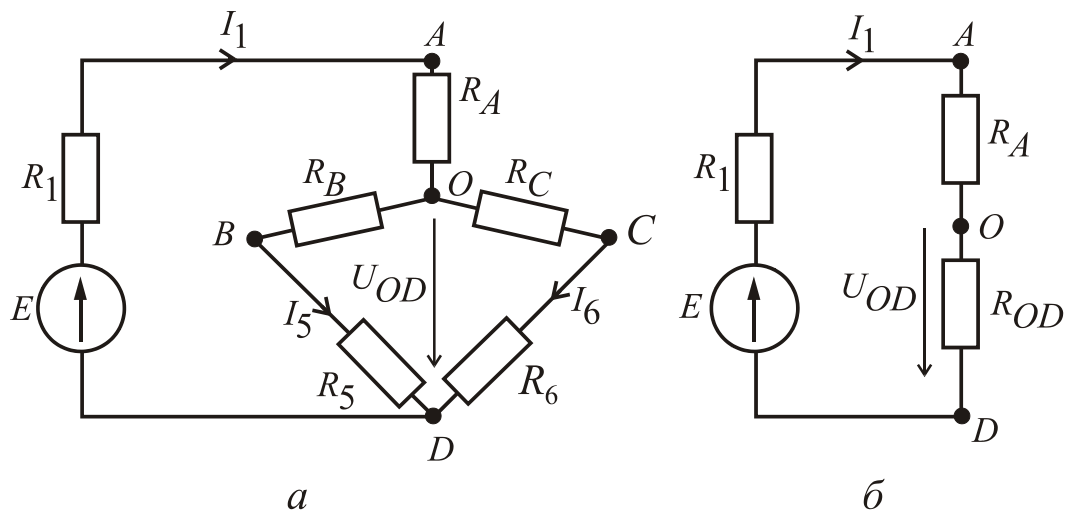


Рисунок 1.16

Визначаємо еквівалентний опір між вузлами *O* і *D* та перетворюємо схему за рис. 1.16, *а* у схему за рис. 1.16, *б*

$$R_{OD} = \frac{(R_B + R_5) \cdot (R_C + R_6)}{R_B + R_5 + R_C + R_6} = \frac{(3,33 + 7) \cdot (6,67 + 9)}{3,33 + 7 + 6,67 + 9} = 6,23 \text{ Ом.}$$

Еквівалентний опір усього кола (рис. 1.16, *б*)

$$R_{\text{екв}} = R_1 + R_A + R_{OD} = 8 + 4,44 + 6,23 = 18,67 \text{ Ом.}$$

Струм крізь джерело ЕРС

$$I_1 = \frac{E}{R_{\text{екв}}} = \frac{60}{18,67} = 3,21 \text{ А.}$$

Напруга між вузлами *O* і *D* (рис. 1.16, *б*)

$$U_{OD} = I_1 \cdot R_{OD} = 3,21 \cdot 6,23 = 20 \text{ В.}$$

Струми паралельних віток (рис. 1.16, *а*):

$$I_5 = \frac{U_{OD}}{R_B + R_5} = \frac{20}{3,33 + 7} = 1,94 \text{ А;}$$

$$I_6 = \frac{U_{OD}}{R_C + R_6} = \frac{20}{6,67 + 9} = 1,28 \text{ А.}$$

За другим законом Кірхгофа для контуру **К** (рис. 1.14) при його обході за рухом годинникової стрілки складаємо рівняння

$$I_4 \cdot R_4 + I_6 \cdot R_6 - I_5 \cdot R_5 = 0;$$

з цього рівняння визначаємо струм

$$I_4 = \frac{I_5 \cdot R_5 - I_6 \cdot R_6}{R_4} = \frac{1,94 \cdot 7 - 1,28 \cdot 9}{15} = 0,14 \text{ А.}$$

За першим законом Кірхгофа для струмів віток, що з'єднуються у вузлі *B* (рис. 1.14), маємо рівняння $I_2 - I_4 - I_5 = 0$, з якого визначаємо струм

$$I_2 = I_4 + I_5 = 0,14 + 1,94 = 2,08 \text{ А.}$$

За першим законом Кірхгофа для струмів віток, що з'єднуються у вузлі *C* маємо рівняння

$$I_3 + I_4 - I_6 = 0,$$

з якого визначаємо струм

$$I_3 = I_6 - I_4 = 1,28 - 0,14 = 1,14 \text{ А.}$$

Рівняння балансу потужностей кола за рис. 1.14:

$$P_{\text{дж}} = \sum_{k=1}^6 P_{\text{сп}k},$$

де потужність джерела ЕРС $P_{\text{дж}} = E \cdot I_1 = 60 \cdot 3,21 = 192,6 \text{ Вт}$;

арифметична сума потужностей споживачів

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^6 P_{\text{сп}k} &= R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 + R_3 \cdot I_3^2 + R_4 \cdot I_4^2 + R_5 \cdot I_5^2 + R_6 \cdot I_6^2 = \\ &= 8 \cdot 3,21^2 + 10 \cdot 2,08^2 + 20 \cdot 1,14^2 + 15 \cdot 0,14^2 + 7 \cdot 1,94^2 + 9 \cdot 1,28^2 = \\ &= 82,43 + 43,26 + 25,99 + 0,29 + 26,34 + 14,75 = 193,06 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Відносну похибку розрахунку потужностей у відсотках

$$\delta_p = \left| \frac{P_{\text{дж}} - \sum_{k=1}^6 P_{\text{сп}k}}{P_{\text{дж}}} \cdot 100\% \right| = \left| \frac{192,6 - 193,06}{192,6} \cdot 100\% \right| = 0,24\% ,$$

можна вважати допустимою.

Приклад 3. Розрахунок електричного кола методом контурних струмів.

Для електричного кола, схему якого зображено на рис. 1.17 визначити струми в усіх вітках, користуючись методом контурних струмів, якщо $E_1 = 100 \text{ В}$; $E_2 = 50 \text{ В}$; $R_1 = R_5 = 8 \text{ Ом}$; $R_2 = 10 \text{ Ом}$; $R_3 = 7 \text{ Ом}$; $R_4 = 9 \text{ Ом}$; $R_6 = 13 \text{ Ом}$. Скласти рівняння балансу потужностей кола і перевірити його.

Розв'язання

Вибір незалежних контурів I, II, III, позначення контурних струмів I_{11} , I_{22} , I_{33} і напрям обходу контурів показані на рис. 1.17.

Запишемо рівняння для контурів I, II і III за другим законом Кірхгофа в

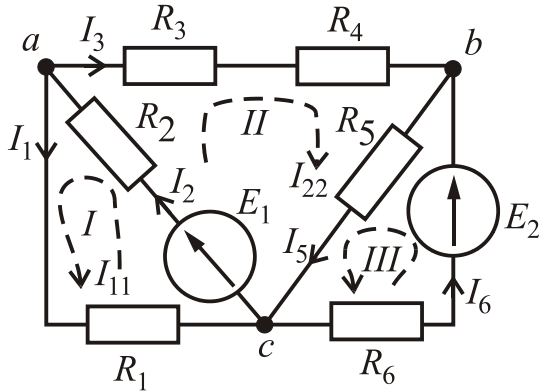


Рисунок 1.17

загальному випадку:

$$\begin{cases} R_{11} \cdot I_{11} + R_{12} \cdot I_{22} + R_{13} \cdot I_{33} = E_{11}; \\ R_{21} \cdot I_{11} + R_{22} \cdot I_{22} + R_{23} \cdot I_{33} = E_{22}; \\ R_{31} \cdot I_{11} + R_{32} \cdot I_{22} + R_{33} \cdot I_{33} = E_{33}, \end{cases} \quad (1.3)$$

де контурні ЕРС:

$$E_{11} = E_1 = 100 \text{ В};$$

$$E_{22} = E_1 = 100 \text{ В};$$

$$E_{33} = E_2 = 50 \text{ В},$$

повні (власні) опори контурів:

$$R_{11} = R_1 + R_2 = 8 + 10 = 18 \text{ Ом};$$

$$R_{22} = R_2 + R_3 + R_5 = 10 + 16 + 8 = 34 \text{ Ом};$$

$$R_{33} = R_5 + R_6 = 8 + 13 = 21 \text{ Ом},$$

взаємні опори контурів:

$$R_{12} = R_{21} = R_2 = 10 \text{ Ом};$$

$$R_{23} = R_{32} = R_5 = 8 \text{ Ом};$$

$$R_{13} = R_{31} = 0 \text{ (контури I і III не мають зв'язку). У даному випадку}$$

взаємні опори $R_{12} = R_{21}$ і $R_{23} = R_{32}$ записані зі знаком «+» тому, що контурні струми в них збігаються.

Після підстановки чисельних значень система рівнянь (1.3) має вигляд

$$\begin{cases} 18 \cdot I_{11} + 10 \cdot I_{22} + 0 \cdot I_{33} = 100; \\ 10 \cdot I_{11} + 34 \cdot I_{22} + 8 \cdot I_{33} = 100; \\ 0 \cdot I_{11} + 8 \cdot I_{22} + 21 \cdot I_{33} = 50. \end{cases} \quad (1.4)$$

$$\text{Її загальний визначник } \Delta = \begin{vmatrix} 18 & 10 & 0 \\ 10 & 34 & 8 \\ 0 & 8 & 21 \end{vmatrix}. \quad (1.5)$$

Розкриваючи його за елементами першої строки, знаходимо

$$\Delta = \begin{vmatrix} 18 & 10 & 0 \\ 10 & 34 & 8 \\ 0 & 8 & 21 \end{vmatrix} = (-1)^{1+1} \cdot 18 \cdot \begin{vmatrix} 34 & 8 \\ 8 & 21 \end{vmatrix} + (-1)^{-1+2} \cdot 10 \cdot \begin{vmatrix} 10 & 8 \\ 0 & 21 \end{vmatrix} + (-1)^{1+3} \cdot 0 \cdot \begin{vmatrix} 10 & 34 \\ 0 & 8 \end{vmatrix} =$$

$$= 18 \cdot (34 \cdot 21 - 8 \cdot 8) - 10 \cdot (10 \cdot 21 - 0 \cdot 8) + 0 = 11700 - 2100 = 9600.$$

Допоміжні визначники системи одержуємо з загального визначника за допомогою заміни 1, 2 та 3 стовпців на стовпець ЕРС системи рівнянь (3.2), а саме:

$$\Delta_{11} = \begin{vmatrix} 100 & 10 & 0 \\ 100 & 34 & 8 \\ 50 & 8 & 21 \end{vmatrix} = (-1)^{1+1} \cdot 100 \cdot \begin{vmatrix} 34 & 8 \\ 8 & 21 \end{vmatrix} + (-1)^{-1+2} \cdot 10 \cdot \begin{vmatrix} 100 & 8 \\ 50 & 21 \end{vmatrix} +$$

$$+ (-1)^{1+3} \cdot 0 \cdot \begin{vmatrix} 100 & 34 \\ 50 & 8 \end{vmatrix} = 100 \cdot (34 \cdot 21 - 8 \cdot 8) - 10 \cdot (100 \cdot 21 - 50 \cdot 8) + 0 =$$

$$= 65000 - 17000 = 48000;$$

$$\Delta_{22} = \begin{vmatrix} 18 & 100 & 0 \\ 10 & 100 & 8 \\ 0 & 50 & 21 \end{vmatrix} = (-1)^{1+1} \cdot 18 \cdot \begin{vmatrix} 100 & 8 \\ 50 & 21 \end{vmatrix} + (-1)^{-1+2} \cdot 100 \cdot \begin{vmatrix} 10 & 8 \\ 0 & 21 \end{vmatrix} + (-1)^{1+3} \cdot 0 \cdot \begin{vmatrix} 10 & 100 \\ 0 & 50 \end{vmatrix} =$$

$$= 18 \cdot (100 \cdot 21 - 50 \cdot 8) - 100 \cdot (10 \cdot 21 - 0 \cdot 8) + 0 = 30600 - 21000 = 9600;$$

$$\Delta_{33} = \begin{vmatrix} 18 & 10 & 100 \\ 10 & 34 & 100 \\ 0 & 8 & 50 \end{vmatrix} = (-1)^{1+1} \cdot 18 \cdot \begin{vmatrix} 34 & 100 \\ 8 & 50 \end{vmatrix} + (-1)^{-1+2} \cdot 10 \cdot \begin{vmatrix} 10 & 8 \\ 0 & 50 \end{vmatrix} +$$

$$+ (-1)^{1+3} \cdot 100 \cdot \begin{vmatrix} 10 & 34 \\ 0 & 8 \end{vmatrix} = 18 \cdot (34 \cdot 50 - 100 \cdot 8) - 10 \cdot (10 \cdot 50 - 0 \cdot 8) +$$

$$+ 100 \cdot (10 \cdot 8 - 0 \cdot 34) = 16200 - 5000 + 8000 = 19200.$$

Контурні струми будуть дорівнювати:

$$I_{11} = \frac{\Delta_{11}}{\Delta} = \frac{48000}{9600} = 5 \text{ A};$$

$$I_{22} = \frac{\Delta_{22}}{\Delta} = \frac{9600}{9600} = 1 \text{ A};$$

$$I_{33} = \frac{\Delta_{33}}{\Delta} = \frac{19200}{9600} = 2 \text{ A}.$$

Відповідно струми у вітках:

$$I_1 = I_{11} = 5 \text{ A};$$

$$I_2 = I_{11} + I_{22} = 5 + 1 = 6 \text{ A};$$

$$I_3 = I_{22} = 1 \text{ A};$$

$$I_5 = I_{22} + I_{33} = 1 + 2 = 3 \text{ A};$$

$$I_6 = I_{33} = 2 \text{ A}.$$

Рівняння балансу потужностей:

$$P_{\text{дж}} = \sum_{k=0}^5 P_{\text{сп}k},$$

$$\text{де } P_{\text{дж}} = E_1 \cdot I_2 + E_2 \cdot I_6 = 100 \cdot 6 + 50 \cdot 2 = 600 + 100 = 700 \text{ Вт}$$

$$\begin{aligned} \sum P_{\text{сп}} &= R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 + R_3 \cdot I_3^2 + R_4 \cdot I_3^2 + R_5 \cdot I_5^2 + R_6 \cdot I_6^2 = \\ &= 8 \cdot 5^2 + 10 \cdot 6^2 + 7 \cdot 1^2 + 9 \cdot 1^2 + 8 \cdot 3^2 + 13 \cdot 2^2 = \\ &= 200 + 360 + 7 + 9 + 72 + 52 = 700 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Приклад 4. Розрахунок складного електричного кола методом еквівалентного генератора.

Визначити струм I_1 у вітці з опором R_1 в електричному колі, яке зображено на рис. 1.18, якщо $E_1 = 120 \text{ В}$; $E_2 = 60 \text{ В}$; $R_1 = 8 \text{ Ом}$; $R_2 = 5 \text{ Ом}$; $R_3 = 4 \text{ Ом}$; $R_4 = 6 \text{ Ом}$; $R_5 = 10 \text{ Ом}$; $R_6 = 15 \text{ Ом}$.

Розв'язання

Електричне коло без ділянки кола з опором R_1 замінюємо еквівалентним генератором (на рис. 1.18 обведений штриховою лінією). Еквівалентний генератор (рис. 1.19) характеризується величиною ЕРС (ЕРС еквівалентного генератора $E_{\text{ег}}$) і внутрішнім (еквівалентним опором) $R_{\text{ег}}$.

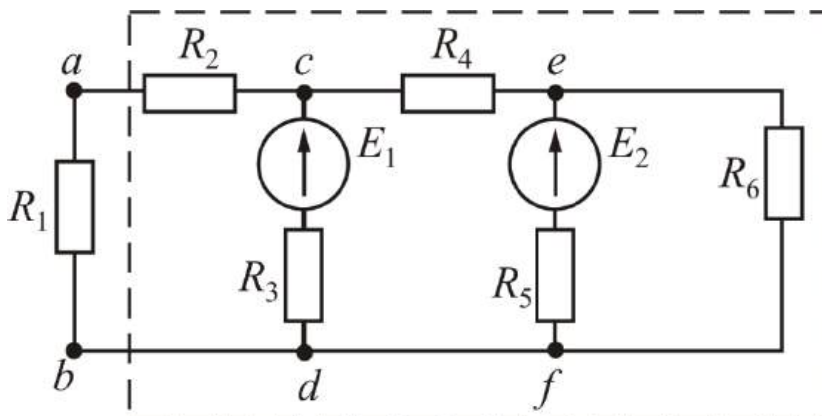


Рисунок 1.18

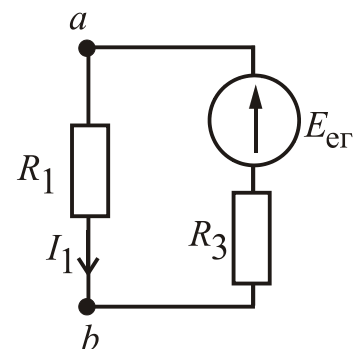


Рисунок 1.19

ЕРС $E_{ер}$ дорівнює напрузі холостого ходу U_{abxx} на розімкнутих затискачах $a-b$ кола (рис. 1.19), тобто $E_{ер} = U_{abxx}$. Еквівалентний опір $R_{ер}$ дорівнює вхідному опору частини кола за рис. 1.19 між затискачами $a-b$, коли коло стає пасивним (рис. 1.21), тобто усі ЕРС дорівнюють нулю, а у вітках замість реальних ЕРС зберігаються їх внутрішні опори.

Струм I_1 визначається за формулою (1.6)

$$I_1 = \frac{E_{ер}}{R_1 + R_{ер}} = \frac{U_{abxx}}{R_1 + R_{ер}}. \quad (1.6)$$

Для кола, зображеного на рис. 1.20, визначаємо напругу U_{abxx}

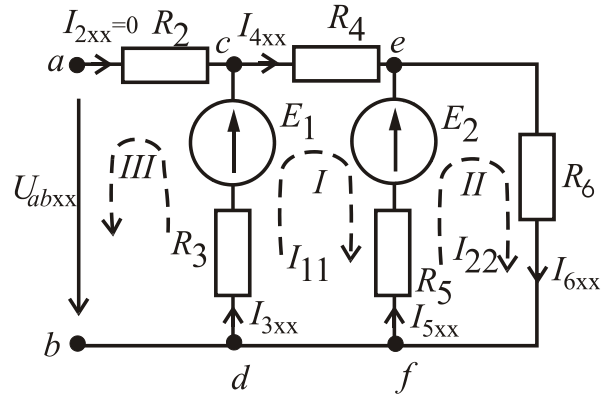


Рисунок 1.20

за другим законом Кірхгофа для контуру $a-c-d-b-a$ при його обході проти руху годинникової стрілки

$$E_1 = I_{3xx} \cdot R_3 + U_{abxx},$$

звідки $U_{abxx} = E_1 - I_{3xx} \cdot R_3$.

Для визначення струму I_{3xx} скористаємося методом контурних струмів. Для двох незалежних контурів I і II при їх обході за годинниковою стрілкою запишемо рівняння за другим законом Кірхгофа в загальному вигляді:

$$\begin{cases} R_{11} \cdot I_{11} + R_{12} \cdot I_{22} = E_{11}; \\ R_{21} \cdot I_{11} + R_{22} \cdot I_{22} = E_{22}, \end{cases}$$

де контурні ЕРС: $E_{11} = E_1 - E_2 = 120 - 60 = 60$ В; $E_{22} = E_2 = 60$ В;

повні (власні) опори контурів: $R_{11} = R_3 + R_4 + R_5 = 4 + 6 + 10 = 20$ Ом;

$R_{22} = R_5 + R_6 = 10 + 15 = 25$ Ом,

взаємні опори контурів: $R_{12} = R_{21} = -R_5 = -10$ Ом.

Після підстановки чисельних значень система рівнянь має вигляд:

$$\begin{cases} 20 \cdot I_{11} - 10 \cdot I_{22} = 60; \\ -10 \cdot I_{11} + 25 \cdot I_{22} = 60. \end{cases}$$

Загальний визначник системи $\Delta = \begin{vmatrix} 20 & -10 \\ -10 & 25 \end{vmatrix} = 20 \cdot 25 - (-10) \cdot (-10) = 400$.

Визначник системи, що потрібний для визначення струму $I_{11} = I_{3xx}$:

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 60 & -10 \\ 60 & 25 \end{vmatrix} = 60 \cdot 25 - 60 \cdot (-10) = 2100.$$

$$\text{Тоді } I_{11} = I_{3xx} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{2100}{400} = 5,25 \text{ А.}$$

Після підстановки чисельних значень у рівняння

$$U_{abxx} = E_1 - I_{3xx} \cdot R_3 = 120 - 5,25 \cdot 4 = 99 \text{ В;}$$

$$E_{\text{ер}} = U_{abxx} = 99 \text{ В.}$$

Визначаємо еквівалентний опір $R_{\text{ер}}$
за рис. 1.21:

$$R_{56} = \frac{R_5 \cdot R_6}{R_5 + R_6} = \frac{10 \cdot 15}{10 + 15} = 6 \text{ Ом;}$$

$$R_{456} = R_4 + R_{56} = 6 + 6 = 12 \text{ Ом;}$$

$$R_{\text{ер}} = R_2 + \frac{R_3 \cdot R_{456}}{R_3 + R_{456}} = 5 + \frac{4 \cdot 12}{4 + 12} = 8 \text{ Ом.}$$

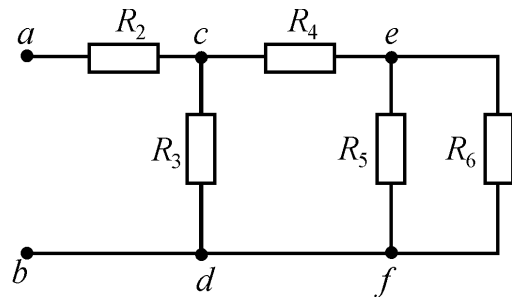


Рисунок 1.21

$$\text{Струм } I_1 \text{ дорівнює } I_1 = \frac{E_{\text{ер}}}{R_1 + R_{\text{ер}}} = \frac{99}{8 + 8} = 6,19 \text{ А.}$$

Питання для самоконтролю

1. Що називається електричним колом і з яких елементів воно складається?
2. Що називається віткою, вузлом, контуром?
3. Яке з'єднання елементів називається послідовним, паралельним, змішаним?
4. Як визначається еквівалентний опір кола при послідовному, паралельному і змішаному з'єднанні споживачів?
5. Який порядок розрахунку кола з послідовним, паралельним і змішаним з'єднанням споживачів?
6. Як визначають потужність, споживану окремими споживачами та потужність усього кола?
7. Напишіть рівняння балансу потужностей кола.
8. Який порядок розрахунку електричного кола за допомогою законів Кірхгофа та методу контурних струмів? У чому відмінність?
9. Запишіть формули перетворення опорів, з'єднаних "зіркою", в еквівалентний "трикутник" та навпаки.
10. Який порядок розрахунку електричного кола методом еквівалентного генератора?

1.4. Формулювання задач на розрахунок електричних кіл змінного синусоїдного струму

У задачі № 5 студент визначає реактивні і повні опори трьох приймачів Z_α , Z_β , Z_γ , які потім використовуються у наступних задачах!

Задача 5. Розрахунок однофазного електричного кола синусоїдного струму з одним джерелом енергії при послідовному з'єднанні приймачів.

Провести розрахунок електричного кола за рис. 1.22 при послідовному з'єднанні приймачів Z_α , Z_β , Z_γ , параметри яких треба взяти з табл. 1.4. Напруга джерела енергії $U = 220$ В при частоті $f = 50$ Гц.

Обсяг розрахунку: а) зобразити електричну схему заміщення кола за рис. 1.22 з ідеальними елементами замість кожного приймача; б) визначити струм у колі; напруги на кожному приймачі; активні та реактивні потужності джерела та приймачів; в) за результатами розрахунків зобразити синусоїдні часові функції напруги та струму джерела; г) побудувати векторну діаграму струму і напруги джерела та напруги на всіх приймачах; д) зробити перевірку розв'язання задачі за допомогою векторної діаграми та балансу активних і реактивних потужностей.

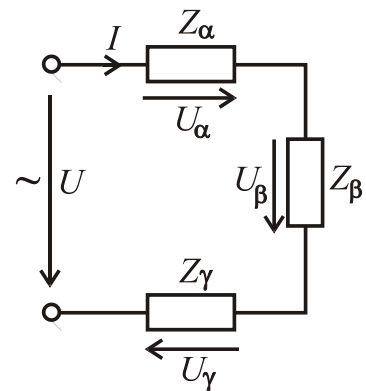


Рисунок 1.22 – Послідовне з'єднання приймачів

Задача 6. Розрахунок однофазного електричного кола синусоїдного струму з одним джерелом енергії при паралельному з'єднанні приймачів.

Провести розрахунок електричного кола за рис. 1.23 при паралельному з'єднанні приймачів Z_α , Z_β , Z_γ , дані яких треба взяти із задачі 5. Напруга джерела $U = 127$ В при частоті $f = 50$ Гц.

Обсяг розрахунку: а) зобразити електричну схему заміщення кола за рис. 2.5 з ідеальними елементами замість кожного приймача; б) визначити струми в колі, активні

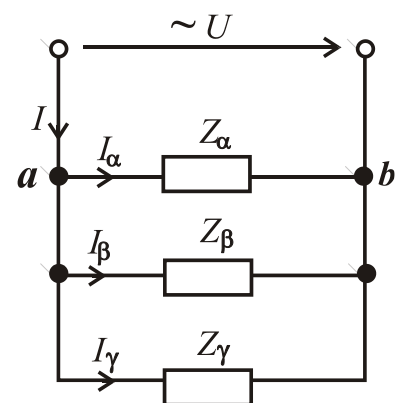


Рисунок 1.23 – Паралельне з'єднання приймачів

та реактивні потужності джерела та приймачів; в) побудувати векторну діаграму напруг і струмів усіх приймачів; г) зробити перевірку розв'язання задачі за допомогою векторної діаграми та балансу активних і реактивних потужностей.

Задача 7. Розрахунок однофазного електричного кола синусоїдного струму з одним джерелом енергії за допомогою символічного методу.

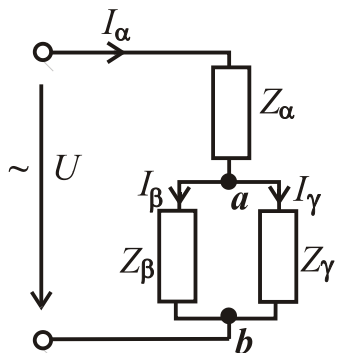


Рисунок 1.24 – Змішане з'єднання приймачів

Провести розрахунок електричного кола за рис. 1.24 при змішаному з'єднанні приймачів $Z_\alpha, Z_\beta, Z_\gamma$, дані яких треба взяти із задачі 5. Напруга джерела енергії $U = 220$ В при частоті $f = 50$ Гц.

Обсяг розрахунку: а) зобразити електричну схему заміщення за рис. 2.6 із ідеальними елементами замість кожного приймача; б) визначити струми в колі, активні та реактивні потужності джерела енергії та приймачів; в)

побудувати векторну діаграму напруг і струмів; г) зробити перевірку розв'язання задачі за допомогою векторної діаграми та балансу активних і реактивних потужностей.

Задача 8. Розрахунок трифазного електричного кола при симетричному навантаженні і з'єднанні приймачів “зіркою”.

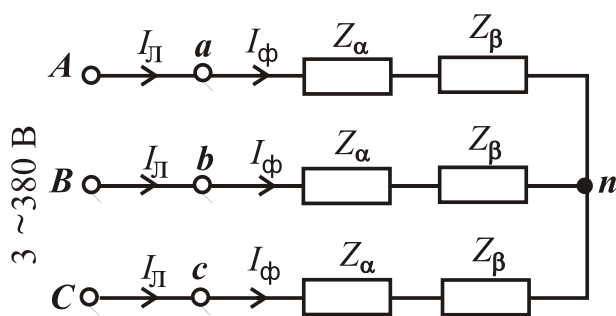


Рисунок 1.25 – Трифазне електричне коло при з'єднанні приймачів “зіркою”

У трифазну мережу з лінійною напругою $U_L = 380$ В при частоті $f = 50$ Гц увімкнено симетричне навантаження при послідовному з'єднанні приймачів Z_α, Z_β у кожну фазу (рис. 1.25).

Параметри приймачів Z_α і Z_β треба взяти із задачі 5.

Обсяг розрахунку: зобразити схему заміщення трифазного кола з ідеальними елементами замість приймачів. Визначити фазні і лінійні струми, а

також приймані активну та реактивну потужності. Побудувати векторну діаграму.

Задача 9. Розрахунок трифазного електричного кола при симетричному навантаженні і з'єднанні приймачів “трикутником”.

У трифазну мережу з лінійною напругою $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ при частоті $f = 50 \text{ Гц}$ увімкнено симетричне навантаження при з'єднанні послідовно приймачів Z_{α} , Z_{γ} в кожен фазу (рис. 1.26). Параметри приймачів Z_{α} і Z_{γ} треба

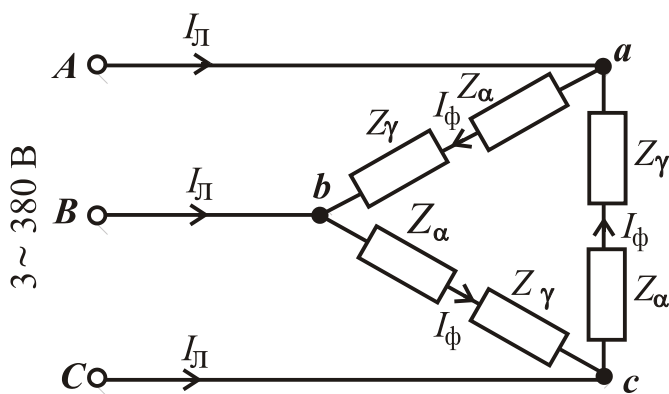


Рисунок 1.26 – Трифазне електричне коло при з'єднанні приймачів “трикутником”

взяти із задачі 5.

Обсяг розрахунку:

зобразити схему заміщення трифазного кола з ідеальними елементами замість приймачів. Визначити фазні і лінійні струми, а також активну та реактивну потужності кола. Побудувати векторну діаграму.

Задача 10. Розрахунок трифазного електричного кола із нейтральним проводом при несиметричному навантаженні.

У трифазну мережу з лінійною напругою $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ при частоті $f = 50 \text{ Гц}$ увімкнуті пофазно приймачі Z_{α} , Z_{β} і Z_{γ} (рис.1.27), що в силу їхньої неоднаковості призводить до несиметричного навантаження. Параметри приймачів Z_{α} , Z_{β} і Z_{γ} взяти із задачі 5.

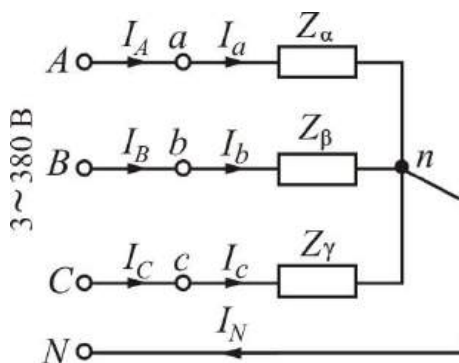


Рисунок 1.27– Трифазне електричне коло із нейтральним проводом

Обсяг розрахунку:

а) зобразити електричну схему трифазного кола з ідеальними елементами замість приймачів; б) визначити фазні і лінійні струми, а також струм у нейтральному проводі; в) визначити активну та реактивну потужності; г) побудувати векторну діаграму.

Таблиця 1.4 – Параметри приймачів Z_α , Z_β , Z_γ

Варіант	Параметри приймача Z_α			Параметри приймача Z_β			Параметри приймача Z_γ		
	R_α	L_α	C_α	R_β	L_β	C_β	R_γ	L_γ	C_γ
	Ом	мГн	мкФ	Ом	мГн	мкФ	Ом	мГн	мкФ
1	12	50,96	-	12	-	199,04	-	76,43	-
2	7	76,43	-	5	-	265,39	20	-	-
3	20	-	212,31	10	95,54	-	-	-	127,39
4	25	-	-	12	50,96	-	10	-	90,99
5	8	19,11	-	-	-	176,93	10	63,69	-
6	-	79,62	-	20	47,77	-	20	-	127,4
7	12	50,96	-	12	-	79,62	-	152,87	-
8	5	-	265,39	15	63,69	-	25	-	-
9	16	38,22	-	7	76,43	-	-	-	63,69
10	12	50,96	-	12	-	199,04	-	-	133
11	-	-	144,76	24	101,91	-	12	15,92	-
12	7	76,43	-	12	-	636,94	-	-	83,81
13	-	63,69	-	24	22,29	-	16	-	265,39
14	10	-	-	12	-	199,04	7	76,43	-
15	12	50,96	-	8	-	530,79	-	-	106,16
16	24	-	176,93	6	25,48	-	-	101,91	-
17	20	-	-	15	63,69	-	5	-	265,39
18	-	63,69	-	10	-	318,47	10	31,85	-
19	18	76,43	-	-	-	79,62	12	-	199,04
20	17	25,48	-	5	38,22	-	-	-	199,52
21	-	-	96,51	30	41,4	-	15	63,69	-
22	15	25,48	-	5	38,22	-	-	-	159,24
23	27	114,65	-	-	-	63,69	13	44,59	-
24	9	41,4	-	13	28,66	-	-	-	106,16
25	7	-	132,7	7	76,43	-	25	-	-
26	-	105,1	-	20	-	212,31	24	-	454,96
27	12	-	199,04	12	50,96	-	20	-	-
28	-	-	90,99	20	47,77	-	20	-	212,31
29	16	38,22	-	12	50,96	-	-	-	199,04
30	-	-	79,62	20	63,69	-	20	63,69	-
31	20	-	-	7	-	132,7	5	38,22	-
32	12	-	199,04	12	50,96	-	22	-	-
33	15	63,69	-	20	47,77	-	-	-	144,76
34	30	-	79,62	30	127,39	-	-	159,24	-

Продовження таблиці 1.4 – Параметри приймачів Z_α , Z_β , Z_γ

Варі- ант	Параметри приймача Z_α			Параметри приймача Z_β			Параметри приймача Z_γ		
	R_α	L_α	C_α	R_β	L_β	C_β	R_γ	L_γ	C_γ
	Ом	мГн	мкФ	Ом	мГн	мкФ	Ом	мГн	мкФ
35	-	79,62	-	10	-	212,31	15	-	318,47
36	6	25,48	-	16	38,22	-	-	-	72,38
37	-	-	95,51	15	41,4	-	15	63,69	-
38	24	57,32	-	15	31,85	-	-	-	113,74
39	18	-	132,7	10	-	212,31	-	124,2	-
40	11	-	167,17	11	60,67	-	-	121,34	-
41	24	57,32	-	24	-	176,93	-	-	114,65
42	18	-	132,7	18	76,43	-	14	-	-
43	-	127,39	-	30	-	79,62	15	-	159,24
44	5	-	265,39	15	63,69	-	10	-	-
45	12	50,96	-	8	-	530,78	-	-	106,16
46	6	25,48	-	16	38,22	-	-	-	159,24
47	7	76,43	-	-	-	66,35	12	-	636,94
48	-	-	106,16	20	47,77	-	10	143,31	-
49	8	19,11	-	12	50,96	-	-	-	144,76
50	14	-	66,35	14	152,87	-	50	-	-
51	20	95,54	-	10	31,85	-	-	-	159,24
52	-	-	127,39	20	-	212,31	20	127,39	-
53	24	-	99,52	24	101,92	-	40	-	-
54	-	105,1	-	30	-	244,98	20	-	159,24
55	30	-	212,31	10	47,77	-	-	79,62	-
56	-	63,69	-	20	63,69	-	20	-	212,31
57	16	-	132,7	-	-	132,7	24	76,43	-
58	18	82,8	-	26	57,32	-	-	-	53,08
59	20	-	-	18	-	132,7	18	76,43	-
60	-	-	117,96	10	117,83	-	12	-	318,47
61	40	95,54	-	7	76,43	-	-	-	318,47
62	20	-	-	12	-	199,04	12	50,96	-
63	25	111,46	-	20	-	212,31	22	-	-
64	22	-	-	5	38,22	-	5	-	265,39
65	-	159,42	-	40	95,54	-	14	-	66,35
66	18	76,43	-	18	-	-	9	-	79,62
67	-	-	159,24	30	111,46	-	20	-	212,31

Продовження таблиці 1.4 – Параметри приймачів Z_α , Z_β , Z_γ

Варіант	Параметри приймача Z_α			Параметри приймача Z_β			Параметри приймача Z_γ		
	R_α	L_α	C_α	R_β	L_β	C_β	R_γ	L_γ	C_γ
	Ом	мГн	мкФ	Ом	мГн	мкФ	Ом	мГн	мкФ
68	18	-	132,7	18	-	-	9	127,39	-
69	20	-	212,31	30	111,46	-	-	-	159,24
70	40	-	106,16	7	-	132,7	-	31,85	-
71	20	-	-	12	50,96	-	12	-	199,04
72	-	127,39	-	20	-	159,24	20	63,69	-
73	15	-	66,35	15	146,5	-	50	-	-
74	-	114,65	-	20	-	212,31	20	-	88,46
75	20	63,69	-	25	-	159,24	-	114,65	-
76	8	19,11	-	8	-	530,79	20	-	-
77	-	-	127,39	25	15,92	-	25	-	636,94
78	40	-	79,62	-	127,39	-	20	63,69	-
79	17	31,85	-	12	15,92	-	-	-	127,39
80	-	-	117,95	27	104,14	-	15	63,69	-
81	-	159,24	-	24	-	132,7	20	-	79,62
82	-	-	95,64	20	58,28	-	20	-	174,03
83	10	-	183,87	10	55,16	-	30	-	-
84	12	38,6	-	18	-	-	30	-	79,62
85	-	-	83,81	19	60,51	-	11	63,69	-
86	12	-	199,04	25	-	-	12	50,96	-
87	25	-	-	12	50,96	-	9	-	79,62
88	22	-	-	22	-	83,59	22	121,34	-
89	-	89,17	-	28	-	113,74	12	50,96	-
90	35	-	90,99	30	-	-	10	31,85	-
91	12	50,96	-	20	-	212,31	-	-	144,76
92	18	-	132,7	-	63,69	-	20	47,77	-
93	-	70,06	-	24	-	454,96	25	-	127,39
94	-	-	144,76	27	88,46	-	15	-	398,09
95	16	28,66	-	-	-	144,76	12	-	636,94
96	-	-	127,39	20	47,77	-	15	-	159,24
97	-	79,62	-	15	-	159,24	7	76,43	-
98	-	-	144,76	18	76,43	-	12	50,96	-
99	20	-	212,31	-	70,06	-	18	-	132,76
100	15	63,69	-	22	-	83,59	25	-	-

1.5. Основні теоретичні положення для розв'язання задач на змінний струм

Змінним струмом називають струм, значення якого та зміни напрямку повторюються в одній і тій же послідовності через рівні проміжки часу, які називаються періодом T . Отже, якщо в довільний момент часу струм дорівнює $i(t)$, тоді через інтервал, рівний одному або будь-якому цілому числу періодів, струм має таке ж значення і напрямок. Синусоїдний струм – окремий випадок змінного струму. В електричних колах синусоїдного струму електричні величини – ЕРС, напруга і струм є синусоїдними функціями часу:

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e); \quad u = U_m \sin(\omega t + \psi_u); \quad i = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad (1.7)$$

де e, u, i – миттєві значення ЕРС, напруги і струму; E_m, U_m, I_m – амплітудні значення; ψ_e, ψ_i, ψ_u – початкові фази, що вимірюються в градусах або рад/с;

ω – кутова частота в рад/с, що дорівнює

$$\omega = 2\pi f,$$

де f – частота живильної мережі в герцах [Гц], яка дорівнює

$$f = \frac{1}{T}, \text{ де } T - \text{період, вимірюваний у секундах [с].}$$

Відповідно до формули (1.7) подання синусоїдного змінного струму називається аналітичною формою.

У колі змінного струму напруга і струм не обов'язково мають однакові початкові фази і характеризуються кутом зсуву фаз $\phi = \psi_u - \psi_i$.

Отримання змінної ЕРС можна показати за допомогою (рис. 1.28).

У середині плоского нерухомого розімкненого контуру обертається постійний магніт з постійною кутовою швидкістю ω . Нехай магнітний потік постійного магніту дорівнює Φ_m , тоді миттєве значення його складової уздовж горизонтальної осі X

$$\Phi_n = \Phi_m \cos(\omega t + \psi_e),$$

де ψ_e – початкова фаза магнітного потоку, а $\omega t + \psi_e$ – фаза магнітного потоку, тобто початковий кут просторового розміщення постійного магніту відносно осі X .

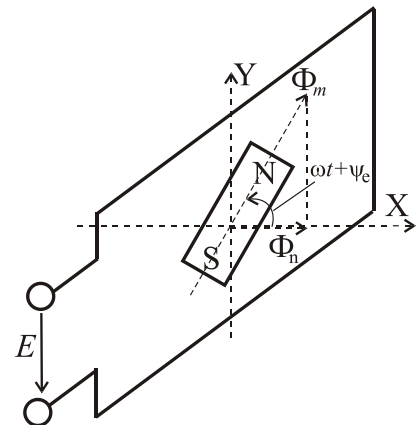


Рисунок 1.28 – Отримання синусоїдної ЕРС

Відомо, що потокозчеплення прямо пропорційно магнітному потоку

$$\psi_n = w\Phi_n,$$

де w – число витків котушки.

Згідно закону електромагнітної індукції ЕРС, що наводиться у котушці, дорівнює

$$e = -\frac{d\psi_n}{dt} = \omega w\Phi_m \sin(\omega t + \psi_e).$$

Амплітудне значення ЕРС визначається як $E_m = 2\pi f w\Phi_m$, а діюче значення ЕРС дорівнює

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 4,44 f w\Phi_m.$$

Синусоїдна ЕРС показана на рис. 1.29. Змінні струми із частотами від 20 Гц – 50 кГц можна отримати за допомогою високочастотних електрогенераторів. Ці генератори (машини змінного струму), як правило, є синхронними, вони розташовані на електростанціях, причому їхній вал приводиться в обертання тепловими, газовими, гідравлічними або вітродвигунами.

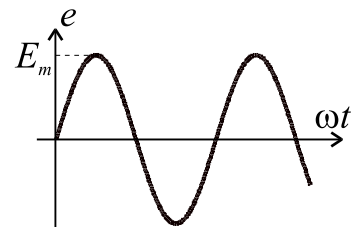


Рисунок 1.29 – Синусоїдна ЕРС

Графічне (у вигляді графіків) подання синусоїдних напруги і струму показано на рис. 1.30.

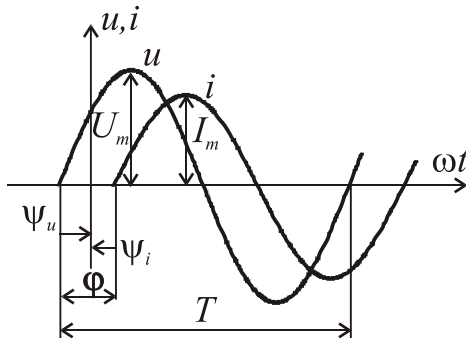


Рисунок 1.30 – Кут зсуву φ

Також на рис.1.30 показаний кут зсуву між напругою та струмом $\varphi = \psi_u - \psi_i$.

Початкові фази синусоїдних струму або ЕРС чи напруги можуть бути позитивними, негативними і дорівнювати нулю (рис. 1.31):

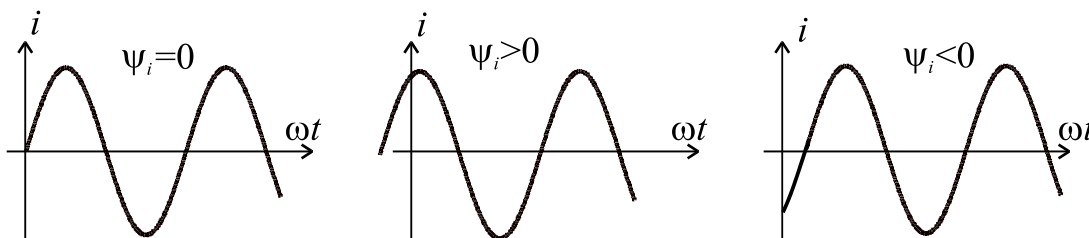


Рисунок 1.31 – Початкові фази синусоїдних величин в електричному колі

Теплова дія струму, а також механічна сила взаємодії двох провідників, по яким проходить один і той самий струм, пропорційні квадрату струму. Тому величину змінного (періодичного) струму характеризує **діюче (середнє квадратичне) значення**, яке розраховується за формулою

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}. \quad (1.8)$$

Підносимо до квадрату (1.8) та множимо обидві частини отриманого виразу на RT

$$RI^2T = \int_0^T Ri^2 dt.$$

Виходячи із останнього виразу, можна сказати, що діюче значення змінного струму дорівнює такому постійному струму, який проходячи крізь резистор з опором R за період часу T , виділяє ту ж кількість теплової енергії, що і даний змінний струм.

Беремо інтеграл (1.8) і визначаємо зв'язок між діючим та амплітудним значенням синусоїдного струму

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \sqrt{\frac{1}{T} I_m^2 \int_0^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt} = \sqrt{\frac{1}{2T} I_m^2 \left(t - \frac{\sin 2\omega t}{2\omega} \right) \Big|_0^T} = \\ &= \sqrt{\frac{1}{2T} I_m^2 \left(T - \frac{\sin 2\omega T}{2\omega} - 0 + \frac{\sin 2\omega 0}{2\omega} \right)} = \sqrt{\frac{1}{2T} T I_m^2} = \sqrt{\frac{I_m^2}{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0,707 I_m. \end{aligned}$$

Аналогічно можна показати, що діючі значення ЕРС та напруги дорівнюють

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}; \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

Крім діючого значення, визначають також і середнє значення синусоїдних величин.

Середнє значення синусоїдного струму I_{cp} обчислюють за півперіод, протягом якого струм залишається позитивним, тобто напрямок струму не змінюється. Воно дорівнює такому постійному струму, при якому протягом півперіоду проходить той же заряд Q , що і при змінному струмі (рис.1.32)

$$I_{cp} = \frac{Q}{T/2} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = -\frac{2I_m}{T\omega} \cos \omega t \Big|_0^{T/2} = \frac{2I_m}{\pi} \approx 0,637 I_m,$$

де $T\omega = 2\pi$, а $\cos(T\omega/2) = \cos(2\pi/2) = -1$; $\cos 0^\circ = 1$.

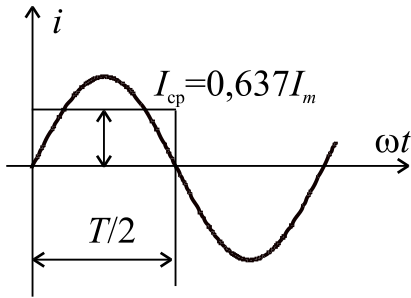


Рисунок 1.32 – Середнє значення струму

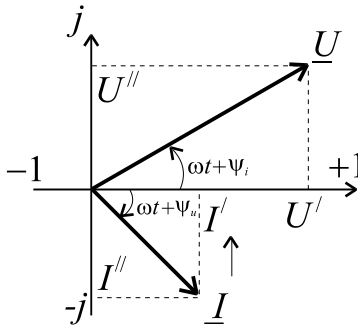


Рисунок 1.33 – Вектори напруги та струму

Аналогічно для напруги і ЕРС:

$$U_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} u dt \approx 0,637 U_m; \quad E_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} e dt \approx 0,637 E_m.$$

Варто пам'ятати, що середнє значення синусоїдної величини (струму, напруги, ЕРС) за період дорівнює нулю.

На векторній діаграмі вектори зображують у масштабі рівними їхнім діючим значенням. Крім того, їх фіксують щодо осі X під кутами рівними початковим фазам. Вектори діючих значень U і I розміщуються на комплексній площині (рис.1.33).

Це дає можливість представити електричні величини **комплексними числами, наприклад, у показовій і алгебраїчній формах:**

$$\underline{U} = U e^{j\psi_u} = U' + jU''; \quad \underline{E} = E e^{j\psi_e} = E' + jE''; \quad \underline{I} = I e^{j\psi_i} = I' + jI'',$$

де U', E', I' – дійсні частини комплексних чисел;

U'', E'', I'' – уявні частини комплексних чисел; e – основа натурального логарифма (не плутати з миттєвим значенням ЕРС). Покажемо переходи від показової до алгебраїчної форми, використовуючи формулу Ейлера

$$\underline{I} = I \cos \psi_i + j I \sin \psi_i = I' + jI'' = \sqrt{(I')^2 + (I'')^2} e^{j \arctg \left(\frac{I''}{I'} \right)} = I e^{j\psi_i}.$$

Розрахунок електричних кіл з використанням комплексних чисел називається *символічним методом*. Додавання і вирахування комплексних величин зручніше проводити в алгебраїчній формі, а множення і ділення в показовій:

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = I'_1 + jI''_1 + I'_2 + jI''_2 = (I'_1 + I'_2) + j(I''_1 + I''_2);$$

$$\underline{U} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2 = U'_1 + jU''_1 - U'_2 - jU''_2 = (U'_1 - U'_2) + j(U''_1 - U''_2);$$

$$\underline{U} = \underline{I} \underline{Z} = I e^{j\psi_i} Z e^{j\varphi} = I Z e^{j(\psi_i + \varphi)} = U e^{j\psi_u};$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} = \frac{U e^{j\psi_u}}{Z e^{j\varphi}} = \frac{U}{Z} e^{j(\psi_u - \varphi)} = I e^{j\psi_i}.$$

При розрахунку кіл синусоїдного струму застосовуються схеми заміщення, у яких реальні джерела і споживачі замінюються сукупністю ідеальних елементів. До них відноситься ідеальне джерело ЕРС (рис. 1.34), а також

пасивні елементи: активний опір R , індуктивний елемент L , ємнісний елемент C (рис. 1.35).

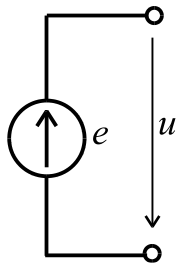


Рисунок 1.34 –
Ідеальне джерело
ЕРС

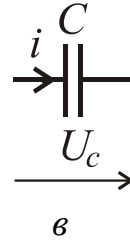
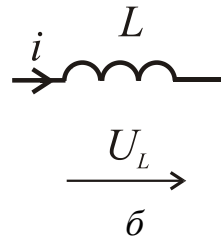
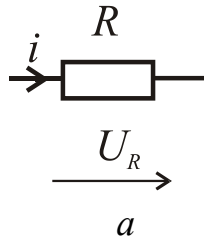


Рисунок 1.35 – Ідеальні елементи кола змінного струму

Ідеальне джерело ЕРС відображає здатність реального об'єкта (генератора, акумулятора) створювати різницю потенціалів на своїх затискачах підтримувати струм у замкненому колі. Вимірюється у вольтах [В].

Ідеальний резистивний елемент (рис. 1.35 *a*) – активний опір R вимірюється в омах [Ом]. Відображає здатність реального об'єкта перетворювати електричну енергію безповоротно в тепло.

Відповідно до символічного методу:

$$\underline{U}_R = R \underline{I}; \quad \underline{U}_R = U_R \cdot e^{j\psi_u}; \quad \underline{I} = I \cdot e^{j\psi_i}; \quad U_R \cdot e^{j\psi_u} = R \cdot I \cdot e^{j\psi_i}; \quad U_R = R \cdot I;$$

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = 0; \quad \psi_u = \psi_i.$$

Таким чином, на резистивному елементі струм і напруга співпадають по фазі. Векторна діаграма подана на рис. 1.36 *a*.

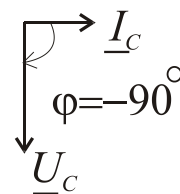
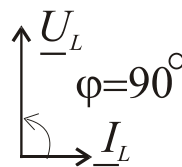
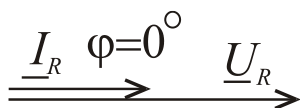


Рис.1.36 – Вектори напруг та струмів

Ідеальний індуктивний елемент (рис. 1.35 *б*) відображає здатність реального об'єкта (котушки індуктивності) збуджувати магнітне поле в навколишньому середовищі при проходженні по цьому об'єкту електричного струму. Індуктивність L вимірюється в генрі [Гн].

На індуктивному елементі ЕРС самоіндукції дорівнює $e_L = -L \frac{di}{dt}$.

За другим законом Кірхгофа $u_L = -e_L = L \frac{di}{dt}$.

Тоді відповідно до символічного методу

$$\underline{U}_L(t) = L \frac{d\underline{I}(t)}{dt} \text{ або } \underline{U}_L e^{j\omega t} = L \frac{d(\underline{I} e^{j\omega t})}{dt} = j\omega L \underline{I} e^{j\omega t}.$$

Таким чином, $\underline{U}_L = j\omega L \underline{I}$, де $j = e^{j\frac{\pi}{2}}$.

Вводимо поняття $X_L = \omega L = 2\pi f L$ – індуктивний опір.

$$\underline{U}_L e^{j\psi_u} = X_L \underline{I} e^{j(\psi_i + \frac{\pi}{2})}; \underline{U}_L = X_L \underline{I}; \psi_u = \psi_i + \frac{\pi}{2}, \text{ звідси } \varphi = \psi_u - \psi_i = \frac{\pi}{2}.$$

На індуктивному елементі струм відстає від напруги на $\frac{\pi}{2}$. Векторна діаграма подана на рис. 1.36 б.

Ідеальний ємнісний елемент (рис. 1.35 в) відображає здатність реального об'єкта накопичувати електричний заряд і створювати в навколишньому просторі електричне поле. Ємність C вимірюється у фарадах [Ф].

Миттєве значення струму крізь ємність дорівнює $i = C \frac{du_C}{dt}$.

Відповідно до символічного методу $\underline{U}_C(t) = \frac{1}{C} \int \underline{I}(t) dt$;

$$\underline{U}_C e^{j\omega t} = \frac{1}{C} \int \underline{I} e^{j\omega t} dt = \frac{1}{j\omega C} \cdot \underline{I} e^{j\omega t}.$$

Таким чином, $\underline{U}_C = -j \frac{1}{\omega C} \underline{I}$, де $-j = e^{-j\frac{\pi}{2}}$.

Вводимо поняття $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$ – ємнісний опір.

$$\underline{U}_C e^{j\psi_u} = X_C \underline{I} e^{j(\psi_i - \frac{\pi}{2})}; \underline{U}_C = X_C \underline{I};$$

$$\psi_u = \psi_i - \frac{\pi}{2}, \text{ звідси } \varphi = \psi_u - \psi_i = -\frac{\pi}{2}.$$

На ємнісному елементі струм опереджає напругу на $\frac{\pi}{2}$. Векторна діаграма подана на рис. 1.36 в.

Закон Ома для комплексних величин.

$$\underline{U} = R \underline{I}; \underline{U}_L = jX_L \underline{I} = \underline{I} X_L e^{j90^\circ}; \underline{U}_C = -jX_C \underline{I} = \underline{I} X_C e^{-j90^\circ}.$$

У загальному вигляді,

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}}.$$

Тоді кути зсуву фаз для кожного випадку (кут між напругою і струмом)

$$\varphi_R = 0^\circ, \varphi_L = 90^\circ, \varphi_C = -90^\circ \text{ (рис. 1.36 а, б, в)}$$

або в радіанах

$$\varphi_R = 0, \varphi_L = \frac{\pi}{2}, \varphi_C = -\frac{\pi}{2}.$$

Закони Кірхгофа для кіл змінного струму.

1-й закон

Сума миттєвих значень струмів, що сходяться у вузлі дорівнює нулю:

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0$$

або для векторів чи комплексних значень $\sum_{k=1}^n \underline{I}_k = 0$.

2-й закон

Відповідно до вибраного напрямку обходу контуру алгебраїчна сума миттєвих значень ЕРС джерел у цьому контурі дорівнює алгебраїчній сумі миттєвих значень напруг на всіх його пасивних елементах

$$\sum_{k=1}^m e_k = \sum_{k=1}^n u_k = \sum_{k=1}^p R_k i_k + \sum_{k=1}^l L_k \frac{di_k}{dt} + \sum_{k=1}^q \frac{1}{C_k} \int i_k dt,$$

де m – число ЕРС у контурі; n – число пасивних елементів у ньому, причому, p, l, q – число резистивних, індуктивних і ємнісних елементів

$$n = p + l + q.$$

Для векторів або комплексних значень:

$$\sum_{k=1}^m \underline{E}_k = \sum_{k=1}^n \underline{U}_k = \sum_{k=1}^p \underline{U}_{Rk} + \sum_{k=1}^l \underline{U}_{Lk} + \sum_{k=1}^q \underline{U}_{Ck}.$$

Співвідношення електричних величин при послідовному та паралельному з'єднанні елементів. Резонанс. Потужність у колах змінного струму

При послідовному з'єднанні елементів R, L, C (рис. 1.37) загальна напруга на них дорівнює геометричній сумі напруг на пасивних елементах

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C \Rightarrow \underline{U} \underline{I} = R \underline{I} + jX_L \underline{I} - jX_C \underline{I} = [R + j(X_L - X_C)] \underline{I}.$$

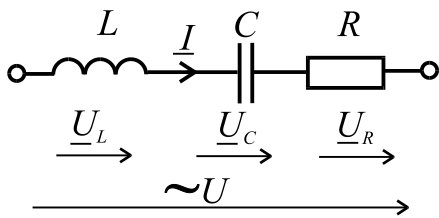


Рисунок 1.37 – Послідовне з'єднання R, L, C

Повний опір даного кола:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2},$$

$$\underline{Z} = R + jX = Z e^{j\varphi} \text{ – повний комплексний опір,}$$

$$X = X_L - X_C \text{ – сумарний реактивний опір.}$$

Тоді діюче значення струму визначимо за

законом Ома $I = \frac{U}{Z}$.

Причому, для амплітудних значень можна записати $U_m = ZI_m$. А для

комплексних значень $I e^{j\psi_i} = \frac{U e^{j\psi_u}}{Z e^{j\varphi}}$.

Напругу та струм можна розкласти на активну й реактивну складові:

$$U_a = U \cos \varphi = U_R = RI; I_a = I \cos \varphi,$$

$$U_p = U \sin \varphi = U_L - U_C = (X_L - X_C)I = XI; I_p = I \sin \varphi.$$

Тоді з геометричних міркувань

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_p^2} = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}.$$

Кут зсуву фаз в колі визначається як

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} = \arctg \frac{X}{R}; R = Z \cos \varphi, X = Z \sin \varphi.$$

Залежно від співвідношення величин X_L і X_C розрізняють:

1) $X_L > X_C, X > 0$ – ділянка кола має активно-індуктивний характер, кут зсуву фаз $0^\circ < \varphi < 90^\circ$, загальний струм відстає по фазі від загальної напруги. Взаємні фазові співвідношення показані на векторній діаграмі (рис. 1.38).

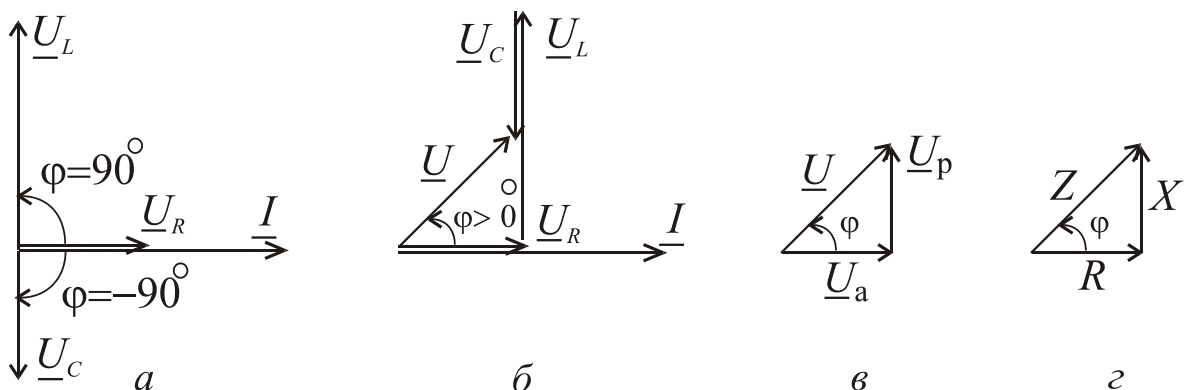


Рисунок 1.38 – Векторні діаграми при куті зсуву $\varphi > 0^\circ$

Базовим вважаємо вектор струму при початковій фазі рівній нулю $\psi_i = 0^\circ$. Фазові співвідношення напруги та струму визначаються геометрично також з трикутника опорів (рис. 1.38 г).

2) $X_L < X_C$, $X < 0$ – ділянка кола має активно-ємнісний характер, кут зсуву фаз $-90^\circ < \varphi < 0^\circ$, загальний струм випереджає по фазі загальну напругу (рис. 1.39).

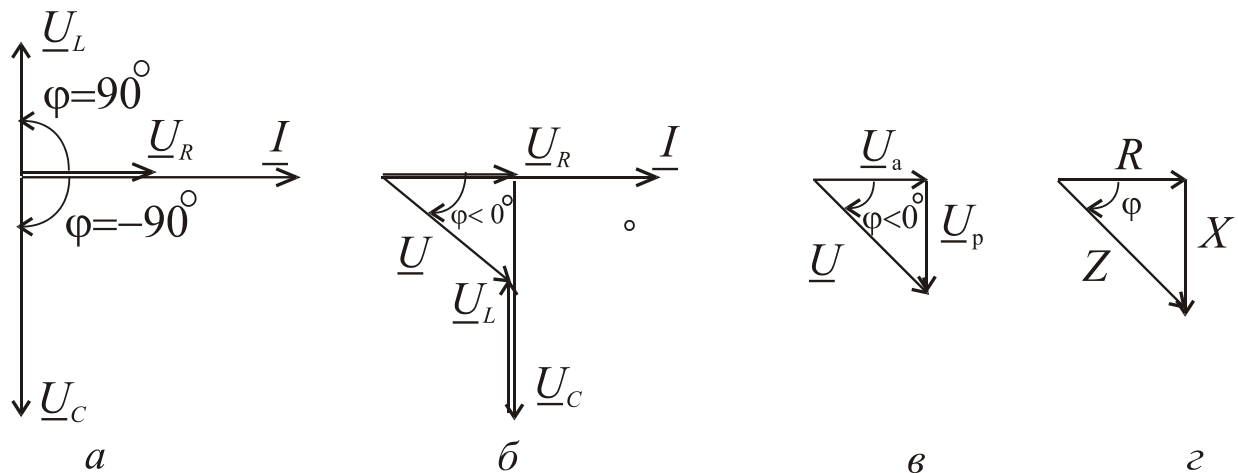


Рисунок 1.39 Векторні діаграми при куті зсуву $\varphi < 0^\circ$

3) $X_L = X_C$, тоді $X = 0$ і $\varphi = 0$ загальний струм збігається по фазі із загальною напругою, у цілому опір ділянки кола має активний характер, і такий стан електричного кола з послідовним з'єднанням елементів відповідає особливому режиму, який називається *резонансом напруг*. Напруги U_L і U_C , перебуваючи в протифазі, взаємно компенсують одна одну, тому загальна напруга дорівнює напрузі на активному опорі $U = U_R$ (рис. 1.40).

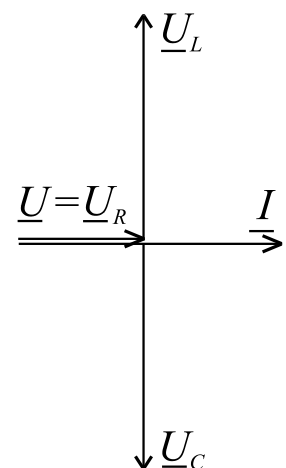


Рисунок 1.40 – Резонанс напруг

Співвідношення електричних величин при паралельному з'єднанні споживачів.

Діючі значення струмів у вітках кола (рис. 1.41) можна визначити як:

$$I_R = \frac{U}{R}; \quad I_L = \frac{U}{X_L}; \quad I_C = \frac{U}{X_C}.$$

Загальний струм знайдемо як векторну суму всіх струмів у паралельних вітках $\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_L + \underline{I}_C$, що показано на векторній діаграмі (рис. 1.42).

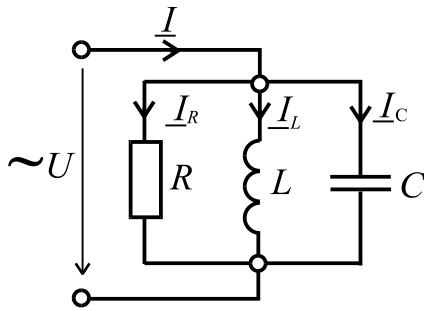


Рисунок 1.41 – Паралельне з'єднання R, L, C

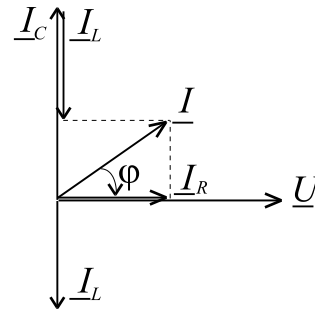


Рисунок 1.42 – Векторна діаграма

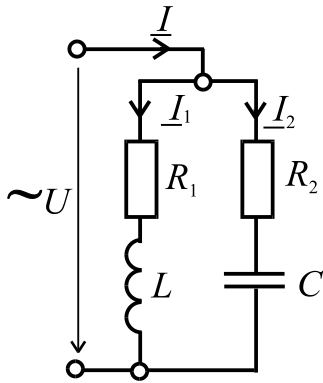


Рисунок 1.43 –
Окремий випадок паралельного з'єднання R, L, C

Якщо коло має вигляд (рис.1.33), то струми у вітках можна знайти як:

$$I_1 = \frac{U}{Z_1}; \quad I_2 = \frac{U}{Z_2},$$

причому загальний струм є геометричною сумою струмів у паралельних вітках $I = I_1 + I_2$.

Повні опори віток: $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_L^2}$; $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (-X_C^2)}$.

Кут зсуву фаз у кожній із віток:
 $\varphi_1 = \arctg \frac{X_L}{R_1}$; $\varphi_2 = \arctg \frac{-X_C}{R_2}$.

З іншого боку загальний струм можна знайти аналітично з використанням понять про активну і реактивну складові струму (рис. 1.44):

$$I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1; \quad I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2; \quad I_a = I_{a1} + I_{a2};$$

$$I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1; \quad I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2; \quad I_p = I_{p1} + I_{p2};$$

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}; \quad \varphi = \arctg \frac{I_p}{I_a}.$$

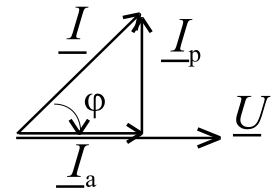


Рисунок 1.44
– Активна та реактивна складові струму

Ще один спосіб знаходження загального струму пов'язаний зі знаходженням повної провідності:

$Y = \sqrt{G_\Sigma^2 + B_\Sigma^2}$, де $G_\Sigma = G_1 + G_2$ – повна активна провідність; $B_\Sigma = B_{L1} - B_{C2}$ – повна реактивна провідність. Для окремих віток провідності мають вигляд:

$$G_1 = \frac{R_1}{Z_1^2}; \quad G_2 = \frac{R_2}{Z_2^2}; \quad B_{L1} = \frac{X_L}{Z_1^2}; \quad B_{C2} = \frac{X_C}{Z_2^2}.$$

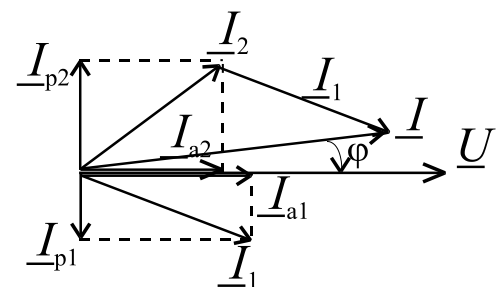


Рисунок 1.45 – До визначення загального струму

Тоді загальний струм визначається як $I = UY$. Фазовий зсув в діапазоні $-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$ залежить від співвідношення B_L і B_C . Векторна діаграма для цього випадку подана на рис. 1.45.

Резонанс. У теорії коливань резонансом називають процес вимушених коливань з такою частотою, при якій їхня інтенсивність максимальна. Характеризувати інтенсивність коливань можна по різних проявах, наприклад, за максимальним значенням амплітуди. Інше визначення резонансу – різке зростання амплітуди сталих змущених коливань при наближенні частоти зовнішнього гармонійного впливу до частоти однієї з нормальних коливань системи.

Як критерій резонансу приймемо збіг по фазі напруги і струму на зажимах кола. Це так званий фазовий резонанс. За способами отримання резонанс може бути: параметричний (коли підбирають індуктивність та ємність при заданій резонансній частоті) або частотний (підбирають частоту напруги живлення при заданій ємності і індуктивності кола).

Коли режим резонансу настає при збігу фаз струму в колі та напруги живлення, тоді реактивний опір кола буде дорівнювати нулю

$$X = X_L - X_C = \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0,$$

тоді умова резонансу напруг:

$$X_L = X_C \text{ або } \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}.$$

Звідки знаходимо частоту напруги живлення та струму в колі, при якій настає резонанс

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – резонансна кутова частота, тоді $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ – резонансна частота в герцах. Характеристичний опір при послідовному з'єднанні дорівнює $\rho = \sqrt{L/C}$. Отже, при послідовному з'єднанні реактивних елементів може виникнути резонанс напруг.

Добротністю Q називають відношення діючих значень напруг U_L і U_C до значення напруги живлення

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{U_C}{U} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{\rho}{R}.$$

Діюче значення струму в послідовному контурі (рис.1.46)

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}. \quad (1.9)$$

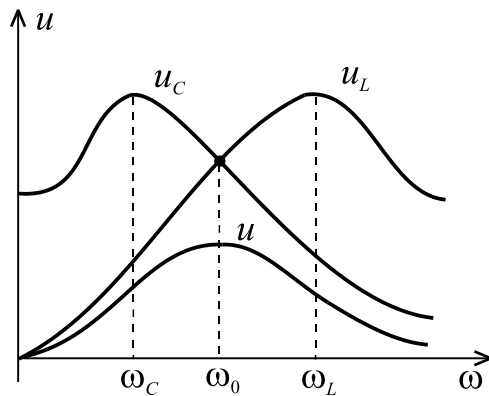


Рисунок 1.46 – Резонансні криві напруг

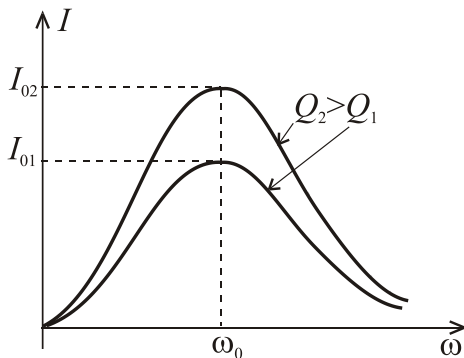


Рисунок 1.47 – Графіки добротності

За виразом (1.9) побудовані резонансні криві в колі при послідовному з'єднанні елементів та зміні частоти ω (рис. 1.46). Найбільшого значення струм досягає при резонансній частоті ω_0 . При зростанні добротності Q резонансне значення струму I підвищується ($I_{02} > I_{01}$).

Добротність показує в скільки разів при резонансі напруги на індуктивності і ємності більше напруги джерела живлення (рис.1.47).

Дослідження на максимум показують, що максимальні значення U_L і U_C мають місце не при резонансній частоті, а при частотах трохи менших, ніж резонансна частота $\omega_C < \omega_0$ або трохи більших $\omega_L > \omega_0$.

Резонанс струмів. Особливий випадок забезпечує умова резонансу струмів I_1 і I_2 . При цьому $B = 0$, $\varphi = 0$, $I = I_a$, $Y = G$ і, у цілому, коло (рис.1.43) має активний опір. I_{p1} і I_{p2} рівні між собою й взаємно компенсують один одного (рис. 1.48).

Умова виникнення резонансу струмів – рівність реактивних провідностей паралельних віток:

$$B_{L1} = B_{C2} \text{ або } \frac{X_L}{R_1^2 + X_L^2} = \frac{X_C}{R_2^2 + X_C^2}.$$

Причому, у випадку електричного кола (рис. 1.43) резонансна частота:

$$\omega_0' = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\rho^2 - R_1^2}{\rho^2 - R_2^2}}, \text{ де } \rho = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

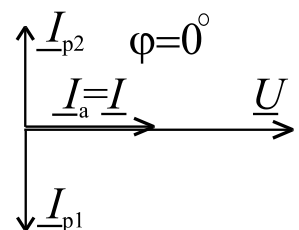


Рисунок 1.48 – Резонанс струмів

Резонансні криві струмів при паралельному з'єднанні показані на рис. 1.49. Слід мати на увазі, що резонансна частота кола при паралельному з'єднанні ω'_0 не дорівнює резонансній частоті при послідовному з'єднанні ω_0 (рис.1.46). Мінімальне значення струму I не дорівнює нулю, і воно знаходиться при частоті близький до ω'_0 .

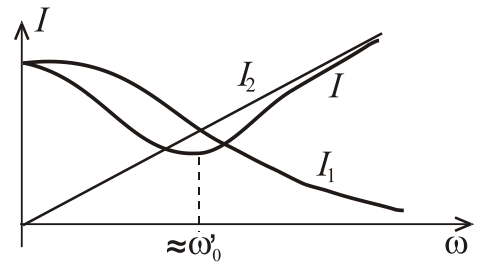


Рисунок 1.49 – Резонансні криві струмів

Резонансні явища використовують у теле- та радіозв'язку, а також у пристроях промислової енергетики.

Потужність та енергетичні процеси в колі синусоїдного струму.

Енергетичні процеси в колах змінного струму характеризуються **миттєвою потужністю** $p = ui$, що змінюється зі зміною u і i , та при цьому коливається з подвоєною частотою 2ω .

Активна потужність P характеризує процес безповоротного перетворення електроенергії в тепло на резистивному елементі і визначається як середня потужність за період T зміни струму. Вона вимірюється у ватах [Вт].

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T U_{Rm} I_m \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt = \frac{U_R I}{T} \int_0^T (1 - \cos 2\omega t) dt = U_R I = RI^2.$$

Крім того, можна записати

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = UI \cos \varphi.$$

Реактивна потужність Q характеризує оборотний процес взаємодії енергії між живильною мережею та споживачами та витрачається на створення магнітних та електричних полів у реактивних елементах (відповідно в котушках індуктивності та конденсаторах):

$$Q = Q_L - Q_C = XI^2 = (X_L - X_C)I^2 = X I^2 = UI \sin \varphi.$$

Реактивна потужність вимірюється у вольт-ампер реактивних [вар]. При цьому якщо миттєва потужність $p > 0$, то потужність забирається з мережі, а якщо $p < 0$, то потужність повертається в мережу.

Повна потужність кола $S = UI$ показує, яку максимальну потужність можна отримати від джерела енергії. Вона вимірюється у вольт-амперах [ВА].

З урахуванням цього, можна записати $P = S \cos \varphi$, де **$\cos \varphi$ називається коефіцієнтом потужності**. Його необхідно підвищувати, тому що чим вище

коефіцієнт потужності, тим більша активна потужність при заданих значеннях напруги й струму, передається споживачеві. Для цього треба зменшувати індуктивний опір навантаження або його компенсувати. Слід зауважити, що Q кола може бути як позитивна, так і від'ємна, а P завжди тільки позитивна.

Реактивна потужність $Q = S \sin \varphi$, а повна потужність $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

Комплексна потужність виражається як

$$\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}^* = U e^{j\psi_u} \cdot I e^{-j\psi_i} = UI e^{j(\psi_u - \psi_i)} = S e^{j\varphi} = S \cos \varphi + j S \sin \varphi = P + jQ,$$

де $\underline{I}^*$ – комплексно спряжене значення струму.

Основні поняття трифазного кола

Багатофазне електричне коло являє собою сукупність декількох електричних кіл, у яких діють ЕРС однієї частоти, але з різними початковими фазами. Складова частина такого кола називається фазою. Взагалі в електротехніці поняття “фаза” має декілька визначень:

- 1) кут, який визначає змінювання синусоїдної величини;
- 2) вивід від вищого потенціалу джерела електроенергії;
- 3) складова частина багатофазних електричних кіл, тобто окреме коло у складі електричної мережі.

Симетричною трифазною системою ЕРС називається сукупність трьох ЕРС однакової частоти і амплітуди, початкові фази яких відрізняються на кут 120 градусів (рис. 1.50).

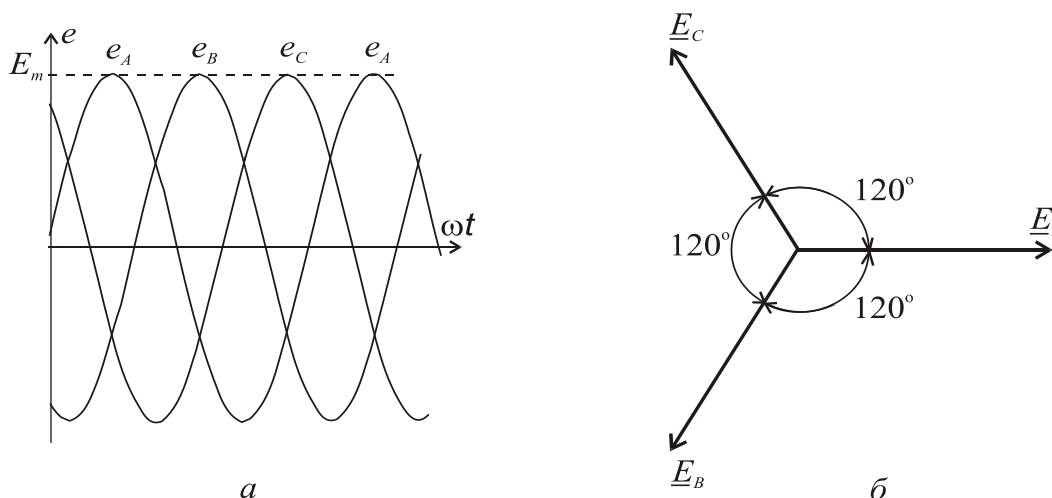


Рисунок 1.50 – Симетрична трифазна симетрична система ЕРС

Трифазна система змінного струму була розроблена російським інженером М.О. Доліво-Добровольським у 1891 році. Ця система дозволила найбільш економічно передавати електроенергію і створити надійні та відносно прості електродвигуни, генератори, трансформатори та ін.

Джерелом трифазних ЕРС є трифазні електрогенератори. Найпростіший трифазний генератор аналогічний однофазному генератору, з тією лише різницею, що в нього не одна, а три однакові обмотки статора, розташовані під кутом 120 градусів (рис. 1.51). A, B, C – початки фаз; X, Y, Z – кінці фаз. При обертанні ротора з частотою ω , змінний магнітний потік Φ_m наводить в

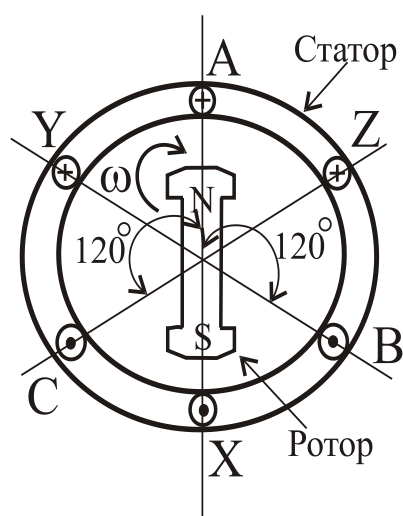


Рисунок 1.51 – Трифазний генератор

обмотках статора ЕРС однакової частоти і амплітуди, які зміщені одна відносно одної на 1/3 частину періоду або на 120° . Напрямок струмів в обмотках позначається «+», якщо струм направлений від спостерігача або «•», якщо направлений на спостерігача.

Таким чином, фазні синусоїдні ЕРС у трифазному генераторі утворюють трифазну симетричну систему фазних напруг, яку можна записати в аналітичному вигляді та зокрема з використанням комплексних чисел:

$$\begin{aligned} e_A &= U_A = U_{\Phi m} \sin \omega t ; & \underline{E}_A &= \underline{U}_A = U_{\Phi} e^{j0^\circ} ; \\ e_B &= U_B = U_{\Phi m} \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) ; & \underline{E}_B &= \underline{U}_B = U_{\Phi} e^{-j\frac{2}{3}\pi} = U_{\Phi} e^{-j120^\circ} ; \\ e_C &= U_C = U_{\Phi m} \sin \left(\omega t + \frac{2}{3} \pi \right) ; & \underline{E}_C &= \underline{U}_C = U_{\Phi} e^{+j\frac{2}{3}\pi} = U_{\Phi} e^{j120^\circ} . \end{aligned}$$

Фазні напруги джерела мають однакове діюче значення U_{Φ} і зсунути по фазі одна відносно одної, як було зазначено вище, на 120° (рис. 1.50).

Основою промислових та побутових електричних мереж є чотирипровідна трифазна лінія електропередачі, яка утворена трьома лінійними (A, B, C) і нейтральним (нульовим) (N) проводами. Навантаження може бути включено за схемою: “зірка” без нейтрального проводу (умовне позначення Y) або “зірка” з нейтральним проводом (YN) чи “трикутник” (Δ) (рис. 1.52).

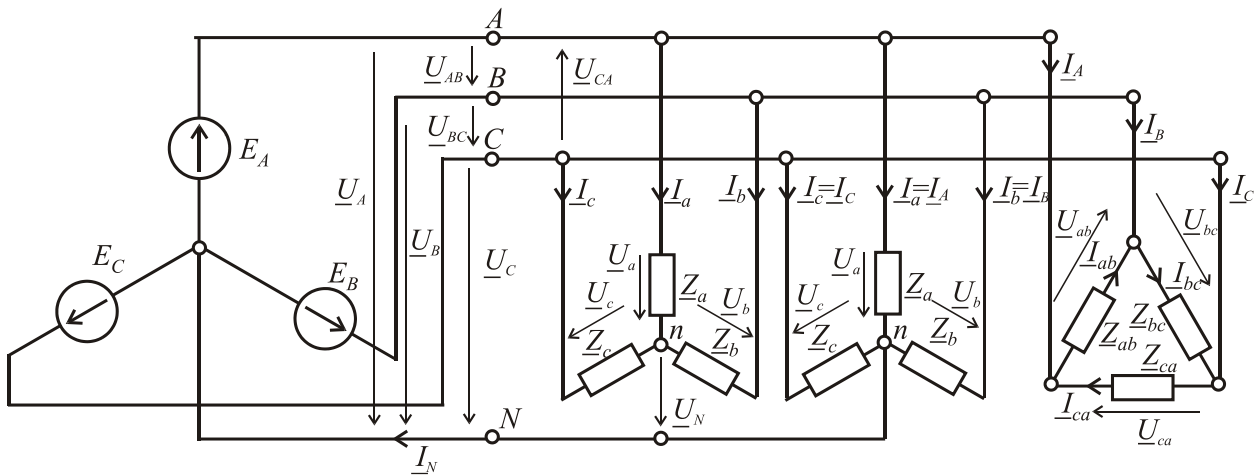


Рисунок 1.52 – Трифазне електричне коло із різними схемами споживачів

Напруги між лінійними проводами називаються *лінійними*: U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} , а між лінійними і нейтральним проводом називаються *фазними напругами джерела*: U_A , U_B , U_C .

Фазні напруги на навантаженні: U_a , U_b , U_c (для “зірки”), U_{ab} , U_{bc} , U_{ca} (для “трикутника”).

Лінійні струми протікають по лінійним проводам: I_A , I_B , I_C .

Фазні струми протікають по навантаженню:

- у випадку з’єднання навантаження за схемою “зірка” I_a , I_b , I_c .
- у випадку з’єднання навантаження за схемою “трикутник” I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} .

Струм у нейтральному проводі – I_N .

Зв’язок лінійних струмів та фазних у випадку з’єднання навантаження в “трикутник” згідно з першим законом Кірхгофа має вигляд $I_A = I_{ab} - I_{ca}$; $I_B = I_{bc} - I_{ab}$; $I_C = I_{ca} - I_{bc}$.

На основі другого закону Кірхгофа можна встановити зв’язок між лінійними і фазними напругами:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B; \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C; \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A.$$

Повні опори фаз при різному з’єднанні навантаження: Z_a , Z_b , Z_c , Z_{ab} , Z_{bc} , Z_{ca} . У загальному випадку повний комплексний опір у фазі $\underline{Z}_\Phi = Z_\Phi e^{j\varphi_\Phi}$.

Струм фази при будь-яких з’єднаннях навантаження можна визначити, використовуючи закон Ома, розділивши відому фазну напругу навантаження на опір навантаження $I_\Phi = U_\Phi / Z_\Phi$. У випадку рівності фазних опорів (не тільки за модулем, але й за аргументом φ комплексного числа) навантаження називається симетричним і встановлюються такі співвідношення між фазними і лінійними параметрами:

- при з'єднанні навантаження “зіркою” співвідношення між діючими значеннями фазних і лінійних напруг $U_{\Phi} = U_L / \sqrt{3}$;

- при з'єднанні “трикутником” $U_{\Phi} = U_L$.

Для лінійних і фазних струмів співвідношення між діючими значеннями лінійних і фазних струмів наступні:

- при з'єднанні навантаження в “зірку” $I_L = I_{\Phi}$;

- при з'єднанні в “трикутник” $I_{\Phi} = I_L / \sqrt{3}$.

На рис. 1.53 а, б показані електричні схеми і векторні діаграми, відповідно для з'єднання навантаження в “зірку” та в “трикутник”. Навантаження в обох випадках симетричне, активно-індуктивне за характером.

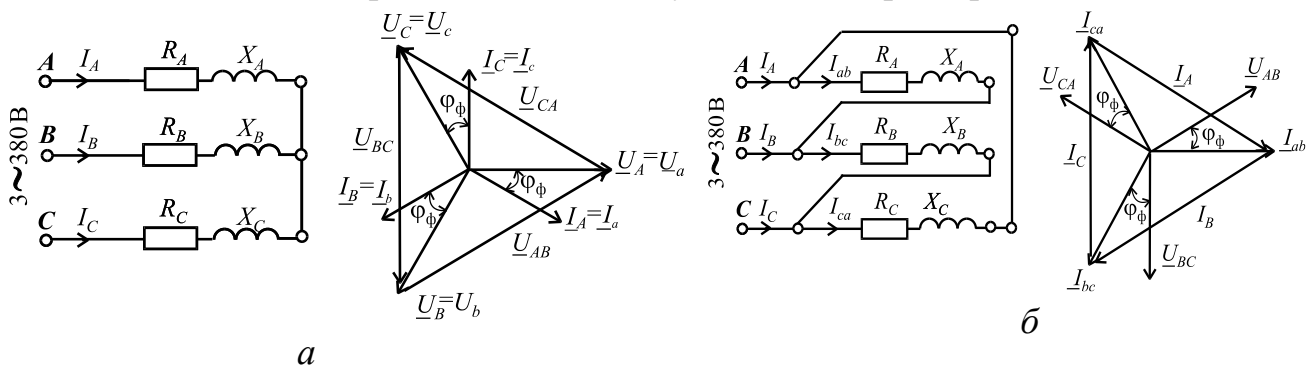


Рисунок 1.53 – Трифазне коло з різним з'єднанням навантаження у “зірку” (а) та у “трикутник” (б) та векторні діаграми в цих випадках

Якщо фазні опори споживачів не дорівнюють один одному, причому як за модулем Z_{Φ} , так і за характером навантаження, тобто куту φ_{Φ} , то таке навантаження називається несиметричним. При цьому навантаження можна підключати як “трикутником”, так і “зіркою” з нейтраллю, тому що фазні напруги залишаються незмінними і дорівнюють наведеним вище. Але при з'єднанні несиметричного навантаження “зіркою” без нейтрального проводу

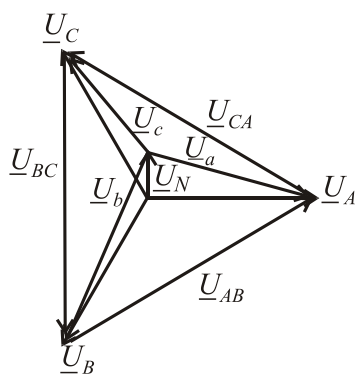


Рисунок 1.54 – Напруга зсуву нейтралі

виникає напруга зсуву нейтралі U_N

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{Y}_a \underline{U}_A + \underline{Y}_b \underline{U}_B + \underline{Y}_c \underline{U}_C}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c},$$

де $\underline{Y}_a = \frac{1}{\underline{Z}_a}$; $\underline{Y}_b = \frac{1}{\underline{Z}_b}$; $\underline{Y}_c = \frac{1}{\underline{Z}_c}$ – комплексні провідності фаз.

Поява напруги зсуву нейтралі явище шкідливе, тому що призводить до того, що на одній з фаз напруга може різко зменшитися, а на інших різко зрости. Фазні напруги при цьому визнача-

ються як:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_N; \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_N; \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_N.$$

Така ситуація неприпустима з погляду безпечної роботи електроприладів, які вмикаються у таку мережу. Наявність нейтрального проводу з опором $R_N \ll Z_\Phi$ вирівнює напруги на фазах споживачів у випадку несиметрії навантаження, тому що сама система фазних ЕРС симетрична і фазне навантаження включається безпосередньо на фазну напругу джерела $U_\Phi = U_\Delta / \sqrt{3}$. Однак по нейтральному проводу у випадку несиметрії навантаження протікає струм, який розраховується як векторна (або комплексна) сума фазних струмів: $\underline{I}_N = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c$, тому і важливо, щоб R_N був набагато менший за Z_Φ .

Потужність трифазного кола.

Активна потужність трифазного кола складається з активних потужностей фаз. Так, для симетричного навантаження:

$P_\Phi = U_\Phi I_\Phi \cos \varphi_\Phi$; $P_{\Sigma} = 3P_\Phi$, де φ_Φ – кут зсуву між фазними напругою і струмом. Аналогічно можна визначити реактивну потужність:

$$Q_\Phi = U_\Phi I_\Phi \sin \varphi_\Phi; Q_{\Sigma} = 3Q_\Phi.$$

Повна потужність фази визначиться по відомій формулі $S_\Phi = \sqrt{P_\Phi^2 + Q_\Phi^2}$; а в усьому трифазному колі, відповідно, як $S_{\Sigma} = 3S_\Phi$.

$$\text{Або інакше: } S_{\Sigma} = 3S_\Phi = 3U_\Phi I_\Phi = \sqrt{3}U_\Delta I_\Delta.$$

Для несиметричного навантаження потужність треба обчислювати окремо для кожної фази:

$$P_\Sigma = U_a I_a \cos \varphi_a + U_b I_b \cos \varphi_b + U_c I_c \cos \varphi_c;$$

$$Q_\Sigma = U_a I_a \sin \varphi_a + U_b I_b \sin \varphi_b + U_c I_c \sin \varphi_c.$$

При перемиканні споживача із “зірки” на “трикутник” лінійні струми та повна споживана потужність зростають у три рази:

$$S_Y = 3S_{\Phi Y} = 3U_{\Phi Y} I_{\Phi Y} = 3 \frac{U_\Delta}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_\Delta}{\sqrt{3}Z_\Phi} = \frac{U_\Delta^2}{Z_\Phi};$$

$$S_\Delta = 3S_{\Phi \Delta} = 3U_{\Phi \Delta} I_{\Phi \Delta} = 3U_\Delta \frac{U_\Delta}{Z_\Phi} = \frac{3U_\Delta^2}{Z_\Phi}.$$

Вимірювання активної потужності у випадку симетричного навантаження показано на рис. 1.55, при цьому $P_\Sigma = 3P_W$, а у випадку несиметричного навантаження – на рис. 1.56. При цьому сумарна потужність кола дорівнює алгебраїчній сумі потужностей, вимірюваних окремими ватметрами $P_\Sigma = P_{W1} + P_{W2}$, але окремий ватметр потужність окремих фаз не вимірює.

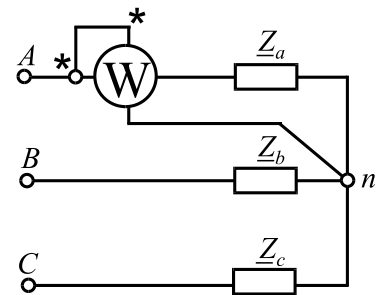


Рисунок 1.55

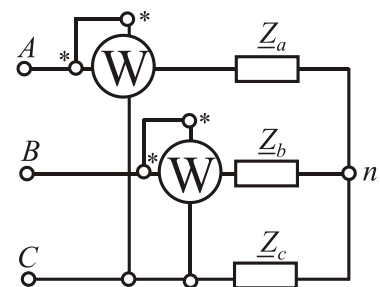


Рисунок 1.56

1.6. Приклади розрахунку електричних кіл змінного струму та питання для самоконтролю

Приклад 5. Розрахунок кола змінного струму при послідовному з'єднанні приймачів.

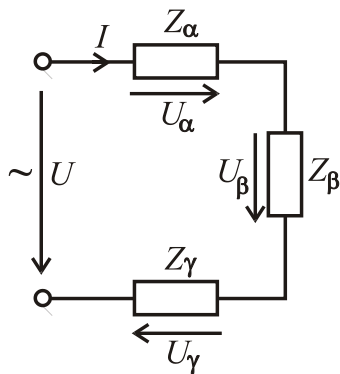


Рисунок 1.57

Розрахувати електричне коло змінного струму з послідовним з'єднанням приймачів Z_α , Z_β і Z_γ , схему якого зображено на рис. 1.57. Діюче значення напруги $U=200$ В, її частота $f=50$ Гц. Параметри ідеальних елементів приймачів: $R_\alpha = 20$ Ом; $L_\alpha = 47,77$ мГн; $R_\beta = 23,3$ Ом; $C_\gamma = 79,62$ мкФ. Зобразити схему заміщення кола з ідеальними елементами замість кожного приймача; визначити струм, джерела енергії. Побудувати векторну діаграму. Записати рівняння балансу активних та реактивних потужностей кола і перевірити ці рівняння. Записати синусоїдні часові функції струму і напруги джерела енергії та побудувати графіки цих функцій.

Розв'язання

На рис. 1.58 зображено схему заміщення кола за рис. 1.57 з ідеальними елементами.

Кутова частота струму і напруг

$$\omega = 2\pi \cdot f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ с}^{-1}.$$

Реактивні опори елементів:

$$X_{L\alpha} = \omega \cdot L_\alpha = 314 \cdot 47,77 \cdot 10^{-3} = 15 \text{ Ом};$$

$$X_{C\gamma} = \frac{1}{\omega \cdot C_\gamma} = \frac{1}{314 \cdot 79,62 \cdot 10^{-6}} = 40 \text{ Ом}.$$

Активний, реактивний та повний опори кола:

$$R = R_\alpha + R_\beta = 20 + 23,3 = 43,3 \text{ Ом};$$

$$X = X_{L\alpha} - X_{C\gamma} = 15 - 40 = -25 \text{ Ом};$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{43,3^2 + (-25)^2} = 50 \text{ Ом}.$$

Діюче значення струму в колі за законом Ома

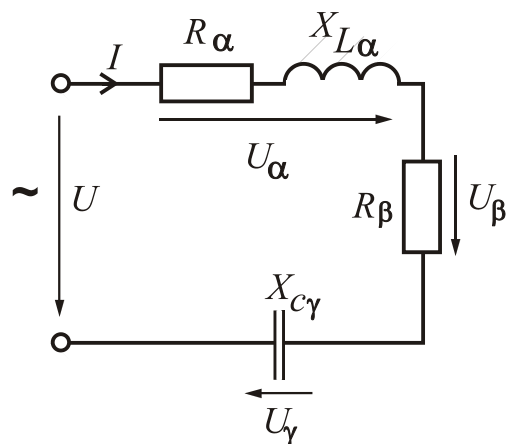


Рисунок 1.58

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{200}{50} = 4 \text{ A.}$$

Кут зсуву фаз між векторами струму та напругою джерела

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} = \arctg \frac{-25}{43,3} = -30^\circ.$$

Повні опори приймачів:

$$Z_\alpha = \sqrt{R_\alpha^2 + X_{L\alpha}^2} = \sqrt{20^2 + 15^2} = 25 \text{ Ом};$$

$$Z_\beta = R_\beta = 23,3 \text{ Ом};$$

$$Z_\gamma = X_{C\gamma} = 40 \text{ Ом}.$$

Діючі значення напруг на приймачах:

$$U_\alpha = Z_\alpha I = 25 \cdot 4 = 100 \text{ В};$$

$$U_\beta = Z_\beta I = 23,3 \cdot 4 = 93,2 \text{ В};$$

$$U_\gamma = Z_\gamma I = 40 \cdot 4 = 160 \text{ В}.$$

Кути зсуву фаз між векторами струму

$\underline{I}$ та напругами $\underline{U}_\alpha, \underline{U}_\beta, \underline{U}_\gamma$ приймачів:

$$\varphi_\alpha = \arctg \frac{X_{L\alpha}}{R_\alpha} = \arctg \frac{15}{20} = 36,87^\circ;$$

$$\varphi_\beta = \arctg \frac{0}{R_\beta} = \arctg \frac{0}{23,3} = 0^\circ;$$

$$\varphi_\gamma = \arctg \frac{-X_{C\gamma}}{0} = \arctg \frac{-40}{0} = -90^\circ.$$

На рис. 1.59 зображена векторна діаграма. Пояснюємо порядок її побудови. Для схеми за рис. 1.58 загальним є струм, для якого приймаємо довільно початкову фазу $\psi_i = 0^\circ$. Вибираємо масштаб струму і

проводимо вектор $\underline{I}$ по горизонтальній осі. Далі вибираємо масштаб напруг і проводимо вектор напруги джерела під кутом φ за рухом годинникової стрілки відносно вектора струму $\underline{I}$, а також вектори напруг на приймачах $\underline{U}_\alpha, \underline{U}_\beta, \underline{U}_\gamma$ під відповідними кутами зсуву фаз $\varphi_\alpha, \varphi_\beta, \varphi_\gamma$ відносно вектора $\underline{I}$.

Масштаб обираємо довільно. Певне значення струму в амперах або напруги в вольтах на 1 см. Треба обов'язково зображати мірний відрізок!

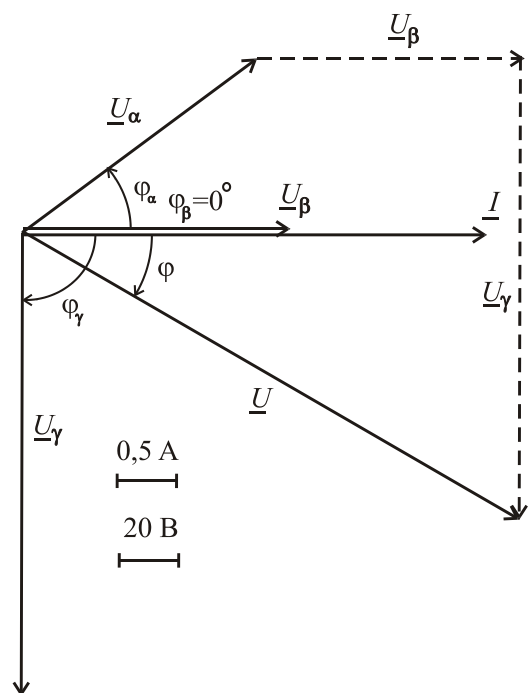


Рисунок 1.59

Користуючись векторною діаграмою, зробимо перевірку розв'язання на основі другого закону Кірхгофа для кола за рис. 1.58. Векторна сума напруг приймачів повинна дорівнювати вектору напруги джерела енергії, тобто $\underline{U} = \underline{U}_\alpha + \underline{U}_\beta + \underline{U}_\gamma$ (рис. 1.59), який за прийнятим масштабом повинен дорівнювати 200 В.

Повна, активна та реактивна потужності джерела енергії:

$$S_{\text{дж}} = U \cdot I = 200 \cdot 4 = 800 \text{ В} \cdot \text{А};$$

$$P_{\text{дж}} = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 200 \cdot 4 \cdot \cos(-30^\circ) = 692,8 \text{ Вт};$$

$$Q_{\text{дж}} = U \cdot I \cdot \sin \varphi = 200 \cdot 4 \cdot \sin(-30^\circ) = -400 \text{ вар}.$$

Рівняння балансу активних потужностей джерела та приймачів

$$P_{\text{дж}} = \sum P_{\text{сп}}$$

$$\sum P_{\text{сп}} = P_\alpha + P_\beta + P_\gamma = R_\alpha \cdot I_\alpha^2 + R_\beta \cdot I_\beta^2 + 0 = 20 \cdot 4^2 + 23,3 \cdot 4^2 = 692,8 \text{ Вт},$$

де $P_\alpha, P_\beta, P_\gamma$ – потужності, які споживають резистивні елементи приймачів.

Рівняння балансу реактивних потужностей:

$$Q_{\text{дж}} = \sum Q_{\text{сп}},$$

$$\sum Q_{\text{сп}} = Q_\alpha + Q_\beta + Q_\gamma = X_{L\alpha} \cdot I_\alpha^2 + 0 - X_{C\gamma} \cdot I_\gamma^2 = 15 \cdot 4^2 - 40 \cdot 4^2 = -400 \text{ вар},$$

де $Q_\alpha, Q_\beta, Q_\gamma$ – потужності, які виникають у реактивних елементах приймачів.

Амплітудні значення струму і напруги джерела енергії відповідно:

$$I_m = \sqrt{2} \cdot I = \sqrt{2} \cdot 4 = 5,66 \text{ А};$$

$$U_m = \sqrt{2} \cdot U = \sqrt{2} \cdot 200 = 282,8 \text{ В}.$$

Синусоїдні часові функції струму і напруги джерела енергії:

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i) = 5,66 \cdot \sin 314 t \text{ А};$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u) = 282,8 \sin(314 t - 30^\circ) \text{ В},$$

де початкова фаза струму вже обрана $\psi_i = 0^\circ$, що дає початкову фазу напруги $\psi_u = \varphi + \psi_i = -30^\circ + 0^\circ = -30^\circ$.

Графіки синусоїд струму і напруги зображаються при використанні не масштабу часу t , а кратного йому масштабу ωt , що більш зручно при побудові цих графіків. У табл. 1.6 наведені розрахунки струму і напруги для різних значень ωt , а на рис. 1.60 зображено графіки функцій $i(t)$ та $u(t)$.

Таблиця 1.6 – Миттєві значення струму і напруги джерела енергії залежно від часу

ωt , рад	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{6}$	π	$\frac{7\pi}{6}$	$\frac{4\pi}{3}$	$\frac{3\pi}{2}$	$\frac{5\pi}{3}$	$\frac{11\pi}{6}$	2π
ωt , град	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
i , А	0	2,83	4,9	5,66	4,9	2,83	0	-2,83	-4,9	-5,66	-4,9	-2,83	0
u , В	-141,4	0	141,4	245	283	245	141	0	-141,4	-245	-283	-245	-141

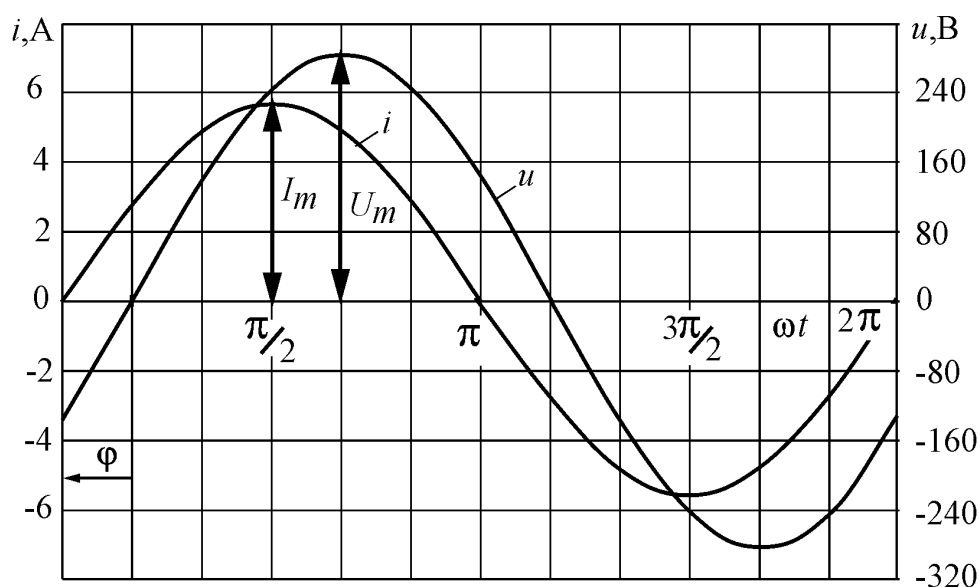


Рисунок 1.60 – Графіки струму та напруги в функції часу

Приклад 6. Розрахунок електричного кола змінного струму при паралельному з'єднанні приймачів.

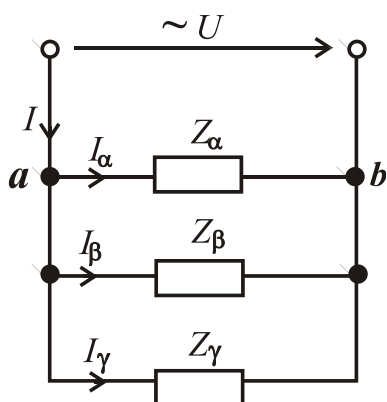


Рисунок 1.61

Розрахувати електричне коло при паралельному з'єднанні приймачів Z_α , Z_β і Z_γ , схему якого зображено на рис. 1.61. Діюче значення напруги $U = 220$ В, її частота $f = 50$ Гц. Параметри ідеальних елементів приймачів:
 $R_\alpha = 24$ Ом; $X_{C\alpha} = 32$ Ом; $R_\beta = 20$ Ом;
 $X_{L\beta} = 20$ Ом; $X_{L\gamma} = 80$ Ом.

Зобразити схему заміщення кола; визначити струми кола, а також активну, реактивну та повну потужності джерела енергії. Побудувати векторну діаграму. Записати рівняння балансу активних та реактивних потужностей кола і перевірити ці рівняння.

Розв'язання

На рис. 1.62 зображено схему заміщення кола за рис. 1.61 з ідеальними елементами.

Повні опори паралельних віток:

$$Z_{\alpha} = \sqrt{R_{\alpha}^2 + (-X_{C\alpha})^2} = \sqrt{24^2 + (-32)^2} = 40 \text{ Ом};$$

$$Z_{\beta} = \sqrt{R_{\beta}^2 + X_{L\beta}^2} = \sqrt{20^2 + 20^2} = 28,28 \text{ Ом};$$

$$Z_{\gamma} = X_{L\gamma} = 80 \text{ Ом}.$$

Діючі значення струмів у паралельних вітках:

$$I_{\alpha} = \frac{U}{Z_{\alpha}} = \frac{220}{40} = 5,5 \text{ А};$$

$$I_{\beta} = \frac{U}{Z_{\beta}} = \frac{220}{28,28} = 7,78 \text{ А};$$

$$I_{\gamma} = \frac{U}{Z_{\gamma}} = \frac{220}{80} = 2,75 \text{ А}.$$

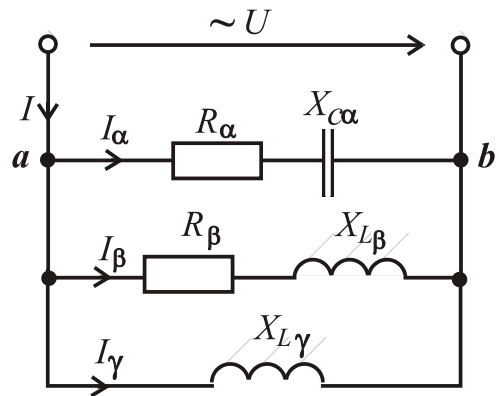


Рисунок 1.62

Кути зсуву фаз між векторами струмів $\underline{I}_{\alpha}$, $\underline{I}_{\beta}$ і $\underline{I}_{\gamma}$ та вектором напруги $\underline{U}$:

$$\varphi_{\alpha} = \arctg \frac{-X_{C\alpha}}{R_{\alpha}} = \arctg \frac{-32}{24} = -53,13^{\circ};$$

$$\varphi_{\beta} = \arctg \frac{X_{L\beta}}{R_{\beta}} = \arctg \frac{20}{20} = 45^{\circ};$$

$$\varphi_{\gamma} = 90^0 \text{ (індуктивний елемент).}$$

Для визначення струму джерела скористаємося векторною діаграмою (рис. 1.63), де вектори будуються в зазначених масштабах. Першим будуємо вектор напруги $\underline{U}$. Його початкову фазу приймаємо довільно ($\psi_u = 0^{\circ}$). Вектори струмів $\underline{I}_{\alpha}$, $\underline{I}_{\beta}$ і $\underline{I}_{\gamma}$ будуємо, користуючись початковими фазами. Тому що $\psi_u = 0^{\circ}$, початкові фази визначаємо за формулами:

$$\psi_{i_{\alpha}} = -\varphi_{\alpha} = 53,13^{\circ}; \quad \psi_{i_{\beta}} = -\varphi_{\beta} = -45^{\circ}; \quad \psi_{i_{\gamma}} = -\varphi_{\gamma} = -90^{\circ}.$$

За першим законом Кірхгофа для вузла a на рис. 3.15 вектор струму джерела є векторна сума струмів паралельних віток, тобто $\underline{I} = \underline{I}_{\alpha} + \underline{I}_{\beta} + \underline{I}_{\gamma}$ (рис. 1.63). Геометричне складання цих векторів дає на основі вимірів значення струму джерела $I \approx 9,7 \text{ А}$ і кут зсуву $\varphi \approx 24^{\circ}$.

Точніші результати можна одержати безпосередньо розрахунками, застосовуючи розкладання векторів струмів на активні й реактивні складові: перші – паралельні вектору $\underline{U}$, а другі – перпендикулярні до нього. Розклад векторів на складові подано на векторній діаграмі (рис. 1.63).

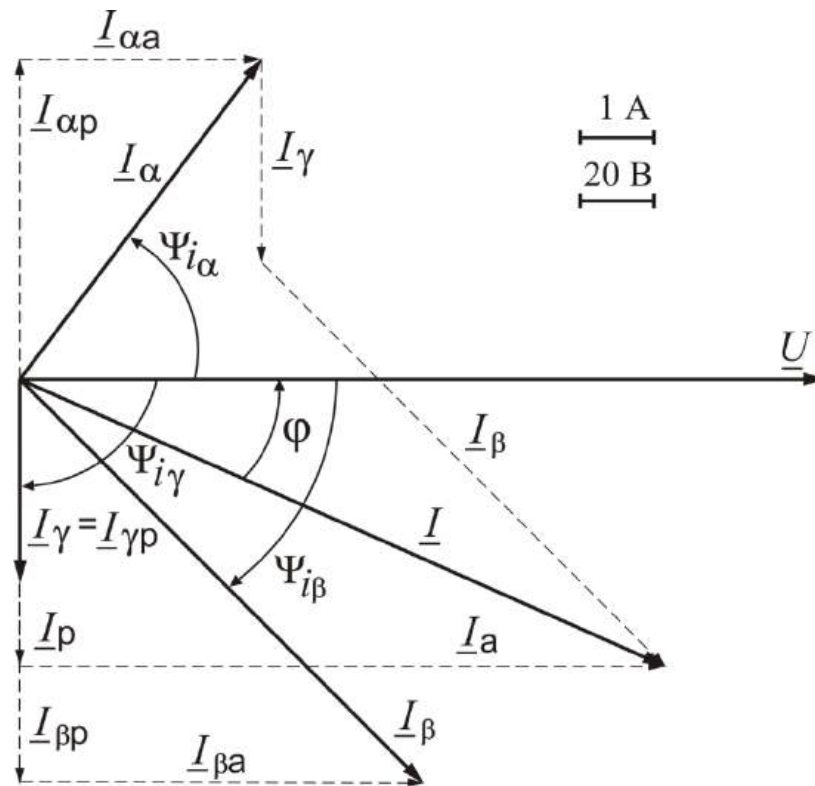


Рисунок 1.63

Активні та реактивні складові струмів приймачів:

$$I_{\alpha a} = I_{\alpha} \cos \psi_{i_{\alpha}} = 5,5 \cos 53,13^{\circ} = 3,3 \text{ A};$$

$$I_{\alpha p} = I_{\alpha} \sin \psi_{i_{\alpha}} = 5,5 \sin 53,13^{\circ} = 4,4 \text{ A};$$

$$I_{\beta a} = I_{\beta} \cos \psi_{i_{\beta}} = 7,78 \cos(-45^{\circ}) = 5,5 \text{ A};$$

$$I_{\beta p} = I_{\beta} \sin \psi_{i_{\beta}} = 7,78 \sin(-45^{\circ}) = -5,5 \text{ A};$$

$$I_{\gamma a} = I_{\gamma} \cos \psi_{i_{\gamma}} = 2,75 \cos(-90^{\circ}) = 0 \text{ A};$$

$$I_{\gamma p} = I_{\gamma} \sin \psi_{i_{\gamma}} = 2,75 \sin(-90^{\circ}) = -2,75 \text{ A}.$$

Активна та реактивна складові струму джерела та його діюче значення:

$$I_a = I_{\alpha a} + I_{\beta a} + I_{\gamma a} = 3,3 + 5,5 + 0 = 8,8 \text{ A};$$

$$I_p = I_{\alpha p} + I_{\beta p} + I_{\gamma p} = 4,4 - 5,5 - 2,75 = -3,85 \text{ A};$$

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{8,8^2 + (-3,85)^2} = 9,61 \text{ A}.$$

Кут фазового зсуву вектора струму $\underline{I}$ відносно вектора напруги $\underline{U}$

$$\varphi = -\psi_i = -\arctg \frac{I_p}{I_a} = -\arctg \frac{-3,85}{8,8} = 23,63^\circ.$$

Повна, активна та реактивна потужності джерела:

$$S = U \cdot I = 220 \cdot 9,61 = 2114,2 \text{ В} \cdot \text{А};$$

$$P = S \cos \varphi = 2114,2 \cdot \cos 23,63^\circ = 1936,9 \text{ Вт};$$

$$Q = S \sin \varphi = 2114,2 \cdot \sin 23,63^\circ = 847,4 \text{ вар}.$$

Відповідно до балансу активних та реактивних потужностей:

$$P = R_\alpha I_\alpha^2 + R_\beta I_\beta^2 = 24 \cdot 5,5^2 + 20 \cdot 7,78^2 = 1936,6 \text{ Вт};$$

$$Q = -X_{C\alpha} I_\alpha^2 + X_{L\beta} I_\beta^2 + X_{L\gamma} I_\gamma^2 = -32 \cdot 5,5^2 + 20 \cdot 7,78^2 + 80 \cdot 2,75^2 = 847,6 \text{ вар}.$$

Приклад 7. Розрахунок електричного кола змінного струму при змішаному з'єднанні приймачів.

Розрахувати електричне коло за рис. 1.64 при змішаному з'єднанні приймачів Z_α , Z_β і Z_γ символічним методом, тобто з використанням

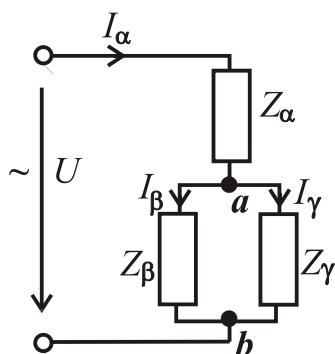


Рисунок 1.64

комплексних чисел. Напруга джерела енергії $U=127 \text{ В}$, її частота $f = 50 \text{ Гц}$. Параметри ідеальних елементів приймачів: $R_\alpha = 8 \text{ Ом}$; $X_{L\alpha} = 15 \text{ Ом}$; $R_\beta = 16 \text{ Ом}$; $X_{C\beta} = 12 \text{ Ом}$; $X_{L\gamma} = 42 \text{ Ом}$.

Зобразити схему заміщення кола з ідеальними елементами; визначити струми кола, напруги на приймачах, а також потужності джерела енергії.

Побудувати векторну діаграму. Записати рівняння

балансу активних та реактивних потужностей кола і перевірити ці рівняння.

Розв'язання

Схему заміщення кола за рис. 1.64 з ідеальними елементами зображено на рис. 1.65. Струми і напруги, а також потужності будемо визначати символічним методом, тому ідеальні елементи, які з'єднані послідовно, об'єднуємо в повні комплексні опори. Від початкової схеми за рис. 1.65 переходимо до схеми з комплексними опорами віток (рис. 1.66, а), де струми і напруга також зображені в комплексній формі.

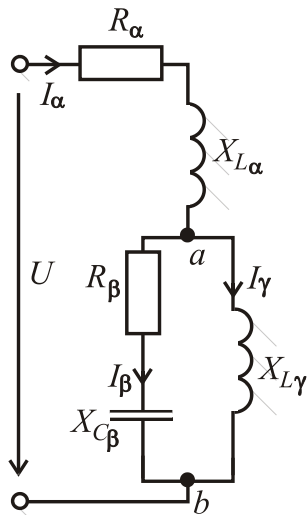


Рисунок 1.65

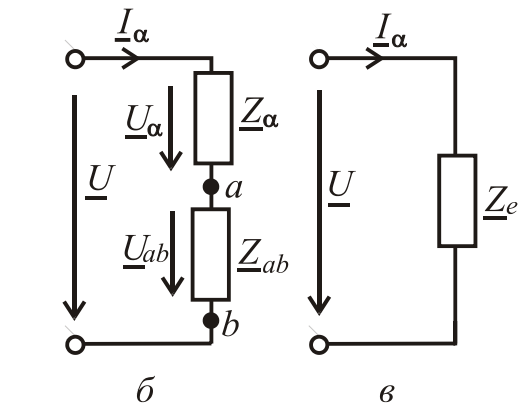
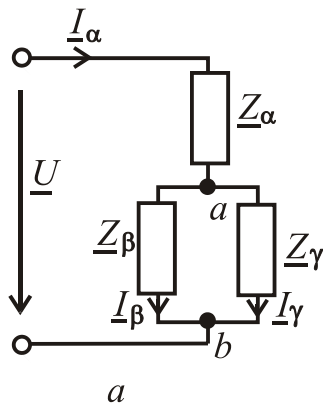


Рисунок 1.66

Значення комплексних опорів віток в алгебраїчній та показовій формах:

$$\underline{Z}_\alpha = R_\alpha + jX_{L\alpha} = 8 + j15 = \sqrt{8^2 + 15^2} \cdot e^{j \arctg \frac{15}{8}} = 17 \cdot e^{j61,93^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_\beta = R_\beta - jX_{C\beta} = \sqrt{16^2 + (-12)^2} \cdot e^{j \arctg \frac{-12}{16}} = 20 \cdot e^{-j36,87^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_\gamma = jX_{L\gamma} = j42 = 42 \cdot e^{j \arctg \frac{42}{0}} = 42 \cdot e^{j90^\circ} \text{ Ом};$$

Ділянку кола з паралельним з'єднанням $\underline{Z}_\beta$ і $\underline{Z}_\gamma$ заміняємо еквівалентним комплексним опором $\underline{Z}_{ab}$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{ab} &= \frac{\underline{Z}_\beta \cdot \underline{Z}_\gamma}{\underline{Z}_\beta + \underline{Z}_\gamma} = \frac{20 \cdot e^{-j36,87^\circ} \cdot 42 \cdot e^{j90^\circ}}{16 - j12 + j42} = \frac{840 \cdot e^{j53,13^\circ}}{16 + j30} = \frac{840 \cdot e^{j53,13^\circ}}{\sqrt{16^2 + 30^2} e^{j \arctg \frac{30}{16}}} = \\ &= \frac{840 \cdot e^{j53,13^\circ}}{34 \cdot e^{j61,93^\circ}} = 24,71 \cdot e^{-j8,8^\circ} = 24,71 [\cos(-8,8^\circ) + j \sin(-8,8^\circ)] = 24,42 - j3,78 \text{ Ом} \end{aligned}$$

і одержуємо більш просту схему за рис. 1.66, б.

Два послідовно з'єднаних опори $\underline{Z}_\alpha$ і $\underline{Z}_{ab}$ за рис. 1.66, б заміняємо одним, який є еквівалентним опором усього кола (рис. 1.66, в):

$$\begin{aligned} \underline{Z}_e &= \underline{Z}_\alpha + \underline{Z}_{ab} = 8 + j15 + 24,42 - j3,78 = 32,42 + j11,22 = \\ &= \sqrt{32,42^2 + 11,22^2} \cdot e^{j \arctg \frac{11,22}{32,42}} = 34,3 \cdot e^{j19,09^\circ} \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Комплексне значення напруги джерела $\underline{U} = U \cdot e^{j\psi_u} = 127 \cdot e^{j0^\circ} = 127 \text{ В}$, якщо початкову фазу цієї напруги прийняти $\psi_u = 0^\circ$.

Комплексне значення струму джерела за законом Ома (рис. 1.66, *в*)

$$\underline{I}_\alpha = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_e} = \frac{127}{34,3e^{j19,09^\circ}} = 3,7 \cdot e^{-j19,09^\circ} = 3,5 - j1,21 \text{ A.}$$

Комплекс напруги на приймачеві $\underline{Z}_\alpha$ (рис. 1.66, *б*)

$$\underline{U}_\alpha = \underline{Z}_\alpha \cdot \underline{I}_\alpha = 17 \cdot e^{j61,93^\circ} \cdot 3,7 \cdot e^{-j19,09^\circ} = 62,9 \cdot e^{j42,84^\circ} = 46,1 + j42,8 \text{ В.}$$

Напруга між вузлами *a* і *b* на прийमाках $\underline{Z}_\beta$ і $\underline{Z}_\gamma$ (рис. 3.19, *а*)

$$\underline{U}_{ab} = \underline{Z}_{ab} \cdot \underline{I}_\alpha = 24,71 \cdot e^{-j8,8^\circ} \cdot 3,7 \cdot e^{-j19,09^\circ} = 91,4 \cdot e^{-j27,89^\circ} = 80,8 - j42,8 \text{ В.}$$

Струми в паралельних вітках (рис. 1.66, *а*):

$$\underline{I}_\beta = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_\beta} = \frac{91,4 \cdot e^{-j27,89^\circ}}{20 \cdot e^{-j36,87^\circ}} = 4,57 \cdot e^{j8,98^\circ} = 4,51 + j0,71 \text{ A;}$$

$$\underline{I}_\gamma = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_\gamma} = \frac{91,4 \cdot e^{-j27,89^\circ}}{42 \cdot e^{j90^\circ}} = 2,18 \cdot e^{-j117,89^\circ} = -1,02 - j1,93 \text{ A.}$$

Перевірка струмів за першим законом Кірхгофа для вузла *a* (рис. 1.66, *а*)

$$\underline{I}_\alpha = \underline{I}_\beta + \underline{I}_\gamma = 4,51 + j0,71 - 1,02 - j1,93 = 3,49 - j1,22 \approx 3,5 - j1,21 \text{ A.}$$

Перевірка напруг за другим законом Кірхгофа (рис. 1.66, *а*)

$$\underline{U} = \underline{U}_\alpha + \underline{U}_{ab} = 46,1 + j42,8 + 80,8 - j42,8 = 126,9 \approx 127 \text{ В.}$$

Невелика різниця в значеннях обумовлена округленням при розрахунках.

Співвідношення напруг $\underline{U} = \underline{U}_\alpha + \underline{U}_{ab}$ і струмів $\underline{I}_\alpha = \underline{I}_\beta + \underline{I}_\gamma$ зображено на рис. 1.67 за допомогою векторної діаграми в зазначених масштабах.

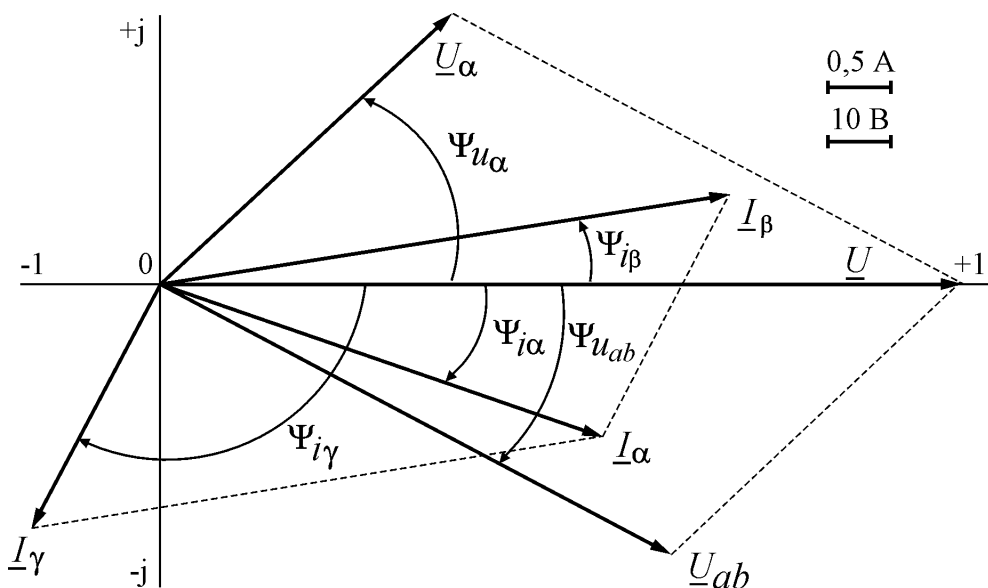


Рисунок 1.67

Побудова векторної діаграми виконується за діючими значеннями струмів і напруг та їх початковими фазами. Діючі значення напруги і струму визначаються як модуль у показовій формі комплексного числа, яке визначає струм або напругу.

Діючі значення струмів і напруг та їхні початкові фази: $I_\alpha = 3,7 \text{ A}$; $\psi_{i\alpha} = -19,09^\circ$; $I_\beta = 4,57 \text{ A}$; $\psi_{i\beta} = 8,98^\circ$; $I_\gamma = 2,18 \text{ A}$; $\psi_{i\gamma} = -117,89^\circ$; $U_\alpha = 62,9 \text{ В}$; $\psi_{u\alpha} = 42,84^\circ$; $U_{ab} = 91,4 \text{ В}$; $\psi_{ab} = -27,89^\circ$; $U = 127 \text{ В}$; $\psi_u = 0^\circ$.

Векторна діаграма може також бути побудована за дійсними та уявними складовими комплексних діючих значень струмів та напруг:

$$\underline{I}_\alpha = 3,5 - j1,21 \text{ A}; \underline{I}_\beta = 4,51 + j0,71 \text{ A}; \underline{I}_\gamma = -1,02 - j1,93 \text{ A};$$

$$\underline{U}_\alpha = 46,1 + j42,8 \text{ В}; \underline{U}_{ab} = 80,8 - j42,8 \text{ В}; \underline{U} = 127 \text{ В},$$

де дійсні значення величин:

$$I'_\alpha = 3,5 \text{ A}; I'_\beta = 4,51 \text{ A}; I'_\gamma = -1,02 \text{ A}; U'_\alpha = 46,1 \text{ В}; U'_{ab} = 80,8 \text{ В}; U' = 127 \text{ В};$$

уявні значення величин:

$$I''_\alpha = -1,21 \text{ A}; I''_\beta = 0,71 \text{ A}; I''_\gamma = -1,93 \text{ A}; U''_\alpha = 42,8 \text{ В}; U''_{ab} = -42,8 \text{ В}; U'' = 0 \text{ В}.$$

Комплексна потужність джерела енергії $\underline{S}_{\text{дж}} = \underline{U} \cdot \underline{I}_\alpha^* = P_{\text{дж}} + jQ_{\text{дж}}$ визначається як добуток комплексів напруги і спряженого струму джерела енергії, які визначаються в показовій (або в алгебраїчній) формі.

Спряжений комплекс струму $\underline{I}_\alpha^* = \underline{I}_\alpha \cdot e^{-j\psi_{i\alpha}}$ визначається з вихідного $\underline{I}_\alpha = \underline{I}_\alpha \cdot e^{j\psi_{i\alpha}}$ зміною знака у показнику (або перед уявній частиною, якщо використовується алгебраїчна форма комплексного числа).

Підставимо комплекси напруги і спряженого комплексу струму джерела і проведемо перетворення:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{\text{дж}} &= \underline{U} \cdot \underline{I}_\alpha^* = 127 \cdot 3,7 \cdot e^{j19,09^\circ} = 469,9 \cdot e^{j19,09^\circ} = \\ &= 469,9 \cdot (\cos 19,09^\circ + j \sin 19,09^\circ) = 444,1 + j153,7 \text{ В} \cdot \text{А}, \end{aligned}$$

де повна потужність $S_{\text{дж}} = 469,9 \text{ В} \cdot \text{А}$ є модуль у показовій формі комплексної потужності, а потужності: активна $P_{\text{дж}} = 444,1 \text{ Вт}$ і реактивна $Q_{\text{дж}} = 153,7 \text{ вар}$, як дійсна і уявна складові з алгебраїчної форми комплексного числа.

Аналогічно визначаються потужності приймачів:

$$\underline{S}_\alpha = \underline{U}_\alpha \cdot \underline{I}_\alpha^* = 62,9 \cdot e^{j42,84^\circ} \cdot 3,7 \cdot e^{j19,09^\circ} = 232,7 \cdot e^{j61,93^\circ} = 109,5 + j205,3 \text{ В} \cdot \text{А};$$

$$\underline{S}_\beta = \underline{U}_{ab} \cdot \underline{I}_\beta^* = 91,4 \cdot e^{-j27,89^\circ} \cdot 4,57 \cdot e^{-j8,98^\circ} = 417,7 \cdot e^{-j36,87^\circ} = 334,2 - j250,6 \text{ В} \cdot \text{А};$$

$$\underline{S}_\gamma = \underline{U}_{ab} \cdot \underline{I}_\gamma^* = 91,4 \cdot e^{-j27,89^\circ} \cdot 2,18 \cdot e^{j117,89^\circ} = 199,3 \cdot e^{j90^\circ} = j199,3 \text{ В} \cdot \text{А},$$

де $\underline{I}_\alpha^*, \underline{I}_\beta^*, \underline{I}_\gamma^*$ – спряжені струми приймачів;

активні потужності приймачів: $P_\alpha = 109,5 \text{ Вт}$; $P_\beta = 334,2 \text{ Вт}$; $P_\gamma = 0$;

реактивні потужності приймачів: $Q_\alpha = 205,3 \text{ вар}$; $Q_\beta = -250,6 \text{ вар}$;

$$Q_\gamma = 199,3 \text{ вар}.$$

Рівняння балансу активних потужностей:

$$P_{\text{дж}} = P_\alpha + P_\beta + P_\gamma = 109,5 + 334,2 + 0 = 443,7 \text{ Вт} \approx 444,1 \text{ Вт}.$$

Рівняння балансу реактивних потужностей:

$$Q_{\text{дж}} = Q_\alpha + Q_\beta + Q_\gamma = 205,3 - 250,6 + 199,3 = 154 \text{ вар} \approx 153,7 \text{ вар}.$$

Приклад 8. Розрахунок трифазного кола при симетричному навантаженні та з'єднанні приймачів “зіркою”.

У трифазну мережу з лінійною напругою $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ та частотою $f = 50 \text{ Гц}$ увімкнено симетричне навантаження (рис. 1.68), яке з'єднується “зіркою”. Навантаження складається з двох послідовно з'єднаних приймачів Z_α, Z_β у кожній фазі з параметрами: $R_\alpha = 16 \text{ Ом}$; $X_{L\alpha} = 30 \text{ Ом}$; $R_\beta = 22,1 \text{ Ом}$; $X_{C\beta} = 8 \text{ Ом}$.

Зобразити схему заміщення трифазного кола з ідеальними елементами приймачів. Визначити фазні і лінійні струми, а також активну та реактивну потужності електричного кола.

Побудувати векторну діаграму.

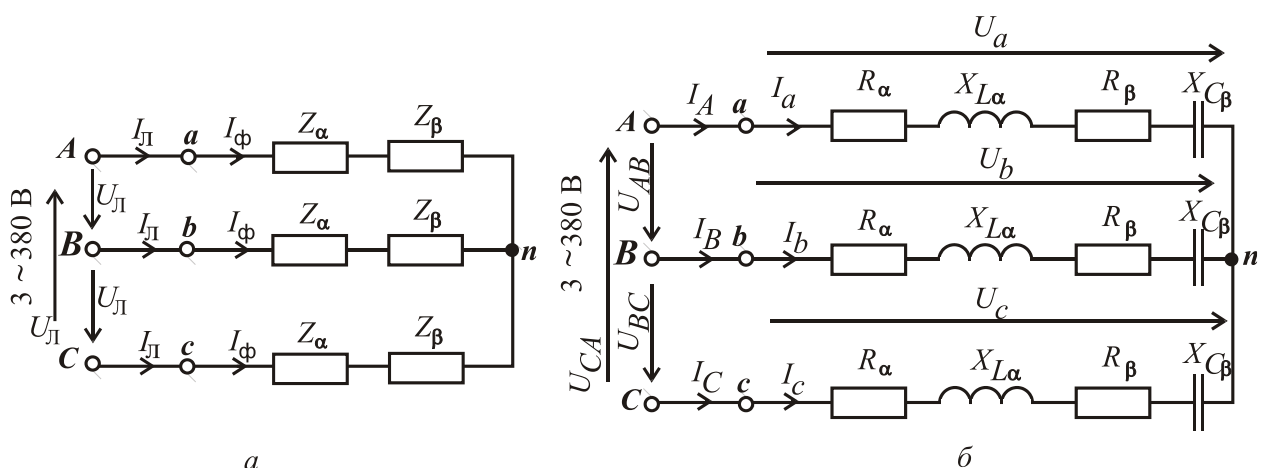


Рисунок 1.68

Розв'язання

На рис. 1.68, б зображена схема заміщення трифазного кола при з'єднанні навантаження “зіркою”.

Діюче значення фазної напруги у мережі

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В.}$$

При симетричному навантаженні фазні напруги на приймачах $U_{\text{фс}}$ дорівнюють фазним напругам мережі U_{ϕ} , тобто

$$U_{\text{фс}} = U_a = U_b = U_c = U_{\phi} = 220 \text{ В.}$$

Повний опір кожної фази

$$Z_{\phi} = \sqrt{(R_{\alpha} + R_{\beta})^2 + (X_{L\alpha} - X_{C\beta})^2} = \sqrt{(16 + 22,1)^2 + (30 - 8)^2} = 44 \text{ Ом.}$$

Фазовий зсув між фазними напругою і струмом у кожній фазі

$$\varphi = \arctg \frac{X_{L\alpha} - X_{C\beta}}{R_{\alpha} + R_{\beta}} = \arctg \frac{30 - 8}{16 + 22,1} = 30^{\circ}.$$

Діюче значення фазних та лінійних струмів:

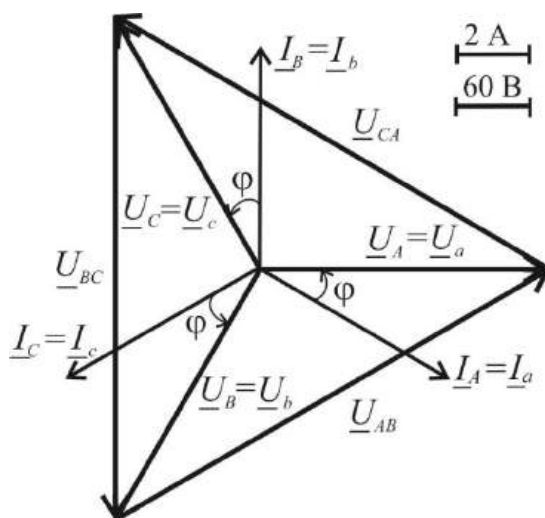
$$I_{\phi} = I_{\text{л}} = I_a = I_b = I_c = I_A = I_B = I_C = \frac{U_{\text{фс}}}{Z_{\phi}} = \frac{220}{44} = 5 \text{ А.}$$

Активна та реактивна потужності всього кола:

$$P_Y = 3P_{\phi} = 3 U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi = 3 \cdot 220 \cdot 5 \cdot \cos 30^{\circ} = 2858 \text{ Вт;}$$

$$Q_Y = 3Q_{\phi} = 3 U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi = 3 \cdot 220 \cdot 5 \cdot \sin 30^{\circ} = 1650 \text{ вар.}$$

Векторна діаграма будується таким чином. Визначаємо масштаби



струмів та напруг, які показано на рис. 1.69. Вибираємо довільно початкову фазу вектора напруги $\Psi_{U_A} = 0^{\circ}$ і по горизонтальній осі проводимо цей вектор. Вектори фазних напруг приймачів $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$, як і вектори фазних напруг мережі $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$, створюють трифазну симетричну систему, тобто мають однакові діючі

Рисунок 1.69

значення і зсунуті за фазою одна відносно одної на кут 120° . Вектор напруги $\underline{U}_B$ відстає від вектора $\underline{U}_A$ на кут 120° , тому він повертається на цей кут за рухом годинникової стрілки, а вектор напруги $\underline{U}_C$ випереджає вектор $\underline{U}_A$ на кут 120° , тому він повертається на цей кут проти руху годинникової стрілки.

Вектори лінійних напруг $\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$ будемо з використанням другого закону Кірхгофа за формулами:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B; \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C; \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A,$$

тобто з'єднаємо кінці векторів напруг $\underline{U}_A, \underline{U}_B, \underline{U}_C$ між собою і одержимо вектори лінійних напруг, як це зображено на рис. 1.69.

Кожний фазний струм відстає від своєї фазної напруги на кут $\varphi = 30^\circ$, тому він повертається за рухом годинникової стрілки на цей кут відносно своєї фазної напруги.

Приклад 9. Розрахунок трифазного кола при симетричному навантаженні та з'єднанні приймачів “трикутником”.

У трифазну мережу з лінійною напругою $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ та частотою $f = 50 \text{ Гц}$ увімкнено симетричне навантаження (рис. 1.70), яке з'єднується “трикутником”. Навантаження складається з двох послідовно з'єднаних приймачів Z_α, Z_γ у кожній фазі з параметрами $R_\alpha = 20 \text{ Ом}$; $R_\gamma = 10 \text{ Ом}$; $X_{C\gamma} = 30 \text{ Ом}$. Зобразити схему заміщення трифазного кола з ідеальними елементами приймачів. Визначити фазні і лінійні струми, а також активну та реактивну потужності електричного кола. Побудувати векторну діаграму.

Розв'язання

На рис. 1.70, б зображена схема заміщення трифазного кола при з'єднанні навантаження “трикутником”.

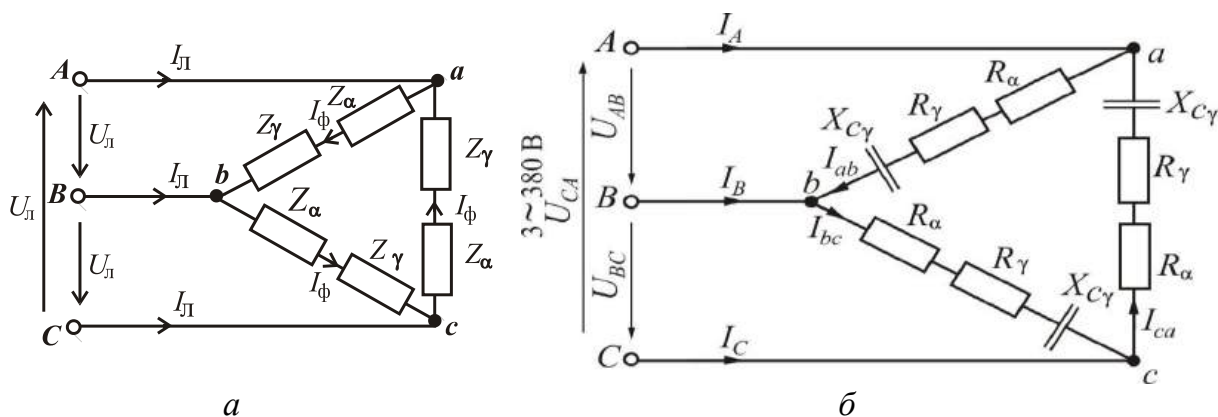


Рисунок 1.70

Повний опір кожної фази

$$Z_{\phi} = \sqrt{(R_{\alpha} + R_{\gamma})^2 + (-X_{C\gamma})^2} = \sqrt{(20 + 10)^2 + (-30)^2} = 42,43 \text{ Ом};$$

Фазовий зсув між фазними напругою і струмом у кожній фазі

$$\varphi = \arctg \frac{-X_{C\gamma}}{R_{\alpha} + R_{\gamma}} = \arctg \frac{-30}{20 + 10} = -45^{\circ}.$$

При з'єднанні приймачів у “трикутник” фазні напруги на них U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} співпадають з відповідними лінійними напругами мережі U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} , тому фазні напруги приймачів $U_{\phi c} = U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$.

Діючі значення фазних струмів:

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi c}}{Z_{\phi}} = I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = \frac{380}{42,43} = 8,96 \text{ А}.$$

Відповідно діюче значення лінійних струмів:

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\phi} = I_A = I_B = I_C = \sqrt{3} \cdot 8,96 = 15,52 \text{ А}.$$

Активна та реактивна потужності усього кола:

$$P_{\Delta} = 3P_{\phi} = 3 \cdot U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi = 3 \cdot 380 \cdot 8,96 \cdot \cos(-45)^{\circ} = 7222 \text{ Вт};$$

$$Q_{\Delta} = 3Q_{\phi} = 3 \cdot U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi = 3 \cdot 380 \cdot 8,96 \cdot \sin(-45)^{\circ} = -7222 \text{ вар}.$$

Векторна діаграма, яка зображена на рис. 1.71, будується таким чином.

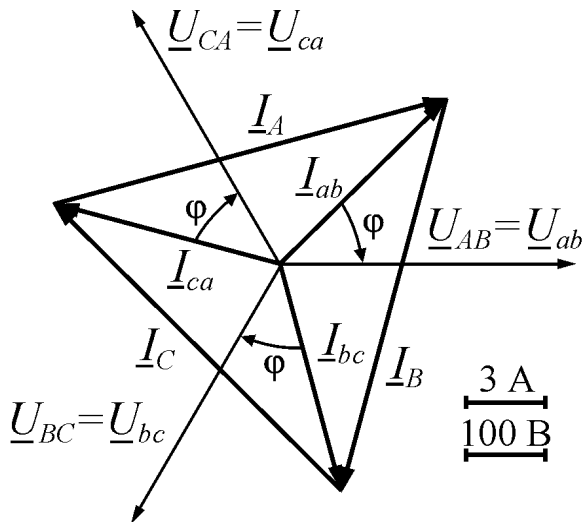


Рисунок 1.71

Визначаємо масштаби струмів та напруг, які показано на рис. 1.71. Вибираємо довільно початкову фазу вектора напруги $\underline{U}_{AB}$ $\Psi_{U_{AB}} = 0^{\circ}$ і по горизонтальній осі проводимо цей вектор. Вектори лінійних напруг $\underline{U}_{AB}, \underline{U}_{BC}, \underline{U}_{CA}$ (які також є фазними напругами на приймачах $\underline{U}_{ab}, \underline{U}_{bc}, \underline{U}_{ca}$) створюють трифазну симетричну систему, тобто вони мають однакові діючі значення і зсунуті за фазою одна відносно одної на кут 120° .

Вектор напруги $\underline{U}_{BC}$ відстає від вектора $\underline{U}_{AB}$ на кут 120° , тому він повертається на цей кут за рухом годинникової стрілки, а вектор напруги $\underline{U}_{CA}$ випереджає вектор $\underline{U}_{AB}$ на кут 120° , тому він повертається на цей кут

проти руху годинникової стрілки.

Кожний вектор фазного струму $\underline{I}_{ab}, \underline{I}_{bc}, \underline{I}_{ca}$ випереджає свій фазний вектор напруги на кут $\varphi = -45^\circ$, тому він повертається проти руху годинникової стрілки на цей кут відносно фазної напруги.

Вектори лінійних струмів $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$ будуюмо з використанням першого закону Кірхгофа за формулами:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc},$$

тобто з'єднаємо кінці векторів струмів $\underline{I}_{ab}, \underline{I}_{bc}, \underline{I}_{ca}$ між собою і одержимо вектори лінійних струмів, як це зображено на рис. 1.71.

Приклад 10. Розрахунок трифазного кола із нейтральним проводом при несиметричному навантаженні та з'єднанні приймачів “зіркою”.

У трифазну мережу з лінійною напругою $U_{\text{л}} = 380$ В при частоті $f = 50$ Гц увімкнено несиметричне навантаження приймачів Z_α, Z_β і Z_γ (по одному приймачу в кожен фазу) зіркою із нейтральним проводом (рис.1.27). Параметри приймачів: $R_\alpha = 12$ Ом, $X_{L\alpha} = 16$ Ом, $R_\beta = 32$ Ом, $X_{C\beta} = 24$ Ом, $X_{L\gamma} = 20$ Ом.

Зобразити електричну схему трифазного кола з ідеальними елементами замість приймачів. Визначити фазні і лінійні струми, а також струм у нейтральному проводі. Визначити активну та реактивну потужності електричного кола. Побудувати векторну діаграму.

Розв'язання

На рис. 1.72 зображена електрична схема трифазного кола.

Фазні напруги мережі:

$$U_\phi = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = U_A = U_B = U_C = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В.}$$

За наявності нейтрального проводу фазні напруги мережі дорівнюють фазним напругам на прийमाх:

$$U_A = U_a; \quad U_B = U_b; \quad U_C = U_c. \quad U_a = U_b = U_c = U_\phi = 220 \text{ В.}$$

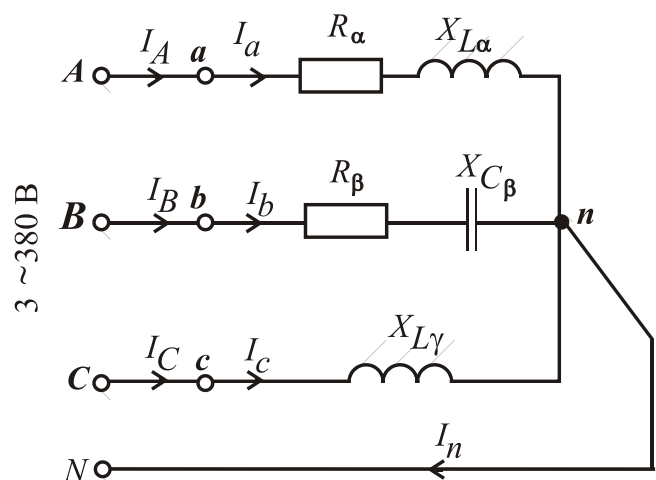


Рисунок 1.72

Повні опори і кути зсуву фаз навантаження:

$$Z_{\alpha} = \sqrt{R_{\alpha}^2 + X_{L\alpha}^2} = \sqrt{12^2 + 16^2} = 20 \text{ Ом};$$

$$Z_{\beta} = \sqrt{R_{\beta}^2 + (-X_{C\beta})^2} = \sqrt{32^2 + (-24)^2} = 40 \text{ Ом};$$

$$Z_{\gamma} = X_{L\gamma} = 20 \text{ Ом};$$

$$\varphi_{\alpha} = \arctg \frac{X_{L\alpha}}{R_{\alpha}} = \arctg \frac{16}{12} = \arctg 1,33 = 53,13^{\circ};$$

$$\varphi_{\beta} = \arctg \frac{-X_{C\beta}}{R_{\beta}} = \arctg \frac{-24}{32} = \arctg(-0,75) = -36,87^{\circ};$$

$$\varphi_{\gamma} = 90^{\circ}.$$

Діючі значення фазних струмів, які дорівнюють лінійним:

$$I_a = I_A = \frac{U_a}{Z_{\alpha}} = \frac{220}{20} = 11 \text{ А};$$

$$I_b = I_B = \frac{U_b}{Z_{\beta}} = \frac{220}{40} = 5,5 \text{ А};$$

$$I_c = I_C = \frac{U_c}{Z_{\gamma}} = \frac{220}{20} = 11 \text{ А}.$$

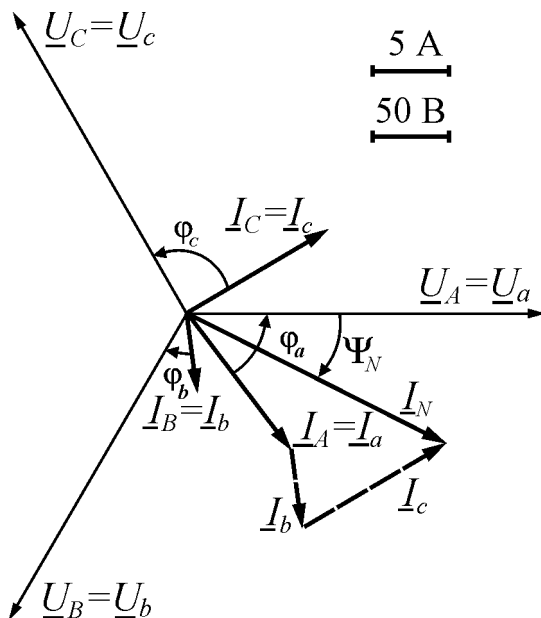


Рисунок 1.73

Побудуємо векторну діаграму (рис. 1.73). Приймаємо початкову фазу напруги для фази A $\psi_{U_A} = 0^{\circ}$. Визначаємо діюче значення струму в нейтральному проводі ($I_N = I_a + I_b + I_c$) прямим вимірюванням довжини вектора I_N і множенням її на масштаб струму ($I_N = 19 \text{ А}$). Початкова фаза струму нейтрального проводу, яка визначена за допомогою транспортира, дорівнює $\psi_{i_N} = -27,5^{\circ}$.

Можна аналітично перевірити здобуті результати за допомогою символічного методу. Фазні синусоїдні напруги утворюють трифазну симетричну систему:

$$\underline{U}_A = \underline{U}_a = 220 \text{ В}; \quad \underline{U}_B = \underline{U}_b = 220 e^{-j120^{\circ}} \text{ В}; \quad \underline{U}_C = \underline{U}_c = 220 e^{j120^{\circ}} \text{ В}.$$

Комплексні повні опори фаз приймачів:

$$\underline{Z}_\alpha = Z_\alpha e^{j\varphi_\alpha} = 20e^{j53,13^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_\beta = Z_\beta e^{j\varphi_\beta} = 40e^{-j36,87^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_\gamma = Z_\gamma e^{j\varphi_\gamma} = 20e^{j90^\circ} \text{ Ом}.$$

Комплексні значення лінійних і фазних струмів:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_\alpha} = \frac{220}{20e^{j53,13^\circ}} = 11e^{-j53,13^\circ} = 6,6 - j8,8 \text{ А};$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_\beta} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{40e^{-j36,87^\circ}} = 5,5e^{-j83,13^\circ} = 0,66 - j5,46 \text{ А};$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_\gamma} = \frac{220e^{j120^\circ}}{20e^{j90^\circ}} = 11e^{j30^\circ} = 9,53 + j5,5 \text{ А},$$

де діючі значення фазних струмів, які дорівнюють лінійним,

$$I_a = I_A = 11 \text{ А}; \quad I_b = I_B = 5,5; \quad I_c = I_C = 11 \text{ А};$$

початкові фази струмів:

$$\psi_{i_a} = -53,13^\circ; \quad \psi_{i_b} = -83,13^\circ; \quad \psi_{i_c} = 30^\circ.$$

Комплексне значення струму в нейтральному проводі

$$\begin{aligned} \underline{I}_N = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c &= 6,6 - j8,8 + 0,66 - j5,46 + 9,53 + j5,5 = 16,79 - j8,76 = \\ &= 18,94 e^{-j27,55^\circ} \text{ А}, \end{aligned} \quad (*)$$

де діюче значення струму у нейтральному проводі $I_N = 18,94 \text{ А}$, а його аргумент або початкова фаза $\psi_{i_N} = -27,55^\circ$.

Увага! Якщо вектор струму в нейтральному проводі належить до другого квадранту комплексної площини (тобто дійсна частина комплексного числа негативна та уявна частина позитивна), то до розрахованого за формулою (*) аргументу (початкової фази) треба додавати 180 градусів, а якщо він належить до третього квадранту (тобто дійсна та уявна частини негативні), то треба від аргументу віднімати 180 градусів.

Активна та реактивна потужності всього кола:

$$\begin{aligned} P &= P_\alpha + P_\beta + P_\gamma = U_a I_a \cos \varphi_\alpha + U_b I_b \cos \varphi_\beta + U_c I_c \cos \varphi_\gamma = \\ &= 220 \cdot 11 \cdot \cos 53,13^\circ + 220 \cdot 5,5 \cdot \cos(-36,87^\circ) + 220 \cdot 11 \cdot \cos 90^\circ = 2420 \text{ Вт}; \\ Q &= Q_\alpha + Q_\beta + Q_\gamma = U_a I_a \sin \varphi_\alpha + U_b I_b \sin \varphi_\beta + U_c I_c \sin \varphi_\gamma = \\ &= 220 \cdot 11 \cdot \sin 53,13^\circ + 220 \cdot 5,5 \cdot \sin(-36,87^\circ) + 220 \cdot 11 \cdot \sin 90^\circ = 3630 \text{ вар}. \end{aligned}$$

Питання для самоконтролю

1. Якими параметрами характеризуються миттєві значення синусоїдного струму, напруги, ЕРС?
2. Сформулюйте і запишіть закони Ома і Кірхгофа для кіл змінного струму.
3. Які ідеальні елементи застосовують у схемах заміщення електричних кіл синусоїдного струму?
4. Запишіть формули для індуктивного, ємнісного опорів та повного опору.
5. Якими потужностями характеризуються енергетичні процеси в електричних колах змінного струму; як визначають ці потужності і як вони пов'язані між собою?
6. Які умови виникнення резонансу напруг та резонансу струмів і які співвідношення основних електричних величин у цих режимах?
7. Які математичні основи та сутність символічного методу розрахунку електричних кіл синусоїдного змінного струму?
8. В яких формах можна подавати комплексні значення струмів, напруг, ЕРС і опорів і як переходити від однієї форми до другої при розрахунках?
9. Запишіть рівняння балансу активних і реактивних потужностей електричного кола.
10. Як вимірюється активна потужність в електричному колі?
11. Як отримують трифазну симетричну систему ЕРС?
12. Як можуть бути з'єднані приймачі у трифазній мережі?
13. Які струми і напруги називаються лінійними та фазними?
14. Які співвідношення між лінійними і фазними струмами при з'єднанні приймачів "зіркою" та "трикутником"?
15. Які співвідношення між лінійними і фазними напругами при з'єднанні приймачів "зіркою" та "трикутником"?
16. Яке призначення нейтрального проводу в чотирипровідній мережі? Що буде, коли він обірветься при симетричному і несиметричному навантаженні?
17. Запишіть формули визначення активної, реактивної та повної потужностей трифазного кола.
18. Як вимірюється активна потужність у трифазному колі?
19. Що таке напруга зміщення нейтралі та в яких випадках вона виникає, та як розраховується?
20. Як впливає перемикання приймачів із з'єднання "зіркою" на з'єднання "трикутником" на струми та потужність кола?

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНОК МАГНІТНИХ КІЛ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ

2.1. Формулювання задач

Задача 1. Котушка зі сталевим осердям (однорідне магнітне коло)

На рис. 2.1 показані варіанти магнітних систем у вигляді котушки зі сталевим осердям, що утворюють магнітне коло. У табл. 2.1 для різних варіантів задані: розміри осердя a, b, c, D, d, d_s ; число витків обмотки котушки w ; коефіцієнт заповнення шихтованого осердя сталлю k_s ; марка сталі (криві намагнічування показані на рис. 2.).

Для заданого варіанта магнітної системи треба визначити величину магнітного потоку Φ в осерді при заданому постійному струмі в обмотці I .

Розсіянням магнітного потоку котушки знехтувати, тобто коефіцієнт розсіяння магнітного потоку $k_{\text{роз}} = 1$.

Задача 2. Котушка зі сталевим осердям (неоднорідне магнітне коло)

На рис. 2.2 показані варіанти магнітних систем у вигляді котушки зі сталевим осердям, що утворюють неоднорідне магнітне коло. У табл. 2.2 подані їхні геометричні розміри і кількість витків котушки – w , а також k_s – коефіцієнт заповнення осердя сталлю; $k_{\text{роз}}$ – коефіцієнт розсіяння магнітного потоку, що

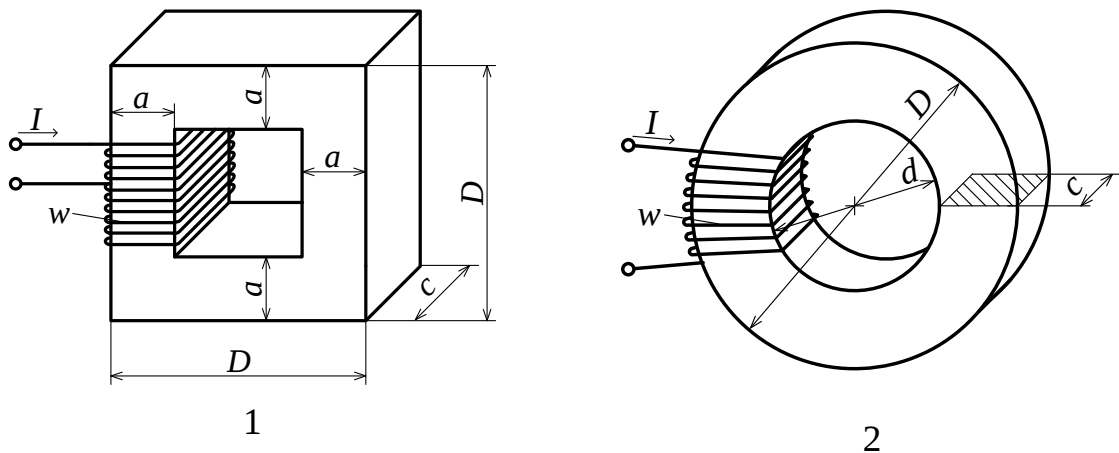
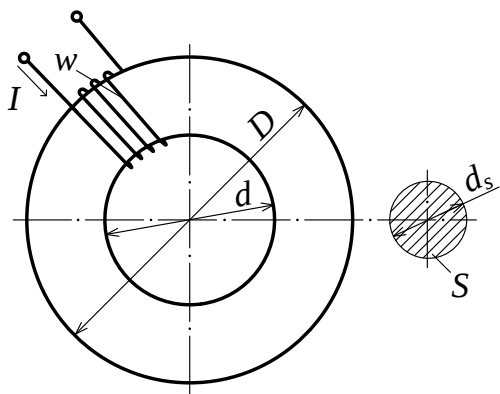
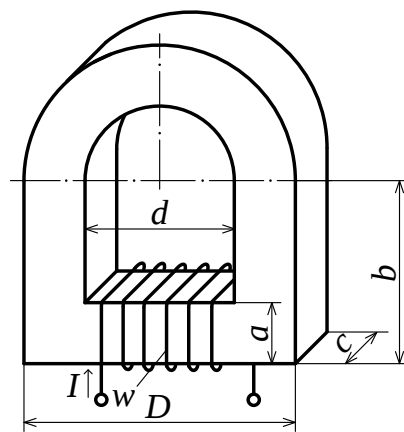


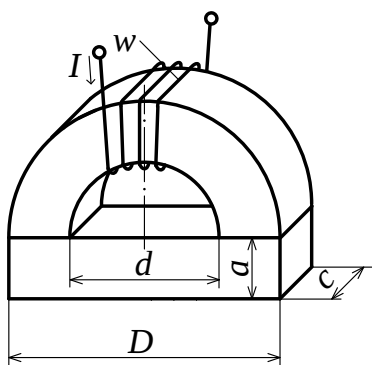
Рисунок 2.1



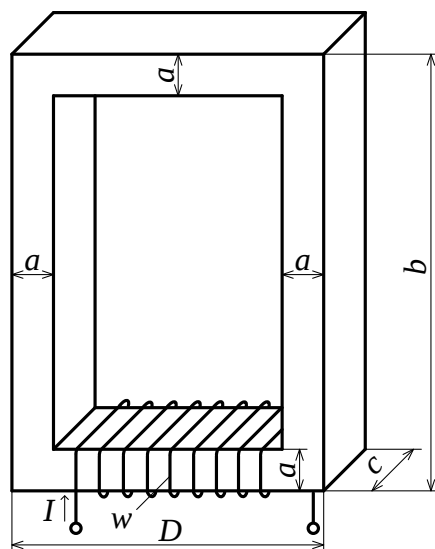
3



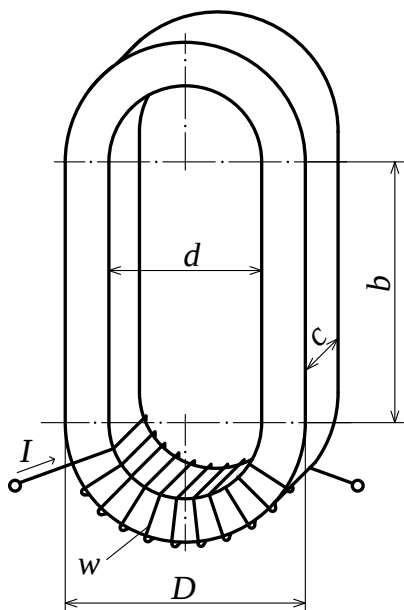
4



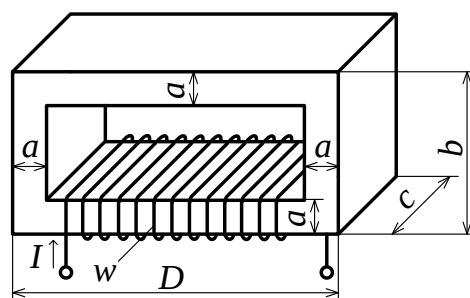
5



6



7



8

Рисунок 2.1 (продовження)

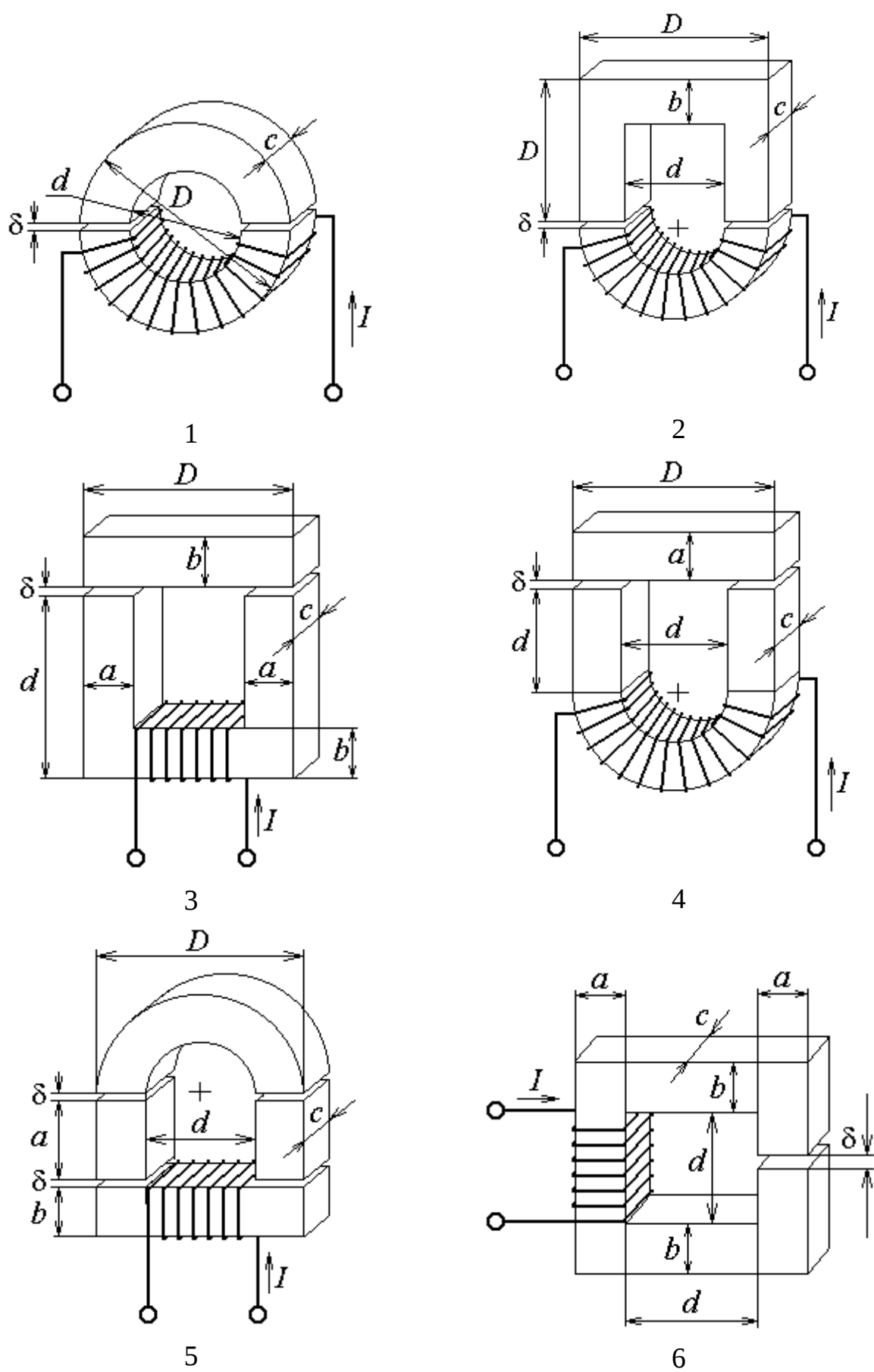
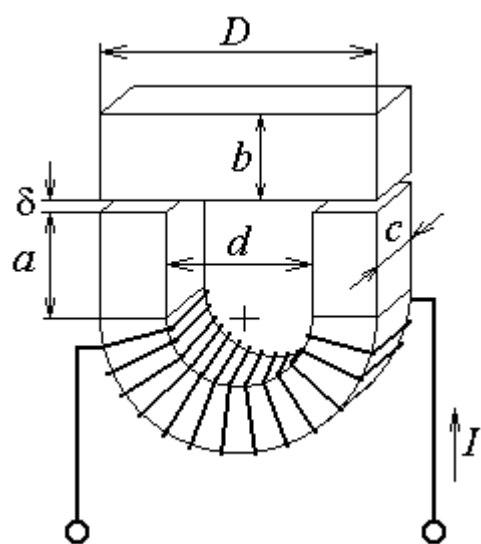
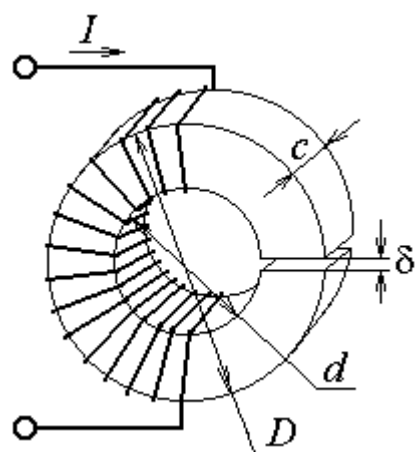


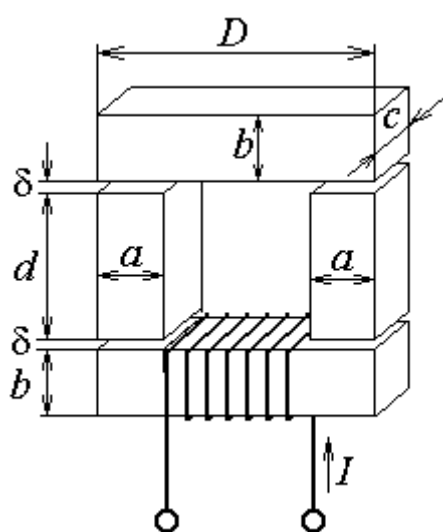
Рисунок 2.2



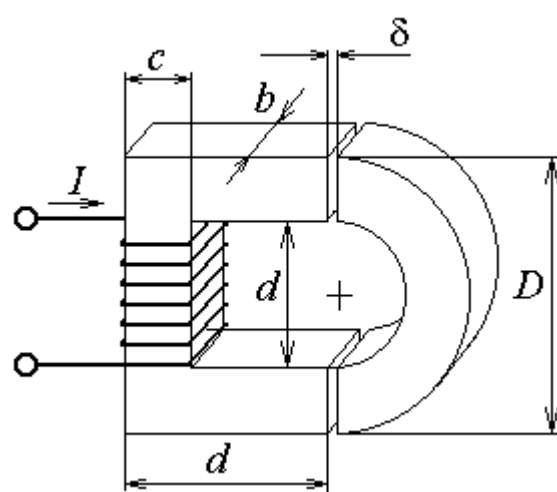
7



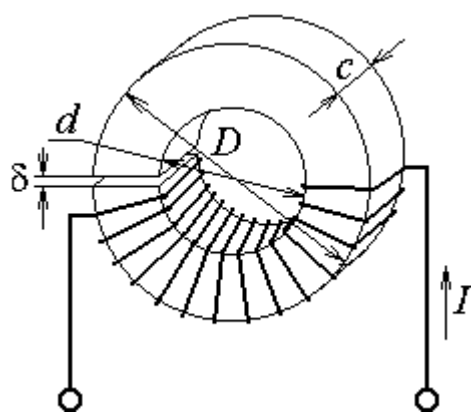
8



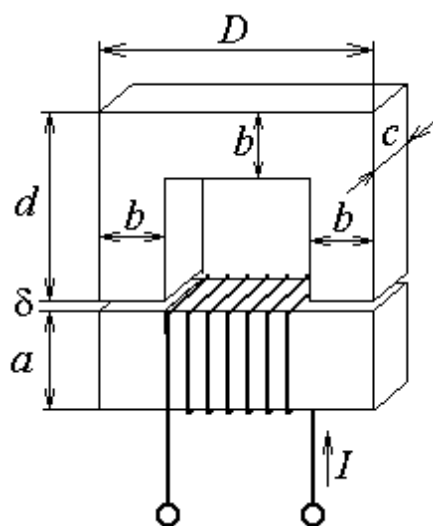
9



10



11



12

Рисунок 2.2 (продовження)

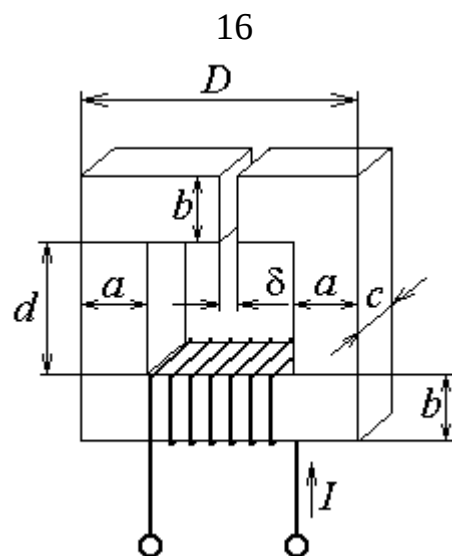
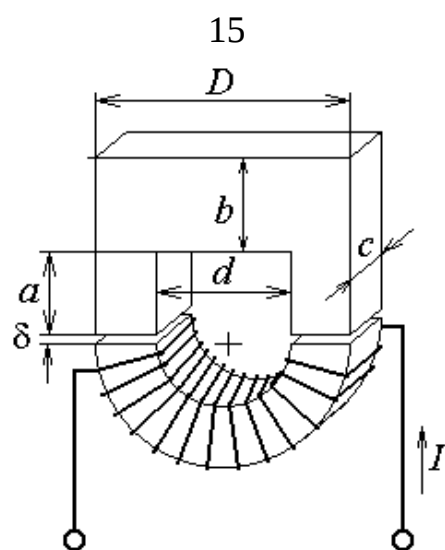
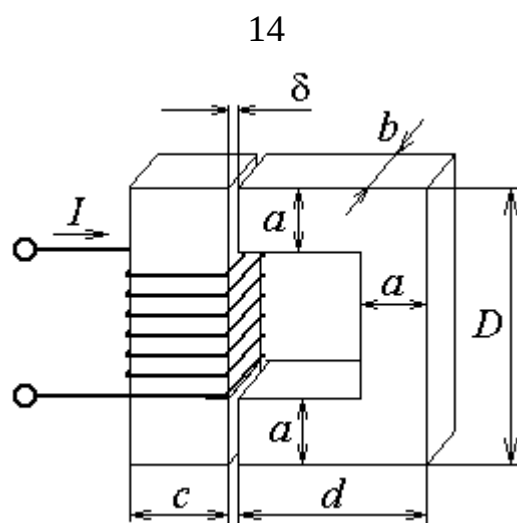
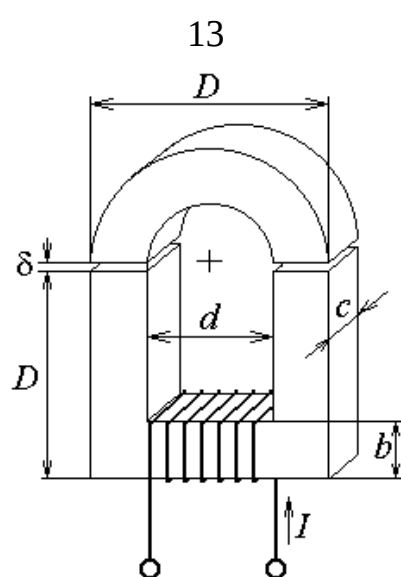
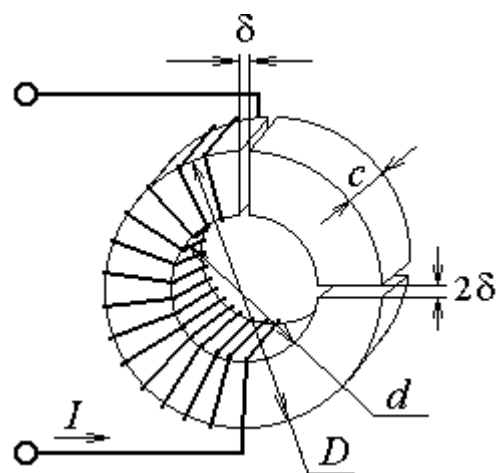
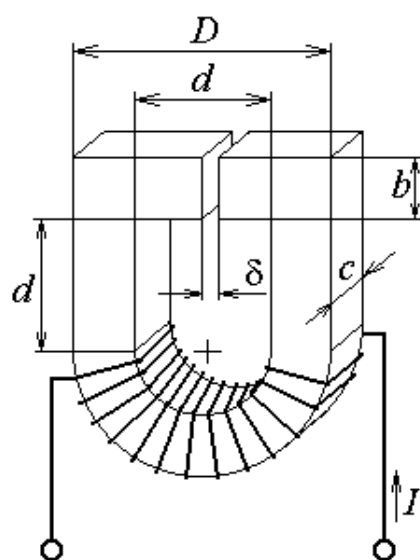


Рисунок 2.2 (продовження)

показує, у скільки разів магнітний потік на ділянці осердя з обмоткою більше, ніж в решті частини магнітопроводу.

Криві намагнічування сталей заданих марок зображені на рис. 2.2.

Для заданого варіанта магнітної системи треба визначити постійний струм I в обмотці, при якому в проміжку (або проміжках) магнітопроводу магнітна індукція B_k дорівнює заданій у табл. 2.2.

Задача 3. Вантажопідйомні електромагніти та електромагніти реле

На рис. 2.3 показані варіанти вантажопідйомних електромагнітів та електромагнітів реле. Електромагніт – це пристрій, що складається з нерухомого сталевго осердя з котушкою і рухомого сталевго якоря, переміщення якого спричиняє або підйом вантажу, або перемикання замикаючих електричних контактів в реле. За відсутності струму в котушці електромагніта якір під дією сили тяжіння вантажу або пружини відділений від осердя повітряним зазором δ . Якщо ж котушку підключити до джерела постійного струму під дією електромагнітної сили якір притягується до нерухомого осердя.

У табл. 2.3 дані геометричні розміри; кількість витків котушки; коефіцієнт жорсткості пружини – k ; маса вантажу – m ; марка сталі. Для заданого варіанта електромагніту визначити струм I в обмотці котушки, при якому починається переміщення якоря.

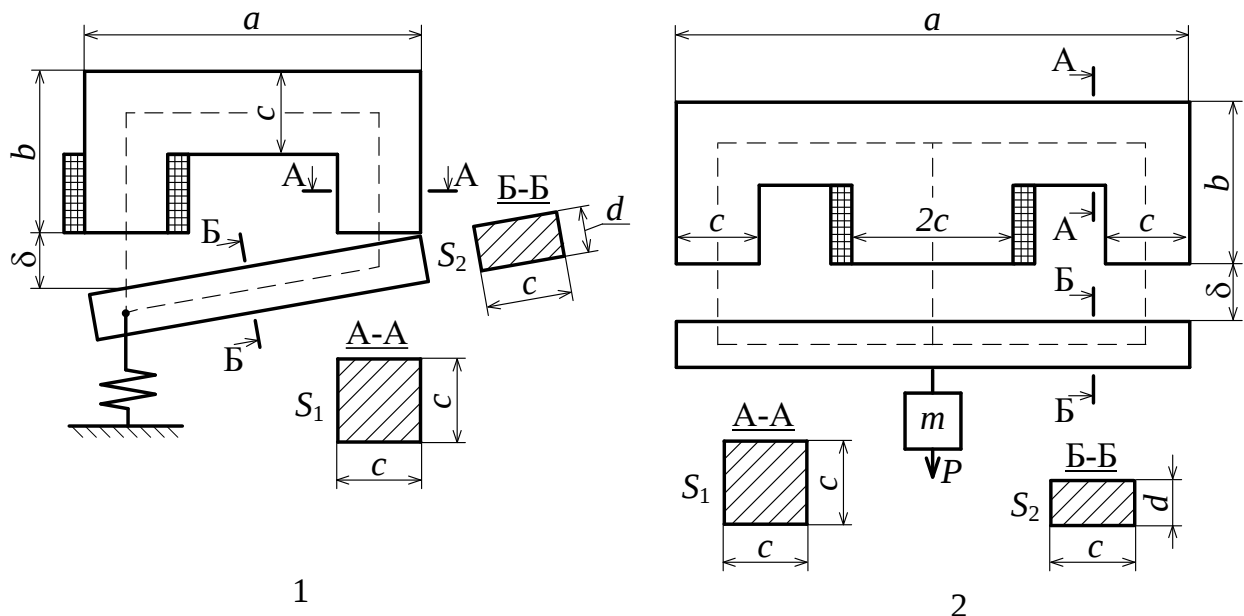
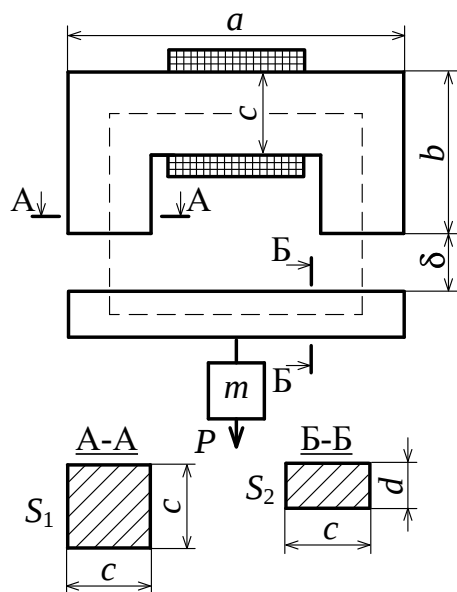
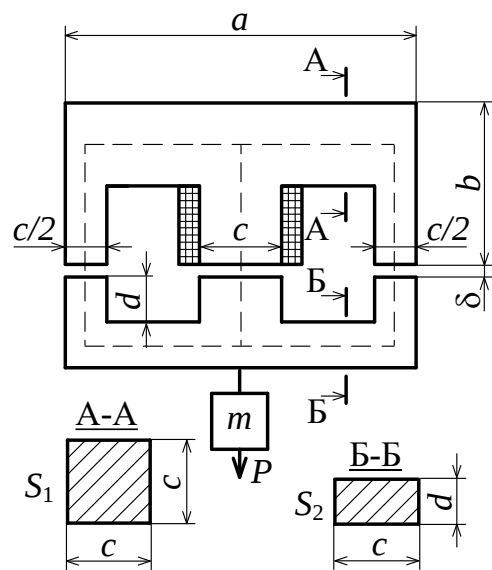


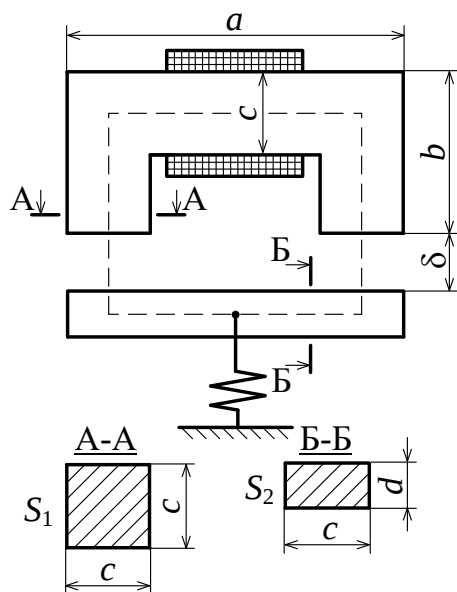
Рисунок 2.3



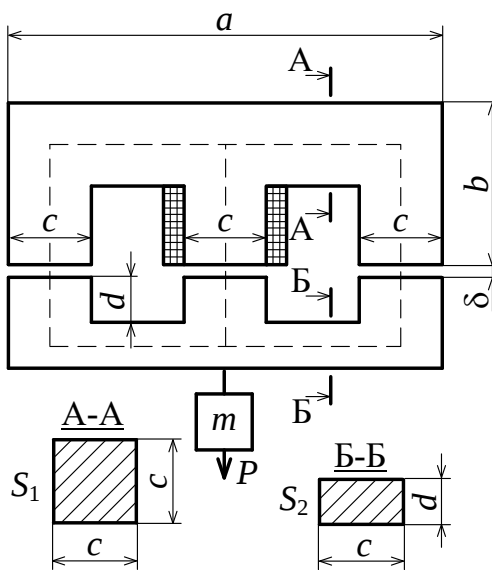
3



4

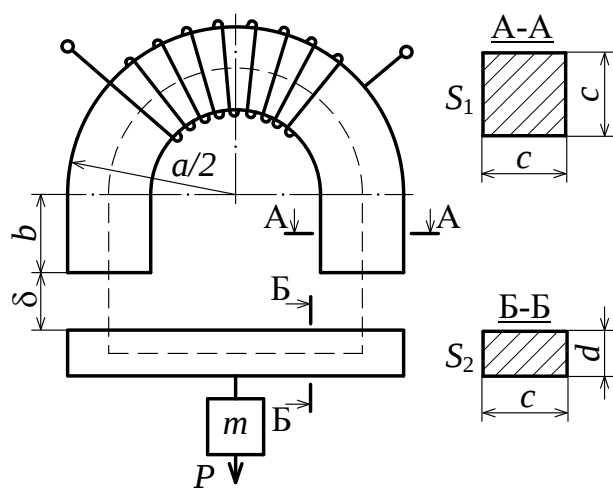


5

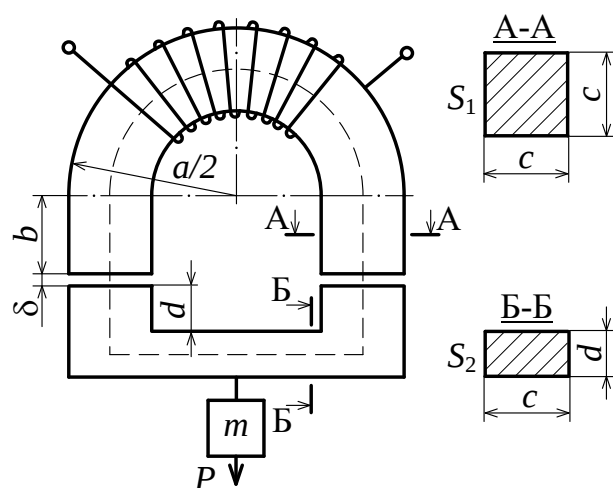


6

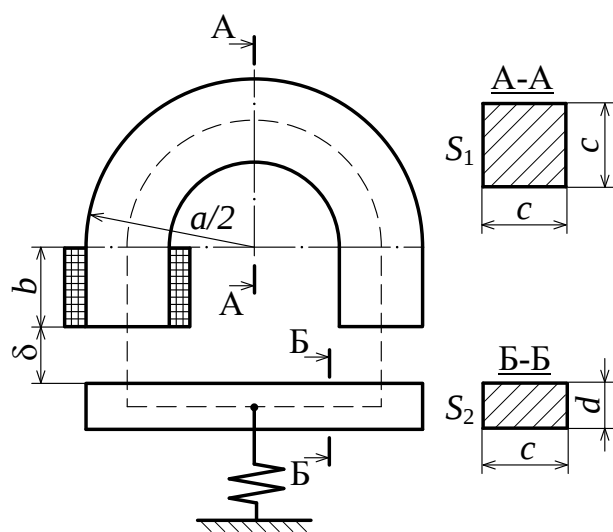
Рисунок 2.3 (продовження)



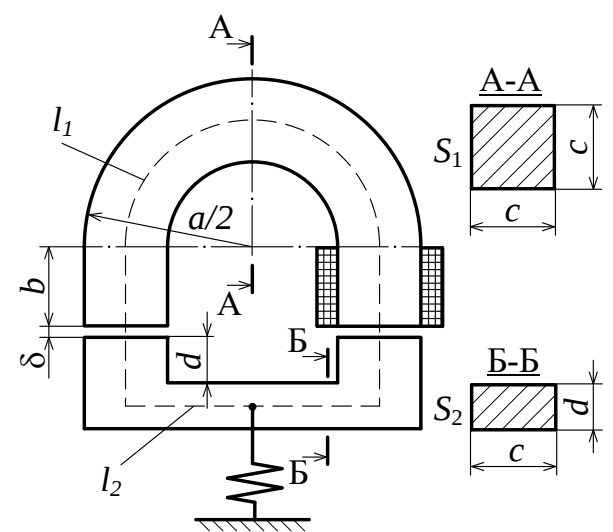
7



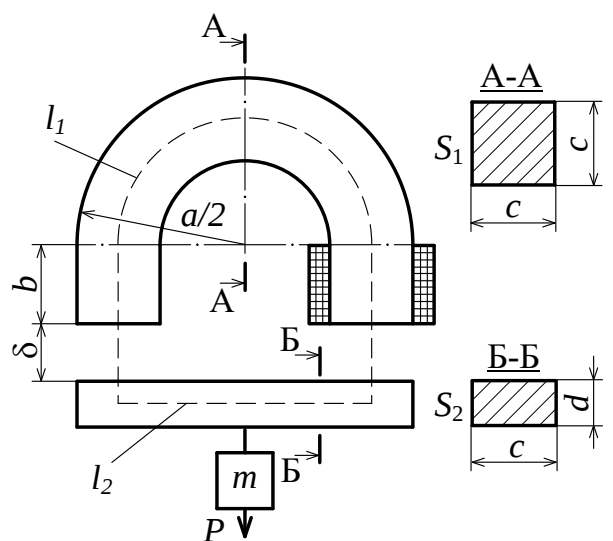
8



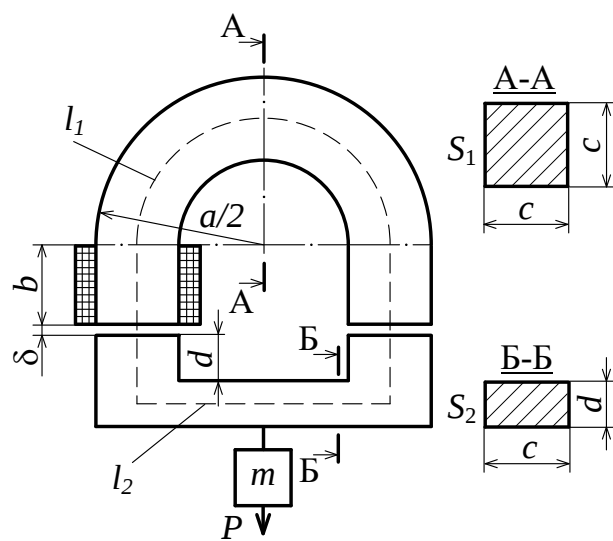
9



10



11



12

Рисунок 2.3 (продовження)

Задача 4. Дросель зі знімним ярком

Дросель з ярком, що знімається, являє собою котушку зі сталевим осердям, яка включена на синусоїдну напругу. Обмотка котушки з кількістю витків w_k мідного проводу намотана на шихтоване сталеве осердя, що виконане роз'ємним. Для визначення параметрів електричної схеми заміщення цього дроселя проведені два досліді при живленні його обмотки від мережі змінної напруги з частотою $f = 50$ Гц через автотрансформатор Т (рис. 2.4).

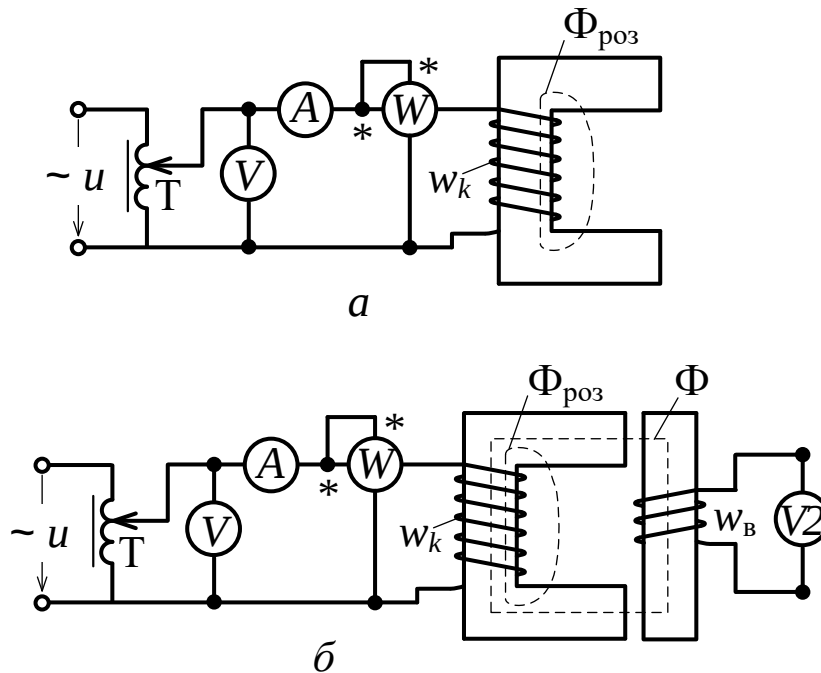


Рисунок 2.4

У першому досліді ярк був віддалений від основної частини осердя (рис. 2.4, а), так що можна вважати, що створювався тільки магнітний потік розсіювання $\Phi_{\text{роз}}$. Показаними на схемі приладами були виміряні діючі значення струму I_0 і напруги U_0 , а також активна потужність P_0 .

У другому досліді ярк осердя був встановлений в основне положення (рис. 2.4, б) і тепер по осердю через ярк замикався ще й основний магнітний потік Φ . На ярк була намотана вимірювальна котушка з кількістю витків w_b . Після подачі в основну обмотку струму I були виміряні активна потужність P , яка споживається дроселем, а також напруга U_b на затиска-

чах вимірювальної котушки.

Варіанти даних наведені в табл. 2.4.

Треба зобразити типову електричну схему заміщення дроселя і визначити параметри елементів цієї схеми. За цією схемою і заданим струмом I розрахувати діюче значення напруги U у другому досліді і побудувати векторну діаграму.

Задача 5. Однофазний трансформатор

Фізична модель однофазного трансформатора, до вторинної обмотки якого підключене навантаження Z_H , показано на рис. 2.5, а. На рис. 2.5, б подане умовне позначення трансформатора Т.

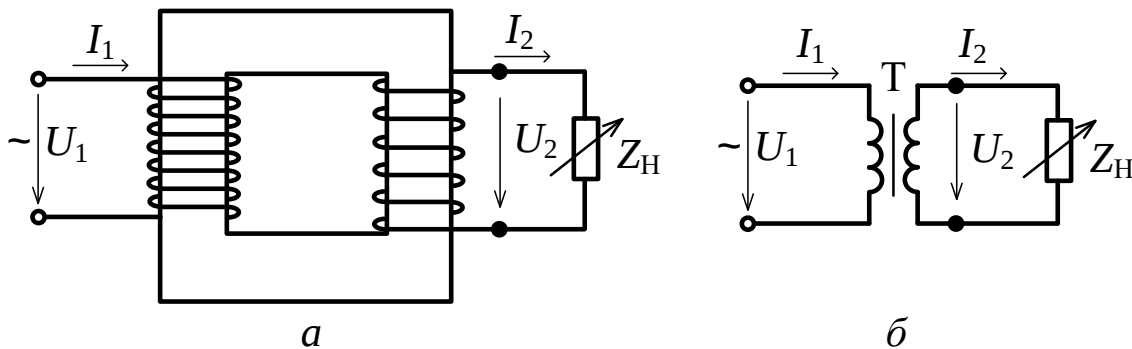


Рисунок 2.5

Варіанти паспортних даних однофазного трансформатора наведені в табл. 2.5. Вважаючи, що первинною обмоткою трансформатора буде обмотка вищої напруги (ВН), а вторинною – обмотка нижчої напруги (НН), для заданого варіанта треба визначити:

- 1) коефіцієнт трансформації;
- 2) номінальні струми обмоток; струм неробочого ходу (НХ) і струм аварійного короткого замикання (КЗ) первинної обмотки;
- 3) залежність ККД від струму навантаження трансформатора (побудувати графік цієї залежності $\eta(I_2)$ або $\eta(\beta)$, якщо $\beta = I_2 / I_{2\text{ном}}$ – коефіцієнт навантаження, тобто відношення струму вторинної обмотки до його номінального значення;
- 4) залежність напруги на вихідних затискачах від струму наванта-

ження (побудувати цю залежність, яка зветься також зовнішньою характеристикою, у вигляді $U_2(I_2)$ або $U_2(\beta)$).

У табл. 2.5 позначені: $S_{\text{ном}}$ – повна номінальна потужність; $U_{\text{ВНном}}$, $U_{\text{ННном}}$ – номінальні напруги обмоток ВН і НН; $i_{\text{нх}}$, P_0 – струм і втрати потужності в режимі НХ; $P_{\text{к}}$, $u_{\text{к}}$ – втрати потужності і напруга в режимі дослідного КЗ ($i_{\text{нх}}$ і $u_{\text{к}}$ подані в % від номінальних струму $I_{\text{ном}}$ і напруги $U_{\text{ном}}$ первинної обмотки, відповідно); $\cos \varphi_{\text{н}}$ – коефіцієнт потужності навантаження, яке підключається до трансформатора.

Задача 6. Двигун постійного струму з паралельним збудженням

Схема включення двигуна постійного струму з паралельним збудженням надана на рис. 2.6, а дані наведені в табл. 2.6, де позначені: $P_{2\text{ном}}$, $U_{\text{ном}}$, $\eta_{\text{ном}}$, $n_{\text{ном}}$ – номінальна потужність, напруга, ККД і частота обертання; $R_{\text{я}}$ – опір кола обмотки якоря, $R_{\text{з}}$ – опір обмотки збудження.

Для заданого варіанта даних треба виконати наступне.

1. Для номінального режиму роботи визначити струм $I_{\text{ном}}$, який споживається двигуном із мережі; струм збудження $I_{\text{зном}}$; електромагнітну потужність $P_{\text{ЕМном}}$, ЕРС обмотки якоря $E_{\text{ном}}$.

2. Визначити опір $R_{\text{р}}$ пускорегулювального реостата, який треба ввімкнути в коло якоря (рис. 2.6) для обмеження пускового струму якоря до $I_{\text{япуск}} = 2,5I_{\text{яном}}$, якщо двигун включається на номінальну напругу.

3. Знайти напругу живлення U' , яка забезпечить пусковий струм якоря на рівні $I_{\text{япуск}} = 2,5I_{\text{яном}}$ без включення пускового реостата.

4. Визначити частоту обертання якоря n_0 в режимі ідеального неробочого ходу.

5. Побудувати природну механічну характери-

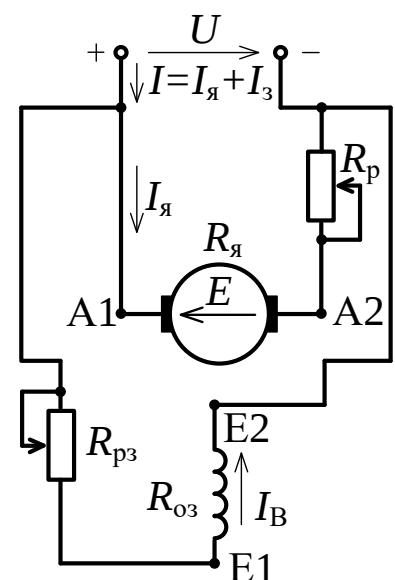


Рисунок 2.6

стику $n(M)$, де n – частота обертання якоря; M – його обертальний момент, при живленні двигуна номінальною напругою $U_{\text{ном}}$.

6. Визначити частоту обертання якоря при обертальному моменті $M = 0,5M_{\text{ном}}$, де $M_{\text{ном}}$ – номінальний обертальний момент, перевірити це, використовуючи побудовану за пунктом 5 механічну характеристику $n(M)$.

7. Побудувати штучну механічну характеристику $n(M)$, якщо в коло якоря включений пускорегулювальний реостат з опором $R_p = 3R_a$ (рис. 2.6), а живильна напруга залишена номінальною.

Задача 7. Двигун постійного струму з послідовним збудженням

Для двигуна постійного струму (ДПС) з послідовним збудженням схема ввімкнення подана на рис. 2.7, а дані в табл. 2.7, де позначені: $P_{2\text{ном}}$, $U_{\text{ном}}$, $n_{\text{ном}}$, $\eta_{\text{ном}}$ – номінальні потужність, напруга, частота обертання і ККД; R_a – опір кола обмотки якоря з урахуванням обмотки збудження. Крива намагнічування ДПС $\Phi(I)$ у відносних одиницях у вигляді $k_\Phi(k_I)$ подана на рис. 2.8, де $k_I = I/I_{\text{ном}}$ – кратність струму збудження (який одночасно є і струмом якоря); $k_\Phi = \Phi/\Phi_{\text{ном}}$ – кратність магнітного потоку збудження ($I_{\text{ном}}$, $\Phi_{\text{ном}}$) – номінальні значення відповідних величин).

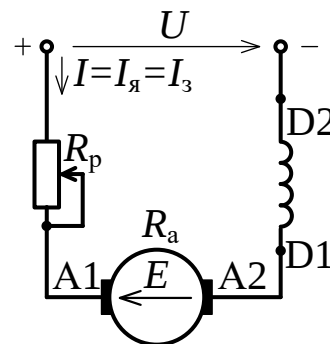


Рисунок 2.7

1. Для номінального режиму роботи визначити: потужність $P_{1\text{ном}}$ і струм $I_{\text{ном}}$, що споживаються двигуном із мережі; втрати потужності $\Delta P_{\text{ном}}$; ЕРС обмотки якоря $E_{\text{ном}}$; обертальний електромагнітний момент $M_{\text{ном}}$; корисний момент на валу двигуна $M_{2\text{ном}}$.

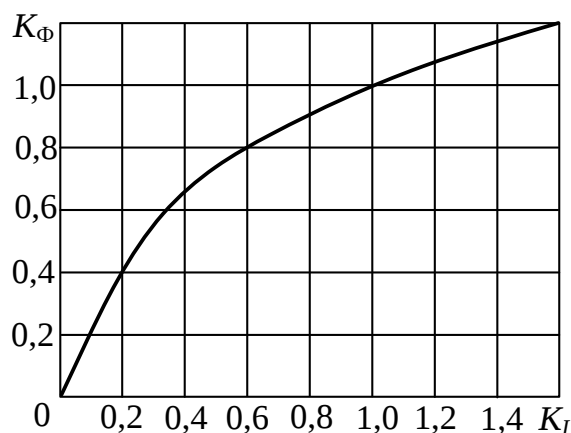


Рисунок 2.8

2. Побудувати природну механічну характеристику двигуна

$n(M)$, де n – частота обертання якоря, M – обертальний момент якоря при живленні номінальною напругою $U_{\text{ном}}$.

3. Побудувати штучну механічну характеристику $n(M)$, якщо в коло якоря ввімкнений регулювальний реостат з опором $R_p = 3R_a$ (рис. 2.7), а напруга збережена номінальною.

4. Використовуючи побудовані за пунктами 2 і 3 характеристики $n(M)$, визначити частоту обертання двигуна при зниженні обертального моменту на 40 %, а також при підвищенні його на 15 % порівняно з номінальним значенням за відсутності наявності регулювального реостата R_p .

5. Знайти частоту обертання якоря при забезпеченні номінального обертального моменту $M_{\text{ном}}$, але в разі зниження напруги живлення на 25 % порівняно з її номінальним значенням $U_{\text{ном}}$.

Задача 8. Трифазний асинхронний двигун

Для трифазного асинхронного двигуна, що розрахований на номінальну напругу 220/380 В (фазна/лінійна) при частоті $f = 50$ Гц, за його даними із табл. 2.8, де $P_{2\text{ном}}$ – номінальна потужність; p – кількість пар полюсів; $S_{\text{ном}}$ – номінальне ковзання; $\lambda_M = M_{\text{мах}} / M_{\text{ном}}$ – перевантажувальна здатність щодо обертального моменту ($M_{\text{мах}}$, $M_{\text{ном}}$ – максимальний і номінальний моменти); $m_I = I_{\text{пуск}} / I_{\text{ном}}$ – кратність пускового струму ($I_{\text{пуск}}$, $I_{\text{ном}}$ – пускове і номінальне значення струму, яке споживається із мережі); $\cos\varphi_{1\text{ном}}$ – номінальний коефіцієнт потужності, а також за заданою схемою з'єднання обмотки статора (З – „зірка”, рис. 2.9, а; Т – „трикутник”, рис. 2.9, б):

1) обрати лінійну напругу трифазної мережі живлення U_1 і визначити частоту обертання поля статора n_1 ; номінальну $n_{2\text{ном}}$ і критичну $n_{\text{кр}}$ частоти обертання ротора;

2) визначити потужність, яка споживається двигуном із мережі $P_{1\text{ном}}$; номінальний $I_{\text{ном}}$ і пусковий $I_{\text{пуск}}$ струми двигуна; номінальний $M_{\text{ном}}$ і максимальний $M_{\text{мах}}$ обертальні моменти двигуна;

3) за заданою напругою мережі U_1 розрахувати і побудувати залежність $M(S)$, де M , S – обертальний момент і ковзання ротора, і звідти визначити пусковий обертальний момент двигуна $M_{\text{пуск}}$ і кратність цього моменту $k_{\text{пуск}} = M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}}$;

4) розрахувати і побудувати в одній координатній системі три механічні характеристики – залежності $n_2(M)$, де n_2 – частота обертання ротора, при таких умовах:

а) природну характеристику за

заданою напругою мережі U_M (як у пункті 3), і по ній визначити діапазон частоти обертання ротора, у якому відбувається стабільна робота двигуна;

б) штучну характеристику за зниженою напругою мережі живлення на 10%, тобто при $U'_M = 0,9U_M$ (підказка – тут треба змінити відповідно максимальний обертальний момент $M_{\text{мах}}$, а у решті діяти як в пункті а);

в) штучну характеристику – за вихідним значенням напруги мережі живлення U_M , але нібито у фазі обмотки ротора включений трифазний регульований реостат з фазним опором R_p (рис. 2.10), так що сумарний активний опір у кожній фазі обмотки ротора став удвічі більше, ніж в машині з вихідними даними, тобто $R'_2 = 2R_2$, а індуктивний опір фаз обмотки ротора X_{20} не змінився (підказка – тут треба

відповідно змінити критичне ковзання $s_{\text{кр}}$, а у решті діяти як у пункті а).

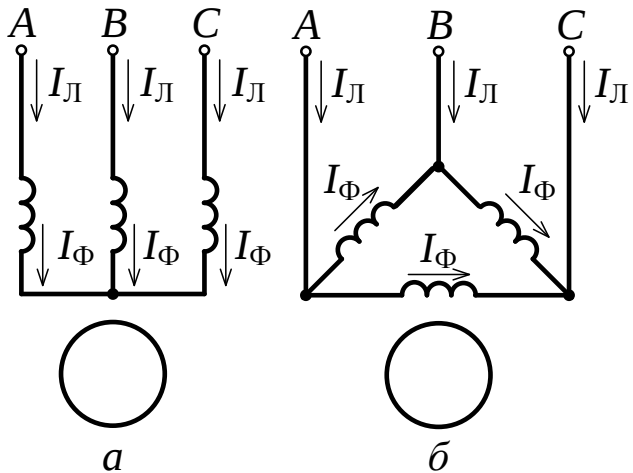


Рисунок 2.9

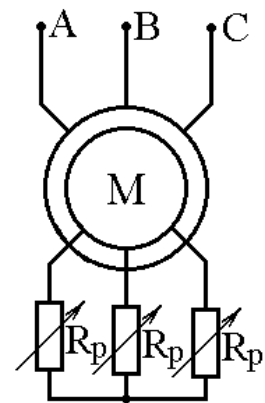


Рис.2.10

Таблиця 2.1 – Варіанти параметрів котушки зі сталевим осердям

№ варіанта	Варіант за рис.6.1	Розміри осердя, мм						Кількість витків	Марка сталі	Коеф. заповнення	Струм, А
		D	d	d_s	a	b	c	w	—	k_3	I
1	1	100	—	—	10	—	10	500	1512	0,95	1,5
2	1	150	—	—	20	—	20	800	Ст.2	0,96	1,6
3	1	200	—	—	20	—	25	1000	Ст.2	0,99	1,7
4	1	80	—	—	5	—	15	2000	1211	1	1,8
5	2	100	80	—	—	—	10	1000	1211	0,93	1,9
6	2	150	100	—	—	—	20	2000	Ст.2	0,94	1,8
7	2	200	150	—	—	—	30	3000	Ст.2	0,96	1,9
8	2	180	150	—	—	—	25	5000	1512	0,97	1,5
9	3	100	80	20	—	—	—	1000	Ст.2	1	1,8
10	3	80	60	20	—	—	—	2000	1512	0,94	1,8
11	3	120	100	20	—	—	—	800	1512	0,99	1,9
12	3	150	130	20	—	—	—	600	1211	0,98	1,5
13	4	150	110	—	20	100	20	500	Ст.2	0,94	1,6
14	4	200	180	—	10	150	15	800	Ст.2	0,95	1,7
15	4	250	200	—	25	80	10	1100	Ст.2	0,98	1,8
16	4	180	150	—	15	120	24	1500	1512	1	1,9
17	5	120	100	—	10	—	15	800	1211	0,96	2
18	5	160	120	—	20	—	18	1100	Ст.2	0,93	1,9
19	5	100	80	—	10	—	16	700	Ст.2	0,97	1,8
20	5	150	100	—	25	—	26	600	1512	0,99	1,7
21	6	80	—	—	5	150	25	600	1512	0,98	1,8
22	6	120	—	—	20	180	13	800	Ст.2	0,95	1,9
23	6	100	—	—	15	200	24	1200	1512	0,99	1,8
24	6	90	—	—	10	140	21	2000	Ст.2	1	1,9
25	7	90	70	—	10	50	30	900	Ст.2	0,93	1,8
26	7	100	60	—	20	60	21	1200	1211	0,94	2,2
27	7	120	80	—	20	80	26	2000	1211	0,99	2,1
28	7	140	90	—	25	75	20	1500	1512	0,98	2,5
29	8	200	—	—	20	80	10	1000	Ст.2	0,94	1,9
30	8	180	—	—	10	60	15	1500	Ст.2	0,98	1,8
31	8	150	—	—	5	50	20	2000	1211	0,97	1,8
32	8	210	—	—	15	70	25	3000	1512	0,93	1,9
33	1	125	—	—	12	—	15	600	Ст.2	0,91	2,5
34	1	160	—	—	10	—	20	1000	1512	0,93	2,4

Продовження таблиці 2.1

№ варіанта	Варіант за рис.2.1	Розміри осердя, мм						Кількість витків	Марка сталі	Коеф. заповнення	Струм, А
		D	d	d_s	a	b	c	w	—	k_3	I
35	1	180	—	—	15	—	12	2000	1211	0,96	1,5
36	1	210	—	—	10	—	10	1500	Ст.2	0,97	2
37	2	110	90	—	—	—	5	1500	1512	0,93	1,7
38	2	115	92	—	—	—	10	1200	1211	0,96	1,8
39	2	130	95	—	—	—	25	1800	Ст.2	0,94	1,9
40	2	120	100	—	—	—	15	2000	1211	0,97	2
41	3	110	90	20	—	—	—	1200	1512	0,94	2,1
42	3	125	95	30	—	—	—	1500	1211	0,95	2,2
43	3	130	110	20	—	—	—	600	1211	0,96	2,3
44	3	140	110	20	—	—	—	700	Ст.2	0,98	2,5
45	4	110	90	—	10	80	10	1000	1512	0,95	1,8
46	4	160	120	—	20	100	20	1200	1512	0,93	2
47	4	120	100	—	20	100	10	1500	Ст.2	0,96	1,7
48	4	140	110	—	15	150	15	800	Ст.2	0,99	2,5
49	5	110	90	—	10	—	10	1100	Ст.2	0,94	1,9
50	5	130	100	—	15	—	20	1500	Ст.2	0,95	2
51	5	140	110	—	15	—	20	2000	1211	0,96	1,9
52	5	125	105	—	10	—	10	2500	1211	0,98	1,8
53	6	110	—	—	10	200	10	2000	1211	0,99	1,7
54	6	130	—	—	15	160	15	2500	1512	0,06	1,6
55	6	160	—	—	20	220	20	3000	1512	0,93	1,5
56	6	140	—	—	20	200	20	1000	1512	0,94	2
57	7	110	80	—	15	50	10	1500	1512	0,96	2,3
58	7	130	100	—	15	70	20	2000	1211	0,93	2,2
59	7	130	100	—	15	70	10	3000	Ст.2	0,99	1,5
60	7	150	110	—	20	90	30	1800	Ст.2	0,94	1,8
61	8	220	—	—	10	80	20	1800	Ст.2	0,93	1,7
62	8	160	—	—	5	40	10	1500	Ст.2	0,95	1,6
63	8	180	—	—	5	50	10	2000	1211	0,97	1,7
64	8	200	—	—	10	60	20	2500	1211	0,94	1,6
65	1	110	—	—	11	—	10	600	Ст.2	0,99	1,5
66	1	120	—	—	12	—	20	800	1512	0,98	2,4
67	1	130	—	—	13	—	30	1000	1211	0,97	2
68	1	140	—	—	14	—	40	1200	Ст.2	0,96	1,7
69	2	150	120	—	—	—	20	1500	1512	0,95	1,8
70	2	160	130	—	—	—	25	1600	1211	0,94	1,9

Продовження таблиці 2.1

№ варі- анта	Варіант за рис.2.1	Розміри осердя, мм						Кіль- кість витків	Марка сталі	Коеф запов- нення	Струм, А
		D	d	d_s	a	b	c	w	—	k_3	I
71	2	170	140	—	—	—	30	1700	1211	0,93	2
72	2	180	150	—	—	—	35	1800	1512	0,96	2,1
73	3	120	90	30	—	—	—	2000	Ст.2	0,95	2
74	3	160	100	60	—	—	—	2500	Ст.2	0,96	1,8
75	3	180	150	30	—	—	—	3000	1512	0,97	1,4
76	3	200	160	40	—	—	—	1500	1211	0,98	2
77	4	125	95	—	15	100	15	2000	1512	0,95	2
78	4	135	105	—	15	110	15	2500	1512	0,94	2
79	4	145	105	—	20	120	20	3000	1211	0,93	1,5
80	4	155	125	—	15	120	20	1500	1211	0,99	1,5
81	5	120	90	—	15	—	5	3000	Ст.2	0,98	1,9
82	5	125	95	—	15	—	10	3000	Ст.2	0,96	1,5
83	5	125	105	—	10	—	15	2500	1512	0,94	1,5
84	5	135	115	—	10	—	20	2000	1211	0,94	1,8
85	6	120	—	—	15	165	15	1500	Ст.2	0,93	1,7
86	6	125	—	—	15	170	20	1700	1512	0,94	2
87	6	135	—	—	20	180	10	1200	1211	0,96	2,1
88	6	145	—	—	20	180	10	1000	Ст.2	0,95	2,4
89	7	115	85	—	15	60	15	1500	1211	0,96	2,5
90	7	120	90	—	15	65	20	800	1512	0,97	2,3
91	7	125	95	—	15	70	25	700	Ст.2	0,98	2,4
92	7	130	100	—	15	75	30	1500	Ст.2	0,99	2,5
93	8	140	—	—	15	60	10	600	Ст.2	0,98	2,1
94	8	160	—	—	10	60	10	800	Ст.2	0,97	2,4
95	8	170	—	—	5	50	15	1000	1211	0,96	2,2
96	8	190	—	—	10	60	15	1200	1512	0,95	2,2
97	8	200	—	—	15	80	20	1500	1512	0,93	2,3
98	8	200	—	—	20	80	20	2000	Ст.2	0,95	2,4
99	8	150	—	—	10	40	15	1500	1512	0,97	1,7
100	8	130	—	—	5	40	15	1000	1211	1	2

Таблиця 2.2 – Варіанти параметрів котушки зі сталевим осердям

№ варіанта	Варіант за рис.2.2	Розміри осердя, мм						Кількість витків	Марка сталі	Коеф. заповнення	Коеф. розсіяння	Індукція у проміжку, Тл	Коеф. струму
		D	d	a	b	c	δ	w	—	k_3	$k_{роз}$	B_k	β
1	1	110	70	15	16	18	2,0	1000	1512	0,96	1,10	1,10	1,1
2	4	84	54	15	12	14	1,5	1500	Ст.2	1,00	1,15	1,05	1,2
3	11	131	85	18	13	22	3,3	1200	1211	0,93	1,20	1,25	1,3
4	18	157	103	27	29	26	2,7	750	1512	0,95	1,05	1,15	1,4
5	10	206	136	35	38	34	3,5	500	Ст.2	1,00	1,25	1,35	1,5
6	3	108	72	19	20	18	1,8	3000	1211	0,94	1,10	1,40	1,1
7	15	195	131	32	36	32	3,2	600	1512	0,96	1,15	1,45	1,2
8	5	155	105	25	26	24	2,5	1300	Ст.2	1,00	1,20	1,30	1,3
9	7	189	129	30	32	29	3,0	1000	1211	0,93	1,05	1,05	1,4
10	2	83	57	12	14	13	1,3	1500	1512	0,95	1,25	1,30	1,5
11	6	85	70	20	18	19	2,0	1200	Ст.2	1,00	1,10	1,15	1,1
12	7	84	54	15	16	14	1,5	750	1211	0,94	1,15	1,35	1,2
13	2	131	85	20	26	22	2,3	500	1512	0,96	1,20	1,25	1,3
14	7	157	103	27	30	26	2,7	3000	Ст.2	1,00	1,05	1,45	1,4
15	1	206	136	30	28	33	2,5	600	1211	0,93	1,25	1,30	1,5
16	8	108	72	15	16	17	1,8	1300	1512	0,95	1,10	1,40	1,1
17	13	195	131	30	35	31	3,2	1000	Ст.2	1,00	1,15	1,30	1,2
18	9	155	140	25	27	24	2,5	1500	1211	0,94	1,20	1,15	1,3
19	6	110	129	30	25	30	3,0	1200	1512	0,96	1,05	1,05	1,4
20	8	83	57	12	10	13	1,3	750	Ст.2	1,00	1,25	1,25	1,5
21	4	110	70	20	15	19	2,0	500	1211	0,93	1,10	1,45	1,1
22	12	84	54	16	14	14	1,5	3000	1512	0,95	1,15	1,35	1,2
23	9	131	121	15	25	21	2,3	600	Ст.2	1,00	1,20	1,40	1,3
24	16	80	62	15	15	16	1,4	750	1512	0,95	1,15	1,15	1,2
25	14	206	136	38	36	33	0,7	1000	1512	0,96	1,25	1,10	1,5
26	2	108	72	15	20	17	1,8	1500	Ст.2	1,00	1,10	1,05	1,1
27	9	195	150	32	36	31	3,2	1200	1211	0,93	1,15	1,25	1,2

Продовження таблиці 2.2

№ варіанта	Варіант за рис.2.2	Розміри осердя, мм						Кількість витків	Марка сталі	Коеф. заповнення	Коеф. розсіяння	Індукція у проміжку, Тл	Коеф. струму
		D	d	a	b	c	δ	w	—	k_3	$k_{роз}$	B_k	β
28	2	155	105	22	28	25	1,5	750	1512	0,95	1,20	1,15	1,3
29	15	189	129	30	32	29	3,0	500	Ст.2	1,00	1,05	1,35	1,4
30	7	83	57	13	14	13	1,3	3000	1211	0,94	1,25	1,40	1,5
31	12	110	70	22	20	18	2,0	600	1512	0,96	1,10	1,45	1,1
32	3	84	54	15	16	14	1,5	1300	Ст.2	1,00	1,15	1,30	1,2
33	10	131	85	21	25	22	2,3	1000	1211	0,93	1,20	1,05	1,3
34	1	157	103	30	25	26	2,7	1500	1512	0,95	1,05	1,30	1,4
35	17	206	136	35	29	34	3,5	1200	Ст.2	1,00	1,25	1,15	1,5
36	6	100	72	18	15	17	1,8	750	1211	0,94	1,10	1,35	1,1
37	11	195	131	35	28	31	3,2	500	1512	0,96	1,15	1,25	1,2
38	4	155	105	25	26	24	2,5	3000	Ст.2	1,00	1,20	1,45	1,3
39	12	189	129	33	30	29	3,0	600	1211	0,93	1,05	1,30	1,4
40	17	83	57	16	14	13	1,3	1300	1512	0,95	1,25	1,40	1,5
41	12	110	70	25	20	19	2,0	1000	Ст.2	1,00	1,10	1,30	1,1
42	3	84	54	12	17	14	1,5	1500	1211	0,94	1,15	1,15	1,2
43	10	131	85	23	24	21	2,3	1200	1512	0,96	1,20	1,05	1,3
44	4	157	103	27	30	25	2,7	750	Ст.2	1,00	1,05	1,25	1,4
45	18	206	136	35	38	33	3,5	500	1211	0,93	1,25	1,45	1,5
46	5	108	72	18	20	17	1,8	3000	1512	0,95	1,10	1,35	1,1
47	13	195	131	28	35	31	3,2	600	Ст.2	1,00	1,15	1,40	1,2
48	10	155	105	25	28	25	2,5	1300	1211	0,94	1,20	1,50	1,3
49	8	189	129	36	29	30	3,0	1000	1512	0,96	1,05	1,10	1,4
50	6	70	58	13	15	13	1,3	1500	Ст.2	1,00	1,25	1,05	1,5
51	7	110	70	20	21	18	2,0	1200	1211	0,93	1,10	1,25	1,1
52	16	84	54	15	16	14	1,5	750	1512	0,95	1,15	1,15	1,2
53	1	131	85	17	19	22	1,3	500	Ст.2	1,00	1,20	1,35	1,3
54	5	157	103	27	30	26	2,7	3000	1211	0,94	1,05	1,40	1,4

Продовження таблиці 2.2

№ варі- анта	Варі- ант за рис. 2.2	Розміри осердя, мм						Кіль- кість витків	Марка сталі	Коеф. запов- нення	Коеф. роз- сіяння	Індук- ція у проміж- ку, Тл	Коеф. стру- му
		D	d	a	b	c	δ	w	—	k_3	$k_{роз}$	B_k	β
55	12	206	136	35	28	34	3,5	600	1512	0,96	1,25	1,45	1,5
56	13	108	72	18	20	18	1,8	1300	Ст.2	1,00	1,10	1,30	1,1
57	2	195	131	30	34	30	3,2	1000	1211	0,93	1,15	1,05	1,2
58	8	155	105	27	26	24	2,5	1500	1512	0,95	1,20	1,30	1,3
59	15	189	129	30	32	29	3,0	1200	Ст.2	1,00	1,05	1,15	1,4
60	10	83	57	13	14	13	1,3	750	1211	0,94	1,25	1,35	1,5
61	3	110	70	19	22	19	2,0	500	1512	0,96	1,10	1,25	1,1
62	1	84	54	15	18	14	1,5	3000	Ст.2	1,00	1,15	1,45	1,2
63	14	131	85	18	20	22	1,1	600	1211	0,93	1,20	1,30	1,3
64	6	95	103	27	22	25	2,7	1300	1512	0,95	1,05	1,40	1,4
65	18	206	186	35	37	33	3,5	1000	Ст.2	1,00	1,25	1,30	1,5
66	9	108	89	18	19	17	1,8	1500	1211	0,94	1,10	1,15	1,1
67	5	195	131	32	35	31	3,2	1200	1512	0,96	1,15	1,05	1,2
68	13	155	105	22	28	25	2,5	750	Ст.2	1,00	1,20	1,25	1,3
69	18	189	129	30	33	30	3,0	500	1211	0,93	1,05	1,45	1,4
70	7	83	57	13	15	13	1,3	3000	1512	0,95	1,25	1,35	1,5
71	2	110	70	17	21	18	2,0	600	Ст.2	1,00	1,10	1,40	1,1
72	4	84	54	15	16	14	1,5	1300	1211	0,94	1,15	1,50	1,2
73	12	131	85	33	25	22	2,3	1000	1512	0,96	1,20	1,10	1,3
74	13	157	103	30	29	26	2,7	1500	Ст.2	1,00	1,05	1,05	1,4
75	4	206	156	35	30	34	3,5	1200	1211	0,93	1,25	1,25	1,5
76	15	130	85	20	25	20	2,2	750	1211	0,93	1,20	1,45	1,3
77	9	195	150	32	36	32	3,2	500	Ст.2	1,00	1,15	1,35	1,2
78	5	155	105	25	26	24	2,5	3000	1211	0,94	1,20	1,40	1,3
79	13	189	129	30	32	29	3,0	600	1512	0,96	1,05	1,45	1,4
80	8	83	57	10	12	13	3,3	1300	Ст.2	1,00	1,25	1,30	1,5

Продовження таблиці 2.2

№ варіанта	Варіант за рис. 2.2	Розміри осердя, мм						Кількість витків	Марка сталі	Коеф. заповнення	Коеф. розсіяння	Індукція у проміжку, Тл	Коеф. струму
		D	d	a	b	c	δ	w	—	k_3	$k_{роз}$	B_K	β
81	11	110	70	15	20	19	2,0	1000	1211	0,93	1,10	1,05	1,1
82	14	84	54	10	12	14	1,0	1500	1512	0,95	1,15	1,30	1,2
83	16	150	122	30	20	25	2,0	1400	Ст.2	1,00	1,20	1,05	1,3
84	10	157	103	27	30	26	2,7	750	1211	0,94	1,05	1,35	1,4
85	18	206	136	35	37	33	3,5	500	1512	0,96	1,25	1,25	1,5
86	10	108	72	18	19	17	1,8	3000	Ст.2	1,00	1,10	1,45	1,1
87	13	195	131	27	35	31	3,2	600	1211	0,93	1,15	1,30	1,2
88	18	155	105	25	27	24	2,5	1300	1512	0,95	1,20	1,40	1,3
89	7	189	129	32	38	30	2,0	1000	Ст.2	1,00	1,05	1,30	1,4
90	17	83	57	13	14	13	1,3	1500	1211	0,94	1,25	1,15	1,5
91	3	110	70	16	22	19	2,0	1200	1512	0,96	1,10	1,05	1,1
92	8	84	54	10	12	14	3,5	750	Ст.2	1,00	1,15	1,25	1,2
93	15	131	85	20	25	21	2,3	500	1211	0,93	1,20	1,45	1,3
94	12	157	103	27	20	25	2,7	3000	1512	0,95	1,05	1,35	1,4
95	1	206	136	35	36	33	3,5	600	Ст.2	1,00	1,25	1,40	1,5
96	4	108	72	18	20	17	1,8	1300	1211	0,94	1,10	1,50	1,1
97	16	155	125	35	28	25	2,5	1500	Ст.2	1,00	1,20	1,05	1,3
98	7	189	129	30	32	29	2,0	1200	1211	0,93	1,05	1,25	1,4
99	12	131	85	33	25	22	2,3	1000	1512	0,96	1,20	1,10	1,3
100	8	83	57	12	14	13	3,3	1300	Ст.2	1,00	1,25	1,30	1,5

Таблиця 2.3 – Варіанти параметрів вантажопідйомних електромагнітів та електромагнітів реле

№ варіанта	Варіант за рис. 2.3	Розміри осердя, мм					Кількість витків	Марка сталі	Коеф. жорсткості, Н/м	Маса, кг
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	δ	<i>w</i>	–	<i>k</i>	<i>m</i>
1	1	100	50	20	15	10	2000	1211	10^4	–
2	1	150	70	10	10	15	1500	1512	10^4	–
3	2	120	60	30	10	10	1800	Ст.2	–	3
4	2	150	80	20	10	5	1800	1211	–	1,5
5	3	100	40	20	10	5	1500	1512	–	2
6	3	120	60	20	10	10	2000	Ст.2	–	2,5
7	4	180	50	25	5	5	2000	Ст.2	–	1
8	4	200	80	30	10	15	1800	1211	–	1,8
9	5	100	30	10	10	5	1500	1211	10^4	–
10	5	150	30	10	10	8	1500	Ст.2	10^4	–
11	6	160	40	10	15	12	2000	1512	–	4,5
12	6	140	40	20	10	14	1500	Ст.2	–	3,5
13	7	180	60	20	10	5	2000	Ст.2	–	2,5
14	7	220	90	40	10	5	1500	1211	–	1,6
15	8	200	40	20	5	2	2000	1211	–	1
16	8	200	80	40	10	10	1000	1512	–	3
17	9	240	60	20	5	10	2000	Ст.2	10^4	–
18	9	200	60	10	5	15	1500	1512	10^4	–
19	10	260	50	20	10	10	1500	1512	10^4	–
20	10	220	40	20	20	10	2000	Ст.2	10^4	–
21	11	300	80	10	20	10	2000	Ст.2	–	4
22	11	320	60	20	10	10	2000	Ст.2	–	2,5
23	12	260	60	10	10	5	1500	1211	–	3,5
24	12	280	50	20	10	4	1000	Ст.2	–	1,5
25	1	120	40	15	10	10	2000	1512	10^4	–
26	1	140	60	15	15	10	1500	Ст.2	10^4	–
27	2	140	80	10	15	5	1200	1211	–	2,5
28	2	120	70	20	20	5	1200	1512	–	1,5
29	3	110	30	30	10	4	1500	Ст.2	–	2
30	3	160	70	30	15	6	1800	Ст.2	–	1,5
31	4	150	40	10	6	4	1000	1211	–	1,5
32	4	160	40	30	15	4	1000	1512	–	2,5
33	5	110	15	10	10	5	1500	Ст.2	10^4	–

Продовження таблиці 2.3

№ варі- анта	Варіант за рис.2.3	Розміри осердя, мм					Кіль- кість витків	Марка сталі	Коеф. жорст- кості, Н/м	Ма- са, кг
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	δ	<i>w</i>	—	<i>k</i>	<i>m</i>
34	5	130	20	20	10	10	2000	1211	10^4	-
35	6	120	30	15	10	5	1500	1512	—	1
36	6	130	50	25	20	5	1200	Ст.2	—	1,5
37	7	160	40	20	30	10	1500	1211	—	2,5
38	7	160	60	10	10	5	1500	1512	—	1,5
39	8	180	50	10	5	10	2000	Ст.2	—	2
40	8	160	40	20	10	10	1000	1512	—	2
41	9	200	30	10	10	5	1000	1512	10^4	—
42	9	220	40	15	20	10	1500	Ст.2	10^4	—
43	10	240	60	15	10	5	1500	1211	10^4	—
44	10	230	25	25	15	10	2000	1512	10^4	—
45	11	250	60	20	20	5	1500	1512	—	1
46	11	270	80	10	10	10	2000	1211	—	2
47	12	200	40	10	10	10	2000	Ст.2	—	2,4
48	12	250	60	20	20	5	1500	1211	—	1,2
49	1	110	50	45	20	5	1800	1512	10^4	—
50	1	130	80	20	25	4	1500	Ст.2	10^4	—
51	2	140	40	20	12	6	2000	1211	—	2
52	2	180	60	35	16	3	1200	Ст.2	—	1,5
53	3	135	40	18	8	4	1500	1512	—	1,5
54	3	155	65	24	16	6	1800	1211	—	2
55	4	170	50	20	14	12	1800	1211	—	2,5
56	4	120	65	40	12	14	2000	Ст.2	—	2,5
57	5	120	18	10	18	4	1200	1512	10^4	—
58	5	140	24	20	12	12	2000	Ст.2	10^4	—
59	6	110	44	25	10	10	1700	1211	—	1,5
60	6	180	60	30	12	8	1500	1211	—	2
61	7	190	50	30	12	10	1200	1512	—	1,5
62	7	240	100	36	16	8	2000	Ст.2	—	2,7
63	8	150	50	16	14	6	2000	Ст.2	—	2
64	8	190	56	24	8	4	2000	1211	—	3
65	9	214	66	16	10	14	1500	1512	10^4	—
66	9	208	70	18	8	18	2000	1211	10^4	—
67	10	210	36	20	14	22	1800	Ст.2	10^4	—

Продовження таблиці 2.3

№ варі- анта	Варіант за рис.2.3	Розміри осердя, мм					Кіль- кість витків	Марка сталі	Коеф. жорст- кості, Н/м	Ма- са, кг
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	δ	<i>w</i>	—	<i>k</i>	<i>m</i>
68	10	216	48	16	14	18	2000	1512	10^4	—
69	11	306	70	22	18	16	2000	1211	—	3,5
70	11	284	74	26	16	8	2000	1512	—	2
71	12	230	72	12	10	8	2000	Ст.2	—	4
72	12	202	56	16	10	6	1800	1211	—	1,5
73	1	160	30	25	10	5	2000	1211	10^4	—
74	1	180	40	35	25	4	1000	Ст.2	10^4	—
75	2	110	50	15	18	8	1500	Ст.2	—	3
76	2	130	70	25	24	9	2000	1512	—	1,5
77	3	130	45	12	14	6	1500	1512	—	1,8
78	3	165	55	16	22	8	2400	1211	—	2
79	4	130	45	35	16	4	2000	1211	—	2,5
80	4	210	55	50	18	3	1800	Ст.2	—	1,5
81	5	145	25	10	12	5	1900	Ст.2	10^4	—
82	5	165	16	24	16	7	2000	1512	10^4	—
83	6	175	36	22	14	6	1800	1211	—	3
84	6	165	55	32	22	14	1400	Ст.2	—	2
85	7	200	64	24	24	4	1500	1512	—	1,5
86	7	210	82	50	28	5	1200	1211	—	1,2
87	8	155	58	32	10	8	1600	Ст.2	—	1
88	8	196	62	36	12	10	2200	1512	—	1,3
89	9	210	100	12	12	12	2000	1211	10^4	—
90	9	230	80	14	14	16	1800	Ст.2	10^4	—
91	10	230	30	18	16	20	2000	1512	10^4	—
92	10	226	46	14	12	15	1600	1211	10^4	—
93	11	310	64	12	24	10	1200	1211	—	1,5
94	11	330	58	16	30	12	1800	1512	—	2
95	12	240	62	10	12	10	2000	Ст.2	—	2
96	12	224	54	14	16	8	1600	Ст.2	—	2,5
97	11	280	65	14	20	10	1800	Ст.2	—	1,5
98	11	240	72	10	16	10	2000	1211	—	2,2
99	11	250	80	10	15	12	1500	Ст.2	—	1,8
100	11	260	90	15	12	15	2000	1211	—	2,5

Таблиця 2.4 – Варіанти параметрів дроселя зі знімним якорем

№ варі- анта	Величини, які виміряні при вилученому якорі			Кількість витків котушки	Величини, які виміряні при замкненому магнітопроводі		Кількість витків і напруга вимірювальної котушки	
	I_0 , А	U_0 , В	P_0 , Вт	w_K	I , А	P , Вт	w_B	U_B , В
1	1,0	10	5	2000	1,0	12	50	2
2	2,5	12	14	800	2,5	36	55	6
3	3,5	24	37	570	3,5	100	60	19
4	5,0	14	28	400	5,0	78	65	17
5	1,5	20	11	1330	1,5	32	70	8
6	4,0	18	25	500	4,0	75	75	22
7	3,0	28	26	670	3,0	81	80	27
8	2,0	16	9	1000	2,0	29	85	11
9	4,5	30	33	440	4,5	109	90	53
10	1,0	22	11	2000	1,0	28	50	5
11	2,5	26	31	800	2,5	81	55	16
12	3,5	10	15	570	3,5	40	60	7
13	5,0	12	24	400	5,0	67	65	14
14	1,5	24	13	1330	1,5	38	70	9
15	4,0	14	19	500	4,0	57	75	16
16	3,0	20	19	670	3,0	59	80	19
17	2,0	18	10	1000	2,0	32	85	12
18	4,5	28	30	440	4,5	99	90	47
19	1,0	16	8	2000	1,0	20	50	3
20	2,5	30	35	800	2,5	91	55	18
21	3,5	22	34	570	3,5	92	60	20
22	5,0	26	53	400	5,0	148	65	38
23	1,5	10	6	1330	1,5	17	70	4
24	4,0	12	16	500	4,0	48	75	13
25	3,0	24	22	670	3,0	68	80	21
26	2,0	14	8	1000	2,0	26	85	9
27	4,5	20	22	440	4,5	73	90	32

Продовження таблиці 2.4

№ варі- анта	Величини, які виміряні при вилученому якорі			Кількість витків катушки	Величини, які виміряні при замкненому магнітопроводі		Кількість витків і напруга вимірювальної катушки	
	I_0 , А	U_0 , В	P_0 , Вт		I , А	P , Вт	w_B	U_B , В
28	1,0	18	9	2000	1,0	22	50	4
29	2,5	28	33	800	2,5	86	55	16
30	3,5	16	25	570	3,5	68	60	14
31	5,0	30	61	400	5,0	171	65	42
32	1,5	22	12	1330	1,5	35	70	10
33	4,0	26	36	500	4,0	108	75	35
34	3,0	10	9	670	3,0	28	80	8
35	2,0	12	7	1000	2,0	22	85	7
36	4,5	24	26	440	4,5	86	90	36
37	1,0	14	7	2000	1,0	18	50	3
38	2,5	20	23	800	2,5	60	55	11
39	3,5	18	28	570	3,5	76	60	15
40	5,0	28	57	400	5,0	160	65	37
41	1,5	16	9	1330	1,5	26	70	7
42	4,0	30	41	500	4,0	123	75	39
43	3,0	22	20	670	3,0	62	80	23
44	2,0	26	14	1000	2,0	45	85	20
45	4,5	10	11	440	4,5	36	90	14
46	1,0	12	6	2000	1,0	15	50	2
47	2,5	24	28	800	2,5	73	55	12
48	3,5	14	21	570	3,5	57	60	11
49	5,0	20	41	400	5,0	115	65	25
50	1,5	18	10	1330	1,5	29	70	8
51	4,0	28	38	500	4,0	114	75	34
52	3,0	16	15	670	3,0	46	80	16
53	2,0	30	17	1000	2,0	54	85	22
54	4,5	22	24	440	4,5	79	90	40

Продовження таблиці 2.4

№ варі- анта	Величини, які виміряні при вилученому якорі			Кількість витків котушки	Величини, які виміряні при замкненому магнітопроводі		Кількість витків і напруга вимірювальної котушки	
	I_0 , А	U_0 , В	P_0 , Вт	w_K	I , А	P , Вт	w_B	U_B , В
55	1,0	26	13	2000	1,0	32	50	6
56	2,5	10	12	800	2,5	31	55	5
57	3,5	12	18	570	3,5	49	60	9
58	5,0	24	49	400	5,0	137	65	29
59	1,5	14	8	1330	1,5	23	70	6
60	4,0	20	27	500	4,0	81	75	23
61	3,0	18	17	670	3,0	53	80	17
62	2,0	28	15	1000	2,0	48	85	20
63	4,5	16	17	440	4,5	56	90	27
64	1,0	30	15	2000	1,0	38	50	6
65	2,5	22	26	800	2,5	68	55	13
66	3,5	26	40	570	3,5	108	60	25
67	5,0	10	20	400	5,0	56	65	11
68	1,5	12	7	1330	1,5	20	70	5
69	4,0	24	33	500	4,0	99	75	27
70	3,0	14	13	670	3,0	40	80	13
71	2,0	20	11	1000	2,0	35	85	13
72	4,5	18	20	440	4,5	66	90	29
73	1,0	28	14	2000	1,0	35	50	6
74	2,5	16	19	800	2,5	49	55	9
75	3,5	30	46	570	3,5	124	60	27
76	5,0	22	45	400	5,0	126	65	31
77	1,5	26	15	1330	1,5	44	70	12
78	4,0	10	14	500	4,0	42	75	11
79	3,0	12	11	670	3,0	34	80	10
80	2,0	24	13	1000	2,0	42	85	15
81	4,5	14	15	440	4,5	50	90	22
82	1,0	20	10	2000	1,0	25	50	4

Продовження таблиці 2.4

№ варі- анта	Величини, які виміряні при вилученому якорі			Кількість витків котушки	Величини, які виміряні при замкненому магнітопроводі		Число витків і напруга вимірювальної котушки	
	I_0 , А	U_0 , В	P_0 , Вт		I , А	P , Вт	w_B	U_B , В
83	2,5	18	21	800	2,5	55	55	10
84	3,5	28	43	570	3,5	116	60	24
85	5,0	16	33	400	5,0	92	65	22
86	1,5	30	17	1330	1,5	49	70	14
87	4,0	22	30	500	4,0	90	75	29
88	3,0	26	24	670	3,0	74	80	28
89	2,0	10	6	1000	2,0	19	85	6
90	4,5	12	13	440	4,5	43	90	18
91	4,5	12	13	440	4,5	43	90	18
92	1,0	24	12	2000	1,0	30	50	4
93	2,5	14	16	800	2,5	42	55	7
94	3,5	20	31	570	3,5	84	60	16
95	5,0	18	37	400	5,0	104	65	23
96	1,5	28	16	1330	1,5	46	70	12
97	4,0	16	22	500	4,0	66	75	20
98	2,0	22	12	1000	2,0	38	85	16
99	4,5	26	28	440	4,5	92	90	48
100	2,0	24	13	1000	2,0	42	85	15

Таблиця 2.5 – Варіанти параметрів однофазного трансформатора і його навантаження

№ варі- анта	Повна потуж- ність, кВА	Номінальні напруги обмоток, В		Струм НХ, %	Втрати потужності, Вт		Напруга КЗ, %	Коефіцієнт потужності активно- індуктивного навантаження
		ВН	НН		НХ	КЗ		
	$S_{\text{ном}}$	$U_{\text{ВНном}}$	$U_{\text{ННном}}$	i_x	P_0	P_K	u_K	$\cos \varphi_H$
1	0,25	660	230	17,6	5,9	17,8	7,3	0,90
2	0,25	380	230	17,5	5,9	17,6	7,2	0,85
3	0,50	660	230	15,9	10,4	32,1	6,7	0,90
4	0,50	380	230	15,9	10,2	31,8	6,6	0,85
5	0,63	660	230	14,3	11,3	36,0	6,0	0,90
6	0,63	380	230	14,2	11,1	35,5	6,0	0,85
7	1,00	660	230	12,6	15,1	49,9	5,4	0,90
8	1,00	380	230	12,5	14,9	49,1	5,3	0,85
9	1,60	660	230	10,9	20,0	68,0	4,6	0,90
10	1,60	380	230	10,8	19,6	66,8	4,6	0,85
11	2,50	660	230	9,1	25,0	87,5	3,9	0,90
12	2,50	380	230	9,0	24,4	85,6	3,8	0,85
13	4,00	660	230	8,3	34,8	125,2	3,5	0,90
14	4,00	380	230	8,2	33,9	122,1	3,5	0,85
15	6,30	660	230	9,6	60,3	223,2	4,1	0,90
16	6,30	380	230	9,5	59,0	218,2	4,0	0,85
17	10,00	660	230	9,2	87,5	332,5	3,9	0,90
18	10,00	380	230	9,1	85,4	324,6	3,8	0,85
19	16,00	660	230	9,1	130,6	509,4	3,8	0,90
20	16,00	380	230	8,9	127,3	496,7	3,7	0,85
21	0,25	660	133	17,5	5,9	17,6	7,2	0,85
22	0,25	380	133	17,4	5,7	17,2	7,1	0,80
23	0,25	220	133	17,3	5,6	16,9	7,0	0,75
24	0,50	660	133	15,9	10,2	31,8	6,6	0,85
25	0,50	380	133	15,7	10,0	31,0	6,5	0,80

Продовження таблиці 2.5

№ варі- анта	Повна потуж- ність, кВА	Номинальні напруги обмоток, В		Струм НХ, %	Втрати потужності, Вт		Напруга КЗ, %	Коефіцієнт потужності активно- індуктивного навантаження
		ВН	НН		НХ	КЗ		
	$S_{\text{ном}}$	$U_{\text{ВНном}}$	$U_{\text{ННном}}$	$i_{\text{х}}$	P_0	$P_{\text{к}}$	$u_{\text{к}}$	$\cos \varphi_{\text{н}}$
26	0,50	220	133	15,6	9,8	30,2	6,3	0,75
27	0,63	660	133	14,2	11,1	35,5	6,0	0,85
28	0,63	380	133	14,1	10,8	34,6	5,8	0,80
29	0,63	220	133	13,9	10,5	33,6	5,7	0,75
30	1,00	660	133	12,5	14,9	49,1	5,3	0,85
31	1,00	380	133	12,3	14,4	47,6	5,1	0,80
32	1,00	220	133	12,1	14,0	46,0	5,0	0,75
33	1,60	660	133	10,8	19,6	66,8	4,6	0,85
34	1,60	380	133	10,6	18,9	64,3	4,4	0,80
35	1,60	220	133	10,3	18,2	61,8	4,2	0,75
36	2,50	660	133	9,0	24,4	85,6	3,8	0,85
37	2,50	380	133	8,7	23,3	81,7	3,6	0,80
38	2,50	220	133	8,5	22,2	77,8	3,5	0,75
39	4,00	660	133	8,2	33,9	122,1	3,5	0,85
40	4,00	380	133	7,9	32,2	115,8	3,3	0,80
41	4,00	220	133	7,6	30,4	109,6	3,1	0,75
42	6,30	660	133	9,5	59,0	218,2	4,0	0,85
43	6,30	380	133	9,2	56,3	208,3	3,8	0,80
44	6,30	220	133	9,0	53,6	198,4	3,6	0,75
45	10,00	660	133	9,1	85,4	324,6	3,8	0,85
46	10,00	380	133	8,8	81,2	308,7	3,6	0,80
47	10,00	220	133	8,6	77,1	292,9	3,4	0,75
48	16,00	660	133	8,9	127,3	496,7	3,7	0,85
49	16,00	380	133	8,7	120,8	471,2	3,5	0,80
50	16,00	220	133	8,4	114,3	445,7	3,3	0,75
51	0,25	660	115	17,5	5,8	17,4	7,2	0,80

Продовження таблиці 2.5

№ варі- анта	Повна потуж- ність, кВА	Номинальні напруги обмоток, В		Струм НХ, %	Втрати потужності, Вт		Напруга КЗ, %	Коефіцієнт потужності активно- індуктивного навантаження
		ВН	НН		НХ	КЗ		
	$S_{\text{ном}}$	$U_{\text{ВНном}}$	$U_{\text{ННном}}$	$i_{\text{х}}$	P_0	$P_{\text{к}}$	$u_{\text{к}}$	$\cos \varphi_{\text{н}}$
52	0,25	380	115	17,3	5,6	16,9	7,0	0,75
53	0,25	220	115	17,1	5,4	16,3	6,7	0,70
54	0,50	660	115	15,8	10,1	31,4	6,6	0,80
55	0,50	380	115	15,6	9,8	30,2	6,3	0,75
56	0,50	220	115	15,4	9,4	29,1	6,1	0,70
57	0,63	660	115	14,1	11,0	35,0	5,9	0,80
58	0,63	380	115	13,9	10,5	33,6	5,7	0,75
59	0,63	220	115	13,6	10,0	32,2	5,4	0,70
60	1,00	660	115	12,4	14,7	48,3	5,2	0,80
61	1,00	380	115	12,1	14,0	46,0	5,0	0,75
62	1,00	220	115	11,8	13,3	43,7	4,7	0,70
63	1,60	660	115	10,7	19,3	65,5	4,5	0,80
64	1,60	380	115	10,3	18,2	61,8	4,2	0,75
65	1,60	220	115	10,0	17,1	58,1	4,0	0,70
66	2,50	660	115	8,8	23,9	83,6	3,7	0,80
67	2,50	380	115	8,5	22,2	77,8	3,5	0,75
68	2,50	220	115	8,1	20,6	71,9	3,2	0,70
69	4,00	660	115	8,0	33,0	119,0	3,4	0,80
70	4,00	380	115	7,6	30,4	109,6	3,1	0,75
71	4,00	220	115	7,2	27,8	100,2	2,9	0,70
72	6,30	660	115	9,3	57,6	213,3	3,9	0,80
73	6,30	380	115	9,0	53,6	198,4	3,6	0,75
74	6,30	220	115	8,6	49,6	183,5	3,4	0,70
75	10,00	660	115	9,0	83,3	316,7	3,7	0,80
76	10,00	380	115	8,6	77,1	292,9	3,4	0,75
77	10,00	220	115	8,1	70,8	269,2	3,2	0,70
78	16,00	660	115	8,8	124,1	483,9	3,6	0,80

Продовження таблиці 2.5

№ варі- анта	Повна потуж- ність, кВА	Номинальні напруги обмоток, В		Струм НХ, %	Втрати потужності, Вт		Напру- га КЗ, %	Коефіцієнт потужності активно- індуктивного навантаження
		ВН	НН		НХ	КЗ		
	$S_{\text{ном}}$	$U_{\text{ВНном}}$	$U_{\text{ННном}}$	$i_{\text{х}}$	P_0	$P_{\text{к}}$	$u_{\text{к}}$	$\cos \varphi_{\text{н}}$
79	16,00	380	115	8,4	114,3	445,7	3,3	0,75
80	16,00	220	115	8,0	104,5	407,5	3,1	0,70
81	0,25	660	26	17,4	5,7	17,2	7,1	0,75
82	0,25	380	26	17,2	5,5	16,5	6,8	0,70
83	0,25	220	26	16,9	5,3	15,7	6,5	0,65
84	0,50	660	26	15,7	10,0	31,0	6,5	0,75
85	0,50	380	26	15,5	9,5	29,5	6,2	0,70
86	0,50	220	26	15,2	9,0	28,0	5,9	0,65
87	0,63	660	26	14,1	10,8	34,6	5,8	0,75
88	0,63	380	26	13,7	10,2	32,6	5,5	0,70
89	0,63	220	26	13,4	9,6	30,7	5,2	0,65
90	1,00	660	26	12,3	14,4	47,6	5,1	0,75
91	1,00	380	26	11,9	13,5	44,5	4,8	0,70
92	1,00	220	26	11,5	12,6	41,4	4,5	0,65
93	1,60	660	26	10,6	18,9	64,3	4,4	0,75
94	1,60	380	26	10,1	17,5	59,3	4,1	0,70
95	1,60	220	26	9,6	16,0	54,4	3,8	0,65
96	2,50	660	26	8,7	23,3	81,7	3,6	0,75
97	2,50	380	26	8,2	21,1	73,9	3,3	0,70
98	2,50	220	26	7,6	18,9	66,1	3,0	0,65
99	4,00	660	26	7,9	32,2	115,8	3,3	0,75
100	4,00	660	115	8,0	33,0	119,0	3,4	0,80

Таблиця 2.6 – Дані двигуна постійного струму з паралельним збудженням

№ варіанта	Потужність, кВт	Напруга, В	Частота обертання, об/хв	ККД	Опір кола якоря, Ом	Опір обмотки збудження, Ом
	$P_{2\text{ном}}$	$U_{\text{ном}}$	$n_{\text{ном}}$	$\eta_{\text{ном}}$	R_a	R_z
1	4	220	900	0,723	1,60	191
2	3,15	220	750	0,693	2,38	255
3	2	220	450	0,576	3,16	199
4	4,25	220	730	0,680	1,61	110
5	3	220	475	0,603	3,14	139
6	3,55	220	425	0,601	2,67	117
7	15	220	1400	0,779	0,37	103
8	7,5	220	1000	0,760	0,79	175
9	6	220	875	0,740	0,80	85
10	4,25	220	580	0,650	1,84	105
11	11	220	1060	0,785	0,45	100
12	8,5	220	875	0,760	0,62	98
13	8	220	600	0,680	0,85	58
14	11	220	800	0,760	0,48	73
15	8,5	220	515	0,680	0,93	91
16	15	220	850	0,807	0,21	45
17	11	220	530	0,705	0,56	46
18	15	220	580	0,753	0,34	44
19	17	220	500	0,730	0,33	34
20	20	220	475	0,750	0,26	32
21	7,5	440	2120	0,871	1,54	1124
22	5,5	440	1450	0,814	3,06	964
23	4,25	440	975	0,740	5,93	971
24	3,14	440	730	0,690	9,64	994
25	7,5	440	1450	0,825	1,54	414
26	5,5	440	900	0,741	4,96	1304
27	4,25	440	690	0,674	6,62	438

Продовження таблиці 2.6

№ варі- анта	Потуж- ність, кВт	Напруга, В	Частота обертання, об/хв	ККД	Опір кола якоря, Ом	Опір обмотки збудження, Ом
	$P_{2\text{ном}}$	$U_{\text{ном}}$	$n_{\text{ном}}$	$\eta_{\text{ном}}$	R_a	R_z
28	10	440	1320	0,812	1,23	260
29	7,5	440	975	0,810	2,53	1045
30	5,5	440	690	0,708	5,24	671
31	30	440	3070	0,871	0,38	278
32	18,5	440	2180	0,850	0,63	264
33	15	440	1400	0,800	1,33	481
34	5,5	440	800	0,730	3,74	367
35	30	440	2300	0,863	0,42	278
36	22	440	1600	0,830	0,75	365
37	11	440	1090	0,800	1,53	352
38	8,5	440	800	0,750	2,77	459
39	23,6	440	1400	0,830	0,70	340
40	15	440	1030	0,810	1,15	341
41	11	440	825	0,780	1,72	325
42	30	440	1450	0,840	0,44	171
43	18,5	440	1090	0,820	0,65	164
44	15	440	730	0,761	1,32	191
45	22	440	1090	0,845	0,51	185
46	18,5	440	775	0,808	0,79	180
47	30	440	1030	0,855	0,36	160
48	22	440	775	0,813	0,64	157
49	45	440	1450	0,880	0,23	189
50	37	440	1150	0,850	0,32	136
51	26,5	440	775	0,780	0,61	99
52	45	440	1060	0,860	0,26	132
53	37	440	825	0,830	0,37	118
54	55	440	1000	0,849	0,25	136

Продовження таблиці 2.6

№ варі- анта	Потуж- ність, кВт	Напруга, В	Частота обертання, об/хв	ККД	Опір кола якоря, Ом	Опір обмотки збудження, Ом
	$P_{2\text{ном}}$	$U_{\text{ном}}$	$n_{\text{ном}}$	$\eta_{\text{ном}}$	R_a	R_z
55	75	440	1060	0,873	0,15	103
56	90	440	1000	0,900	0,09	96
57	110	440	1000	0,870	0,11	76
58	132	440	1000	0,870	0,08	49
59	160	440	1000	0,890	0,06	53
60	27	440	500	0,762	0,60	78
61	45	440	750	0,822	0,36	128
62	90	440	1500	0,886	0,11	90
63	37	440	500	0,786	0,56	147
64	55	440	750	0,833	0,29	143
65	110	440	1500	0,891	0,08	78
66	45	440	500	0,790	0,42	98
67	132	440	1500	0,891	0,05	18
68	50	440	500	0,776	0,43	99
69	75	440	750	0,840	0,20	108
70	160	440	1500	0,897	0,05	54
71	90	440	750	0,853	0,15	91
72	200	440	1500	0,903	0,04	43
73	75	440	500	0,822	0,23	100
74	110	440	750	0,867	0,11	76
75	250	440	1500	0,910	0,03	35
76	11	220	1000	0,830	0,24	73
77	22	440	600	0,840	0,56	246
78	45	220	750	0,870	0,04	23
79	55	440	500	0,880	0,12	103
80	10	220	1500	0,770	0,35	74
81	15	440	750	0,800	0,82	172

Продовження таблиці 2.6

№ варі- анта	Потуж- ність, кВт	Напруга, В	Частота обертання, об/хв	ККД	Опір кола якоря, Ом	Опір обмотки збудження, Ом
	$P_{2\text{ном}}$	$U_{\text{ном}}$	$n_{\text{ном}}$	$\eta_{\text{ном}}$	R_a	R_z
82	37	220	500	0,880	0,04	28
83	11	440	1000	0,830	0,82	292
84	22	220	1500	0,840	0,09	41
85	45	440	1000	0,870	0,07	74
86	55	220	600	0,880	0,04	25
87	10	440	750	0,770	1,87	372
88	15	220	500	0,800	0,27	86
89	37	440	1500	0,880	0,07	92
90	11	220	750	0,830	0,12	60
91	22	440	500	0,840	0,50	184
92	45	220	1000	0,870	0,03	18
93	55	440	1500	0,880	0,08	68
94	10	220	1000	0,770	0,37	74
95	15	440	600	0,800	0,96	344
96	37	220	750	0,880	0,04	28
97	11	440	500	0,830	1,22	486
98	22	220	1500	0,840	0,09	37
99	45	440	750	0,870	0,04	62
100	37	440	1150	0,850	0,32	136

Таблиця 2.7 – Дані двигуна постійного струму з послідовним збудженням

№ варі-анта	Потужність, кВт	Напруга, В	Частота обертання, об/хв	ККД	Опір кола якоря, Ом
	$P_{2\text{ном}}$	$U_{\text{ном}}$	$n_{\text{ном}}$	$\eta_{\text{ном}}$	$R_{\text{я}}$
1	45	220	1000	0,870	0,06
2	22	440	600	0,840	0,64
3	11	220	750	0,830	0,35
4	55	440	500	0,880	0,22
5	37	220	1500	0,880	0,08
6	15	440	750	0,800	1,07
7	10	220	500	0,770	0,46
8	45	440	1000	0,870	0,27
9	22	220	1500	0,840	0,17
10	11	440	1000	0,830	1,49
11	55	220	600	0,880	0,05
12	37	440	750	0,880	0,30
13	15	220	500	0,800	0,29
14	10	440	1500	0,770	1,99
15	45	220	750	0,870	0,07
16	22	440	500	0,840	0,62
17	11	220	1000	0,830	0,34
18	55	440	1500	0,880	0,21
19	37	220	1000	0,880	0,08
20	15	440	600	0,800	1,24
21	10	220	750	0,770	0,45
22	45	440	500	0,870	0,26
23	22	220	1500	0,840	0,17
24	11	440	750	0,830	1,44
25	4	220	900	0,723	1,45
26	3,15	220	750	0,693	1,96
27	2	220	450	0,576	3,55
28	4,25	220	730	0,680	1,49

Продовження таблиці 2.7

№ варі- анта	Потужність, кВт	Напруга, В	Частота обертання, об/хв	ККД	Опір кола якоря, Ом
	$P_{2\text{ном}}$	$U_{\text{ном}}$	$n_{\text{ном}}$	$\eta_{\text{ном}}$	$R_{\text{я}}$
29	3	220	475	0,603	2,32
30	3,55	220	425	0,601	1,96
31	15	220	1400	0,779	0,33
32	7,5	220	1000	0,760	0,71
33	6	220	875	0,740	0,93
34	4,25	220	580	0,650	1,55
35	11	220	1060	0,785	0,45
36	8,5	220	875	0,760	0,62
37	8	220	600	0,680	0,79
38	11	220	800	0,760	0,48
39	8,5	220	515	0,680	0,74
40	15	220	850	0,807	0,30
41	11	220	530	0,705	0,55
42	15	220	580	0,753	0,36
43	17	220	500	0,730	0,34
44	20	220	475	0,750	0,27
45	7,5	440	2120	0,871	1,74
46	5,5	440	1450	0,814	3,20
47	4,25	440	975	0,740	5,26
48	3,14	440	730	0,690	7,91
49	7,5	440	1450	0,825	2,24
50	5,5	440	900	0,741	4,05
51	4,25	440	690	0,674	6,01
52	10	440	1320	0,812	1,77
53	7,5	440	975	0,810	2,38
54	5,5	440	690	0,708	4,37
55	30	440	3070	0,871	0,44
56	18,5	440	2180	0,850	0,80

Продовження таблиці 2.7

№ варі- анта	Потужність, кВт	Напруга, В	Частота обертання, об/хв	ККД	Опір кола якоря, Ом
	$P_{2\text{ном}}$	$U_{\text{ном}}$	$n_{\text{ном}}$	$\eta_{\text{ном}}$	$R_{\text{я}}$
57	15	440	1400	0,800	1,24
58	5,5	440	800	0,730	4,16
59	30	440	2300	0,863	0,46
60	22	440	1600	0,830	0,75
61	11	440	1090	0,800	1,69
62	8,5	440	800	0,750	2,56
63	23,6	440	1400	0,830	0,69
64	15	440	1030	0,810	1,19
65	11	440	825	0,780	1,81
66	30	440	1450	0,840	0,52
67	18,5	440	1090	0,820	0,93
68	15	440	730	0,761	1,41
69	22	440	1090	0,845	0,69
70	18,5	440	775	0,808	0,97
71	30	440	1030	0,855	0,48
72	22	440	775	0,813	0,80
73	45	440	1450	0,880	0,27
74	37	440	1150	0,850	0,40
75	26,5	440	775	0,780	0,75
76	45	440	1060	0,860	0,31
77	37	440	825	0,830	0,44
78	55	440	1000	0,849	0,27
79	75	440	1060	0,873	0,17
80	90	440	1000	0,900	0,12
81	110	440	1000	0,870	0,12
82	132	440	1000	0,870	0,10
83	160	440	1000	0,890	0,07
84	27	440	500	0,762	0,78

Продовження таблиці 2.7

№ варі- анта	Потужність, кВт	Напруга, В	Частота обертання, об/хв	ККД	Опір кола якоря, Ом
	$P_{2\text{ном}}$	$U_{\text{ном}}$	$n_{\text{ном}}$	$\eta_{\text{ном}}$	$R_{\text{я}}$
85	45	440	750	0,822	0,38
86	90	440	1500	0,886	0,13
87	37	440	500	0,786	0,53
88	55	440	750	0,833	0,29
89	110	440	1500	0,891	0,10
90	45	440	500	0,790	0,43
91	132	440	1500	0,891	0,09
92	50	440	500	0,776	0,40
93	75	440	750	0,840	0,21
94	160	440	1500	0,897	0,07
95	90	440	750	0,853	0,16
96	200	440	1500	0,903	0,05
97	75	440	500	0,822	0,23
98	110	440	750	0,867	0,12
99	250	440	1500	0,910	0,04
100	55	440	500	0,880	0,22

Таблиця 2.8 – Дані трифазного асинхронного двигуна

№ варіанта	Схема з'єднання обмотки статора	Потужність, кВт	Кількість пар полюсів	Номінальне ковзання	$\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$	ККД	Коефіцієнт потужності
		$P_{2\text{ном}}$	p	$s_{\text{ном}}$	λ_M	m_I	$\eta_{\text{ном}}$	$\cos\varphi_{1\text{ном}}$
1	Т	0,09	1	0,086	2,2	5,0	0,600	0,700
2	З	0,12	1	0,097	2,2	5,0	0,630	0,700
3	Т	0,18	1	0,080	2,2	5,0	0,660	0,760
4	З	0,25	1	0,080	2,2	5,0	0,680	0,770
5	Т	0,37	1	0,083	2,2	5,0	0,700	0,860
6	З	0,55	1	0,085	2,2	5,0	0,730	0,860
7	Т	0,75	1	0,053	2,2	5,5	0,770	0,870
8	З	1,1	1	0,063	2,2	5,5	0,775	0,870
9	Т	1,5	1	0,050	2,2	6,5	0,810	0,850
10	З	2,2	1	0,050	2,2	6,5	0,830	0,870
11	Т	3	1	0,054	2,2	6,5	0,845	0,880
12	З	4	1	0,040	2,2	7,5	0,865	0,890
13	Т	5,5	1	0,040	2,2	7,5	0,875	0,910
14	З	7,5	1	0,026	2,2	7,5	0,875	0,880
15	Т	11	1	0,031	2,2	7,5	0,880	0,900
16	З	15	1	0,023	2,2	7,5	0,880	0,910
17	Т	18,5	1	0,023	2,2	7,5	0,885	0,920
18	З	22	1	0,020	2,2	7,5	0,885	0,910
19	Т	30	1	0,019	2,2	7,5	0,905	0,900
20	З	37	1	0,019	2,2	7,5	0,900	0,890
21	Т	45	1	0,018	2,2	7,5	0,910	0,900
22	З	55	1	0,021	2,2	7,5	0,910	0,920
23	Т	75	1	0,014	2,2	7,5	0,910	0,890
24	З	90	1	0,014	2,2	7,5	0,920	0,900
25	Т	110	1	0,020	2,2	7,0	0,910	0,890
26	З	132	1	0,020	2,2	7,0	0,915	0,890
27	Т	160	1	0,019	1,9	7,0	0,920	0,900

Продовження таблиці 2.8

№ варі- анта	Схема з'єднан- ня об- мотки статора	Потуж- ність, кВт	Кіль- кість пар по- люсів	Номіна- льне ковзання	$\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$	ККД	Коефі- цієнт потуж- ності
		$P_{2\text{ном}}$	p	$S_{\text{ном}}$	λ_M	m_I	$\eta_{\text{ном}}$	$\cos\varphi_{1\text{ном}}$
28	З	200	1	0,019	1,9	7,0	0,925	0,900
29	Т	250	1	0,019	1,9	7,0	0,925	0,900
30	З	315	1	0,020	1,9	7,0	0,930	0,910
31	Т	0,06	2	0,081	2,2	5,0	0,500	0,600
32	З	0,09	2	0,086	2,2	5,0	0,550	0,600
33	Т	0,12	2	0,080	2,2	5,0	0,630	0,660
34	З	0,18	2	0,087	2,2	5,0	0,640	0,640
35	Т	0,25	2	0,080	2,2	5,0	0,680	0,650
36	З	0,37	2	0,090	2,2	5,0	0,680	0,690
37	Т	0,55	2	0,087	2,2	4,5	0,705	0,700
38	З	0,75	2	0,087	2,2	4,5	0,720	0,730
39	Т	1,1	2	0,067	2,2	5,0	0,750	0,810
40	З	1,5	2	0,067	2,2	5,0	0,770	0,830
41	Т	2,2	2	0,054	2,2	6,0	0,800	0,830
42	З	3	2	0,053	2,2	6,5	0,820	0,830
43	Т	4	2	0,053	2,2	6,0	0,840	0,840
44	З	5,5	2	0,050	2,2	7,0	0,855	0,860
45	Т	7,5	2	0,030	2,2	7,5	0,875	0,860
46	З	11	2	0,028	2,2	7,5	0,875	0,870
47	Т	15	2	0,027	2,2	7,0	0,890	0,880
48	З	18,5	2	0,027	2,2	7,0	0,900	0,880
49	Т	22	2	0,020	2,2	7,0	0,900	0,900
50	З	30	2	0,020	2,2	7,0	0,910	0,890
51	Т	37	2	0,017	2,2	7,0	0,910	0,900
52	З	45	2	0,018	2,2	7,0	0,920	0,900
53	Т	55	2	0,020	2,2	7,0	0,925	0,900
54	З	75	2	0,014	2,2	7,0	0,930	0,900
55	Т	90	2	0,013	2,2	7,0	0,930	0,910

Продовження таблиці 2.8

№ варі- анта	Схема з'єднан- ня об- мотки статора	Потуж- ність, кВт	Кіль- кість пар по- люсів	Номіна- льне ковзання	$\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$	ККД	Коефі- цієнт потуж- ності
		$P_{2\text{ном}}$	p	$s_{\text{ном}}$	λ_M	m_I	$\eta_{\text{ном}}$	$\cos\varphi_{1\text{ном}}$
56	З	110	2	0,023	2,0	7,0	0,925	0,900
57	Т	132	2	0,023	2,0	6,5	0,930	0,900
58	З	160	2	0,020	1,9	7,0	0,935	0,910
59	Т	200	2	0,017	1,9	7,0	0,940	0,920
60	З	250	2	0,017	1,9	7,0	0,945	0,920
61	Т	315	2	0,017	1,9	7,0	0,945	0,920
62	З	0,18	3	0,115	2,2	4,0	0,560	0,620
63	Т	0,25	3	0,108	2,2	4,0	0,590	0,620
64	З	0,37	3	0,080	2,2	4,0	0,645	0,690
65	Т	0,55	3	0,080	2,2	4,0	0,675	0,710
66	З	0,75	3	0,080	2,2	4,0	0,690	0,740
67	Т	1,1	3	0,080	2,2	4,0	0,740	0,740
68	З	1,5	3	0,064	2,2	5,5	0,750	0,740
69	Т	2,2	3	0,051	2,2	5,5	0,810	0,730
70	З	3	3	0,055	2,2	6,0	0,810	0,760
71	Т	4	3	0,051	2,2	6,0	0,820	0,810
72	З	5,5	3	0,041	2,2	7,0	0,850	0,800
73	Т	7,5	3	0,032	2,2	7,0	0,855	0,810
74	З	11	3	0,030	2,0	6,0	0,860	0,860
75	Т	15	3	0,030	2,0	6,0	0,875	0,870
76	З	18,5	3	0,027	2,0	6,0	0,880	0,870
77	Т	22	3	0,025	2,0	6,5	0,900	0,900
78	З	30	3	0,023	2,0	6,5	0,905	0,900
79	Т	37	3	0,020	2,0	6,5	0,910	0,890
80	З	45	3	0,015	2,0	7,0	0,915	0,890
81	Т	55	3	0,015	2,0	7,0	0,920	0,880
82	З	75	3	0,020	1,9	7,0	0,920	0,890
83	Т	90	3	0,020	1,9	7,0	0,925	0,890

Продовження таблиці 2.8

№ варіанта	Схема з'єднання обмотки статора	Потужність, кВт	Кількість пар полюсів	Номінальне ковзання	$\frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$	$\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$	ККД	Коефіцієнт потужності
		$P_{2\text{ном}}$	p	$s_{\text{ном}}$	λ_M	m_I	$\eta_{\text{ном}}$	$\cos\varphi_{1\text{ном}}$
84	З	110	3	0,020	1,9	7,0	0,930	0,900
85	Т	132	3	0,020	1,9	7,0	0,935	0,900
86	З	160	3	0,018	1,9	7,0	0,935	0,900
87	Т	200	3	0,018	1,9	7,0	0,940	0,900
88	З	0,25	4	0,093	1,7	3,5	0,560	0,650
89	Т	0,37	4	0,100	1,7	3,5	0,615	0,650
90	З	0,55	4	0,100	1,7	3,5	0,640	0,650
91	Т	0,75	4	0,060	1,7	3,5	0,680	0,620
92	З	1,1	4	0,070	1,7	3,5	0,700	0,680
93	Т	1,5	4	0,070	1,7	5,5	0,740	0,650
94	З	2,2	4	0,060	2,2	6,0	0,765	0,710
95	Т	3	4	0,065	2,2	6,0	0,790	0,740
96	З	4	4	0,041	2,2	6,0	0,830	0,700
97	Т	5,5	4	0,045	2,2	6,0	0,830	0,740
98	З	7,5	4	0,027	2,2	6,0	0,860	0,750
99	Т	11	4	0,027	2,2	6,0	0,870	0,750
100	Т	18,5	1	0,023	2,2	7,5	0,885	0,920

2.2. Основні теоретичні положення для розв'язання задач на розрахунок магнітних кіл

В електротехнічних пристроях перетворення механічної енергії в електричну і навпаки відбувається за допомогою магнітного поля, що відображено в законах електромагнітної індукції і Ампера. Магнітне поле збуджується обмотками зі струмом або постійними магнітами. Для посилення цього поля і концентрації в заданих активних зонах використовуються феромагнітні осердя.

Параметри, що характеризують магнітне поле

Магнітне поле прийнято зображати силовими лініями, направленими від північного до південного полюса постійного магніту (рис. 2.11). Ці силові лінії замкнені і являють собою пружні, натягнуті, нерозривні нитки, між якими діє боковий тиск, внаслідок чого вони не перетинаються друг з другом.

Магнітний потік Φ характеризує число силових ліній магнітного поля, які пронизують поверхню площею S (рис. 2.11). Магнітний потік Φ вимірюється в веберах [Вб] і дорівнює

$$\Phi = BS \cos \alpha, \quad (2.1)$$

де α – кут між нормаллю до поверхні S і напрямком силових ліній; B – індукція магнітного поля.

Індукція магнітного поля B – векторна величина, яка характеризує інтенсивність магнітного поля у заданій точці простору. Її напрямок співпадає з дотичною до силової лінії (рис. 2.11)

$$B = \frac{\Delta \Phi}{\Delta S}. \quad (2.2)$$

Індукція B вимірюється в теслах [Тл]=[Вб/м²]. Якщо магнітне поле рівномірне, то

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (2.3)$$

Потік вектора індукції магнітного поля через замкнену поверхню до-

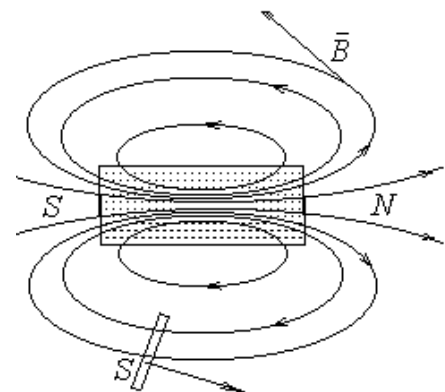


Рисунок 2.11

рівнює нулю

$$\Phi = \oint_S \vec{B} d\vec{s} = 0. \quad (2.4)$$

Це твердження говорить, що силові лінії завжди є замкненими і, таким чином, формулюється принцип неперервності силових ліній.

Напруженість магнітного поля H – векторна величина, яка співпадає з напрямком індукції і характеризує інтенсивність магнітного поля у вакуумі (за відсутністю магнітних речовин). Напруженість вимірюється в [А/м]. Індукція пов'язана з напруженістю магнітного поля співвідношенням

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H}, \quad (2.5)$$

де μ_a – абсолютна магнітна проникність середовища.

Вводять поняття відносної магнітної проникності

$$\mu_r = \mu_a / \mu_0, \quad (2.6)$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала, дорівнює абсолютній магнітній проникності у вакуумі.

Таким чином, у вакуумі індукція і напруженість магнітного поля мають лінійну залежність

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}. \quad (2.7)$$

Магнітне поле завжди утворюється електричним струмом. Електричний струм і його магнітне поле існують одночасно. У постійних магнітах його створюють мікроструми.

Класифікація магнітних кіл

Сукупність елементів, що збуджують і проводять магнітне поле, можна розглядати як *магнітне коло*, якщо контури замикання силових ліній поля очевидні і це поле сконцентровано в межах локальних областей простору, що явно виділяються. Для опису процесів в магнітних колах базовими величинами являються магнітний потік Φ , магніторухійна сила (МРС) F і магнітна напруга U_m .

До способів, що застосовуються при розрахунку магнітних кіл, відноситься підрозділ магнітопроводу по контурам замикання основних силових ліній I на однорідні ділянки. Ділянка вважається однорідною, якщо на її довжині l_k можна прийняти напруженість магнітного поля постійною, тобто $H_k = \text{const}$, де k – номер ділянки. Передбачається також, що по пло-

щі поперечного перерізу S_k поле розподілено рівномірно і вектори $\vec{H}_k$ і $\vec{B}_k$ направлені паралельно довжині l_k і перпендикулярно S_k . Таким чином, магнітна індукція на однорідній ділянці пов'язана з її магнітним потоком найбільш простою формулою: $B_k = \Phi_k / S_k$.

Для неферомагнітних ділянок – проміжків відносна магнітна проникність $\mu_r \approx 1$ і магнітні властивості характеризуються лінійною залежністю $B_k = \mu_0 H_k$. Для феромагнітних осердь $\mu_r \gg 1$ і ні є постійною величиною. Тому тут використовуються криві намагнічування – залежності $B(H)$ або $H(B)$ для конкретних феромагнітних матеріалів. На рис. 2.12 подані криві намагнічування для литої сталі марки Ст.2 і двох марок листової електро-технічної сталі – 1211 і 1512.

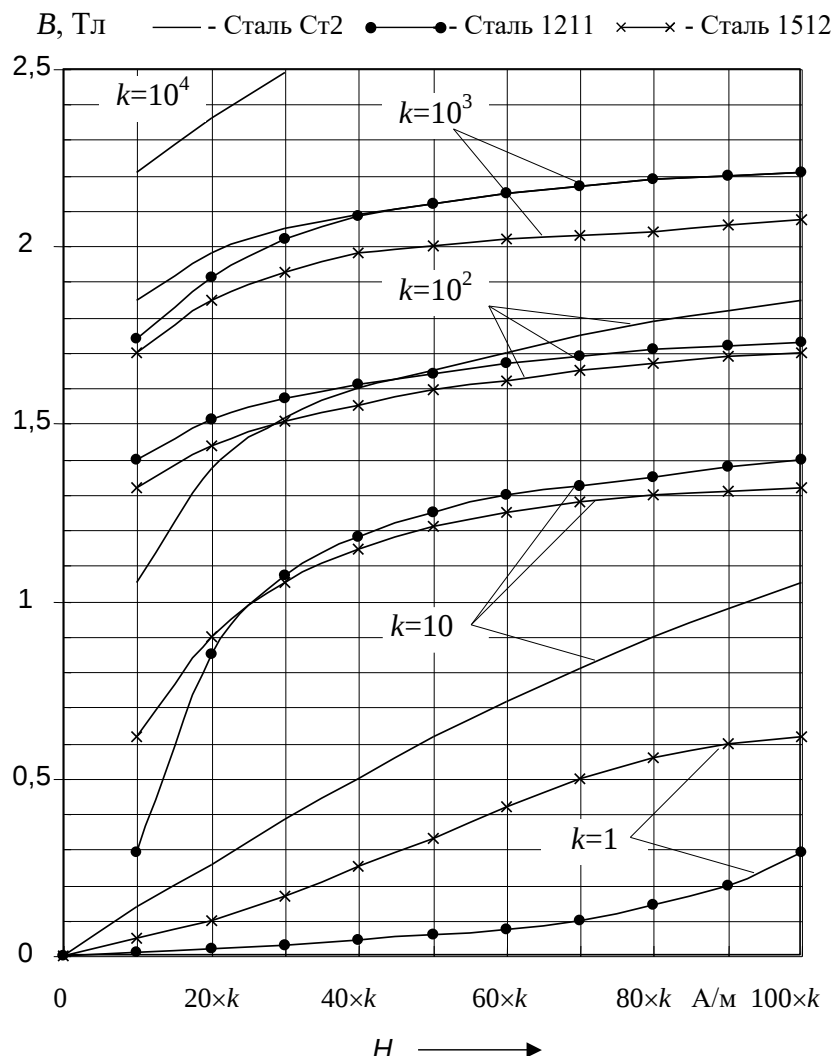


Рисунок 2.12

Магнітні кола класифікуються за способом збудження магнітного потоку, кількості обмоток і контурів замикання основного магнітного по-

току: нерозгалужені (рис. 2.13, а, б) або розгалужені (рис. 2.13, в); по структурі магнітопроводу – однорідні (складаються із однієї однорідної ділянки) (рис. 2.13, а) і неоднорідні (рис. 2.13, б, в).

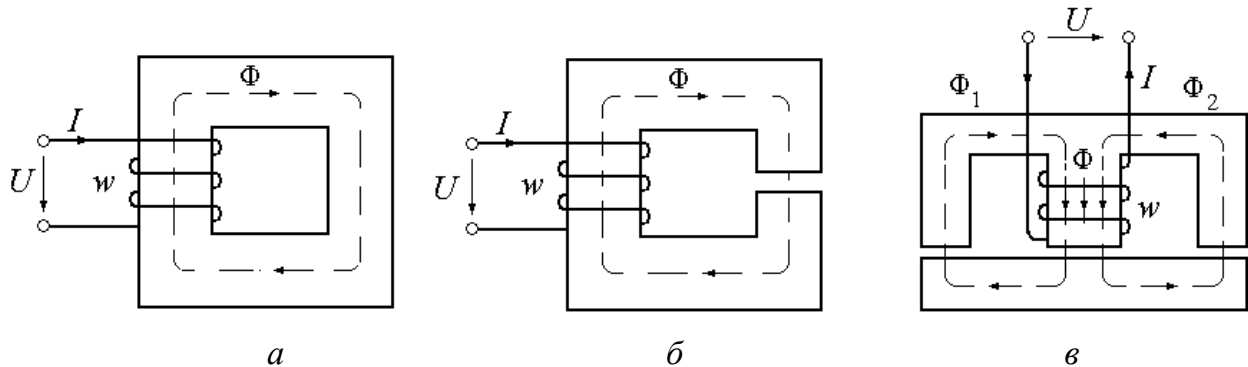


Рисунок 2.13

До однорідних відносяться кола, напруженість магнітного поля в яких по всій довжині магнітопроводу залишається незмінною. До неоднорідних відносяться магнітні кола, які мають по своїй довжині непостійну напруженість, що навіть при одному магнітному потоці обумовлюється різними площами поперечного перерізу та абсолютною магнітною проникливістю окремих ділянок кола. Неоднорідними являються також магнітні кола, які мають поля розсіювання. Зовнішніми признаками, за якими можна судити про однорідність ділянки магнітного кола, є відсутність в її межах відгалужень магнітного потоку, постійність площі перерізу S_k і однорідність матеріалу за магнітними властивостями.

Закони магнітних кіл

Електромагнітною індукцією називають явище збудження ЕРС у контурі при зміні магнітного потоку, зчепленого з ним. Індукована ЕРС за *законом електромагнітної індукції* дорівнює швидкості потоку, зчепленого з контуром

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.8)$$

Знак «мінус» відображає *правило Ленца* – струм, створюваний у замкненому контурі індукованої ЕРС, завжди має такий напрям, що магнітний потік струму протидіє зміні магнітного потоку зовнішнього поля, яке його спричинило.

Якщо провідник переміщується у постійному магнітному полі, то індукована ЕРС за законом електромагнітної індукції дорівнює

$$E = BlV \sin \alpha, \quad (2.9)$$

де l – активна довжина провідника (рис. 2.14); V – швидкість переміщення провідника; B – індукція магнітного поля; α – кут між напрямком силових ліній і напрямком переміщення провідника.

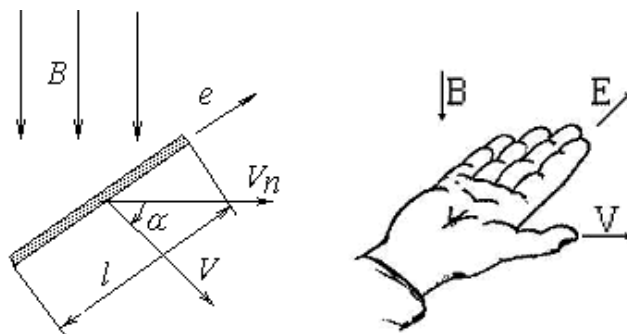


Рисунок 2.14

Напряг індукованої в провіднику ЕРС визначається за *правилом правої руки* (рис. 2.4).

Силова дія магнітного поля на провідник зі струмом визначається *законом Ампера*, який лежить в основі розрахунків перетворення електричної енергії в механічну в електродвигунах. За законом Ампера, якщо провідник зі струмом I знаходиться у магнітному полі з індукцією B , то на провідник довжиною l діє механічна сила

$$F = BlI \sin \alpha, \quad (2.10)$$

де α – кут між напрямком силових ліній і напрямком провідника (рис. 2.15).

Напряг електромеханічної сили F завжди перпендикулярний до провідника зі струмом і магнітним силовим лініям. На практиці цей напрямок визначається за *правилом лівої руки* (рис. 2.15).

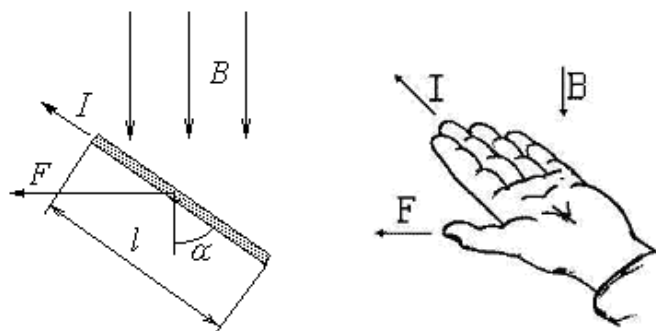


Рисунок 2.15

Закон повного струму встановлює зв'язок між напругою магнітного поля і струмом, що створив це поле: лінійний інтеграл від вектора

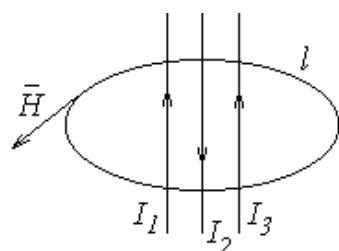


Рисунок 2.16

напруженості магнітного поля вздовж будь-якого замкненого контуру l , який пронизують провідники зі струмом, дорівнює повному струму, що охоплює даний контур (рис. 2.16). Повний струм – алгебраїчна сума струмів, охоплених замкненим контуром.

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \sum_{k=1}^N I_k, \quad (2.11)$$

де N – кількість струмів.

Між електричними і магнітними колами можна встановити певні аналогії, які подані у табл. 2.9

Таблиця 2.9 – Аналогія між електричними і магнітними колами

Електричні величини	Позначення і вираз		Магнітні величини	Позначення і вираз
Струм	I	–	Потік	Φ
ЕРС	E	–	МРС	$F = wI$
Опір	$R = \rho \frac{l}{S}$	–	Опір	$R_M = \frac{l}{\mu_a S}$
Напруга	$U = RI$	–	Магнітна напруга	$U_M = H_k l_k = \Phi R_{M_k}$
Питома провідність	$\gamma = \frac{1}{\rho}$	–	Магнітна проникність	μ_a

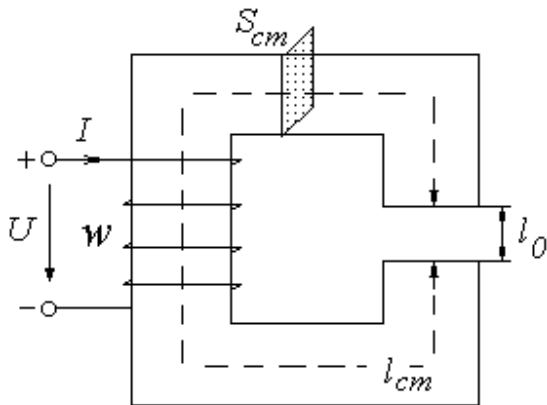


Рисунок 2.17

Розглянемо котушку зі сталевим осердям, що представляють собою нерозгалужене неоднорідне магнітне коло з постійною МРС $F = wI$ (рис. 2.17), яке має $l_{ст}$ – довжину силової лінії на протязі всієї ділянки у сталі; l_0 – довжину повітряного проміжку; $S_{ст}$ – площу поперечного перерізу сталевих осердя; w – число витків обмотки.

Закон Ома для магнітного кола зв'язує магнітний потік з магнітною напругою однорідної ділянки або з МРС обмотки однорідного магнітного кола

$$\Phi = \frac{Iw}{R_{M_{ст}} + R_{M_0}} = \frac{Iw}{\sum R_M}, \quad (2.12)$$

де $\sum R_M$ – сумарний магнітний опір [Гн^{-1}];

$$R_{M_{\text{ст}}} = \frac{l_{\text{ст}}}{\mu_{\text{ст}} S_{\text{ст}}} - \text{магнітний опір сталевий ділянки}; \quad (2.13)$$

$$R_{M_0} = \frac{l_0}{\mu_0 S_0} - \text{магнітний опір повітряного проміжку}. \quad (2.14)$$

1-й закон Кірхгофа для магнітного кола – алгебраїчна сума магнітних потоків віток розгалуженого магнітного кола у вузлі дорівнює нулю

$$\sum_{k=1}^M \Phi_k = 0, \quad (2.15)$$

де M – кількість віток розгалуженого магнітного кола у вузлі.

Так для кола, зображеного на рис. 2.13, в можна записати

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2. \quad (2.16)$$

2-й закон Кірхгофа для магнітного кола – алгебраїчна сума падінь магнітної напруги U_M на k ділянках замкненого контуру магнітного кола дорівнює алгебраїчній сумі МРС F , діючих у цьому ж контурі

$$\sum_{k=1}^n U_{Mk} = \sum_{k=1}^m F_k, \quad (2.17)$$

де n – кількість ділянок замкненого контуру магнітного кола;

m – кількість МРС, діючих в контурі магнітного кола.

Крім основних магнітних потоків, що замикаються по головним контурам магнітопроводу, в уточнених розрахунках магнітних кіл враховуються також відносно невеликі потоки розсіювання. Приклад розподілу повного потоку Φ_{Π} у котушці зі сталевим осердям на основний потік Φ і потік розсіювання $\Phi_{\text{роз}}$ подано на рис. 2.18.

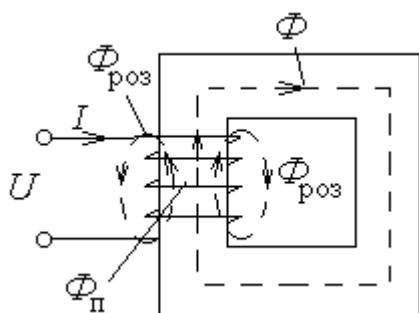


Рисунок 2.18

Потоки розсіювання враховуються на ділянках, укладених усередині обмоток, де приймається

$$\Phi_{\Pi} = \Phi + \Phi_{\text{роз}} = k_{\text{роз}} \Phi, \quad (2.18)$$

тут $k_{\text{роз}}$ – коефіцієнт розсіювання, який визначається з урахуванням досліду детального розрахунку магнітних полів і може знаходитися в межах 1...1,5.

Якщо ділянка магнітного кола знаходиться на шихтованій частині магнітопроводу, набраного із листової сталі, то замість габаритної площі

поперечного перерізу S_0 враховується безпосередньо сумарна площа перерізу листів $S_k = k_3 S_0$, де k_3 – коефіцієнт заповнення осердя сталлю (при товщині листів $\Delta = 0,2 \dots 0,5$ мм k_3 може знаходитися в межах $0,83 \dots 0,96$).

Для проміжків у магнітопроводі площа поперечного перерізу S_k береться приблизно рівною габаритній площі S_0 меншого із прилягаючих торців феромагнітного осердя.

Принцип розрахунку магнітних кіл постійного струму

Основною задачею розрахунку магнітного кола вважають пряму з наступним формулюванням.

Задано: магнітний потік Φ , розміри магнітопроводу, матеріал осердя, марка сталі, крива намагнічування $B(H)$.

Знайти: $F = wI$ – МРС обмотки, яка необхідна для створення цього магнітного потоку Φ .

Послідовність розрахунку:

1) коло розбивається на ділянки з таким розрахунком, щоб індукція і напруженість магнітного поля на протязі ділянки залишались незмінними. За конструктивними розмірами магнітопроводу визначаються довжина l_k і площа поперечного перерізу кожної ділянки S_k . Вважаємо, що потік Φ на кожній ділянці однаковий.

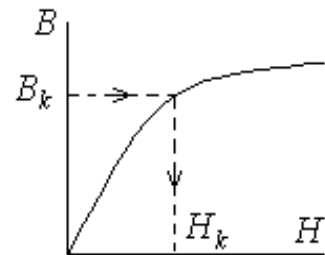


Рисунок 2.19

2) за заданим магнітним потоком Φ визначаємо індукцію на кожній ділянці $B_k = \Phi / S_k$.

3) потім, знаючи індукцію B_k , по кривій намагнічування визначаємо напруженість H_k для феромагнітних ділянок (рис. 2.19). Для немагнітних ділянок напруженість розраховуємо за формулою $H_k = B_k / \mu_0$.

4) знаючи H_k , за законом повного струму знаходимо МРС

$$F = Iw = \sum_{k=1}^n H_k l_k,$$

а потім знаходимо і струм

$$I = \frac{F}{w}.$$

Магнітні кола зі змінною магніторушійною силою

Магнітні кола змінного магнітного потоку потребують особистого підходу. Із них найменш складний для розрахунку, але практично широко розповсюджений, випадок синусоїдного характеру магнітного потоку

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t, \quad (2.19)$$

де Φ_m – амплітуда; $\omega = 2\pi f$ – кутова частота; t – час.

Цей випадок відповідає синусоїдній електричній напрузі джерела, що живить обмотки магнітної системи. Функція струму $i(t)$ також вважається синусоїдною, хоча при наявності феромагнітних осердь вона несинусоїдна і лише представляється еквівалентною синусоїдою. Відповідно змінюються за синусоїдним законом також величини F , U_m , H і B .

У часі ці магнітні величини можуть бути зсунуті одна відносно другої по фазі. Перша причина цього – фазові зсуви струмів різних обмоток, друга – магнітні втрати потужності у феромагнітних осердях. Тому замість постійних значень магнітних величин в магнітних колах синусоїдного магнітного потоку використовуються комплексні значення, наприклад, для потоку, МРС і магнітної напруги:

$$\underline{\Phi} = \Phi e^{j\psi_\Phi}; \quad \underline{F} = F e^{j\psi_F}; \quad \underline{U}_m = U_m e^{j\psi_{U_m}}, \quad (2.20)$$

де Φ , F , U_m – діючі значення; ψ_Φ , ψ_F , ψ_{U_m} – початкові фази магнітного потоку, МРС, магнітної напруги.

Однорідні ділянки магнітного кола тепер представляються комплексними магнітними опорами

$$\underline{Z}_\mu = R_\mu + jX_\mu, \quad (2.21)$$

де R_μ , X_μ – відповідно активний і реактивний опори ділянки:

$$R_\mu = \rho_{\mu R} \frac{l_k}{S_k};$$

$$X_\mu = \rho_{\mu X} \frac{l_k}{S_k},$$

l_k , S_k – відповідно довжина і площа поперечного перерізу ділянки.

Питомі магнітні опори $\rho_{\mu R}$ і $\rho_{\mu X}$ залежать від частоти f магнітного поля і повинні визначатися експериментально, як і сімейства петель гісте-

резису, для кожної конкретної електротехнічної сталі. На неферромагнітних ділянках магнітного кола присутній тільки R_μ , визначення якого таке ж, як для неферромагнетиків $\rho_{\mu R} = \mu_0^{-1}$.

Закон Ома, 1-й і 2-й закони Кірхгофа для магнітного кола синусоїдного магнітного потоку справедливі для комплексних величин, а саме:

$$\text{Закон Ома } \underline{U}_m = \underline{Z}_\mu \underline{\Phi}; \quad \underline{\Phi} = \frac{\underline{F}}{\underline{Z}_\mu}; \quad (2.22)$$

$$\text{1-й закон Кірхгофа } \sum_{k=1}^p \underline{\Phi}_k = 0; \quad (2.23)$$

$$\text{2-й закон Кірхгофа } \sum_{k=1}^n \underline{H}_k l_k = \sum_{k=1}^m \underline{F}_k \text{ або } \sum_{k=1}^n \underline{Z}_{\mu k} \underline{\Phi}_k = \sum_{k=1}^m \underline{F}_k, \quad (2.24)$$

де p – кількість стрижнів осердь, що сходяться у розгалуженні; n – кількість однорідних ділянок; m – кількість обмоток.

Втрати потужності в магнітних колах і рівняння електричної рівноваги в їх обмотках

Змінна напруга $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ приводить до відповідної зміни (хоча, можливо, і з деяким відхиленням від синусоїд) величин i , Φ , $\Phi_{\text{роз}}$, e і $e_{\text{роз}}$. Нові величини ЕДС, що з'явилися, e і $e_{\text{роз}}$ спричинені (відповідно з законом електромагнітної індукції) магнітними потоками Φ і $\Phi_{\text{роз}}$, що змінюються. Діюче значення ЕРС прийнято визначати наступним чином

$$E = 4,44 f \omega \Phi_m. \quad (2.25)$$

Основне рівняння рівноваги напруги має вигляд

$$\underline{U} = -\underline{E} - \underline{E}_{\text{роз}} + \underline{I}R, \quad (2.26)$$

де $\underline{E}_{\text{роз}} = -jX_{L_{\text{роз}}} \underline{I}$ – ЕРС розсіювання; $X_{L_{\text{роз}}}$ – індуктивний опір обмотки, спричинений потоком розсіювання.

Це рівняння можна записати у спрощеному вигляді

$$\underline{U} = -\underline{E} + \underline{Z}\underline{I}, \quad (2.27)$$

де $\underline{Z} = R + jX_{\text{роз}}$ – повний опір котушки; R – активний опір котушки.

Представляючи $\underline{U}$, $\underline{I}$, $\underline{E}$ і $\underline{E}_{\text{роз}}$ комплексними значеннями або векторами, треба пам'ятати, що $\underline{E}$ відстає по фазі від основного магнітного

поток на чверть періоду або на $\pi/2$, а $\underline{E}_{\text{роз}}$ – від струму $\underline{I}$ на такий же кут, тобто

$$\underline{E}_{\text{роз}} = -jX_{L_{\text{роз}}} \underline{I}. \quad (2.28)$$

Струм $\underline{I}$ розкладається на активну $\underline{I}_a$ і реактивну $\underline{I}_p$ складові: перша проходить по вітці з активною провідністю G_{Π} , чим заміщаються магнітні втрати P_m в сталевому осерді, друга – по вітці з реактивною потужністю B_p , чим заміщається індукована дія основного потоку Φ , приводячи, як було відмічено, до виникнення ЕРС E , причому напруга на розгалуженій ділянці $\underline{U}' = -\underline{E}$ (див. рис. 2.20).

Згідно основного рівняння напруги будуюмо векторну діаграму. За основу діаграми вибирається вектор магнітного потоку $\underline{\Phi}_m$, який відстає від вектору струму $\underline{I}$, який його створює, по фазі на кут втрат у сталі δ . ЕРС самоіндукції $\underline{E}$ відстає від вектору потоку на 90° , ЕРС розсіювання $\underline{E}_{\text{роз}}$ від струму – на 90° . Напруга на виводах котушки $\underline{U}$, яка випереджає струм $\underline{I}$ за фазою на кут φ , є геометричною сумою векторів $-\underline{E}$, $jX_{L_{\text{роз}}} \underline{I}$ та $\underline{I}R$ (рис. 2.20).

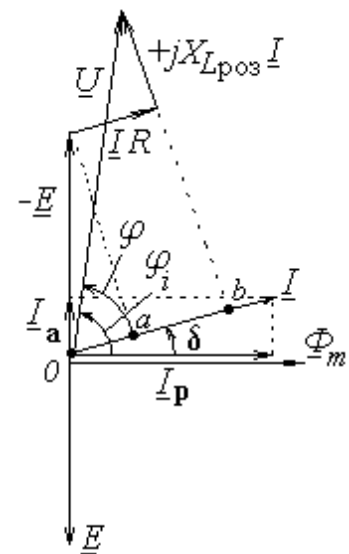


Рисунок 2.20

Активна потужність, яка споживається котушкою, дорівнює $P = UI \cos \varphi$. З векторної діаграми витікає, що значення $U \cos \varphi$ дорівнює сумі двох відрізків $Oa + ab$. Причому відрізок $Oa = E \cos \varphi_i = E \cos(90^\circ - \delta)$, відрізок $ab = IR$, тому

$$U \cos \varphi = IR + E \cos \varphi_i = IR + E \cos(90^\circ - \delta).$$

Таким чином отримуємо вираз для потужності

$$P = UI \cos \varphi = I^2 R + IE \cos \varphi_i = \Delta P_e + \Delta P_m, \quad (2.29)$$

де $\Delta P_e = I^2 R$ – потужність, що витрачається в активному опорі обмотки. Її називають електричними втратами;

$\Delta P_m = IE \cos \varphi_i = EI \sin \delta$ – втрати у сталі осердя, які називаються магнітними і їх можна представити наступним чином

$$\Delta P_M = P_\Gamma + P_B, \quad (2.30)$$

P_Γ – втрати на гістерезис; P_B – втрати на вихрові струми.

Відомий ряд емпіричних формул для розрахунку цих втрат, наприклад:

$$P_\Gamma = \sigma_{\Gamma} f B_m^2 \gamma G \cdot 10^{-4}; \quad (2.31)$$

$$P_B = \sigma_{\text{ВХ}} f^2 B_m^2 \gamma G \cdot 10^{-7}, \quad (2.32)$$

де σ_{Γ} , $\sigma_{\text{ВХ}}$ – коефіцієнти, що визначаються експериментально, залежать від марки сталі і товщини листа; G – об'єм осердя, см^3 ; γ – щільність сталі, г/см^3 ; B_m – [Тл]; f – [Гц].

У цілому $\Delta P_M \sim B_m^2$ (пропорційні), з урахуванням $\Phi_m = B_m S$ також $P_M \sim \Phi_m^2$. Звичайно в магнітних системах змінного струму, що використовуються, $E \gg E_{\text{роз}}$ і $E \gg R_k I$. Тоді в основному рівнянні рівноваги напруги (2.26) можна вважати $\underline{U} \approx -\underline{E}$, і на основі формули (2.25) утворюється

$$\Phi_m \approx \frac{U}{4,44 f w}. \quad (2.33)$$

В підсумку можна прийняти, що $P_M \sim U^2$, очевидно, також $P_M \sim I^2$. Це дозволяє виявити роль U і I в поділі загальних втрат потужності в магнітних системах на P_M і P_e .

Схема заміщення котушки зі сталевим осердям

Для аналізу і розрахунку реальну котушку з осердям заміняють еквівалентною схемою, наприклад, у вигляді схеми з послідовним з'єднанням елементів (рис. 2.21). Підставою для заміни є рівняння $\underline{U} = -\underline{E} + jX_{L_{\text{роз}}} \underline{I} + \underline{I}R$

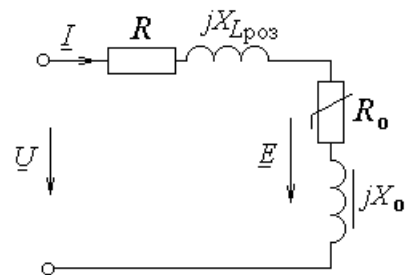


Рисунок 2.21

Параметри схеми заміщення можна знайти наступним чином:

$$R = \frac{P_{\text{об}}}{I^2}; \quad R_0 = \frac{P_M}{I^2}; \quad X_p = L_p \omega; \quad Z_0 = \frac{E}{I}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}. \quad (2.34)$$

Елементи схеми заміщення мають наступний фізичний смисл:

$X_{L\text{роз}}$ – індуктивний опір, через який заміщується індуктивна дія потоку розсіювання Φ_p ;

R – активний опір, через який заміщуються втрати потужності в провідниках обмотки $P_{об}$;

X_0 – індуктивний опір, через який заміщується індуктивна дія основного магнітного потоку;

R_0 – активний опір, через який заміщуються магнітні втрати потужності у сталевому осерді $P_{ст}$.

2.3 Приклади розрахунку магнітних кіл

Приклад 1. Однорідне магнітне коло.

а) пряма задача

Тороподібне осердя виконано із литої сталі марки Ст. 2, кількість витків його обмотки $w = 27$. Діаметри: тора $d = 10$ см, його поперечного перерізу $d_0 = 2$ см (рис. 2.22).

Визначити постійний струм I обмотки для збудження в осерді магнітного потоку $\Phi = 2,83 \cdot 10^{-4}$ Вб.

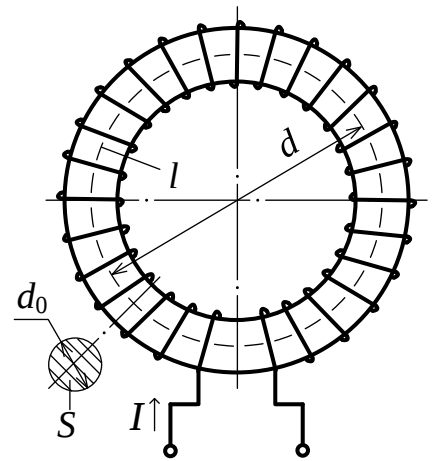


Рисунок 2.22

Розв'язання

Площа поперечного перерізу осердя

$$S = \frac{\pi d_0^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 2^2}{4} = 3,14 \text{ см}^2 = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

довжина його середньої силової лінії

$$l = \pi \cdot d = 3,14 \cdot 10 = 31,4 \text{ см} = 0,314 \text{ м}.$$

Магнітна індукція в осерді

$$B = \Phi / S = 2,83 \cdot 10^{-4} / 3,14 \cdot 10^{-4} = 0,9 \text{ Тл}.$$

По кривій намагнічування сталі Ст. 2 знаходимо напруженість магнітного поля $H = H(B) = 800 \text{ А/м}$ (див. рис. 2.12).

МРС по контуру середньої силової лінії $F = H l = 800 \cdot 0,314 = 251 \text{ А}$;
струм обмотки

$$I = F / w = 9,3 \text{ А}.$$

Приклад 2. Однорідне магнітне коло.

б) зворотна задача

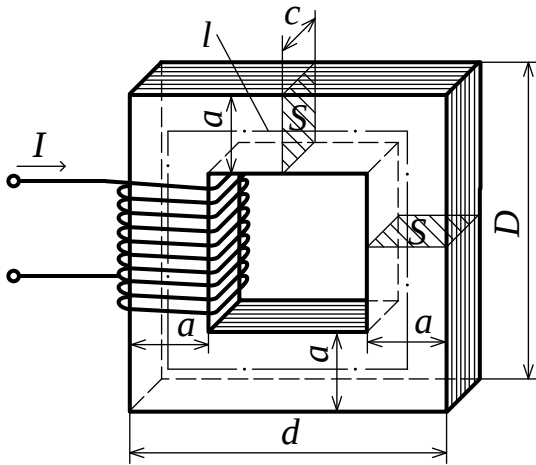


Рисунок 2.23

На рис. 2.23 зображене магнітне коло, що складається з шихтованого осердя і намотаної на нього обмотки. Розміри осердя: $D = 5,5$ см; $d = 5,5$ см; $a = 1,5$ см; $c = 2$ см; кількість витків обмотки $w = 300$. Листова сталь марки 1512 має товщину листів $0,5$ мм; для цього випадку коефіцієнт заповнення осердя $k_3 = 0,93$. Визначити величину магнітного потоку в осерді при постійному струмі обмотки $I = 2$ А. Розсіянням магнітного

потіку знехтувати.

Розв'язання

На всьому контурі замикання магнітного поля по осердю його поперечний переріз практично зберігається, матеріал один і той же, потік – також. Таке магнітне коло розглядається як однорідне.

Довжина середньої силової лінії

$$l = (D - a + d - a) \cdot 2 = (5,5 - 1,5 - 5,5 - 1,5) \cdot 2 \cdot 10^{-2} = 0,16 \text{ м.}$$

Площа поперечного перерізу осердя (по сталевим листам)

$$S_c = k_3 a c = 0,93 \cdot 1,5 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

На основі закону повного струму напруженість магнітного поля

$$H = wI / l = 320 \cdot 2 / 0,16 = 4000 \text{ А/м.}$$

По кривій намагнічування для сталі 1512 (див. рис. 2.12) знаходимо магнітну індукцію в осерді: $B = B(H) = 1,55$ Тл.

Магнітний потік у шихтованому осерді

$$\Phi = B \cdot S_c = 1,55 \cdot 2,79 \cdot 10^{-4} = 4,3 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

Приклад 3. Неоднорідні магнітні кола

а) пряма задача

На рис. 2.24 зображене магнітне поле, утворене прямокутним і напівкільцевим осердями, поділеними проміжком δ , причому обмотка збу-

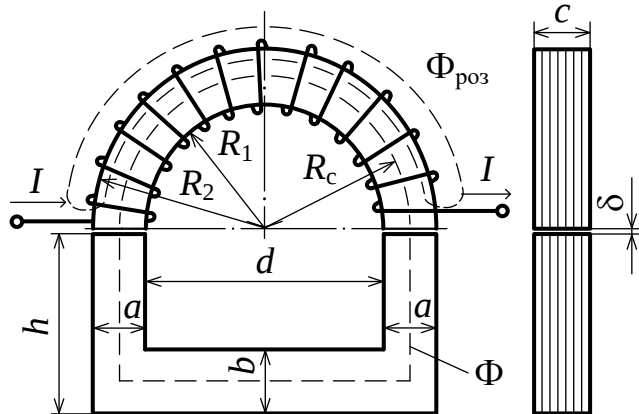


Рисунок 2.24

дження намотана тільки на другому із них і кількість її витків $w = 1000$. Розміри:

$$\delta = 2 \text{ мм}; R_1 = 60 \text{ мм};$$

$$R_2 = 100 \text{ мм}; h = 100 \text{ мм};$$

$$a = 40 \text{ мм}; b = 46 \text{ мм}; c = 30 \text{ мм}.$$

Осердя виконано із листової сталі марки 1211 і має коефіцієнт заповнення $k_3 = 0,95$. Визначити постійний струм котушки, необхідний для збудження в проміжках магнітного поля з індукцією $B_\delta = 1,5$ Тл. Коефіцієнт розсіювання магнітного потоку котушки $k_{\text{роз}}$ прийняти рівним 1,1.

Розв'язання

По контуру середньої силової лінії магнітопровід поділимо на однорідні ділянки (рис. 2.25).

Ділянка 1 об'єднує обидва проміжки, відділена за ознакою різних магнітних властивостей і має загальну довжину $l_1 = 2\delta = 4 \cdot 10^{-3}$ м. Ділянка 2 відрізняється від інших магнітним потоком, тому що всередині обмотки повний потік $\Phi_{\text{повн}} = \Phi + \Phi_{\text{роз}}$, де Φ – основний потік, що замикається по всьому магнітопроводу; $\Phi_{\text{роз}}$ – магнітний потік розсіювання.

$$\text{Довжина цієї ділянки по середній лінії} \\ l_2 = \pi R_c = \pi \frac{R_1 + R_2}{2} = 3,14 \cdot \frac{(0,06 + 0,1)}{2} = 0,251 \text{ м}.$$

Частина магнітопроводу, що залишилась, поділена на ділянки 3 і 4 за ознакою різних розмірів їх поперечних перерізів. Довжини цих ділянок:

– третьої

$$l_3 = 2 R_c = 2 \cdot \frac{R_1 + R_2}{2} = 2 \cdot \frac{0,06 + 0,1}{2} = 0,16 \text{ м};$$

– четвертої (яка об'єднує два відрізка однакового поперечного перерізу)

$$l_4 = 2(h - b/2) = 2(0,1 - 0,046/2) = 0,154 \text{ м}.$$

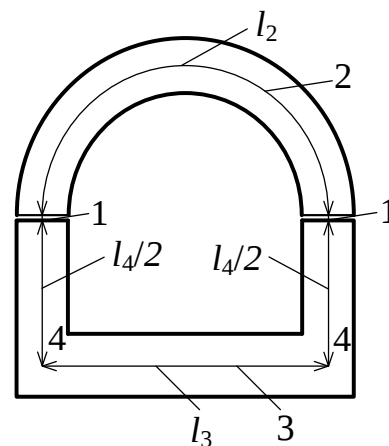


Рисунок 2.25

Площу поперечного перерізу проміжку приймаємо за площею прилеглих торців осердя

$$S_1 = ac = 0,04 \cdot 0,03 = 12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

На решті ділянок площі перерізів беруться безпосередньо за сталевими листами:

$$S_2 = c(R_2 - R_1)k_3 = 0,03 \cdot (0,1 - 0,06) \cdot 0,95 = 11,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$S_3 = bck_3 = 0,046 \cdot 0,03 \cdot 0,95 = 13,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$S_4 = ac k_3 = 0,04 \cdot 0,03 \cdot 0,95 = 11,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Магнітний потік у проміжку – основний потік

$$\Phi = B_\delta S_1 = 1,5 \cdot 12 \cdot 10^{-4} = 18 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}.$$

Магнітні потоки в межах окремих однорідних ділянок:

$$\Phi_1 = \Phi_3 = \Phi_4 = \Phi = 18 \cdot 10^{-4} \text{ Вб};$$

$$\Phi_2 = k_{\text{роз}} \Phi = 1,1 \cdot 18 \cdot 10^{-4} = 19,8 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}.$$

Магнітна індукція на ділянках:

$$B_1 = B_\delta = 1,5 \text{ Тл};$$

$$B_2 = \Phi_2 / S_2 = 19,8 \cdot 10^{-4} / 11,4 \cdot 10^{-4} = 1,74 \text{ Тл};$$

$$B_3 = \Phi_3 / S_3 = 18 \cdot 10^{-4} / 13,1 \cdot 10^{-4} = 1,37 \text{ Тл};$$

$$B_4 = \Phi_4 / S_4 = 18 \cdot 10^{-4} / 11,4 \cdot 10^{-4} = 1,58 \text{ Тл}.$$

Напруженість магнітного поля на феромагнітних ділянках визначаємо по кривій намагнічування $H = H(B)$ для сталі марки 1211 (див. рис. 2.12):

$$H_2 = H(1,74) = 9250 \text{ А/м};$$

$$H_3 = H(1,37) = 950 \text{ А/м};$$

$$H_4 = H(1,58) = 3500 \text{ А/м}.$$

У проміжку магнітні властивості є лінійними і із формули $B = \mu_0 H$ маємо $H_1 = B_1 / \mu_0 = 1,5 / (4\pi \cdot 10^{-7}) = 1,194 \cdot 10^6 \text{ А/м}.$

На основі закону повного струму в алгебраїчній формі отримуємо магніторушійну силу обмотки

$$F = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_4 l_4 = 1,194 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 10^{-3} + 9250 \cdot 0,251 + 950 \cdot 0,16 + 3500 \cdot 0,154 = 4776 + 2322 + 152 + 539 = 7789 \text{ А}.$$

$$\text{Струм обмотки } I = F / w = 7789 / 1000 \approx 7,8 \text{ А}.$$

Приклад 4. Неоднорідні магнітні кола

б) зворотна задача

На рис. 2.26 зображена в двох проекціях магнітна система, що складається із литого сталевго осердя і обмотки збудження. Осердя виконано з марки сталі Ст. 2 і має проміжок. Розміри на рис. 2.26 дані в міліметрах. Визначити магнітну індукцію в проміжку B_δ при МРС обмотки $F = 3500$ А. Потоком розсіяння обмотки знехтувати.

Розв'язання

Коло, що розглядається, неоднорідне, і розв'язати зворотну задачу, слідуючи безпосередньо від МРС до величини магнітного поля, не вдається. Тому розв'язання будемо шукати методом побудови магнітної характеристики $B_\delta(F)$ (можливий ще метод послідовних наближень).

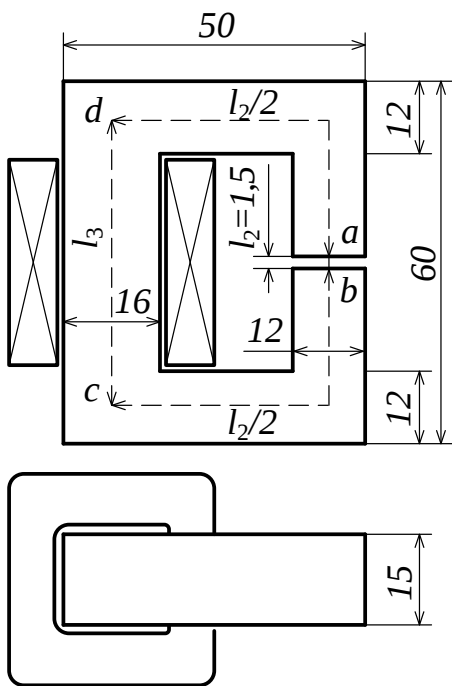


Рисунок 2.26

Очевидно, магнітне коло на рис. 2.26 можна розбити по довжині середньої силової лінії на три однорідних ділянки, позначення і параметри яких дані в табл. 2.10.

Для побудови магнітної характеристики $B_\delta(F)$ необхідно задати ряд значень B_δ і, розв'язуючи кожний раз пряму задачу (див. приклад 3), отримати відповідний ряд значень МРС F . Алгоритм розв'язання прямої задачі поданий блок-схемою, яка подана на рис. 2.27, де Φ – загальний для всіх ділянок магнітний потік; $B_1, B_2, B_3, H_1, H_2, H_3$ – індукція і напруженість магнітного поля на відповідних ділянках.

Таблиця 2.10 – До розрахунку магнітного кола

Номер ділянки	1	2	3
Позначення	ab	$ad+bc$	cd
Довжина, м	$l_1 = 0,0015$	$l_2 = 0,126$	$l_3 = 0,048$
Площа перерізу, м ²	$S_1 = 1,8 \cdot 10^{-4}$	$S_2 = 1,8 \cdot 10^{-4}$	$S_3 = 2,4 \cdot 10^{-4}$

Значення H_2 і H_3 для феромагнітних ділянок визначаються за значеннями індукцій B_2 і B_3 по кривій намагнічування сталі Ст. 2 (див. рис. 2.12), у проміжку H_1 визначається з використанням магнітної постійної $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Для розрахунку хоча б порядку значень B_δ , що задаються, виконаємо попередню грубу оцінку по максимуму, рахуючи, що вся МРС $F = 3500$ А прикладена до проміжку. Тоді із формули $F \approx H_1 l_1$ отримуємо

$$H_{1\text{оц}} \approx 3500 / 0,0015 = 2,3 \cdot 10^6 \text{ А/м},$$

$$\text{а } B_{\delta\text{оц}} = \mu_0 H_{1\text{оц}} = 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} 2,3 \cdot 10^6 \approx 2,9 \text{ Тл}.$$

Реально шукане значення B_δ при $F = 3500$ А може оказатися тільки менш $B_{\delta\text{оц}}$, тому будемо іти від значення 0,6 Тл вверх, поки отримане по алгоритму (див. рис. 2.27) значення МРС F не перевищить заданого значення $F = 3500$ А. Результати виконаних розрахунків зведені у табл. 2.11.

По даним табл. 2.11 на рис. 2.28 побудована магнітна характеристика. Ідучи від значення МРС $F = 3500$ А по характеристиці, отримаємо розв'язання зворотної задачі $B_\delta = 1,83$ Тл.

Таблиця 2.11 – Дані для побудови магнітної характеристики

Магнітна величина	B_k , Тл			H_k , А/м			$H_k l_k$, А			F , А
Номер ділянки	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Σ
Результати розрахунків	0,6	0,6	0,45	$47,7 \cdot 10^4$	500	365	716	63	18	797
	1,1	1,1	0,83	$87,5 \cdot 10^4$	1100	725	1313	139	35	1487
	1,5	1,5	1,125	$119,4 \cdot 10^4$	2900	1150	1791	365	55	2211
	1,8	1,8	1,35	$143,2 \cdot 10^4$	8150	1875	2148	1027	90	3265
	2,0	2,0	1,5	$159,2 \cdot 10^4$	23500	2900	2388	2961	139	5488

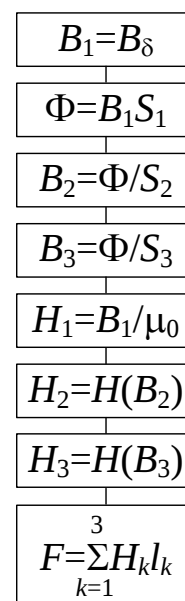


Рисунок 2.27

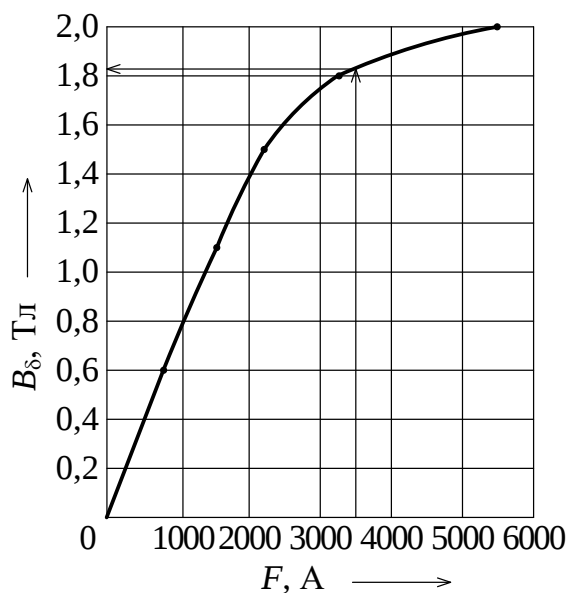


Рисунок 2.28

Приклад 5.

На рис. 2.29 зображена схема дроселя, що живиться від джерела синусоїдної напруги частотою $f = 50$ Гц. Осердя виконано із листової сталі марки 1212, його розміри: $r_1 = 40$ мм; $r_2 = 60$ мм; $c = 20$ мм. Коефіцієнт заповнення сталлю поперечного перетину $k_3 = 0,93$. Число витків обмотки $w = 37$; активний опір її проводу $R_k = 0,2$ Ом. Визначити напругу і струм обмотки, що необхідні для збудження в осерді магнітного поля з амплітудою індукції $B_m = 0,9$ Тл. Які при цьому втрати потужності в обмотці і осерді?

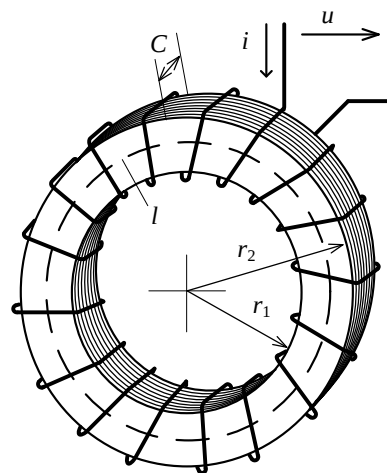


Рисунок 2.29

Розв'язання

Магнітне поле рахуємо зосередженим повністю в осерді і дросель будемо розглядати як однорідне магнітне коло змінного магнітного потоку.

Довжина середньої силової лінії

$$l = \pi(r_1 + r_2) = 3,14(40 + 60) \cdot 10^{-3} = 3,14 \cdot 10^{-1} \text{ м.}$$

Площа поперечного перетину сталених листів

$$S_c = k_3 \cdot c(r_2 - r_1) = 0,93 \cdot 20 \cdot 10^{-3}(60 - 40) \cdot 10^{-3} = 3,72 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Значення магнітного потоку:

амплітудне

$$\Phi_m = B_m S_c = 0,9 \cdot 3,72 \cdot 10^{-4} = 3,35 \cdot 10^{-4} \text{ Вб};$$

діюче

$$\Phi = \Phi_m / \sqrt{2} = 3,35 \cdot 10^{-4} / \sqrt{2} = 2,37 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}.$$

Для сталі марки 1212 по заданому значенню $B_m = 0,9$ Тл із графіків на рис. 2.12 знаходимо питомі магнітні опори:

- активний $\delta_{\mu R} = 2,6 \cdot 10^2$ м/Гн;

- реактивний $\delta_{\mu X} = 1,0 \cdot 10^2$ м/Гн.

Магнітні опори осердя:

- активний $R_\mu = \rho_{\mu R} \frac{l}{S_c} = 2,6 \cdot 10^2 \cdot 31,4 \cdot 10^{-2} / 3,72 \cdot 10^{-4} = 21,9 \cdot 10^4 \text{ Гн}^{-1};$

- реактивний $X_\mu = \rho_{\mu X} \frac{l}{S_c} = 1,0 \cdot 10^2 \cdot 31,4 \cdot 10^{-2} / 3,72 \cdot 10^{-4} = 8,4 \cdot 10^4 \text{ Гн}^{-1}.$

Комплексний магнітний опір осердя

$$\underline{Z}_\mu = R_\mu + jX_\mu = 21,9 \cdot 10^4 + j8,4 \cdot 10^4 = 23,5 \cdot 10^4 e^{j21^\circ} \text{ Гн}^{-1}.$$

За законом Ома комплексне значення МРС обмотки магнітного кола

$$\underline{F} = \underline{Z}_\mu \Phi = 23,5 \cdot 10^4 e^{j21^\circ} \cdot 2,37 \cdot 10^{-4} e^{j0^\circ} = 55,7 e^{j21^\circ} \text{ А},$$

де $\underline{\Phi} = \Phi e^{j\psi_\Phi} = 2,37 \cdot 10^{-4} e^{j0^\circ}$ Вб – комплексне значення магнітного потоку, прийняте з початковою фазою $\psi_\Phi = 0^\circ$.

Діючі значення:

МРС $F = 55,7$ А;

струму обмотки $I = F / w = 1,5$ А;

їхні початкові фази $\psi_I = \psi_F = 21^\circ$.

Рівняння електричної рівноваги в електричному контурі обмотки має вигляд $\underline{U} = (-\underline{E}) + R_k \underline{I}$, де $\underline{E}$ – ЕРС, що наведена основним потоком. Діюче значення ЕРС

$$E = 4,44 f w \Phi_m = 4,44 \cdot 50 \cdot 37 \cdot 3,35 \cdot 10^{-4} = 2,75 \text{ В}.$$

Її початкова фаза $\psi_E = -90^\circ$, тому що вектор $\underline{E}$ завжди відстає по фазі від потоку, який визвав ЕРС, на чверть періоду. Отримуємо $\underline{E} = 2,75e^{j90^\circ}$ В.

Підставляючи комплексні значення, отримуємо

$$\underline{U} = -2,75e^{-j90^\circ} + 0,2 \cdot 1,5e^{j21^\circ} = 2,75e^{j90^\circ} + 0,3e^{j21^\circ} = j2,75 + 0,28 + j0,11 = 0,28 + j2,86 = 2,87e^{j84,4^\circ} \text{ В.}$$

Діюче значення напруги джерела $U = 2,87$ В; початкова фаза напруги $\psi_U = 84,4^\circ$. Часові співвідношення величин проілюстровані на рис. 2.30 за допомогою векторної діаграми, яка побудована в указаних масштабах.

Фазовий зсув напруги відносно струму

$$\varphi = \psi_U - \psi_I = 63,4^\circ.$$

Активна потужність дроселя

$$P = UI \cos \varphi = 2,87 \cdot 1,5 \cos 63,4^\circ = 1,92 \text{ Вт.}$$

Втрати потужності:

- електричні в проводі обмотки

$$P_e = R_k I^2 = 0,45 \text{ Вт;}$$

- магнітні у сталевому осерді

$$P_m = P - P_e = 1,47 \text{ Вт.}$$

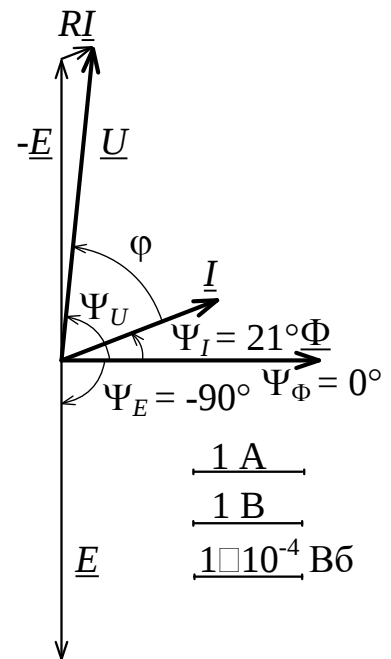


Рисунок 2.30

Приклад 6. Визначення параметрів схеми заміщення дроселя, який ввімкнутий на змінну напругу

Обмотка із проводу з кількістю витків $w_k = 1000$ намотана на шихтоване сталеве осердя, яке виконано рознімним (рис. 2.31).

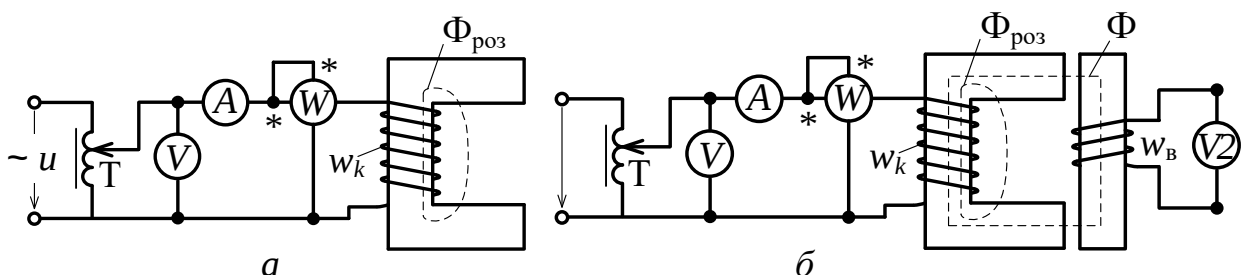


Рисунок 2.31

Для визначення параметрів електричної схеми заміщення цього дроселя проведені два досліди при живленні його обмотки від мережі змінної напруги з частотою $f = 50$ Гц через автотрансформатор Т (рис. 2.31, а, б).

В першому досліді якір осердя був вилучений (рис. 2.31, а), в обмотці встановлений струм $I_0 = 3$ А і виміряні напруга обмотки $U_0 = 15$ В і активна потужність $P_0 = 36$ Вт.

В другому досліді якір осердя був встановлений в основне положення (рис. 2.31, б). Після установки струму $I = 3$ А були виміряні напруга $U = 210$ В і активна потужність $P = 76$ Вт. Крім того, на затискачах вимірювальної котушки, що встановлена на якорі і має кількість витків $w_b = 200$, була виміряна напруга $U_b = 40$ В.

За даними дослідів потрібно визначити параметри типової електричної схеми заміщення дроселя.

Розв'язання

Типова електрична схема заміщення дроселя зображена на рис. 2.32. У відповідності з рівнянням електричної рівноваги $\underline{U} = -\underline{E} - \underline{E}_{\text{роз}} + R_k \underline{I}$ ця схема має три послідовних ділянки, кожна із яких відповідає одному із членів у правій частині рівняння, причому

$$\underline{U}' = -\underline{E}; \quad \underline{U}_{L_{\text{роз}}} = -\underline{E}_{\text{роз}}.$$

При розімкненому осерді (див. рис. 2.31, а) повний магнітний потік зменшується до досить малого потоку розсіювання $\Phi_{\text{роз}}$. Основний потік Φ практично відсутній і тому в схемі (рис. 2.32) можна відкинути ділянку, що заміщає дію цього потоку.

Таким чином, для умов першого досліді схема заміщення зводиться до виду, зображеному на рис. 2.33. Для цієї схеми за даними першого досліді визначаємо повний опір обмотки з осердям без якоря

$$Z_0 = U_0 / I_0 = 15 / 3 = 5 \text{ Ом}$$

і параметри схеми заміщення:

$$R_k = P_0 / I_0^2 = 36 / 3^2 = 4 \text{ Ом}; \quad X_{L_{\text{роз}}} = \sqrt{Z_0^2 - R_k^2} = \sqrt{5^2 - 4^2} = 3 \text{ Ом}.$$

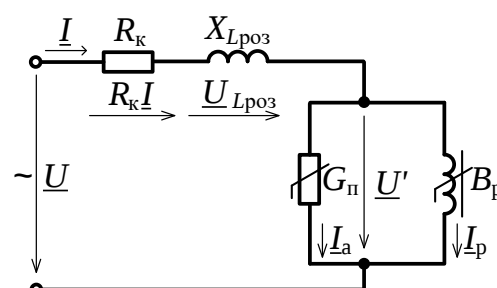


Рисунок 2.32

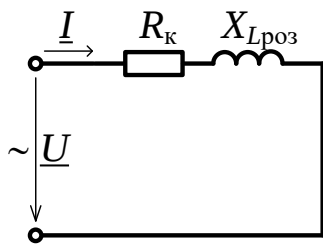


Рисунок 2.33

У другому досліді ЕРС вимірювальної котушки $E_B = U_B = 40$ В. По цьому значенню визначаємо амплітуду основного магнітного потоку в якорі осердя

$$\Phi_m = E_B / 4,44 f w_B = 9 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

ЕРС E , що наводиться цим потоком в обмотці дроселю

$$E = 4,44 f w_k \Phi_m = 4,44 \cdot 50 \cdot 1000 \cdot 9 \cdot 10^{-4} = 199,8 \approx 200 \text{ В.}$$

У другому досліді виміряна потужність P витрачається на електричні втрати в обмотці $R_k I^2$ і магнітні втрати у сталі всього осердя

$$P_M = P - R_k I^2 = 76 - 4 \cdot 3^2 = 40 \text{ Вт.}$$

Знайдена ЕРС E відповідає напрузі U' у повній схемі на рис. 2.32, тобто $U' = E = 200$ В. Тому що потужність P_M зосереджується в схемі заміщення у вітці з активною провідністю G_n , можна знайти активну складову струму, яка проходить по ній

$$I_a = P_M / U' = 40 / 200 = 0,2 \text{ А.}$$

Ця складова співпадає по фазі з напругою U' , а реактивна складова I_p в індуктивному елементі повинна відставати від U' на $\frac{\pi}{2}$. Враховуючи взаємну ортогональність векторів I_a і I_p , а також те, що їх сума $I_a + I_p = I$, визначаємо

$$I_p = \sqrt{I^2 - I_a^2} = \sqrt{3^2 - 0,2^2} = 2,99 \text{ А.}$$

Тепер за законом Ома для діючих значень I_a , I_p і U' находимо провідності паралельної ділянки схеми заміщення (див. рис. 2.32):

- активну $G_n = I_a / U' = 0,001 \text{ См};$
- реактивну $B_p = I_p / U' = 0,015 \text{ См.}$

Достовірність схеми заміщення можна перевірити на основі розрахунку електричного кола, використовуючи відому напругу $U = 210$ В. Співвідношення всіх величин і їх задоволення рівнянню

$$\underline{U} = -\underline{E} - \underline{E}_{роз} + R_k \underline{I} = -\underline{E} + jX_{L_{роз}} \underline{I} + R_k \underline{I}$$

ілюструє векторна діаграма, що побудована в масштабі на рис. 2.34.

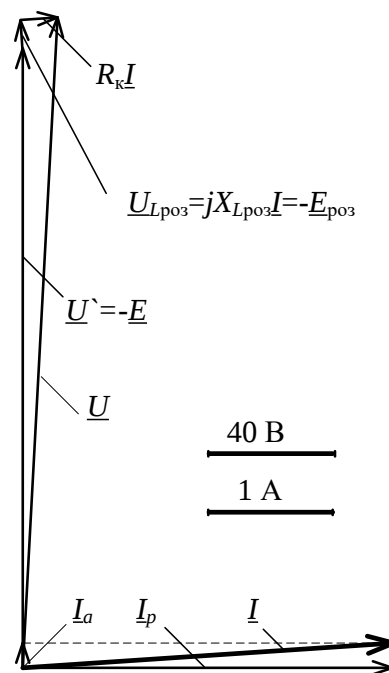


Рисунок 2.34

2.4 Електромагніти та реле. Основні теоретичні положення.

Будова та принцип роботи електромагнітів

Здатність електромагнітів, як і постійних магнітів, притягувати до своїх полюсів близько розташовані феромагнітні тіла заснована на електромеханічній взаємодії магнітного поля електромагніта з мікрострумами у феромагнітному тілі. При цьому феромагнітне тіло, що притягується, само намагнічується, його полярність протилежна до полярності полюсів електромагніта. Електромагніти можуть працювати і на постійному і на змінному струмі.

У промисловості електромагніти знайшли широке застосування, наприклад в підйомних кранах, в якості приводів гальм, муфт зчеплення, вентилів в трубопроводах для рідин, в комутаційній апаратурі електроустаткування, у вимірювальних приладах, в автоматах, реле та ін. На рис. 2.35, *а* показане конструктивне виконання електромагнітів тягнучої та штовхаючої дії, а на рис. 2.35, *б, в* показані промисловий та вантажопідйомний електромагніти.



Рисунок 2.35

Тягові електромагніти з лінійним (зворотно-поступальним) рухом якоря (рис.2.35, *а*) застосовують для керування гідравлічними або пневматичними вентилями, кранами, виконавчими органами станків та механізмів. До силових відносять тягові, вантажопідйомні (рис.2.35, *б, в*) і гальмівні електромагніти, що перетворюють електричну енергію в механічну.

На рис.2.36 наведені схеми таких електромагнітів, де цифрами показані: 1 – обмотка; 2 – осердя; 3 – ярма електромагнітів.

Під час притягання електромагнітом ферромагнітного тіла в повітряному проміжку частина енергії магнітного поля перетворюється в механічну.

Об’ємна густина цієї енергії визначається наступним чином

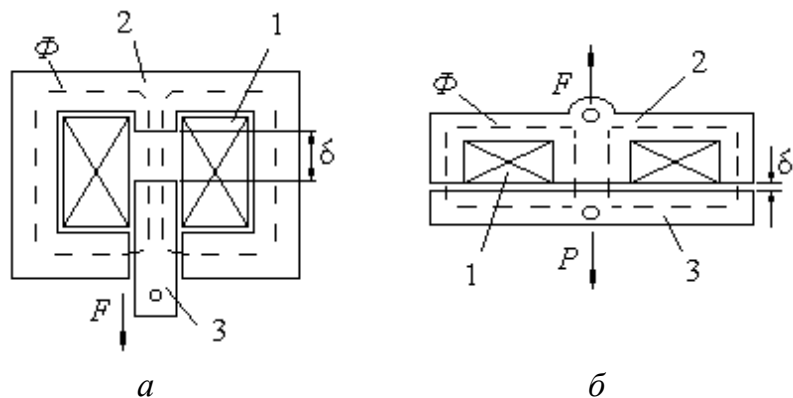


Рисунок.2.36

$$w_M = \frac{\mu_a H^2}{2} = \frac{BH}{2} = \frac{B^2}{2\mu_a}, \quad (2.35)$$

Сила тяги або підйомна сила одного полюса електромагніта дорівнює

$$F = \frac{P}{2} = \frac{B^2 S}{2\mu_0} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S}, \quad (2.36)$$

де P – зовнішня сила; S – площа полюси.

Будова та принцип роботи реле

Електричним реле називають апарат, призначений для автоматичного спрацьовування (включення або відключення) при зміні якогось електричного параметра кола (струму, напруги) або неелектричного параметра, на який він має реагувати.

Реле захисту і керування – апарати багаторазової дії і виконуються або із самоповерненням або з ручним поверненням.

Основні характеристики реле: значення величини спрацьовування і відпускання (повернення), коефіцієнт повернення і час спрацьовування.

Коефіцієнт повернення – відношення величин відпускання і спрацьовування (завжди менше одиниці).

Час спрацьовування реле (або витримка реле) $t_{сп}$ – час подачі сигналу на вхід реле до моменту його включення.

Відрізняють безінерційні ($t_{\text{сп}} < 1$ мс), швидкодіючі ($t_{\text{сп}} < 50$ мс) і нормальні ($t_{\text{сп}} < 0,05 \div 0,2$ с).

Реле максимального струму широко застосовується в електроустановках для автоматичного захисту від КЗ. На рис. 2.37 показана схема цього реле, де цифрами позначено: 1 – обмотка; 2 – осердя; 3 – якор; 4 – пружина; 5 – контакти замикальні; 6 – контакти розмикальні.

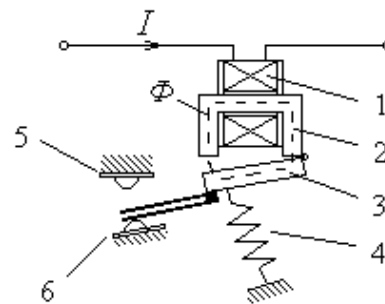


Рисунок 2.37

Якщо робочий струм I перевищує певне максимальне значення, то сила тяги електромагніту, що включає обмотку 1 та сталеве осердя 2, перевищує механічну силу пружини 4, забезпечуючи переміщення якоря 3. При цьому замикаються контакти замикальні 5, а контакти розмикальні 6 – розмикаються.

Теплове реле призначено для захисту електроапаратури від тривалих перевантажень (рис. 2.38). При нагріві біметалічна пластина 1 в спеціальному нагрівачі 2 (ніхромовий дріт) деформується, її зігнутий кінець піднімається і вивільняє важіль 4 при спрацьовуванні. Важіль 4 обертається

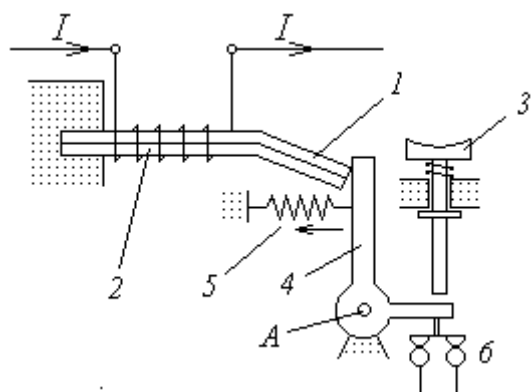


Рисунок 2.38

пружиною 5 вліво відносно осі А і своїм кінцем розмикає нормально замкнені контакти 6 кола керування двигуна. Після охолодження пластини протягом 3-5 мін вихідний стан реле може бути відновлений натисканням на кнопку повернення 3.

Реле вирізняються різноманітним конструктивним виконанням із залежності від функціонального призначення. На рис. 2.39 показане реле максимального струму серії РЕВ570, теплове реле РТТ-141 та реле максимального струму з самоповерненням РЕМ65. Реле максимального струму серії РЕВ570 (рис. 2.39, а) застосовується в якості реле максимального струму в основному для захисту електродвигунів постійного струму від струмів КЗ. Його котушки виконуються на номінальні струми від 1,6 до 1250 А.

Реле теплове РТТ-141 (рис. 2.39, б) призначено для захисту трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором від перевантажень

неприпустимої тривалості та від струмів, які виникають при обриві однієї з фаз.

Реле максимального струму з самоповерненням РЕМ65 (рис. 2.39, в) призначено для комутації кіл в схемах автоматичного керування електродвигачами постійного струму напругою до 320 В суднового електрообладнання. Це реле виконується з самоповерненням з котушкою, що втягує, на номінальні струми від 2,5 до 100 А.

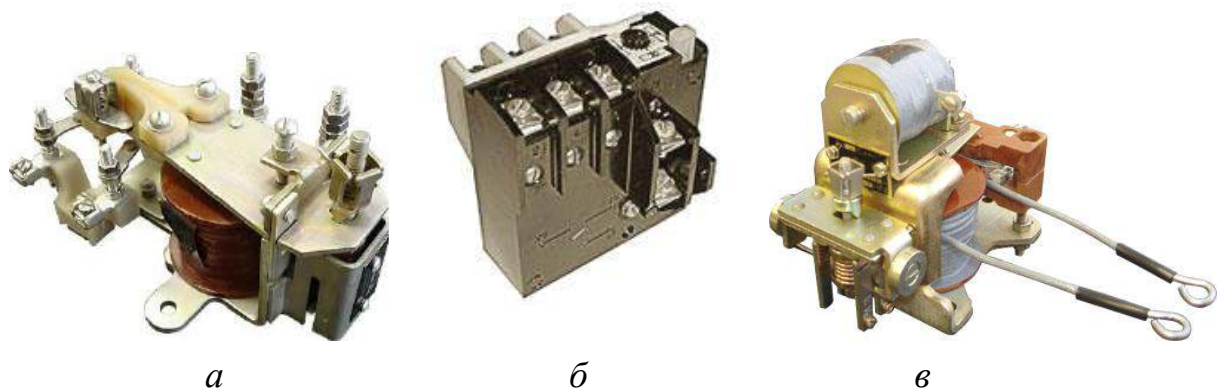


Рисунок 2.39

2.5. Приклади розрахунку параметрів електромагнітів та реле

Приклад 1. Визначити струм в котушці електромагнітного реле (рис. 2.40), якщо задані геометричні розміри: $a = 100$ мм; $b = 50$ мм; $d = 7$ мм; $c = 10$ мм; $\delta = 5$ мм. Число витків в обмотці $w = 1000$; матеріал осердя – сталь 1512. Жорсткість пружини $k = 10^4$ Н/м.

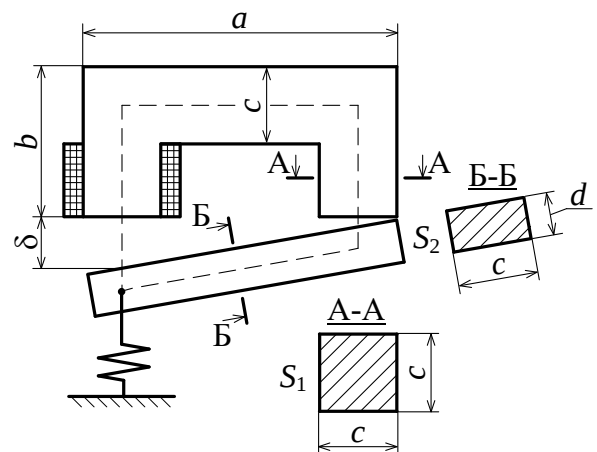


Рисунок 2.40

Розв'язання

Робота реле заснована на виникненні сили тяги, яка створюється магнітним полем при підключенні котушки до джерела живлення, і наводить в рух рухливий якір. Відповідно до відомого закону механіки

$$P = k x ,$$

де k – жорсткість пружини; x – зсув (стискування) пружини. Оскільки $x = \delta$, то при заданій величині жорсткості пружини можна знайти зусилля, не-

обхідне для тяжіння якоря. Тепер з формули $P = \frac{B^2 S}{2\mu_0}$ знаходимо магнітну

індукцію в зазорі $B_\delta = \sqrt{\frac{2\mu_0 P}{S_\delta}}$.

Подальші обчислення пов'язані з визначенням геометричних параметрів окремих ділянок неоднорідного магнітного кола, а саме ярма, якоря і повітряного зазору. Визначаємо довжину середньої силової лінії кожної з цих ділянок.

$$\text{Ярмо } l_{\text{яр}} = \left(b - \frac{c}{2}\right) \cdot 2 + a - c = (50 - 5) \cdot 2 + 100 - 10 = 180 \text{ мм} = 0,18 \text{ м};$$

$$\text{якір } l_{\text{як}} = a - c = 100 - 10 = 90 \text{ мм} = 0,09 \text{ м}; \text{ зазор } l_z = \delta.$$

Перерізи відповідних ділянок:

$$S_\delta = c^2 = 10^{-4} \text{ м}^2 = S_{\text{яр}}; S_{\text{як}} = d \cdot c = 0,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \text{ тобто } S_{\text{як}} = 0,7 S_{\text{яр}}.$$

$$\text{Знаходимо } P = k x = 10^4 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 50 \text{ Н, тоді}$$

$$B_\delta = \sqrt{\frac{2\mu_0 P}{S_\delta}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 50}{10^{-4}}} = 1,12 \text{ Тл.}$$

Магнітна індукція в ярмі $B_{\text{яр}} = B_\delta$, оскільки магнітний потік в магнітопроводі та в повітряному зазорі один і той же, і перерізи цих ділянок однакові

$$B_{\text{як}} = \frac{B_{\text{яр}}}{0,7} = 1,6 \text{ Тл.}$$

Визначаємо напруженості магнітного поля в ділянках. У зазорі

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{1,12}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 0,8 \cdot 10^6 \cdot B_\delta = 0,8 \cdot 10^6 \cdot 1,12 = 0,89657 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Визначимо по кривій намагнічування для сталі 1512 (див. рис. 2.12) напруженість магнітного поля ярма після екстраполяції

$$H_{\text{яр}} = 280 \frac{\text{А}}{\text{м}}, \text{ а } H_{\text{як}} = 5600 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Запишемо рівняння закону повного струму

$$F = wI = \delta \cdot H_{\delta} + l_{\text{як}} \cdot H_{\text{як}} + l_{\text{яр}} \cdot H_{\text{яр}} = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,89657 \cdot 10^6 + 0,09 \cdot 5600 + 0,18 \cdot 280 = 4482,856 + 504 + 50,4 = 5037,256 \text{ А.}$$

Тоді при $w = 1000$ струм в котушці електромагнітного реле

$$I = \frac{F}{w} = \frac{5037,256}{1000} = 5,037 \text{ А або приблизно струм } I = 5 \text{ А.}$$

Приклад 2.

Визначити струм в обмотці електромагніту (рис. 2.41) для піднімання вантажу масою $m = 4,7$ кг, якщо задані геометричні розміри неоднорідного магнітного кола: $a = 140$ мм; $b = 75$ мм; $c = 10$ мм; $d = 10$ мм; $\delta = 5$ мм; число витків обмотки $w = 1000$; марка сталі осердя 1211.

Розв'язання

Знайдемо силу тяги, що діє на якір електромагніту

$$P = mg = 4,7 \cdot 9,8 = 46 \text{ Н,}$$

де $g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ – прискорення вільного падіння.

Знаходимо магнітну індукцію під полюсом

$$B_{\delta} = \sqrt{\frac{2\mu_0 P}{S_{\delta}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 46}{3 \cdot 10^{-4}}} = 0,62 \text{ Тл}$$

де S_{δ} – загальна площа всіх полюсів

$$S_{\delta} = S_{\text{I}} + S_{\text{II}} + S_{\text{III}} = 3 S_{\text{к}},$$

де площа одного полюса $S_{\text{к}} = c^2 = 10^{-4} \text{ м}^2$.

Магнітна індукція кожного полюса однакова $B_{\text{I}} = B_{\text{II}} = B_{\text{III}} = B_{\delta}$. По кривій намагнічування для сталі 1211 (див. рис. 2.12) визначаємо напруженість магнітного поля. Магнітне коло даного електромагніту є розгалуженим, тобто магнітний потік стержня II розгалужується по стержнях I і III.

Розділив магнітне коло по осі симетрії на дві частини, розрахунок здійснимо для половини повного магнітного потоку, що проходить через

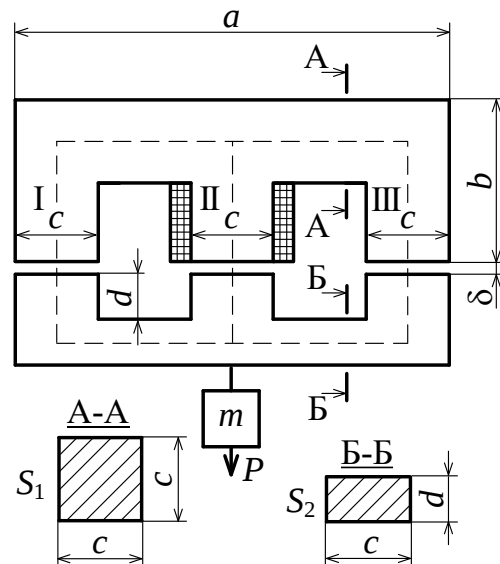


Рисунок 2.41

поперечний переріз стержня II. Штрихова лінія показує силову лінію цього потоку.

Загальний магнітний потік стрижня II

$$\Phi_{II} = B_{II} \cdot S_k = 0,62 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

Магнітні потоки стрижнів I і III

$$\Phi_I = \Phi_{III} = \frac{\Phi_{II}}{2} = 0,31 \cdot 10^{-4} \text{ Вб.}$$

Розбиваємо магнітне коло на однорідні ділянки з однаковим значенням магнітної індукції і одного матеріалу.

Загальна довжина:

- поздовжніх ділянок $l_1 = (b - \frac{c}{2} + 2d - \frac{d}{2}) \cdot 2 = 170 \text{ мм} = 0,17 \text{ м};$

- поперечних ділянок $l_2 = (\frac{a}{2} - \frac{c}{2} - \frac{c}{4}) \cdot 2 = 125 \text{ мм} = 0,125 \text{ м};$

- загальна довжина зазорів $2\delta = 10 \text{ мм} = 10^{-2} \text{ м} .$

Визначаємо напруженості магнітних полів цих ділянок.

Напруженість магнітного поля в зазорі

$$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} = \frac{0,62}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 0,8 \cdot 10^6 \cdot 0,62 = 0,496 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Напруженість магнітного поля на поздовжній ділянці визначаємо по кривій намагнічування для сталі 1211 $H_1 = 160 \frac{\text{А}}{\text{м}}$ (див. рис. 2.12).

Магнітна індукція на поперечній ділянці

$$B_2 = \frac{\Phi_{II}}{2S_2} = \frac{0,62}{2 \cdot 10^{-4}} = 0,31 \text{ Тл.}$$

По кривій намагнічування для сталі 1211 визначаємо напруженість магнітного поля на цій ділянці $H_2 = 110 \frac{\text{А}}{\text{м}}$ (див. рис. 2.12).

Згідно закону повного струму

$$F = wI = 2\delta H_{\delta} + H_1 l_1 + H_2 l_2 = 0,496 \cdot 10^6 \cdot 10^{-2} + 160 \cdot 0,17 + 110 \cdot 0,125 = 4960 + 27,2 + 13,75 = 5000 \text{ А.}$$

Струм в обмотці електромагніту з числом витків $w = 1000$

$$I = \frac{F}{w} = 5 \text{ А.}$$

2.6. Трансформатори. Основні теоретичні положення.

Будова і основні параметри трансформатора

Трансформатор – статичний (без рухомих частин) електромагнітний пристрій, який перетворює одну змінну напругу в іншу змінну напругу із збереженням їх частоти f . Силкові трансформатори є найважливішим елементом у системі електропостачання, відіграють роль проміжної ланки між генераторами електростанцій і споживачами електроенергії. Силкові трансформатори виготовляються для загальних потреб (зварювальні, перетворювачі частоти, електропідні та ін.). По числу фаз вони поділяються на одно- та трифазні, по способу охолодження – на сухі та масляні. На електростанціях електроенергія виробляється за допомогою трифазних генераторів напругою 6...30 кВ. Крім цього, трансформатори широко використовуються в блоках живлення різноманітних електроприладів. На рис. 2.42 показані трансформатори різного призначення і потужності: однофазний сухий (а), трифазний масляний класу напруги 110 кВ (б), потужний станційний (в).

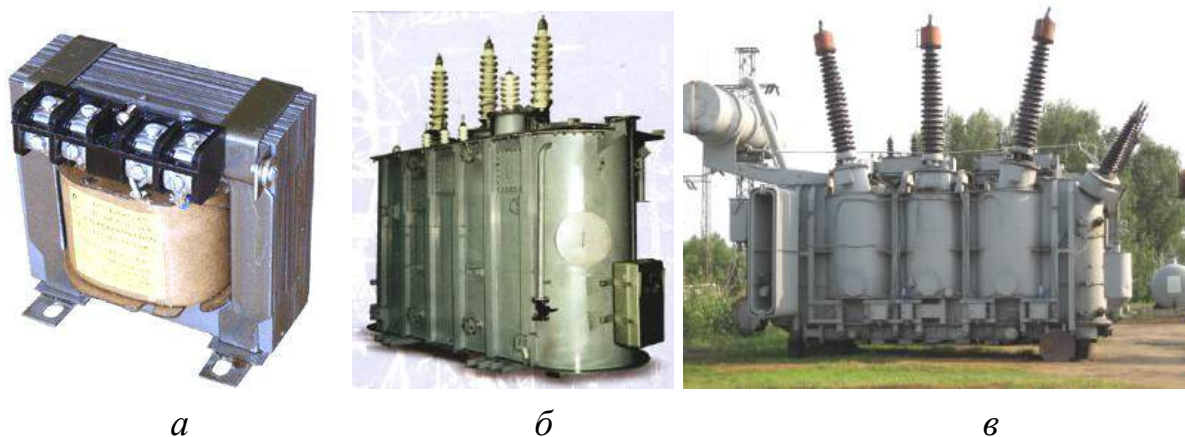


Рисунок 2.42

Однофазний двообмотковий трансформатор схематично зображений на рис. 2.43. Замкнене осердя виконується із листової електротехнічної сталі і служить для посилення магнітного поля, що збуджується об-

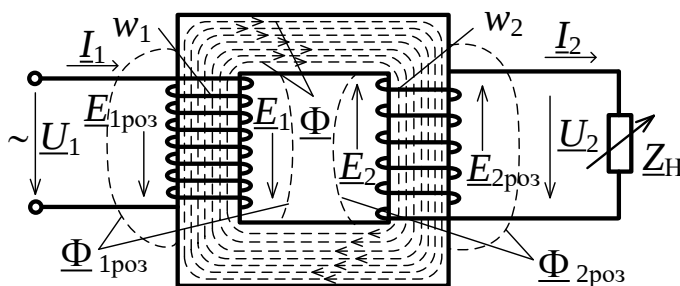


Рисунок 2.43

мотками. Обмотки виконуються із ізольованих проводів, частіше усього мідних, рідше алюмінієвих.

Принцип дії побудований на законі електромагнітної індукції. На первинну обмотку, яка має w_1 витків, подається змінна напруга $\underline{U}_1$, зі вторинної обмотки, що має w_2 витків, напруга $\underline{U}_2$ прикладена до навантаження $\underline{z}_H$. При $w_1 < w_2$ напруга підвищується, тобто $U_1 < U_2$, при $w_1 > w_2$ – знижується; при цьому струми обмоток I_1 і I_2 перетворюються в зворотній пропорції.

Співвідношення кількості витків відноситься до основних параметрів трансформатора і називається коефіцієнтом трансформації:

$$n = \frac{w_{BH}}{w_{HH}} \text{ або, зокрема, } k_{12} = \frac{w_1}{w_2}, \quad (2.37)$$

де w_{BH}, w_{HH} – кількість витків обмотки відповідно вищої (ВН) і нижчої (НН) напруги, причому $w_{BH} > w_{HH}$.

На відміну від схематичного зображення однофазного двообмоткового трансформатора (див. рис. 2.43) реальні його конструкції мають компоновку стрижневої або броньової конструкції, що зображені на рис. 2.44; цифрами позначені: 1 – осердя; 2 – обмотка ВН; 3 – обмотка НН; 4 – каркас обмоток.

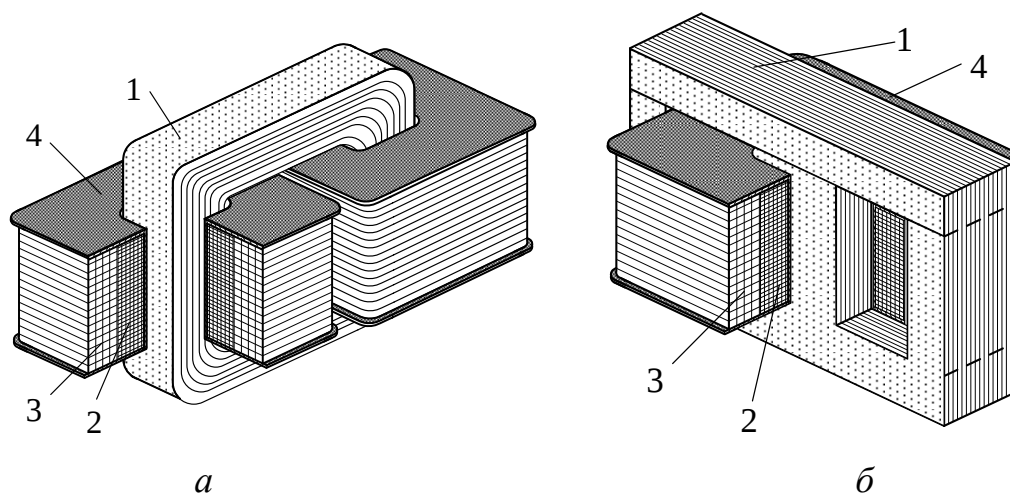


Рисунок 2.44

Звичайно осердя робляться складовими для можливості установки обмоток. Вони можуть виконуватися шихтованими із сталевих пластин або намотуватися із сталеві стрічки (товщина листової сталі може складати 0,35 або 0,5 мм).

Електричний стан трансформатора описується рівняннями напруг для контурів обмоток і рівнянням струмів, що зв'язують комплексні значення або вектори синусоїдних величин:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E} - \underline{E}_{1\text{роз}} + R_1 \underline{I}_1; \quad (2.38)$$

$$\underline{E}_2 = \underline{U}_2 - \underline{E}_{2\text{роз}} + R_2 \underline{I}_2; \quad (2.39)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{10} + \left(-\underline{I}_2 \frac{w_2}{w_1} \right), \quad (2.40)$$

де $\underline{E}_1, \underline{E}_2$ – ЕРС обмоток, які спричинені основним магнітним потоком $\underline{\Phi}$, що пронизує обидві обмотки; $\underline{E}_{1\text{роз}}, \underline{E}_{2\text{роз}}$ – ЕРС, що спричинені магнітними потоками розсіювання $\underline{\Phi}_{1\text{роз}}, \underline{\Phi}_{2\text{роз}}$, кожний із яких створений струмом своєї обмотки і зчеплений тільки з нею; R_1, R_2 – активні опори проводів обмоток; $\underline{I}_{10}$ – струм первинної обмотки в режимі неробочого ходу.

У режимі неробочого ходу основний потік $\underline{\Phi}$ створюється тільки струмом $\underline{I}_{10}$, при замкненому контурі вторинної обмотки – протидіючими струмами $\underline{I}_1$ і $\underline{I}_2$ двох обмоток, але при цьому значення потоку $\underline{\Phi}$ (в частковості, його амплітудне значення Φ_m) практично зберігається.

Всі ЕРС обмоток індукуються у відповідності з законом електромагнітної індукції $e = -w d\Phi/dt$.

Діючі значення основних ЕРС пропорційні Φ_m :

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m; \quad E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m; \quad (2.41)$$

$$E_1 / E_2 = w_1 / w_2 = k_{12}. \quad (2.42)$$

ЕРС від потоків $\underline{\Phi}_{1\text{роз}}$ і $\underline{\Phi}_{2\text{роз}}$, як і самі потоки, пропорційні струмам:

$$\underline{E}_{1\text{роз}} = -jX_{L1\text{роз}} \underline{I}_1; \quad \underline{E}_{2\text{роз}} = -jX_{L2\text{роз}} \underline{I}_2 \quad \text{або} \quad E_{1\text{роз}} = X_{L1\text{роз}} I_1;$$

$E_{2\text{роз}} = X_{L2\text{роз}} I_2$, де $X_{L1\text{роз}}, X_{L2\text{роз}}$ – індуктивні опори обмоток, які спричинені відповідними потоками розсіювання.

Відомо, що $E_{1\text{роз}} \ll E_1$, $R_1 I_1 \ll E_1$, $E_{2\text{роз}} \ll E_2$, $R_2 I_2 \ll E_2$, тому приблизно можна вважати $U_1 \approx E_1$ і $U_2 \approx E_2$. Отже, діючі значення напруг обмоток, як і основних ЕРС, підпорядковані коефіцієнту трансформації

$$U_1 / U_2 \approx E_1 / E_2 = w_1 / w_2 = k_{12}. \quad (2.43)$$

Відомо також, що $\underline{I}_{10} \ll \underline{I}_{\text{ном}}$. Тому, нехтуючи в режимі наванта-

ження порівняно малим значенням струму I_{10} , отримуємо співвідношення для діючих значень струмів

$$I_1 / I_2 \approx w_2 / w_1 = 1 / k_{12}. \quad (2.44)$$

Вказане співвідношення напруг найбільш точно в режимі неробочого ходу; співвідношення струмів уточнюється по мірі віддалення від цього режиму.

У наочній формі співвідношення всіх величин, що входять в рівняння напруг і струмів, прийнято ілюструвати векторною діаграмою. Якісний і розрахунковий аналізи режимів роботи трансформаторів виконують, використовуючи електричні схеми заміщення. Реальні електричні і енергетичні процеси, що відбуваються в трансформаторі, в схемі заміщення відображаються за допомогою ідеальних резистивних і індуктивних елементів. Зі схем заміщення найбільш широко розповсюджена Т-образна схема.

Енергетичні явища в трансформаторі

Із живильної мережі на первинну обмотку трансформатора поступає електрична енергія з активною потужністю

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad (2.45)$$

де $\cos \varphi_1$ – коефіцієнт потужності трансформатора; φ_1 – зсув фаз $\underline{U}_1$ і $\underline{I}_1$.

З вторинної обмотки навантаженню z_H віддається активна потужність

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_H, \quad (2.46)$$

де $\cos \varphi_H$ – коефіцієнт потужності навантаження; φ_H – кут зсуву фаз $\underline{U}_2$ і $\underline{I}_2$, який визначається характером опору навантаження $\underline{z}_H = z_H e^{j\varphi_H}$.

Процес передачі енергії супроводжується її втратами в обмотках і осерді

$$\Delta P = P_e + P_m. \quad (2.47)$$

Потужність електричних втрат у двох обмотках

$$P_e = P_{e1} + P_{e2} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2. \quad (2.48)$$

Потужність магнітних втрат у сталі осердя складається із втрат на гістерезис P_r і вихрові струми P_v

$$P_M = P_\Gamma + P_B. \quad (2.49)$$

Відомо, що ці магнітні втрати спричинені магнітним потоком, що змінюється, причому $P_M \sim \Phi_m^2$. Тому величину P_M можна вважати постійною, тобто не залежною від струму навантаження трансформатора, тому що в робочому діапазоні навантажень амплітуда потоку $\Phi_m \approx \text{const}$. У той же час величина P_M залежить від прикладеної напруги U_1 . Якщо урахувати, що $U_1 \approx E_1$ і $\Phi_m = E_1 / 4,44 f w_1$, то $P_M \sim U_1^2$.

Загальний енергетичний рівень трансформатора оцінюється його повною номінальною потужністю, орієнтовно

$$S_{\text{ном}} \approx U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}} \text{ або } S_{\text{ном}} \approx U_{2\text{ном}} I_{2\text{ном}}, \quad (2.50)$$

де $U_{1\text{ном}}$, $I_{1\text{ном}}$, $U_{2\text{ном}}$, $I_{2\text{ном}}$ – номінальні значення відповідно напруг і струмів обмоток.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) трансформатора $\eta = P_2 / P_1$, його номінальне значення $\eta_{\text{ном}}$ може знаходитися в межах 0,9...0,995, зростаючи з одночасним підвищенням $S_{\text{ном}}$ і габаритів різних трансформаторів.

Режими роботи і характеристики трансформатора

При дослідженні трансформаторів особливу роль відводять режимам неробочого ходу (НХ) і дослідного короткого замикання (КЗ).

У режимі НХ вторинна обмотка розімкнута і на первинну обмотку подається напруга U_{10} , що дорівнює номінальній $U_{1\text{ном}}$. Вимірюючи вторинну напругу U_{20} , її вважають номінальною $U_{2\text{ном}}$ і визначають коефіцієнт трансформації

$$n = U_{\text{вн}} / U_{\text{нн}}, \quad (2.51)$$

де $U_{\text{вн}}$, $U_{\text{нн}}$ – відповідно вище і нижче із значень U_{10} і U_{20} .

Струм НХ I_1 позначається I_{10} і виражається у відсотках:

$$i_{\text{нх}} = (I_{10} / I_{1\text{ном}}) \cdot 100\%. \quad (2.52)$$

Звичайно значення $i_{\text{нх}}$ складає приблизно 10 % і менш. Якщо також врахувати, що $I_2 = 0$, а $P_e \sim I^2$, то потужністю електричних втрат в режимі НХ можна знехтувати і вважати, що потужність НХ P_0 витрачається тільки на магнітні втрати, тобто

$$P_M = P_0. \quad (2.53)$$

Дослідне КЗ виконується з тією умовою, щоб струми обмоток були рівні номінальним значенням: $I_{1к} = I_{1ном}$; $I_{2к} = I_{2ном}$. Установлювана при цьому напруга КЗ $U_{1к}$ виражається у відсотках

$$u_k = (U_{1к} / U_{1ном}) \cdot 100 \% \quad (2.54)$$

і може складати 5...10 % і менш, тобто $U_{1к} \ll U_{1ном}$.

Із дослідного КЗ треба відрізнити аварійне КЗ, яке відбувається при номінальній напрузі, і відповідні надмірно великі струми КЗ можуть призвести до руйнування трансформатора.

Якщо урахувати, що $P_M \sim U_1^2$, то при дослідному КЗ магнітні втрати потужності стають зневажливо малими. Тому потужність КЗ P_K практично відповідає електричним втратам номінального режиму, тобто $P_{еном} = I_K$, так як струми обмоток дорівнюють номінальним значенням.

У режимі навантаження трансформатор живиться номінальною напругою $U_{1ном}$. Опір навантаження z_H може змінюватися, але так, щоб струм навантаження I_2 знаходився у діапазоні від нуля до $I_{2ном}$.

Величина навантаження може характеризуватися коефіцієнтом навантаження

$$\beta = I_2 / I_{2ном}. \quad (2.55)$$

Робочі властивості трансформаторів ілюструються робочими характеристиками:

$$U_2(\beta), \quad \eta(\beta), \\ \cos \varphi_1(\beta), \quad I_1(\beta),$$

типовий вигляд яких поданий на рис. 2.45, де всі величини приведені у відносних одиницях.

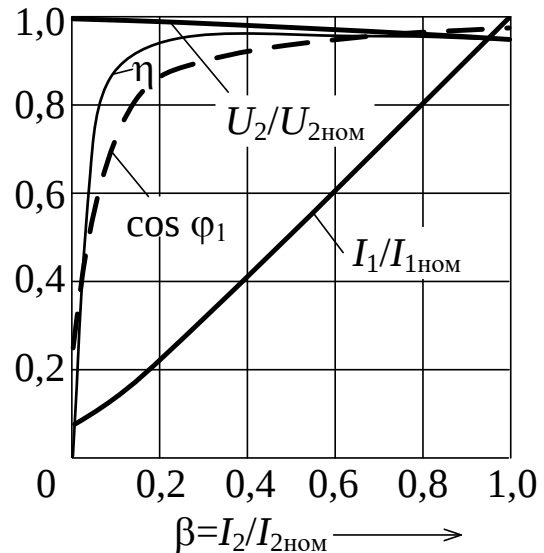


Рисунок 2.45

2.7. Приклади розрахунку параметрів і характеристик однофазних трансформаторів

Приклад 1. Однофазний трансформатор має наступні параметри: $w_{\text{HH}} = 590$; $w_{\text{BH}} = 3000$; $S_{\text{НОМ}} = 5$ кВА; номінальна напруга обмотки НН $U_{\text{HHНОМ}} = 130$ В. Визначити номінальні струми обмоток і напругу обмотки ВН.

Розв'язання

Коефіцієнт трансформації

$$n = \frac{w_{\text{BH}}}{w_{\text{HH}}} = \frac{3000}{590} = 5,08.$$

Номінальні струми обмоток НН і ВН та напруга обмотки ВН:

$$I_{\text{HHНОМ}} = S_{\text{НОМ}} / U_{\text{HHНОМ}} = 5 \cdot 10^3 / 130 = 38,5 \text{ А};$$

$$I_{\text{ВННОМ}} = I_{\text{HHНОМ}} \frac{w_{\text{HH}}}{w_{\text{BH}}} = I_{\text{HHНОМ}} / n = 38,5 / 5,08 = 7,58 \text{ А};$$

$$U_{\text{ВННОМ}} = U_{\text{HHНОМ}} \frac{w_{\text{BH}}}{w_{\text{HH}}} = U_{\text{HHНОМ}} n = 130 \cdot 5,08 = 660 \text{ В}.$$

Приклад 2. Задані наступні параметри трансформатора: $S_{\text{НОМ}} = 0,63$ кВА; $U_{1\text{НОМ}} = 220$ В; $i_{\text{НХ}} = 9\%$; $u_{\text{к}} = 5\%$. Визначити абсолютні значення струму НХ і струму аварійного КЗ.

Розв'язання

Номінальний струм первинної обмотки

$$I_{1\text{НОМ}} = S_{\text{НОМ}} / U_{1\text{НОМ}} = 0,63 \cdot 10^3 / 220 = 2,86 \text{ А}.$$

Струм у режимі НХ

$$I_{10} = \frac{i_{\text{НХ}} I_{1\text{НОМ}}}{100\%} = \frac{9 \cdot 2,86}{100} = 0,26 \text{ А}.$$

Напруга в режимі дослідного КЗ

$$U_{1\text{к}} = \frac{u_{\text{к}} U_{1\text{НОМ}}}{100} = \frac{5 \cdot 220}{100} = 11 \text{ В}.$$

Струм аварійного КЗ, що відбувається при номінальній напрузі,

$$I_{1\text{кз}} = I_{1\text{ном}} \frac{U_{1\text{ном}}}{U_{1\text{к}}} = 2,86 \cdot \frac{220}{11} = 57,2 \text{ А.}$$

Приклад 3. При експериментальному дослідженні однофазного трансформатора було встановлене і виміряне :

1) у досліді НХ $U_{10} = U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$; $I_{10} = 0,3 \text{ А}$; $P_0 = 23 \text{ Вт}$; $U_{20} = 110 \text{ В}$;

2) у досліді КЗ $I_{1\text{к}} = I_{1\text{ном}} = 5 \text{ А}$; $U_{1\text{к}} = 13 \text{ В}$; $P_{\text{к}} = 55 \text{ Вт}$.

Потрібно зобразити Т-образну схему заміщення трансформатора і визначити параметри її елементів.

Розв'язання

Типова Т-образна схема заміщення зображена на рис. 2.46, а. Вітка з повним опором $Z_0 = \sqrt{R_0^2 + X_0^2}$ являється такою, що намагнічує і заміщує дію основного магнітного потоку. Вітка з повним опором $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{L1\text{роз}}^2}$ відноситься до первинної обмотки, а вітка з приведеним $Z'_2 = \sqrt{(R'_2)^2 + (X'_{L2\text{роз}})^2}$ – до вторинної.

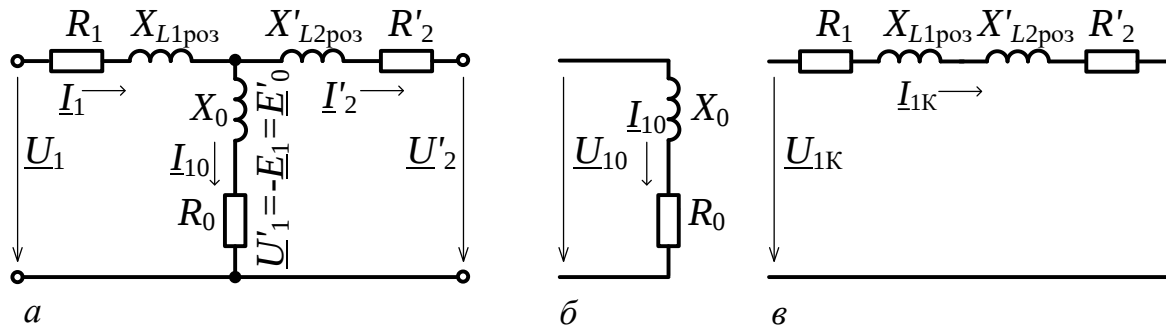


Рисунок 2.46

Параметри елементів схеми визначають, враховуючи відомі співвідношення опорів $Z_1 \approx Z'_2$; $Z_1 \ll Z_0$; $Z'_2 \ll Z_0$, завдяки чому для досліду НХ схема спрощується до вигляду, поданому на рис. 2.46, б, для досліду КЗ – на рис. 2.47, в.

За даними досліду НХ (по схемі на рис. 2.46, б) визначаємо наступні параметри:

$$Z_0 = U_{10} / I_{10} = 1115 \text{ Ом};$$

$$R_0 = P_0 / I_{10}^2 = 256 \text{ Ом};$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = 1085 \text{ Ом}.$$

Активний опір R_0 заміщує магнітні втрати в осерді, індуктивний опір X_0 – індукуючу дію основного магнітного потоку Φ , що приводить до збудження ЕРС E_1 і E_2 .

За даними досліджу КЗ (по схемі на рис. 2.46, в) знаходимо відповідно повний, активний і реактивний опори КЗ трансформатора:

$$Z_K = U_{1K} / I_{1K} = 2,6 \text{ Ом};$$

$$R_K = P_K / I_{1K}^2 = 2,2 \text{ Ом};$$

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2} = 1,4 \text{ Ом}.$$

Використовуючи припущення о рівності параметрів первинної обмотки і приведених параметрів вторинної обмотки, отримуємо:

$$R_1 \approx R_2' \approx R_K / 2 = 1,1 \text{ Ом};$$

$$X_{L1\text{роз}} \approx X_{L2\text{роз}}' \approx X_K / 2 \approx 0,7 \text{ Ом}.$$

Реальні – неприведені параметри вторинної обмотки:

$$R_2 = R_2' / n^2 = 0,09 \text{ Ом};$$

$$X_{L2\text{роз}} \approx X_{L2\text{роз}}' / n^2 = 0,06 \text{ Ом},$$

де $n = U_{10} / U_{20} = 3,45$ – коефіцієнт трансформації.

За допомогою активних опорів R_1 і R_2 заміщуються електричні втрати потужності обмоток, за допомогою індуктивних опорів $X_{L1\text{роз}}$ і $X_{L2\text{роз}}$ – дія потоків розсіювання $\Phi_{1\text{роз}}$ і $\Phi_{2\text{роз}}$, що приводить до збудження відповідних ЕРС $E_{1\text{роз}}$ і $E_{2\text{роз}}$.

Приклад 4. Однофазний трансформатор має наступні параметри: $U_{1\text{ном}} = 127 \text{ В}$; $U_{2\text{ном}} = 400 \text{ В}$; $I_{1\text{ном}} = 2,5 \text{ А}$; $P_K = 17 \text{ Вт}$; $U_{1K} = 8 \text{ В}$. Навантаження трансформатора має активно-індуктивний характер при $\cos \varphi_H = 0,7$. Розрахувати і побудувати зовнішню характеристику трансформатора.

Розв'язання

Зовнішня характеристика – залежність $U_2(I_2)$ або $U_2(\beta)$, де β – коефіцієнт навантаження ($\beta = I_2 / I_{2\text{ном}}$).

Із теорії трансформатора відома приближена формула зовнішньої характеристики

$$U_2 = U_{20} \left[1 - \beta \frac{u_k}{100\%} \cos(\varphi_H - \varphi_K) \right].$$

Відсотковий вираз напруги КЗ

$$u_k = \frac{U_{1k}}{U_{1\text{ном}}} \cdot 100\% = 6,3\%.$$

Кут зсуву фаз навантаження визначається по її коефіцієнту потужності

$$\varphi_H = \arccos(\cos \varphi_H) = \arccos(0,7) = 45,6^\circ.$$

Коефіцієнт потужності і кут зсуву фаз трансформатора при КЗ з урахуванням того, що струм первинної обмотки при КЗ $I_{1k} = I_{1\text{ном}}$ відповідно

$$\cos \varphi_K = P_K / (U_{1k} I_{1k}) = 0,85;$$

$$\varphi_K = \arccos(0,85) = 31,8^\circ.$$

Напруга на затискачах вторинної обмотки в режимі НХ

$$U_{20} = U_{2\text{ном}}.$$

Підставляючи знайдені значення, отримуємо явну формулу зовнішньої характеристики конкретного трансформатора:

$$\begin{aligned} U_2 &= U_{20} \left[1 - \beta \frac{u_k}{100\%} \cos(\varphi_H - \varphi_K) \right] = \\ &= 400 \left[1 - \beta \frac{6,3}{100} \cos(45,6^\circ - 31,8^\circ) \right] = 400(1 - \beta \cdot 0,061). \end{aligned}$$

Очевидно, приблизно визначена зовнішня характеристика являється прямою лінією, що проводиться через точки:

$$\beta = 0; \quad U_2 = 400 \text{ В};$$

$$\beta = 1; \quad U_2 = 375,6 \text{ В}.$$

Побудована таким чином зовнішня характеристика зображена на рис. 2.47 у відносних одиницях: $U_2^*(\beta)$, де $U_2^* = U_2 / U_{2\text{ном}}$.

Зміна напруги на виході трансформатора пояснюється його падінням на внутрішньому опорі, який найбільш повно проявляється в режимі КЗ, дані якого використані для отримання формули зовнішньої характеристики.

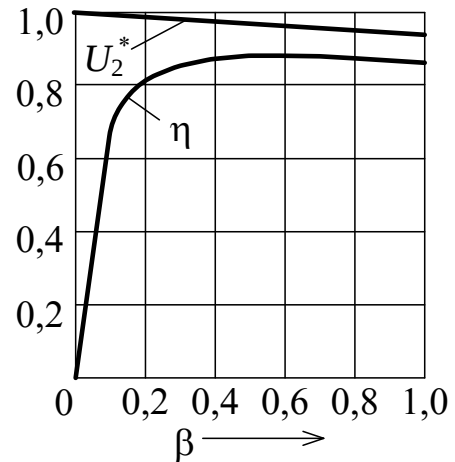


Рисунок 2.47

Приклад 5. Дані наступні параметри трансформатора: $S_{\text{ном}} = 1,0$ кВА; $P_0 = 25$ Вт; $P_K = 70$ Вт. Навантаження трансформатора являється активно-індуктивним при $\cos \varphi_H = 0,6$.

Належить побудувати графік $\eta(\beta)$, де η – ККД; β – коефіцієнт навантаження.

Розв’язання

Із теорії трансформаторів відома приближена формула розрахунку залежності $\eta(\beta)$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_m + P_e} = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_H}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_H + P_0 + \beta^2 P_K}.$$

Підставляючи задані значення для даного трансформатора отримаємо

$$\eta = \frac{\beta \cdot 1000 \cdot 0,6}{\beta \cdot 1000 \cdot 0,6 + 25 + \beta^2 70} = \frac{600 \cdot \beta}{600 \cdot \beta + 25 + 70 \cdot \beta^2}.$$

Приймаючи ряд конкретних значень β від НХ до номінального навантаження, отримуємо чисельну залежність $\eta(\beta)$ (табл. 2.12), яка побудована на рис. 2.47.

Таблиця 2.12 – Дані для побудови залежності $\eta(\beta)$

β	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
η	0	0,54	0,7	0,81	0,852	0,869	0,876	0,878	0,876	0,873	0,869	0,863

2.8. Двигуни постійного струму. Основні теоретичні положення.

Машини постійного струму, як і всі електричні машини, є зворотними, тобто, вони можуть працювати як у режимі генератора, так і в режимі двигуна. Генератор є джерелом електроенергії, у якому механічна енергія перетворюється в електричну, а в двигуні, навпаки, електрична енергія перетворюється в механічну. У теперішній час вони застосовуються в основному в якості двигунів для приводів машин та механізмів, які потребують плавного та економічного регулювання частоти обертання в широких межах, наприклад в електротязі, а також великих перевантажувальних і пускових моментів.

Будова та принцип дії двигуна постійного струму

Двигун постійного струму складається з трьох основних частин: нерухомого статора, обертального ротора (якоря) і колекторного вузла (рис. 2.48). На рис. 2.48 показаний двигун у поперечному (а) і повздовжньому перерізах (б), у розрізі та в загальному вигляді (в).

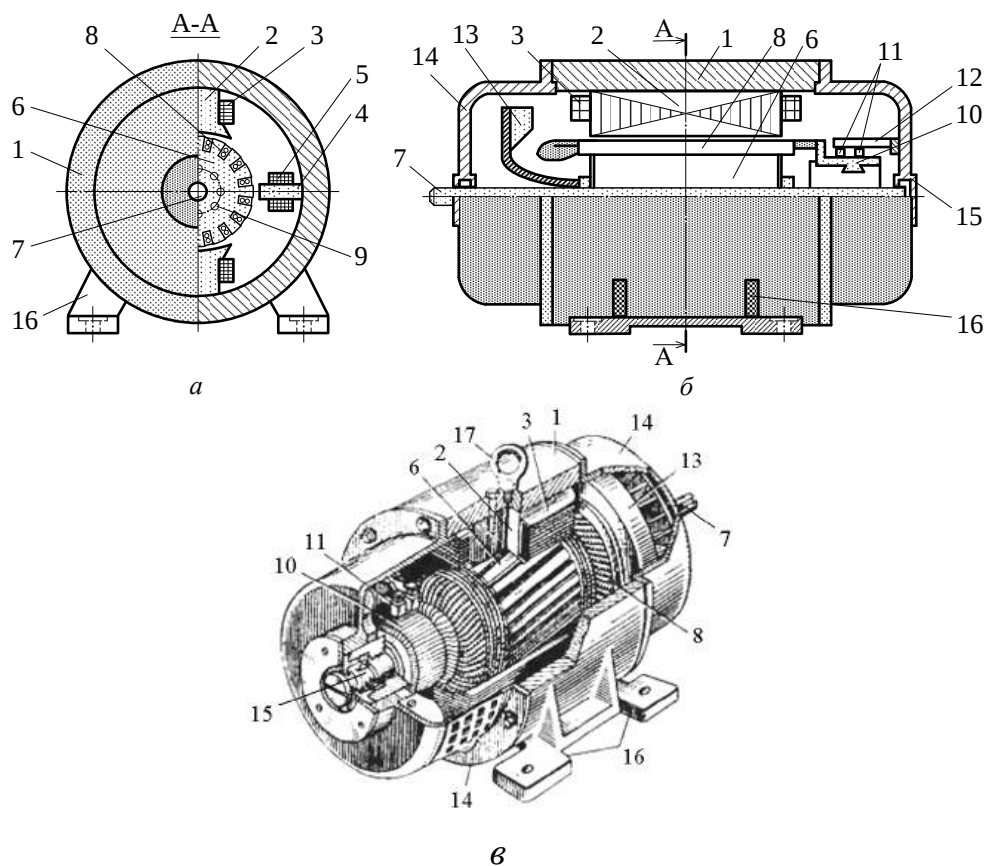


Рисунок 2.48

Статор містить станину 1, яка являє собою полий сталевий циліндр, головні полюси 2, що кріпляться до станини (завжди шихтовані) з полюсними наконечниками. Обмотка збудження 3 встановлена на головних полюсах. Додаткові полюси 4 з обмоткою 5 розташовуються між головними полюсами.

Якір містить шихтоване осердя 6, яке посаджене на вал 7. Обмотка якоря 8 укладена в пази осердя, у якому виконані канали для охолодження 9. Колекторний вузол містить колектор 10, виконаний з окремих колекторних мідних пластин. На колекторі встановлюються щітки 11 (вугільно-графітні), які за допомогою щіткотримача з'єднані з траверсою 12. Щітки ковзають по колектору, здійснюючи електричний зв'язок обмотки якоря з зовнішнім колом. Крім того, двигун містить вентилятор 13, який посаджений на вал, підшипникові щити 14, що встановлені на підшипниках 15. Двигун кріпиться до основи за допомогою лап 16.

На рис. 2.48 більш детально показані елементи статора: загальний вид (а); поперечний переріз (б) та осердя (в) головного полюса; додатковий полюс (г); цифрами подані: 1 – осердя головного полюса; 2 – обмотка збудження; 3 – полюсний наконечник; 4 – якір; 5 – станина; 6 – болт-“шпилька”; 7 – клемні виводи обмоток полюсів; 8 – додатковий полюс; 9, 10 – осердя та обмотка додаткового полюса.

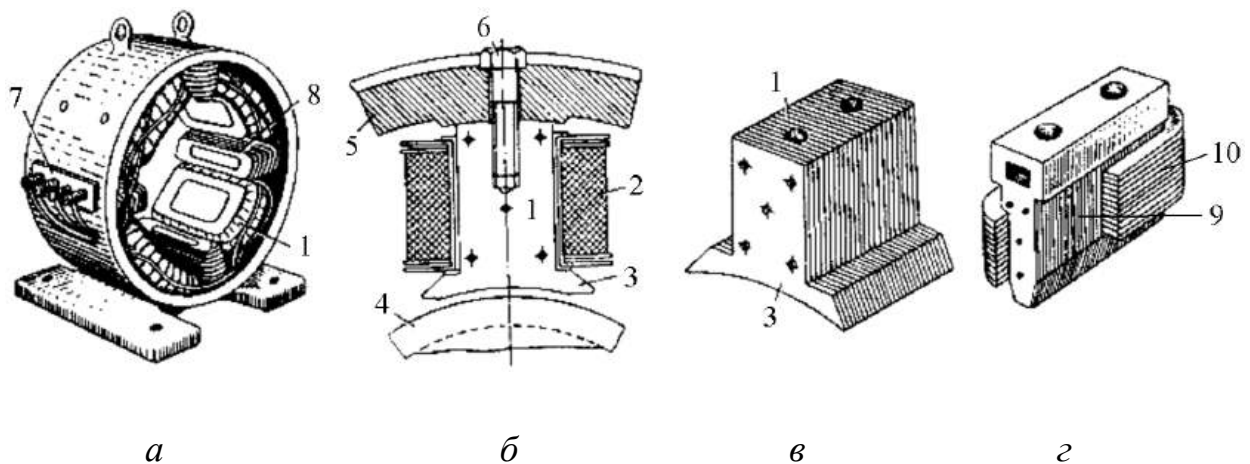


Рисунок 2.49

На рис. 2.49 подані елементи якоря і колектора, а також їх конструктивні особливості: 1 – наживні шайби; 2 – канавки під бандажі; 3 – стяжний болт; 4 – затискне кільце; 5 – міканітова ізоляція; 6 – корпус-втулка; 7 – виступ з прорізом колекторної пластини.

Обмотка якоря виконана у вигляді секцій, кінці яких припаяні до пластин колектора. Усі секції з'єднані послідовно. Секції мають по дві активні (пазові) частини. Кінець наступної секції обмотки з'єднаний з початком попередньої. Таким чином утворюється замкнена обмотка якоря. Секції обмотки вкладаються в пази якоря в певному порядку так, щоб при обертанні якоря їх частини завжди знаходились під різними полюсами статора.

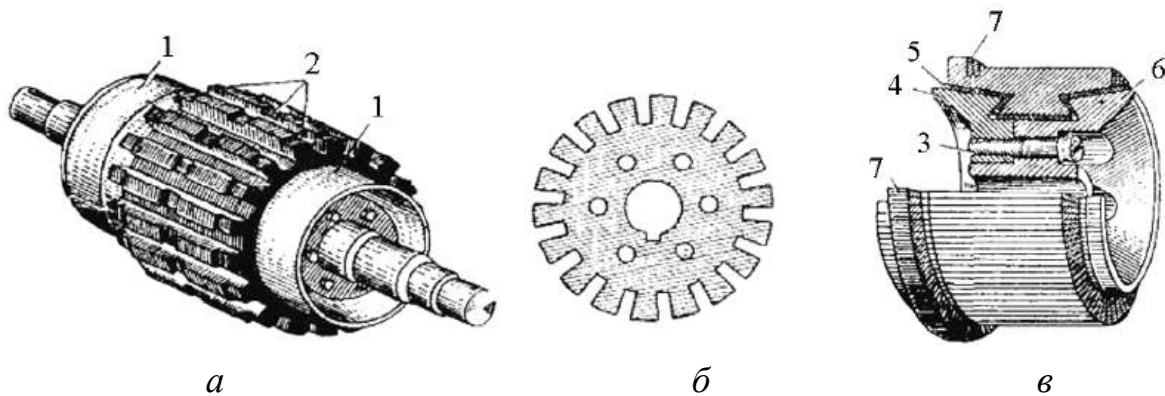


Рисунок 2.50

Кількість щіток дорівнює числу головних полюсів машини. Щітки встановлюються на колекторі по осі полюсів (при наявності додаткових полюсів) так, щоб вони з'єднувались з ділянками секцій, які в даний момент майже не перетинають силові лінії. Кожна щітка звичайно перекриває на колекторі декілька пластин. Через те що секції в кожній паралельній вітці обмотки з'єднані послідовно, то їх ЕРС додаються. Обмотка щітками ділиться на паралельні вітки. Число паралельних віток позначається $2a$. Струм паралельної вітки $i_a = \frac{I_a}{2a}$, де I_a – струм обмотки якоря.

Принцип дії машини постійного струму базується на законах електромагнітної індукції та законі Ампера (рис. 2.51). Магнітне поле машини утворює обмотка збудження, яка знаходиться на головних по-

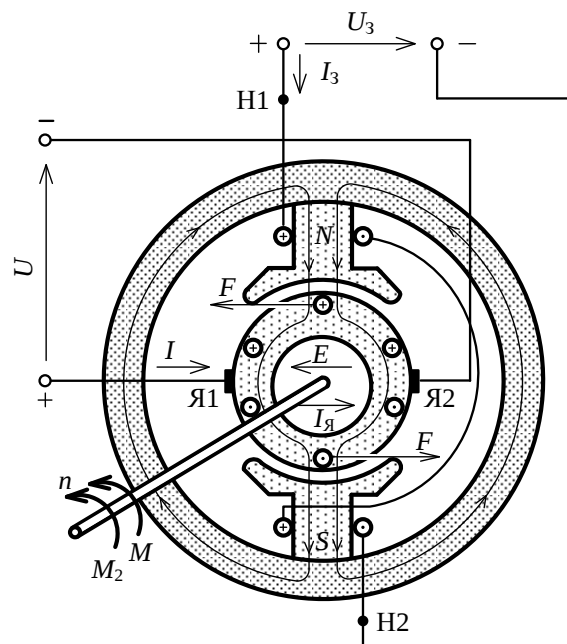


Рисунок 2.51

люсах. Основний магнітний потік Φ проходить станину, осердя полюсів, осердя якоря і дворазово долає повітряний проміжок між якорем та головними полюсами. Напруга U , що подається на обмотку якоря від мережі, створює струм у провідниках обмотки якоря I_a (напрямок вказаний знаками $\oplus$ і $\odot$). За законом Ампера на провідники обмотки якоря діють сили F , напрям яких визначається правилом лівої руки. Ці сили створюють обертовий момент M , який приводить якорь двигуна до обертання з частотою n . При цьому в провідниках обмотки якоря за законом електромагнітної індукції наводяться ЕРС (проти-ЕРС), напрям яких визначається за правилом правої руки і протилежний напрямку струму в провідниках.

Основні рівняння двигунів постійного струму

Обертальний момент

$$M = C_M \Phi I_a. \quad (2.56)$$

Корисний момент на валу двигуна

$$M_2 = 9,55 \frac{P_2}{n}, \quad (2.57)$$

де P_2 – корисна потужність на валу двигуна, Вт; n – частота обертання, об/хв.

Напруга на якорі

$$U = E + I_a R_a. \quad (2.58)$$

ЕРС якоря

$$E = C_E \Phi n. \quad (2.59)$$

Рівняння моментів двигуна при сталому режимі роботи:

$$M = M_2 + M_0 = M_c + M_0, \quad (2.60)$$

де M_0 – момент неробочого ходу двигуна; M_c – статичний (гальмовий) момент робочого механізму.

Способи пуску в хід і регулювання частоти обертання двигунів постійного струму

На рис. 2.52 зображені електричні схеми пуску і регулювання частоти обертання двигунів постійного струму з паралельним (а) і послідовним збудженням (б).

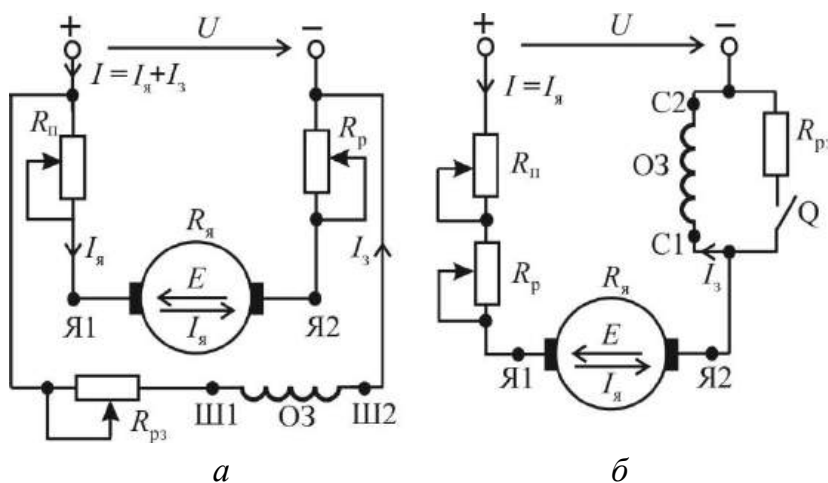
Застосовуються наступні способи пуску:

а) пряме вмикання двигунів у мережу на номінальну напругу;
 б) реостатний спосіб пуску шляхом вмикання в коло якоря пускового реостата R_{Π} ;

в) безреостатна зміна напруги U при пуску, що підводиться до двигуна за допомогою спеціальних генераторів.

Перший спосіб пуску застосовується для машин малої потужності. Пускові струми $I_{\text{пуск}} = U / R_a$ звичайно перевищують номінальні значення струмів у 6...8 разів.

Третій спосіб застосовується рідко з використанням системи „генератор-двигун”.



Найбільш широко розповсюджений другий спосіб. При цьому пусковий струм $I_{\text{пуск}} = U / (R_a + R_{\Pi})$ обмежується в межах $I_{\text{пуск}} = (1,5 \dots 2,5) I_{\text{ном}}$ за допомогою пускового реостата з опором R_{Π} .

Рисунок 2.52

Після запуску двигуна пусковий реостат вимикається.

Регулювання частоти обертання можна проаналізувати, використовуючи формулу

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_p)}{C_E \Phi}. \quad (2.61)$$

Із цієї формули випливають такі способи регулювання частоти обертання двигунів:

а) зміною напруги мережі U . Регулювання n відбувається вниз від номінального значення $n_{\text{ном}}$;

б) зміною падіння напруги в якорному колі $I_a(R_a + R_p)$ шляхом введення регульовального реостата в коло якоря. В цьому випадку частота $n_{\text{ном}}$ регулюється вниз від номінальної частоти обертання $n_{\text{ном}}$;

в) зміною потоку збудження Φ за допомогою регульовального реостата $R_{\text{пз}}$, ввімкнутого в коло збудження. У цьому випадку частота n регу-

люється вгору від номінального значення $n_{\text{ном}}$.

Механічні характеристики двигуна постійного струму

Механічними характеристиками являються залежності $n(M)$ при $U = \text{const}$.

Для двигуна з паралельним збудженням (див. рис. 2.52, а) при $\Phi = \text{const}$ (реакцією якоря знехтуємо) отримаємо

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - M \frac{R_a + R_p}{C_E C_M \Phi^2} = n_0 - C M. \quad (2.62)$$

На рис. 2.52, а зображені механічні характеристики двигуна паралельного збудження (крива 1 – природна характеристика при $R_p = 0$; крива 2 – штучна при $R_p > 0$). Для двигуна з послідовним збудженням (див. рис. 2.52, б) при $\Phi = K I_a$ отримаємо

$$n = \frac{U}{C_E \sqrt{\frac{M K}{C_M}}} - \frac{R_a + R_p}{C_E K}. \quad (2.63)$$

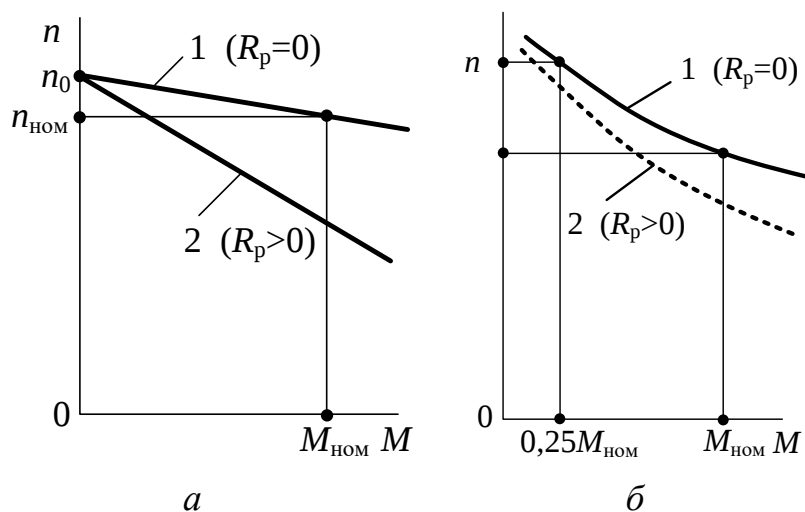


Рисунок 2.53

Останнє рівняння має вигляд, близький до гіперболи (рис. 2.53, б): крива 1 – природна характеристика, крива 2 – штучна.

Відмітимо, що двигуни з послідовним збудженням мають великий обертальний момент, пропорційний квадрату струму. Однак при відсутності моменту на валу двигуна частота обертання швидко зростає (двигун йде в рознос) і для її обмеження необхідно мати момент опору на валу не менш $M = 0,25M_{\text{ном}}$.

Втрати потужності і ККД двигуна постійного струму

Процес перетворення енергії в двигуні постійного струму з паралельним збудженням пояснюється за допомогою енергетичної діаграми (рис. 2.54), де P_1 , $P_{\text{ем}}$, P_2 – потужність, відповідно підведена, електромагнітна і корисна; P_3 , P_0 – втрати відповідно в колі збудження і неробочого ходу; $P_{\text{мх}}$ – механічні втрати; $P_{\text{м}}$ – магнітні втрати в магнітопроводі; $P_{\text{ел}}$ – електричні втрати в обмотках якоря і додаткових полюсів; $P_{\text{щ}}$ – втрати в контакті „щітка-колектор”; $P_{\text{дод}}$ – додаткові втрати.

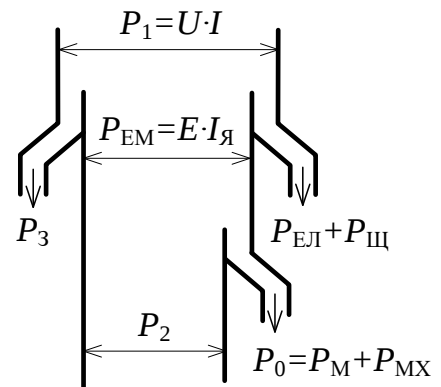


Рисунок 2.54

У двигуні присутні втрати, що трудно враховуються, які називаються додатковими $P_{\text{дод}}$, що складають 0,5...1,0 % підведеної потужності в двигуні.

ККД двигуна

$$\eta_{\text{д}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}, \quad (2.64)$$

де ΔP – сума втрат потужності в двигуні,

$$\Delta P = P_0 + P_{\text{ел}} + P_{\text{щ}} + P_3 + P_{\text{дод}}. \quad (2.65)$$

2.9. Приклади розрахунку параметрів і характеристик двигунів постійного струму

Приклад 1. Двигун з паралельним збудженням (див. рис. 2.52, а) має такі дані: номінальну потужність $P_{2\text{ном}} = 20$ кВт; номінальну напругу $U_{\text{ном}} = 220$ В; номінальну частоту обертання $n_{\text{ном}} = 500$ об/хв; номінальний ККД $\eta_{\text{ном}} = 0,8$; опір якоря $R_a = 0,08$ Ом; опір обмотки збудження $R_{36} = 32$ Ом.

1. Для номінального режиму визначити потужність $P_{1\text{ном}}$ і струм $I_{\text{ном}}$, що споживаються двигуном із мережі; струм обмотки збудження $I_{36\text{ном}}$; струм якоря $I_{a\text{ном}}$; номінальну електромагнітну потужність $P_{\text{емном}}$; ЕРС $E_{\text{ном}}$; номінальні обертальний $M_{\text{ном}}$ і корисний $M_{2\text{ном}}$ механічні моменти; сумарні втрати в двигуні $\Delta P_{\text{ном}}$.

Вказівка – при розрахунку реакцією якоря знехтувати.

2. Побудувати механічні характеристики $n(M)$ при $U_{\text{ном}}$: природну; штучну, якщо в коло якоря введений регулювальний реостат з опором $R_p = 0,18 \text{ Ом}$.

Розв'язання

1. Для номінального режиму:

$$P_{1\text{ном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}} = \frac{20}{0,8} = 0,25 \text{ кВт};$$

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{1\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{25 \cdot 10^3}{220} = 113,6 \text{ А};$$

$$I_{\text{зб ном}} = \frac{U_{\text{ном}}}{R_{\text{зб}}} = \frac{220}{32} = 6,9 \text{ А};$$

$$I_{\text{а ном}} = I_{\text{ном}} - I_{\text{зб ном}} = 113,6 - 6,9 = 106,7 \text{ А}.$$

$$E_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} - I_{\text{а ном}} R_a = 220 - 106,7 \cdot 0,08 = 211,5 \text{ В};$$

$$P_{\text{ем ном}} = E_{\text{ном}} I_{\text{а ном}} = 211,5 \cdot 10,6 = 22570 \text{ Вт} = 22,57 \text{ кВт};$$

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \frac{P_{\text{ем ном}}}{n_{\text{ном}}} = 9,55 \frac{22570}{500} = 431 \text{ Н·м};$$

$$M_{2\text{ном}} = 9,55 \frac{P_{2\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} = 9,55 \frac{20 \cdot 10^3}{500} = 382 \text{ Н·м};$$

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{1\text{ном}} - P_{2\text{ном}} = 25 - 20 = 5 \text{ кВт}.$$

2. Механічна характеристика $n(M)$ при $U_{\text{ном}}$ представляє собою пряму (рис. 2.55) з координатами:

$$M = 0; n = n_0 = U_{\text{ном}} / C_E \Phi_{\text{ном}} \text{ (точка A)}$$

і $n = n_{\text{ном}} = 500 \text{ об/хв.}; M_{\text{ном}} = 431 \text{ Н·м}$ (точка B).

Частота обертання якоря при номінальному навантаженні

$$n_{\text{ном}} = E_{\text{ном}} / C_E \Phi_{\text{ном}},$$

а частота $n_0 = U_{\text{ном}} / C_E \Phi_{\text{ном}}$, тому

$$n_0 = n_{\text{ном}} \frac{U_{\text{ном}}}{E_{\text{ном}}} = 500 \frac{220}{211,5} = 520 \text{ об/хв.}$$

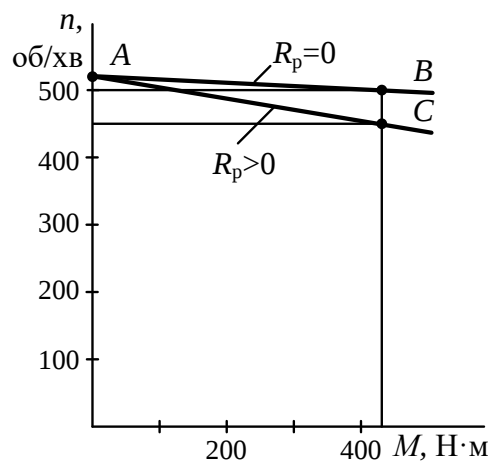


Рисунок 2.55

Штучна характеристика $n(M)$ при $U_{\text{ном}}$ і $R_p = 0,18 \text{ Ом}$ (рис. 2.55) проходить через точки А (координати: $n_0 = 520 \text{ об/хв}$; $M = 0$) і С (координати: n' і $M_{\text{ном}}$).

Ордината точки С

$$n' = \frac{U_{\text{ном}} - I_{\text{аном}}(R_a + R_p)}{E_{\text{ном}}} n_{\text{ном}} = \frac{220 - 113,6 \cdot (0,08 + 0,18)}{211,5} \cdot 500 = 450 \text{ об/хв}.$$

Приклад 2. Двигун постійного струму з послідовним збудженням (див. рис. 2.52, б) має наступні номінальні дані: потужність на валу $P_{2\text{ном}} = 7,5 \text{ кВт}$; напругу $U_{\text{ном}} = 110 \text{ В}$; частоту обертання $n_{\text{ном}} = 500 \text{ об/хв}$; ККД $\eta_{\text{ном}} = 0,798$; опір якорного кола з урахуванням обмотки збудження $R_a = 0,16 \text{ Ом}$. Характеристика намагнічування $\Phi(I)$ у відносних одиницях показана на рис. 2.56, де $k_I = I / I_{\text{ном}}$ – кратність струму; $k_\Phi = \Phi / \Phi_{\text{ном}}$ – кратність магнітного потоку.

1. Для номінального режиму роботи визначити потужність $P_{1\text{ном}}$, що споживається двигуном із мережі; втрати потужності $\Delta P_{\text{ном}}$; струм $I_{\text{ном}}$; ЕРС $E_{\text{ном}}$; електромагнітну потужність $P_{\text{емном}}$; обертальний момент $M_{\text{ном}}$; корисний момент на валу двигуна $M_{2\text{ном}}$.

Вказівка – при розрахунку реакцією якоря знехтувати.

2. Побудувати механічні характеристики двигуна $n(M)$ при $U_{\text{ном}}$ природну та штучну, якщо в колі якоря $R_p = 0,224 \text{ Ом}$.

Розв'язання

Для номінального режиму:

$$P_{1\text{ном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}}} = \frac{7,5}{0,798} = 9,4 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{1\text{ном}} - P_{2\text{ном}} = 9,4 - 7,5 = 1,9 \text{ кВт};$$

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{1\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} = \frac{9,4 \cdot 10^3}{110} = 85,5 \text{ А};$$

$$E_{\text{ном}} = U_{\text{ном}} - I_{\text{ном}} R_a = 110 - 85,5 \cdot 0,16 = 96,5 \text{ В};$$

$$P_{\text{емном}} = E_{\text{ном}} I_{\text{ном}} = 96,5 \cdot 85,5 = 8250 \text{ Вт};$$

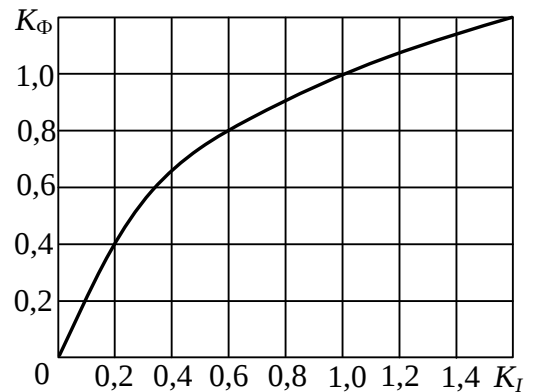


Рисунок 2.56

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 \frac{P_{\text{ЕМНОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = 9,55 \frac{8250}{500} = 157,6 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{2\text{НОМ}} = 9,55 \frac{P_{2\text{НОМ}}}{n_{\text{НОМ}}} = 9,55 \frac{7,5 \cdot 10^3}{500} = 143 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

2. Для побудови природної характеристики $n(M)$ при $U = U_{\text{НОМ}}$ скористаємося кривою намагнічування $\Phi(I)$, що показана на рис. 2.56, і формулами

$$n = n_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}} - k_I I_{\text{НОМ}} R_a}{k_{\Phi} E_{\text{НОМ}}}, \quad M = k_I k_{\Phi} M_{\text{НОМ}}.$$

Задаючись значеннями k_I по рис. 2.56, визначаємо k_{Φ} , n і M . Усі розрахунки зводимо в табл. 2.13. За результатами розрахунку побудована природна механічна характеристика $n(M)$ на рис. 2.57 (крива 1).

Таблиця 2.13 – Природна та штучна механічні характеристики

$k_I = I / I_{\text{НОМ}}$	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
$k_{\Phi} = \Phi / \Phi_{\text{НОМ}}$	0,65	0,8	0,91	1,0	1,08
$M, \text{Н}\cdot\text{м}$	41	75,7	114,7	157,6	204,3
$n, \text{об/хв, при } R_p = 0$	834	660	565	500	450
$n, \text{об/хв, при } R_p = 0,224 \text{ Ом}$	772	585	477	400	339

Для побудови штучної характеристики $n(M)$ при $U = U_{\text{НОМ}}$ і $R_p = 0,224 \text{ Ом}$ скористаємося кривою намагнічування $\Phi(I)$ і формулами

$$n = n_{\text{НОМ}} \frac{U_{\text{НОМ}} - k_I I_{\text{НОМ}} (R_a + R_p)}{k_{\Phi} E_{\text{НОМ}}},$$

$$M = k_I k_{\Phi} M_{\text{НОМ}}.$$

Задаючись значеннями k_I за рис. 2.56, визначаємо k_{Φ} , n і M . Усі розрахунки зведені в табл. 2.13.

За результатами розрахунку побудована штучна механічна характеристика $n(M)$, яка показана на рис. 2.57 (крива 2).

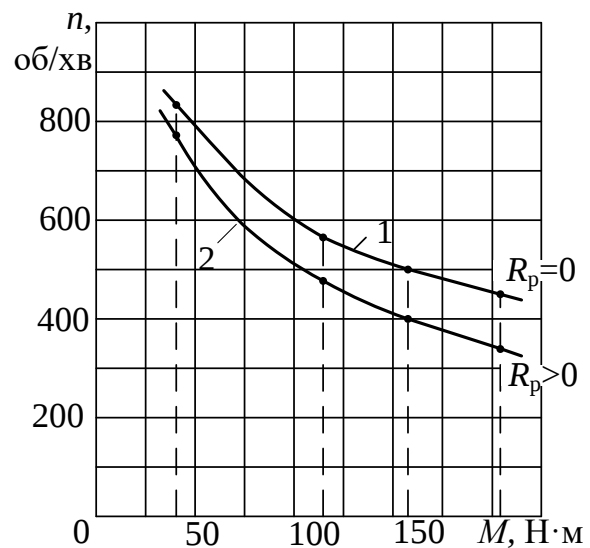


Рисунок 2.57

2.10. Асинхронні двигуни. Основні теоретичні положення.

Будова трифазного асинхронного двигуна

До асинхронних відносять машини змінного струму, частота обертання ротора n_2 яких при постійній частоті змінного струму джерела f змінюється зі змінюванням навантаження і відрізняється від синхронної частоти, тобто від частоти обертання магнітного поля статора n_1 . «Асинхронний» означає *неодночасний*.

Асинхронний двигун призначений для перетворення електричної енергії в механічну енергію у вигляді обертального моменту на валу машини, який передається виконавчому механізму, з'єднаному з ним, наприклад, за допомогою муфти або через редуктор.

У силових установках широко застосовуються трифазні двигуни, які приводять до руху різні станки, насосно-компресорні, ковальсько-пресові, підйомно-транспортні і інші машини та механізми.

Трифазні асинхронні двигуни виконуються двох типів: з короткозамкненим і фазним ротором. Конструкції асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором зображені на рис. 2.66 *а, б* (поперечний та поздовжній перерізи), а загальний вигляд – на рис. 2.67.

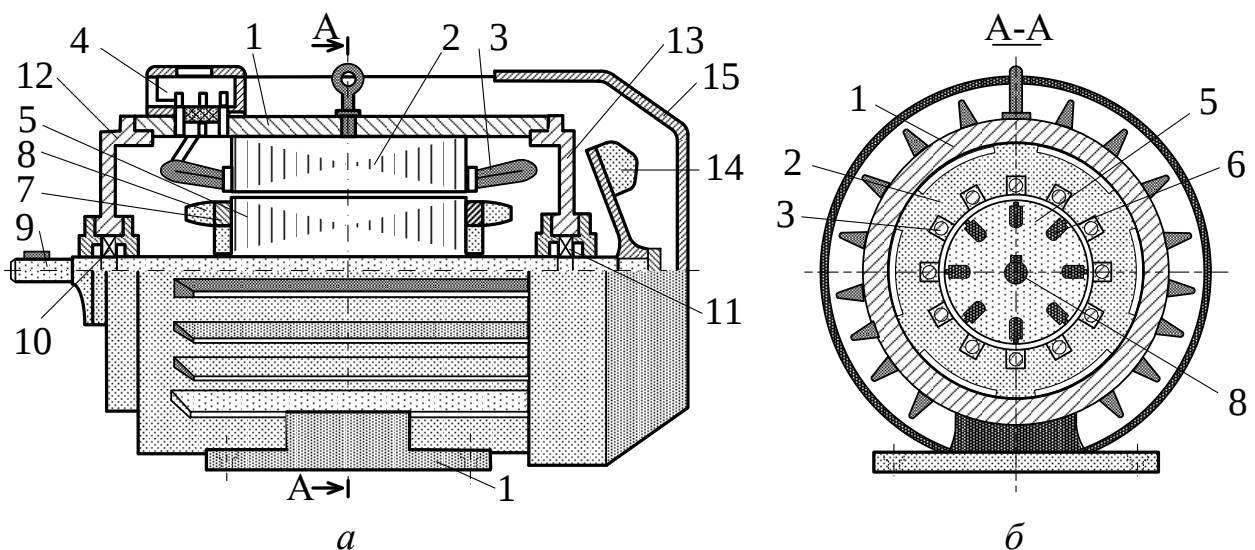


Рисунок 2.66



Рисунок 2.67

від одного шаром лаку. У пазах осердя статора, виконаних в процесі штамповки листів, укладається обмотка 3 статора, яка складається з трьох фаз: C_1 - C_4 (фаза А), C_2 - C_5 (фаза В), C_3 - C_6 (фаза С). Початки C_1 , C_2 , C_3 і кінці C_4 , C_5 , C_6 фаз обмоток виведені на клемну коробку 4, що укріплена на станині. Фази обмотки статора з'єднуються „зіркою” або „трикутником”.

Умовні позначення фаз обмоток на схемах і схеми включення їх у трифазну мережу „зіркою” та „трикутником” показані на рис. 2.68, а, б.

На рис. 2.69 поданий конструктивний (а) і схематичний (б) вигляд короткозамкненого ротора, який складається із осердя 5, набраного із листів електротехнічної сталі товщиною 0,35...0,5 мм з виштампуваними на них пазами, в яких розташовуються стрижні 6 короткозамкненої обмотки ротора. Стрижні на торцях жорстко з'єднані між собою торцевими кільця-

Основні частини двигуна – нерухомий статор і обертовий ротор, розділені повітряним зазором. На станині 1, виконаний у вигляді сталевий вальцьованої труби або алюмінієвої виливки, встановлюється осердя 2 статора. Осердя виконується із листів електротехнічної сталі товщиною 0,35...0,5 мм, ізольованих один

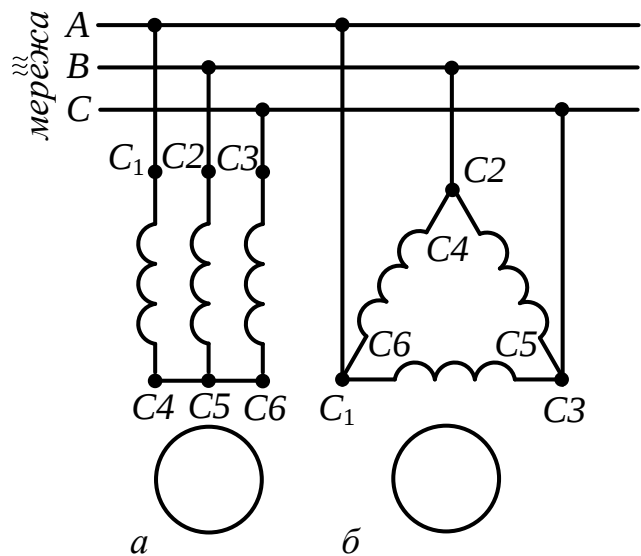


Рисунок 2.68

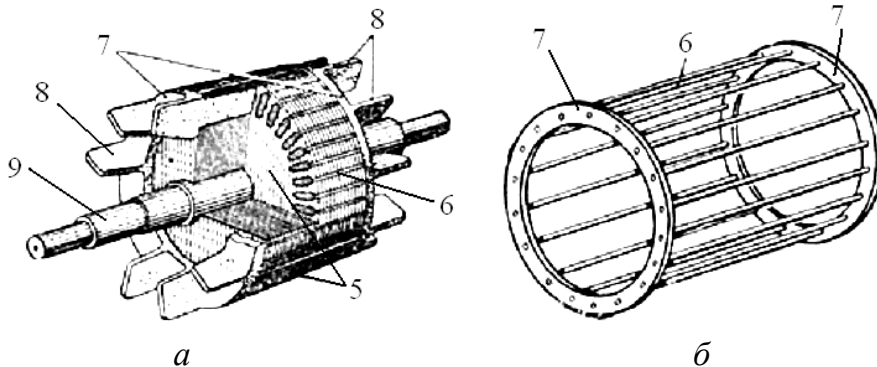


Рисунок 2.69

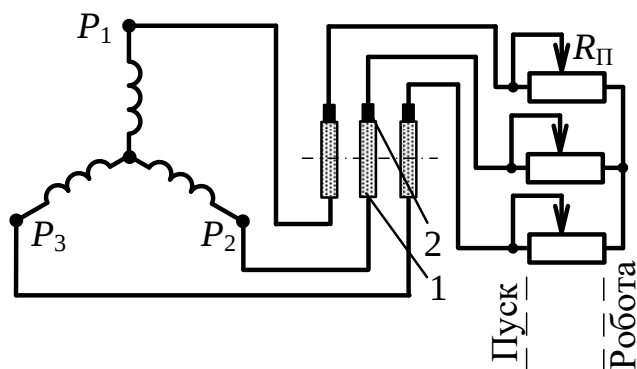


Рисунок 2.70

ми 7. Як правило, обмотка ротора виконується із алюмінію заливанням його в розплавленому стані в пази осердя з одночасним виливком торцевих кілець 7 і вентиляційних лопаток 8. Осердя ротора з обмоткою закріплюється на валу 9 і встановлюється на підшипникових щитах 12 і 13.

Для охолодження машини служить вентилятор 14, закритий кожухом 15.

Конструкції статора двигуна з фазним і короткозамкненим роторами ідентичні. Фазний ротор або ротор з контактними кільцями (рис. 2.70) має трифазну обмотку, виконану аналогічно обмотці статора. Вона з'єднується „зіркою”, початки P_1 , P_2 і P_3 її фаз виводяться на латунні або мідні контактні кільця 1, встановлені на валу ротора і надійно ізольовані один від одного та від корпусу і обертового валу. На кільцях установлюються щітки 2, які електрично з'єднуються з трифазним пусковим реле $R_{\text{п}}$.

Трифазні двигуни малої і середньої потужності виготовляються на дві номінальні напруги: 220/127, 380/220, 600/380 В, відношення між якими дорівнює $\sqrt{3}$. При лінійних напругах трифазної мережі, вказаних в чисельнику, фази обмотки статора з'єднуються „зіркою”, а в знаменнику – „трикутником”. В обох випадках фазні напруги і струми в кожній фазі обмотки статора однакові.

Обертове магнітне поле і його властивості

Обертове магнітне поле – це багатополюсне магнітне поле, що створюється в повітряному зазорі вздовж розточення статора струмами $\underline{I}_A$, $\underline{I}_B$, $\underline{I}_C$, що протікають по фазам обмотки статора при її підключенні до трифазної мережі з симетричною системою напруг. Це поле обертається з синхронною частотою, об/хв,

$$n_1 = 60 f_1 / p, \quad (2.66)$$

де f_1 – частота струму обмотки статора; p – кількість пар полюсів магнітного поля, утворених обмоткою статора.

Для створення цього поля необхідно виконати наступні умови: створити просторовий зсув між осями фазних обмоток статора, рівний 120 еле-

тричним градусам (1 електричний градус відповідає $1/p$ геометричним градусам), а також заживити обмотку статора від трифазної мережі.

На рис. 2.71 показана схема розташування трьох котушок (фаз) в пазах осердя статора, що дозволяє отримати двополюсне ($2p = 2$) обертове магнітне поле. Цифрами позначені: 1 – осердя; 2 – пази з обмоткою; 3 – магнітне поле.

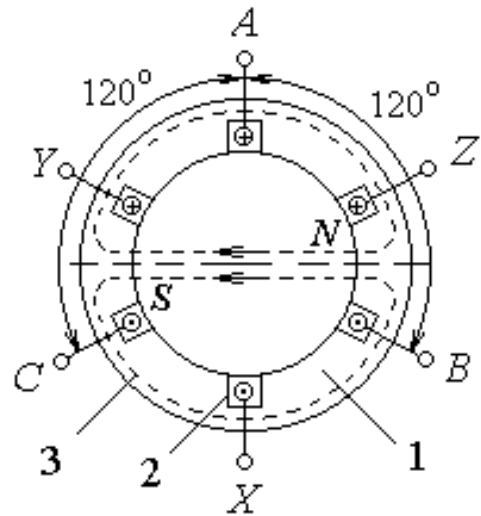


Рисунок 2.71

Щоб упевнитись, що поле трифазної обмотки є обертовим, розглянемо спрощені картини магнітних полів у статорі двополюсного двигуна для трьох моментів часу I – III при максимумах струмів у фазах (рис. 2.72). У момент часу I (рис. 2.72, а) струм в обмотці A-X $i_A = i_m$, а струми в обмотках B-Y та C-Z $i_B = i_C = -0,5I_m$ (рис. 2.72, з). Суперпозиція полів, утворених обмотками, дає поле машини, силові лінії якого направлені горизонтально. Магнітні полюси поля N і S утворюють вісь поля всередині статора.

У момент часу II (рис. 2.72, б) струм в обмотці B-Y $i_B = i_m$, а струми в обмотках A-X та C-Z $i_A = i_C = -0,5I_m$ (рис. 2.72, з). Картина поля така ж, як і для моменту часу I, тільки вісь поля повернулась по ходу годинникової стрілки на 120° , співпадаючи з віссю поля обмотки B-Y. У момент часу III (рис. 2.72, в) струм в обмотці C-Z $i_C = i_m$, а струми в обмотках A-X і B-Y $i_A = i_B = -0,5I_m$ (рис. 2.72, з). Картина поля така ж, як і для моменту часу I, тільки вісь поля повернулась по ходу годинникової стрілки на 240° , співпадаючи з віссю поля обмотки C-Z.

Результуючий вектор магнітного поля дорівнює $1,5 \cdot B_m$ (де B_m – амплітуда поля однієї фази) і обертається з кутовою швидкістю ω у бік фази, що відстає. Таке поле, що обертається, називають круговим магнітним полем. Рух магнітної хвилі супроводжується переміщенням магнітних полюсів N і S у внутрішній поверхні статора, причому залежність магнітного поля у повітряному зазорі близька до синусоїдальної.

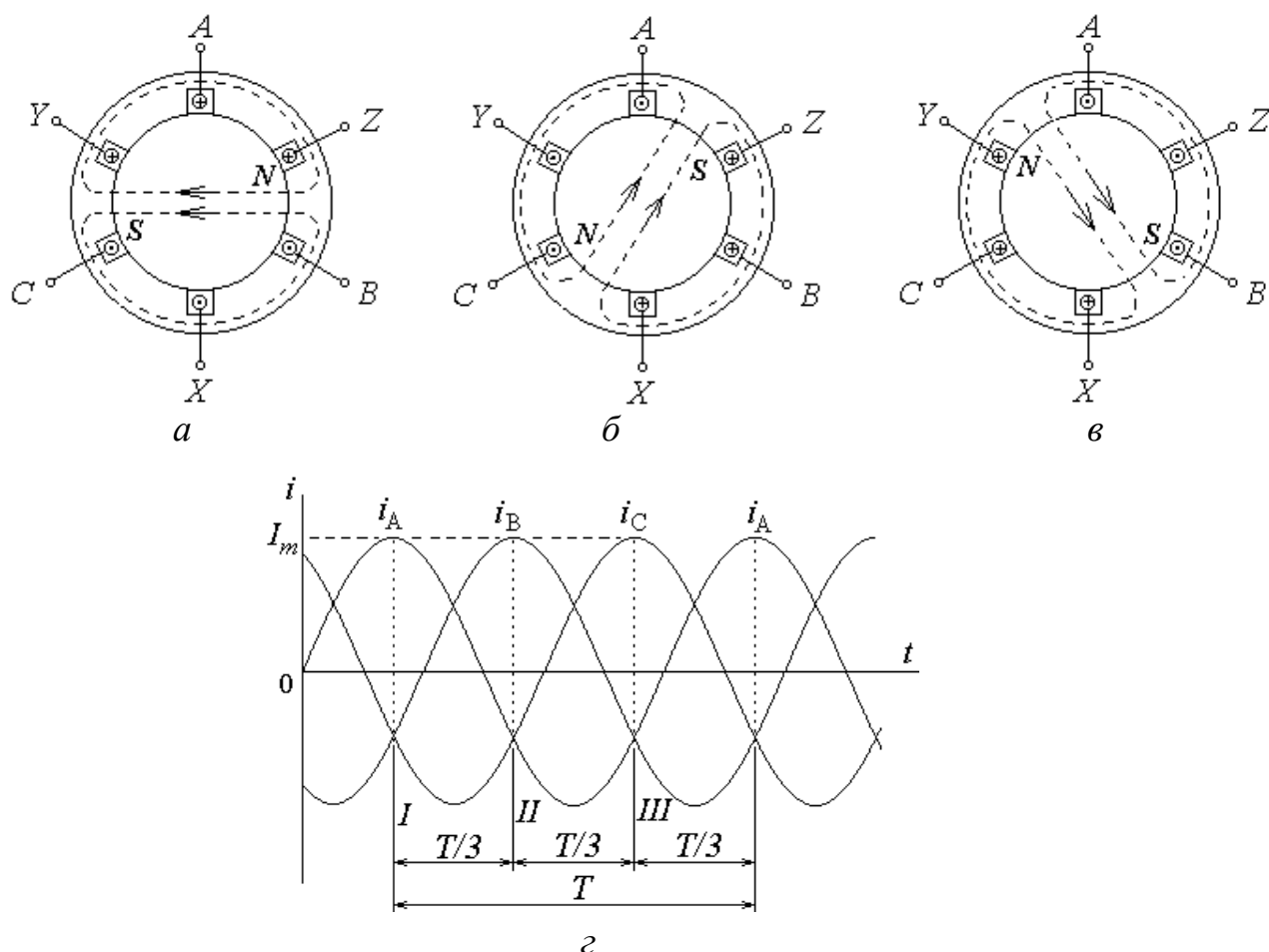


Рисунок 2.72

Таким чином, при прямому чергування фаз обмотки статора (A-B-C) поле дво полюсної машини рівномірно обертається по ходу годинникової стрілки, здійснюючи повний оберт у просторі за один період синусоїдального струму. Якщо змінити порядок чергування фаз в обмотці статора на зворотний, наприклад, B-A-C, для чого необхідно змінити підключення до мережі любых двох фазних обмоток, то магнітне поле машини буде обертатись у зворотному напрямку, тобто проти ходу годинникової стрілки.

Принцип роботи трифазного асинхронного двигуна

Обертове магнітне поле, перетинаючи стержні обмотки ротора, наводить в них ЕРС e_2 , під дією якої у стрижнях обмотки ротора наводяться струми I_2 , напрям активних складових яких співпадає з напрямом ЕРС. Вплив обертового поля на струми ротора створює сили F , що утворюють обертальний момент M , який приводить ротор до обертання в той же бік, що й магнітне поле з частотою $n_2 < n_1$.

Отже, у сталому режимі обертання ротора відбувається з ковзанням

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (2.67)$$

У номінальному режимі $S_{\text{ном}} = 0,02 \dots 0,09$. У режимі двигуна ковзання знаходиться у межах $1 \dots 0$: $S_1 = 1$ ($n_2 = 0$, ротор нерухомий, режим пуску) і $S = 0$ ($n_2 = n_1$ – ідеальний неробочий хід двигуна).

Основні рівняння асинхронного трифазного двигуна

Рівняння електричного стану фази обмотки статора:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1, \quad (2.68)$$

де $\underline{U}_1$ – фазна напруга джерела живлення; $\underline{E}$ – фазна ЕРС; R_1 , X_1 – опори фази обмотки статора відповідно активний і реактивний; $\underline{I}_1$ – фазний струм обмотки статора.

Рівняння електричного стану фази обмотки ротора:

$$\underline{E}_{2S} = S \underline{E}_{20} = R_2 \underline{I}_2 + jX_{20} S \underline{I}_2, \quad (2.69)$$

де $\underline{E}_{2S}$ – фазна ЕРС обертового ротора; $\underline{E}_{20}$ – фазна ЕРС обмотки нерухомого ротора; R_2 – активний опір фази обмотки ротора; I_2 – діюче значення фазного струму ротора; X_{20} – індуктивний опір фази обмотки при нерухомому роторі.

ЕРС, що індукуються в обмотках двигуна:

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{o61} \Phi_m; E_{20} = 4,44 f_1 w_2 k_{o62} \Phi_m, \quad (2.70)$$

де w_1 , w_2 – кількість витків відповідно фази статора і ротора; k_{o61} , k_{o62} – обмоткові коефіцієнти обмотки відповідно статора і ротора; $k_{o61} = 0,92 \dots 0,96$; для короткозамкненого ротора $k_{o62} = 1$; для фазного – $k_{o62} = 0,92 \dots 0,96$; Φ_m – амплітуда магнітного потоку.

Втрати потужності і ККД асинхронного двигуна

Процес перетворення електричної потужності P_1 , споживаної асинхронним двигуном із мережі, у корисну механічну потужність P_2 пояснюється за допомогою енергетичної діаграми, зображеної на рис. 2.73, де P_{e1} , P_{e2} – електричні втрати в обмотці відповідно статора і ротора; P_{m1} – магнітні втрати в осерді статора; P_{mx} – механічні втрати (на тертя в підшипниках обертового ротора о повітря і вентиляцію); m_1 , m_2 – кількість фаз обмотки відповідно статора і ротора.

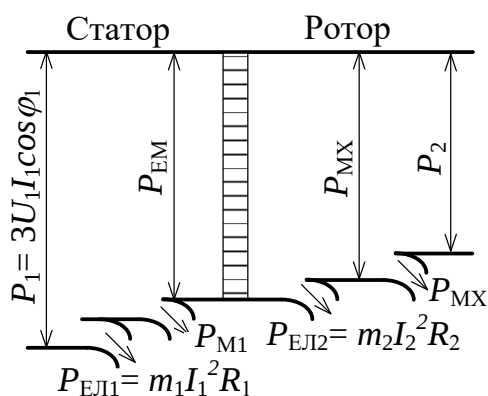


Рисунок 2.73

ККД двигуна

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}, \quad (2.71)$$

де ΔP – сума всіх втрат у двигуні.

Обертальний момент і механічні характеристики асинхронного двигуна

Обертальний момент двигуна

$$M = C'_M \Phi I_2 \cos \psi_2, \quad (2.72)$$

де C'_M – коефіцієнт, що залежить від конструктивних параметрів двигуна;
 ψ_2 – кут зсуву фаз між ЕРС E_2 і струмом I_2 .

Обертальний момент може бути записаний також у вигляді функції напруги, що прикладена до обмотки статора, і параметрів обмотки ротора:

$$M = C_M \frac{U_1^2 R_2 S}{R_2^2 + (X_{20} S)^2}, \quad (2.73)$$

де C_M – коефіцієнт, аналогічний коефіцієнту C'_M .

Аналізуючи останню формулу, можна зробити висновки про те, що момент M пропорційний U_1^2 , максимальний момент

$$M_{\max} = C_M \frac{U_1^2}{X_{20}} \quad (2.73)$$

не залежить від активного опору R_2 , відповідає критичному ковзанню

$$S_{\text{кр}} = \frac{R_2}{X_{20}} \quad (2.74)$$

і при збільшенні R_2 $M_{\max}$ зміщується в бік більших ковзань.

Для двигунів з короткозамкненим і фазним роторами при відсутності пускового реостата $R_{\text{п}}$ залежності $M(S)$ ($U_1 = \text{const}$) ідентичні (рис. 2.74, а крива 1).

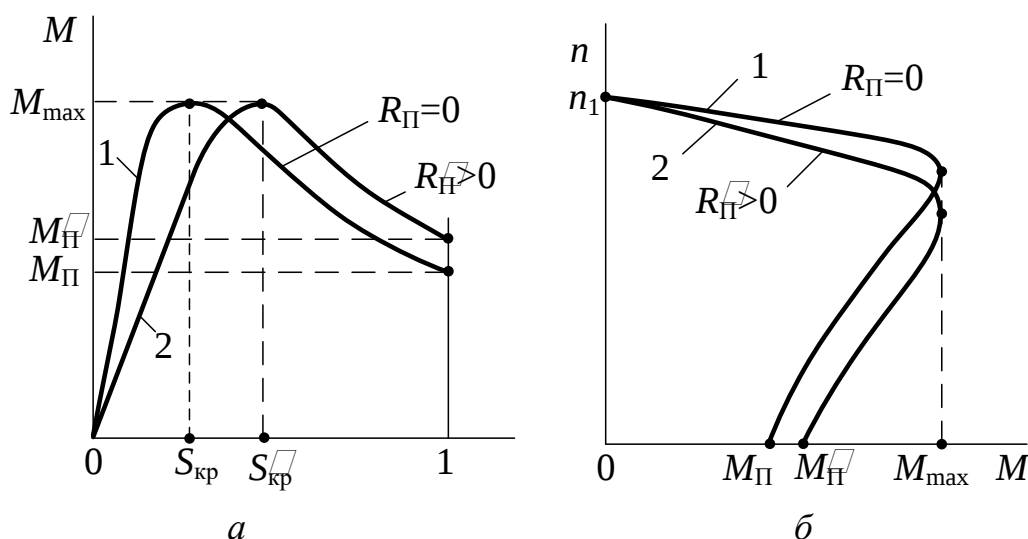


Рисунок 2.74

Двигун з фазним ротором крім природної характеристики $M(S)$ при $R_{\Pi} = 0$ має штучні характеристики, кожна із яких відповідає певному значенню R_{Π} (одна із них подана на рис. 2.74, а – крива 2).

Стійка робота двигуна визначається ділянками характеристик від $S = 0$ до $S = S_{кр}$.

Для практичних розрахунків $M(S)$ при ($U_1 = \text{const}$) застосовується формула Клосса

$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{S_{кр}}{S} + \frac{S}{S_{кр}}}, \quad (2.75)$$

де $2M_{\max} = \lambda_M M_{\text{ном}}$; λ_M – перевантажувальна здатність двигуна;
 $M_{\text{ном}}$ – номінальний обертальний момент; $M_{\text{ном}} = M_0 + M_{2\text{ном}}$; M_0 – момент неробочого ходу; $M_{2\text{ном}}$ – номінальний корисний момент на валу двигуна; $S_{кр} = S_{\text{ном}}(\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1})$.

Нехтуючи M_0 , у загальному випадку можна вважати $M_{\text{ном}} = M_{2\text{ном}}$.

Корисний момент на валу двигуна, Н·м:

$$M_2 = 9,55 \frac{P_2}{n_2}, \quad (2.76)$$

де P_2 – вимірюються в Вт, а n_2 – в об/хв.

Механічні характеристики асинхронного двигуна $n_2(M)$ при $U_1 = \text{const}$ являються іншим виразом залежності $M(S)$, де $n_2 = n_1(1 - S)$.

Природна механічна характеристика $n_2(M)$ асинхронного двигуна з фазним ротором (рис. 2.74, а, крива 1) і механічна характеристика двигуна з короткозамкненим ротором ідентичні. Штучна механічна характеристика двигуна з фазним ротором при вмиканні пускового реостата $R_{\text{п}}$ в коло ротора зображена на рис. 2.74, б (крива 2). Стійка робота двигуна знаходиться в діапазоні частот від $n_0 = n_1$ до $n_{2\text{кр}} = n_1(1 - S_{\text{кр}})$.

Робочі характеристики асинхронного двигуна

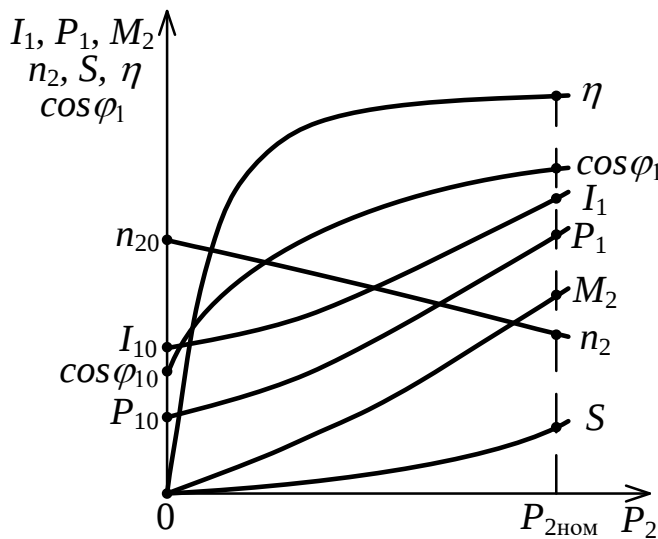


Рисунок 2.75

Основними робочими характеристиками двигуна являються залежності M_2 , n_2 , η , I_1 , P_1 , S , $\cos \phi_1$ від корисної потужності P_2 за умови: $U_1 = \text{const}$; $f_1 = \text{const}$. На рис. 2.75 показані робочі характеристики асинхронного двигуна, де I_{10} – струм статора при неробочому ході; P_{10} – потужність, що споживається двигуном при неробочому

ході; $\cos \phi_{10}$ – коефіцієнт потужності при неробочому ході.

Пуск у хід і регулювання частоти обертання асинхронного двигуна

При експлуатації двигуна важливими питаннями являються способи пуску, реверсу (зміна напрямку обертання ротора на протилежний), регулювання частоти обертання ротора і можливість роботи двигуна від однофазної мережі змінної напруги.

При пуску асинхронних двигунів виникають великі пускові струми, які в 10...15 разів перевищують номінальні, що призводить до зниження напруги мережі і виявляється на роботі інших споживачів, які вмикаються у ту же мережу. Тому в залежності від співвідношення потужностей мережі і двигуна пуск здійснюється різними способами. Однак загальним явля-

ється то, що при кожному способі пуску пусковий струм двигуна і спричинені їм падіння напруги в лінії не повинні порушувати роботу інших споживачів, що вмикаються у ту же мережу.

На рис. 2.76 подані схеми пуску асинхронних двигунів.

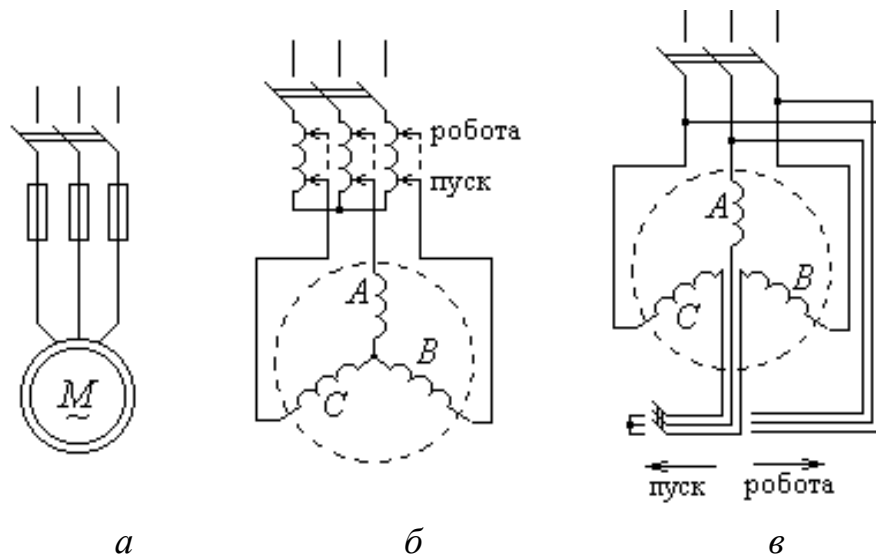


Рисунок 2.76

При малій потужності асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором порівняно з потужністю живильної мережі здійснюється прямий пуск двигуна (рис. 2.76, а), при якому обмотка статора відразу підключається на номінальну напругу мережі. Це приводить до появи великих пускових струмів, які взагалі небезпечні для самого двигуна.

Для зниження пускових струмів при їх великій кратності або великій потужності двигуна і обмеженій потужності мережі пуск двигуна з короткозамкненим ротором здійснюється зниженням напруги на затискачах обмотки статора. При цьому зменшуються не тільки пусковий струм, але і пусковий момент на валу двигуна ($M \sim U_1^2$). Напругу на затискачах обмотки статора можна знизити за допомогою автотрансформатора (рис. 2.76, б), дроселя (індуктивної котушки з регульованим повітряним зазором в колі магнітопроводу), переключення фаз обмотки статора на час пуску з „трикутника” на „зірку” (рис. 2.76, в).

Пуск двигунів з фазним ротором здійснюється за допомогою пускового реостата $R_{\text{п}}$, що вмикається в коло ротора (див. рис. 2.70). Збільшення

опору в колі ротора приводить до зменшення пускового струму і одночасно до збільшення пускового моменту.

Реверсування асинхронного двигуна здійснюється зміною порядку чергування фаз обмотки статора. Частоту обертання ротора двигуна загальнопромислового призначення можна регулювати наступними способами:

- зміною частоти живильної напруги за допомогою частотного перетворювача;

- зміною живильної напруги мережі (у дуже малих межах із-за квадратичного зменшення обертового моменту по відношенню к зменшенню напруги).

У спеціальних асинхронних двигунах з короткозамкненим ротором частоту обертання можна регулювати зміною кількості пар полюсів обмотки статора, а в двигунах з фазним ротором – введенням (підключенням) у коло ротора регулювального реостату.

2.11. Приклади розрахунку параметрів і характеристик асинхронних двигунів

Приклад 1. Трифазний асинхронний двигун ввімкнутий у трифазну мережу з частотою $f_1 = 50$ Гц. Технічні дані двигуна: кількість полюсів $2p = 6$; номінальне ковзання $S_{\text{ном}} = 0,03$; перевантажувальна здатність $\lambda_M = 2,2$. Визначити синхронну частоту обертання поля статора; номінальну і критичну частоти обертання ротора; діапазон частот, при яких можлива стійка робота двигуна.

Розв'язання

Синхронна частота обертання поля статора

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/хв.}$$

Номінальна частота обертання ротора

$$n_2 = n_1 (1 - S_{\text{ном}}) = 1000(1 - 0,03) = 970 \text{ об/хв.}$$

Критичне ковзання

$$S_{\text{кр}} = S_{\text{ном}} \left(\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1} \right) = 0,03 \left(2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1} \right) = 0,125.$$

Критична частота обертання ротора

$$n_{кр} = n_1(1 - S_{кр}) = 1000(1 - 0,125) = 875 \text{ об/хв.}$$

Стійка робота двигуна можлива в діапазоні частот обертання від $n_1 = 1000$ об/хв до $n_{кр} = 875$ об/хв.

Приклад 2. Трифазний асинхронний двигун має наступні технічні дані: номінальна потужність на валу двигуна $P_{2ном} = 0,55$ кВт; номінальна лінійна напруга $U_1 = 380/220$ В при частоті $f_1 = 50$ Гц; номінальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi_{1ном} = 0,65$; номінальний ККД $\eta_{ном} = 0,64$; кратність пускового струму $m_I = I_{пуск} / I_{ном} = 3,5$; лінійна напруга мережі $U_1 = 220$ В. Визначити номінальну потужність $P_{1ном}$, що споживається двигуном із мережі; номінальний $I_{ном}$ і пусковий $I_{пуск}$ струми двигуна.

Розв'язання

Номінальна потужність, що споживається двигуном із мережі

$$P_{1ном} = \frac{P_{2ном}}{\eta_{ном}} = \frac{0,55}{0,64} = 0,859 \text{ кВт.}$$

При заданій напрузі мережі $U_1 = 220$ В фази обмотки статора з'єднуються „трикутником” (рис. 5.12, а).

Номінальний лінійний струм двигуна

$$I_{лном} = \frac{P_{2ном}}{\sqrt{3}U_M \cos \varphi_{1ном} \eta_{ном}} = \frac{0,55 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,65 \cdot 0,64} = 3,47 \text{ А.}$$

При з'єднанні обмотки статора „трикутником” номінальний фазний струм

$$I_{фном} = \frac{I_{лном}}{\sqrt{3}} = \frac{3,47}{1,73} = 2 \text{ А.}$$

Пускові струми двигуна:

$$- \text{лінійний } I_{лпуск} = m_I I_{лном} = 3,5 \cdot 3,47 = 12,2 \text{ А;}$$

$$- \text{фазний } I_{фпуск} = m_I I_{фном} = 3,5 \cdot 2 = 7 \text{ А.}$$

Приклад 3. Трифазний асинхронний двигун вмикається в мережу з лінійною напругою $U_1 = 380$ В і має наступні дані: номінальна потужність на валу двигуна $P_{2\text{ном}} = 11$ кВт; номінальна напруга $U_1 = 380/220$ В при частоті $f_1 = 50$ Гц; номінальний ККД $\eta_{\text{ном}} = 0,88$; номінальне ковзання $S_{\text{ном}} = 0,04$; кількість полюсів $2p = 4$. Визначити номінальні: лінійний $I_{\text{л ном}}$ і фазний $I_{\text{ф ном}}$ струми двигуна; частоту обертання поля статора n_1 ; частоту обертання ротора $n_{2\text{ном}}$; обертальний момент $M_{\text{ном}}$.

Розв'язання

Для заданої лінійної напруги мережі $U_1 = 380$ В обмотку статора необхідно з'єднати „зіркою” (рис. 2.77, б).

При цьому номінальні лінійний і фазний струми двигуна однакові:

$$I_{\text{л ном}} = I_{\text{ф ном}} = \frac{P_{2\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{м}} \cos \varphi_{1\text{ном}} \eta_{\text{ном}}} = \frac{11 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,87 \cdot 0,88} = 21,8 \text{ А.}$$

Синхронна частота обертання поля статора

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/хв.}$$

хв.

Номінальна частота обертання ротора

$$n_{2\text{ном}} = n_1 (1 - S_{\text{ном}}) = 1500(1 - 0,04) = 1440 \text{ об/хв.}$$

Номінальний обертальний момент

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \frac{P_{2\text{ном}}}{n_{2\text{ном}}} = 9,55 \frac{11 \cdot 10^3}{1440} = 72,95 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

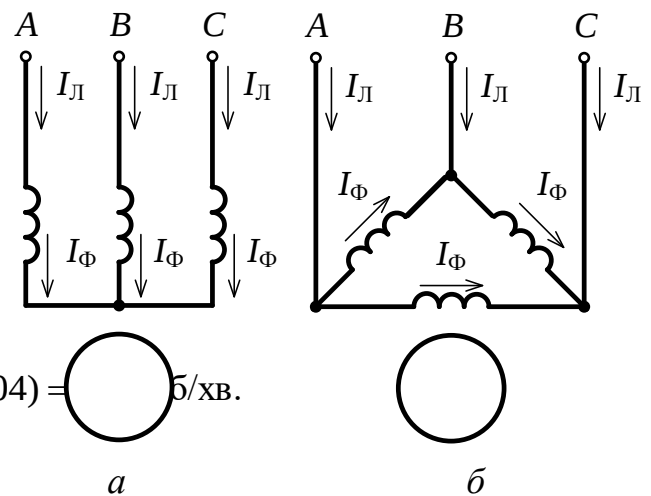


Рисунок 2.77

Приклад 5.4. Трифазний асинхронний двигун з номінальними потужністю $P_{2\text{ном}} = 0,55$ кВт і частотою обертання поля статора $n_{1\text{ном}} = 750$ об/хв має кратність максимального моменту $\lambda_M = M_{\text{мах}} / M_{\text{ном}} = 1,7$; номінальне ковзання $S_{\text{ном}} = 0,091$.

Розрахувати і побудувати механічні характеристики двигуна $n_2(M)$ і $M(S)$ при $U_1 = 380 \text{ В} = \text{const}$; визначити пусковий момент $M_{\text{пуск}}$ і його кратність k_{Π} по відношенню до номінального моменту.

Розв'язання

Механічні характеристики розраховуються при умові, що $U_1 = \text{const}$, на основі виразів:

$$M = \frac{2M_{\text{max}}}{S/S_{\text{кр}} + S_{\text{кр}}/S};$$

$$n_2 = n_1(1 - S);$$

$$S = S \left(\lambda_M + \sqrt{\lambda_M^2 - 1} \right);$$

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \frac{P_{2\text{ном}}}{n_{2\text{ном}}};$$

$$M_{\text{max}} = \lambda_M M_{\text{ном}}.$$

За даними задачі і зазначених формул визначаємо:

$$n_{2\text{ном}} = 682 \text{ об/хв};$$

$$S_{\text{кр}} = 0,28;$$

$$M_{\text{ном}} = 7,7 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\text{max}} = 13,1 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Задаючись значеннями S від 0 до 1, визначаємо M і n_2 . Результати розрахунків зведені в табл. 2.14.

Пусковий момент двигуна визначається при $S = 1$ і складає $M_{\text{пуск}} = 6,8 \text{ Н}\cdot\text{м}$, а його кратність

$$k_{\Pi} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}} = \frac{6,8}{7,7} = 0,884.$$

Таблиця 2.14 – Механічні характеристики асинхронного двигуна

S	0	0,05	0,091	0,2	0,28	0,4	0,6	0,8	1,0
$n_2, \text{об/хв}$	750	712,5	682	600	540	450	300	150	0
$M, \text{Н}\cdot\text{м}$	0	4,53	7,7	12,39	13,1	12,31	10,04	8,17	6,8

За даними табл. 2.14 побудуємо механічні характеристики $M(S)$ (рис. 2.78, а) і $n_2(M)$ (рис. 2.78, б) при $U_1 = \text{const}$.

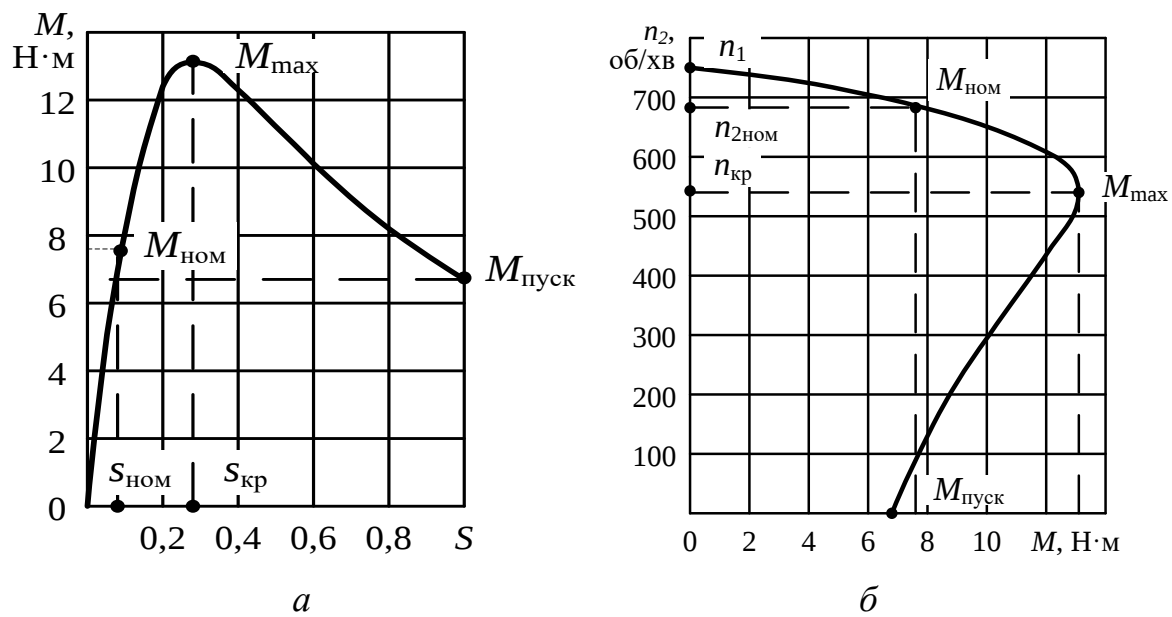


Рисунок 2.78

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

3.1 Постановка задачі з розрахунку підсилювача низької частоти

Розрахувати підсилювальний каскад напруги для заданого типу транзистора, який вмикається за схемою із загальним емітером (рис.3.1.) за вихідними даними наведеними в табл.3.1 Характеристики транзисторів наведені на рис.3.2 – 3.7.

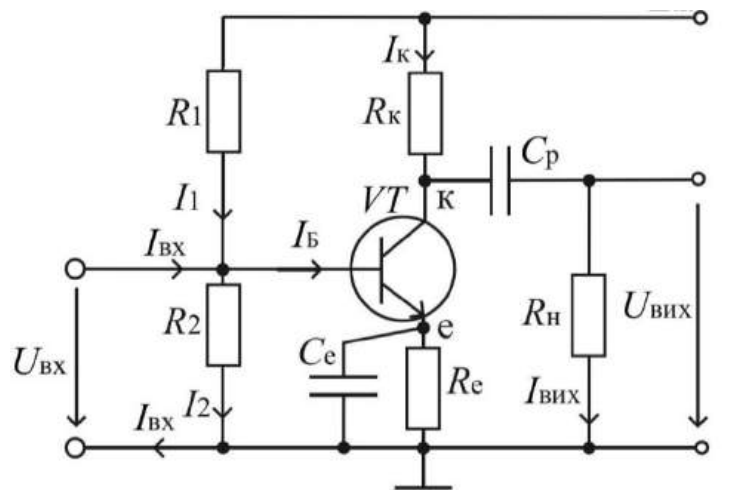


Рисунок 3.1 – Схема підсилювального каскада низької частоти

Таблиця 3.1 Вихідні дані для задачі 3.1

Варіант	Тип транзистора	R_H , Ом	I_{KO} , Ом	U_{K30} , В	E_J , В	f_H , Гц	M_H
1	П27	1500	1,5	1,5	3	50	1,25
2	МП112	900	4,5	4	9	200	1,2
3	КТ104Г	400	36	12,5	27	120	1,25
4	КТ201А	750	10,3	8	16	210	1,3
5	КТ201Г	500	20	3	6	250	1,3
6	П212А	450	52	10	18	300	1,25
7	П27	1300	1	2	3	150	1,2
8	ГТ122А	600	10	6	14	100	1,25
9	МП112	850	4,5	4	10	120	1,4
10	КТ104Г	420	36	12,5	24	90	1,4
11	КТ201А	650	10,2	9	18	60	1,2

Продовження таблиці 3.1

12	П27	1200	1	1,5	3	100	1,3
13	ГТ122А	450	8	6	11	50	1,4
14	КТ201Г	400	20	3	5,5	120	1,35
15	П212А	500	52	10	20	150	1,2
16	П27	1400	1,5	1,5	3,5	50	1,4
17	МП112	720	5,5	4	8	280	1,25
18	КТ104Г	450	40	15	27	300	1,25
19	КТ201А	700	10,3	8,5	20	270	1,2
20	КТ201Г	550	16	3	6	190	1,3
21	П27	1000	1,5	2	4	100	1,5
22	П212А	550	40	12	24	180	1,4
23	ГТ122А	480	9	6	14	170	1,35
24	МП112	680	4	4	9	210	1,4
25	КТ104Г	480	35	12,5	22	100	1,25
26	МП112	800	5,5	5	10	60	1,2
27	КТ104Г	480	36	12,5	25	150	1,3
28	КТ201А	750	9,8	10	20	90	1,2
29	П27	900	1,6	2	4,5	50	1,25
30	П212А	500	38	10	20	100	1,2
31	КТ201Г	350	16	3	5,5	180	1,3
32	ГТ122 А	650	8	6	15	200	1,2
33	МП112	750	4	4	10	60	1,35
34	КТ104Г	450	40	12,5	27	70	1,3
35	КТ201А	600	9,8	8,5	20	80	1,35
36	П27	800	1,7	2,5	5	100	1,2
37	П212А	550	37	9	18	90	1,25
38	КТ201А	650	9,8	9	18	120	1,2
39	ГТ122А	550	8	5,5	12	150	1,3
40	МП112	700	5,5	4	9	200	1,36
41	П27	1200	1	1,5	3,5	50	1,3
42	П212А	600	52	10	25	100	1,4
43	КТ201Г	650	22	3,5	6	180	1,2

Продовження таблиці 3.1

44	ГТ122А	650	10	6	15	160	1,25
45	КТ201	400	9,8	8,5	16	170	1,3
46	КТ104Г	350	40	16	25	230	1,2
47	МП112	650	4	4	8	300	1,4
48	КТ104Г	400	32	10	22	270	1,3
49	КТ201А	700	9,8	9,5	20	350	1,25
50	П212А	520	27	12	20	250	1,2

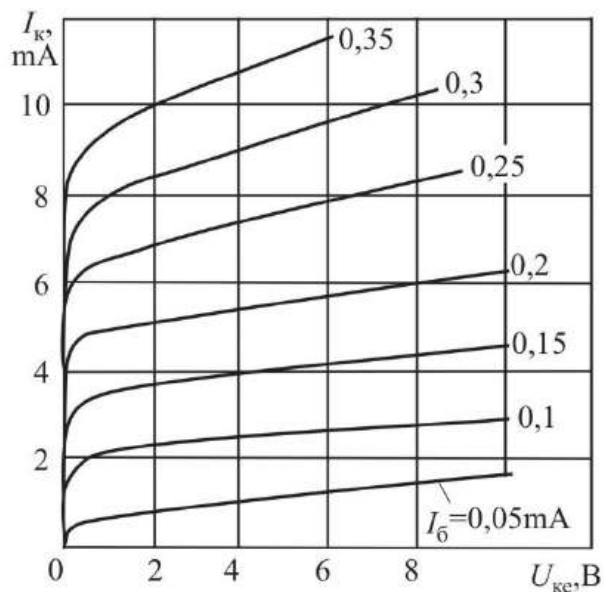
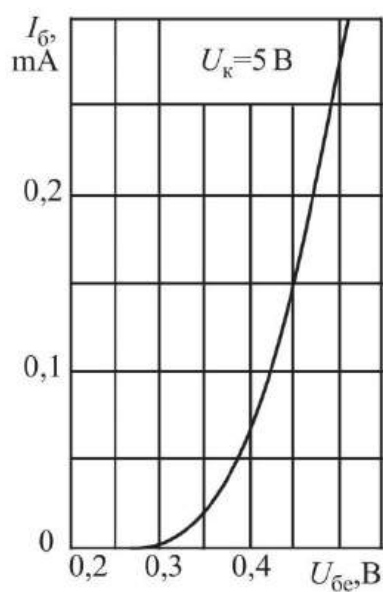


Рисунок 3.2 – Характеристики транзистора МП112 ($n - p - n$)

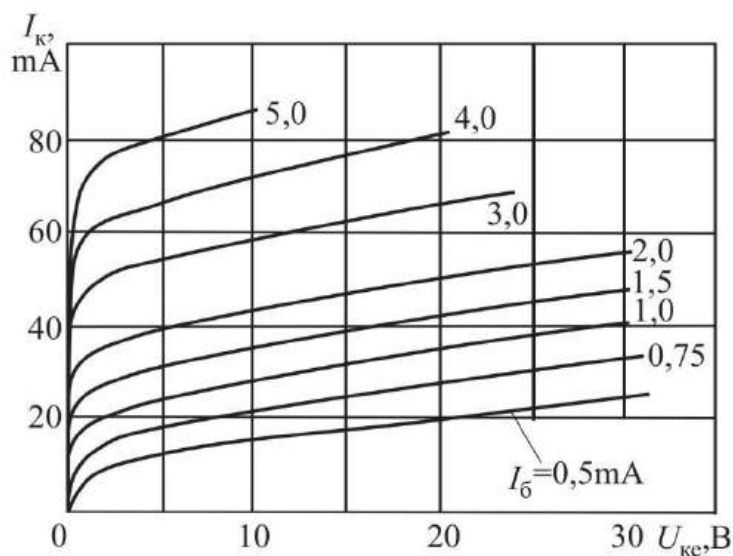
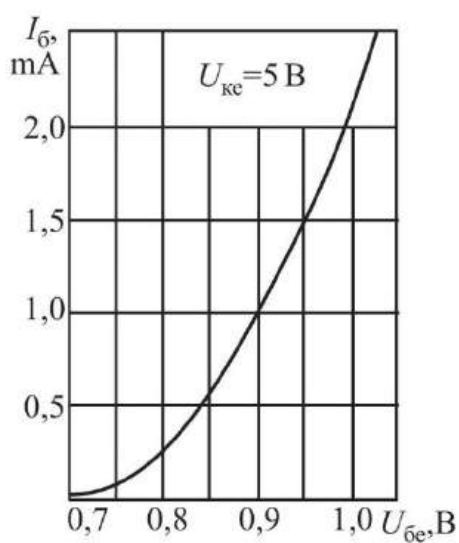


Рисунок 3.3 – Характеристики транзистора КТ104Г ($n - p - n$)

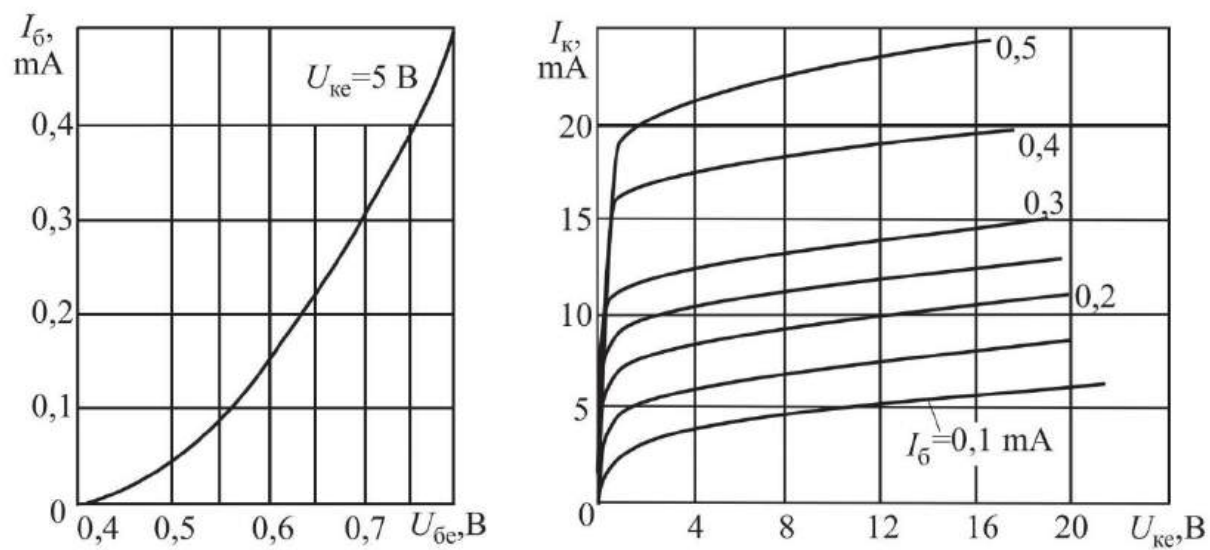


Рисунок 3.4 – Характеристики транзистора КТ201А ($n - p - n$)

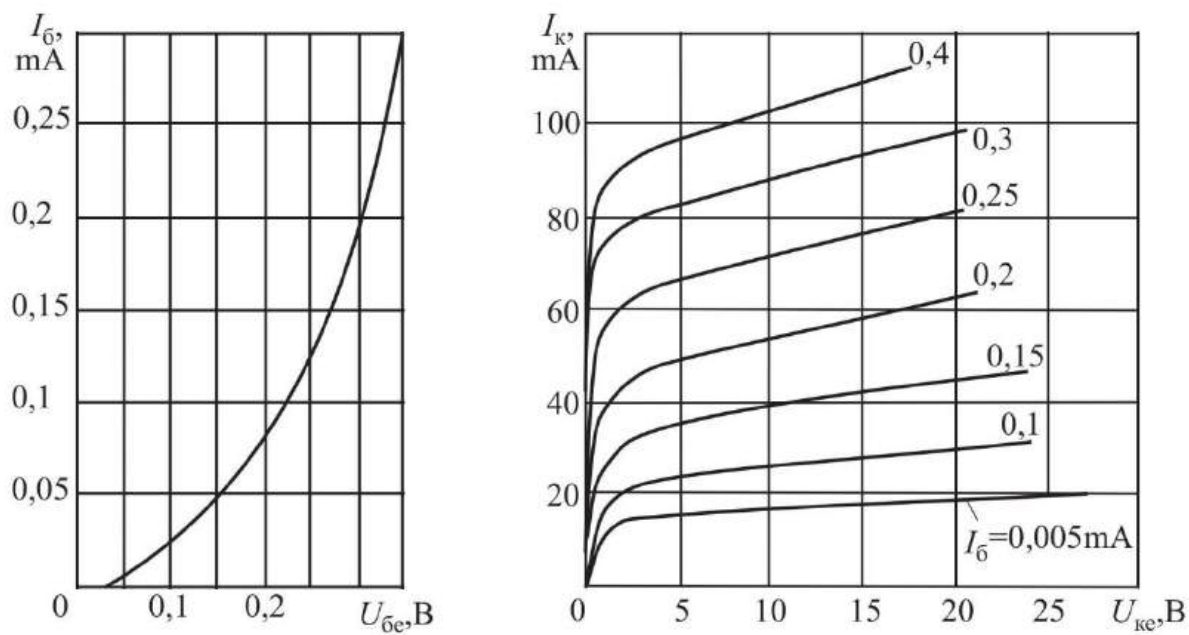


Рисунок 3.5 – Характеристики транзистора П212А ($n - p - n$)

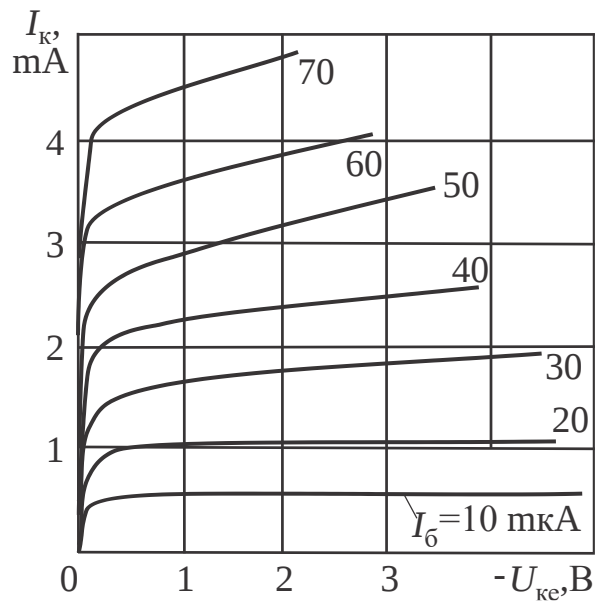
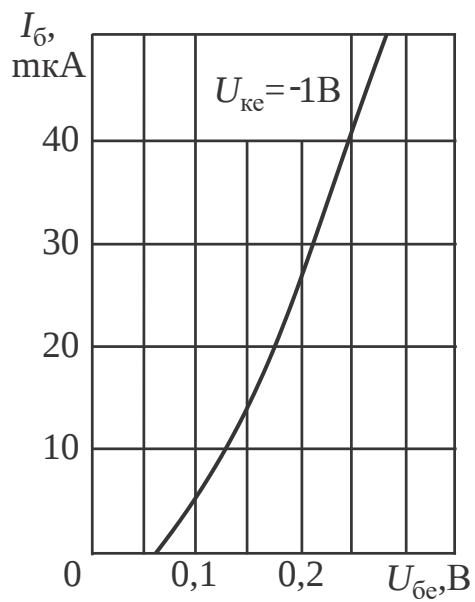


Рисунок 3.6 – Характеристики транзистора П27 ($n - p - n$)

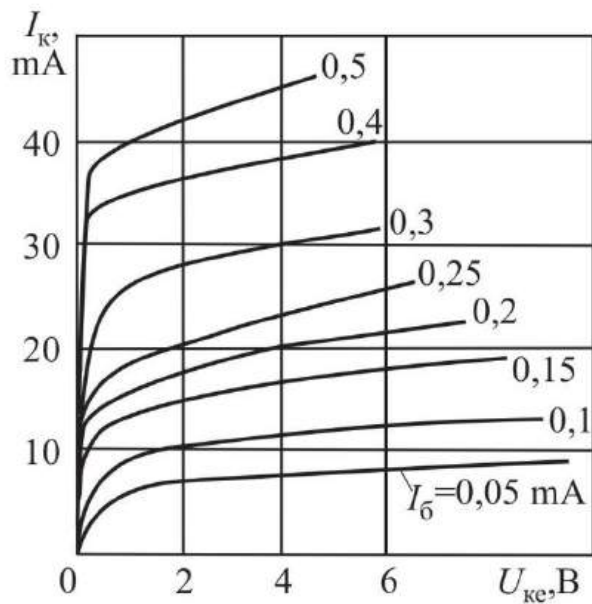
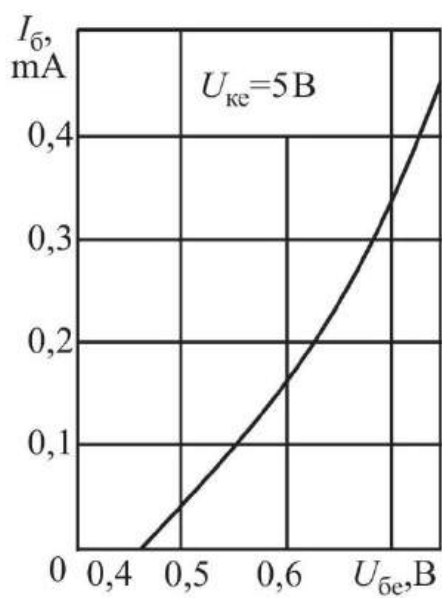


Рисунок 3.7 – Характеристики транзистора КТ201Г ($n - p - n$)

3.2. Основні теоретичні положення

Основні фізичні процеси у напівпровідникових приладах – генерація носіїв зарядів, управління їхньою концентрацією і рухом. Ці процеси формуються за допомогою електрофізичних властивостей напівпровідникових матеріалів, що входять до складу всіх напівпровідникових приладів.

Найбільш широке застосування у напівпровідниковій техніці отримав германій Ge, кремній Si, селен Se, а також напівпровідникові з'єднання типу арсенід галія, карбід кремнію, сульфід кадмію та ін.

Носіями зарядів у напівпровідниках є електрони і дірки. Відповідно цьому відрізняють електронну та діркову електропровідність. Утворення (генерація) пари носіїв зарядів (електрон-дірка) у напівпровіднику відбувається під впливом зовнішніх факторів, таких, як збільшення температури, дія зовнішнього електричного поля і світла, та інше.

Концентрація електронно-діркових пар у напівпровіднику обумовлюється рівновагою між процесами генерації пар та їх рекомбінацією (возз'єднанням пар). Така концентрація утворює власну електропровідність напівпровідника, яка збільшується з посиленням дії зовнішніх факторів.

У нормальних умовах власна електропровідність напівпровідників досить мала у порівнянні з електропровідністю провідників. Так, наприклад, в 1 см^3 чистого германія при кімнатній температурі міститься $2,5 \cdot 10^{13}$ пар електронів-дірок при загальній кількості атомів $4,2 \cdot 10^{22}$, у той час як в 1 см^3 металу міститься 10^{22} – 10^{23} атомів і стільки ж носіїв зарядів (електронів).

Для збільшення електропровідності напівпровідників використовують домішки. В якості домішок застосовують матеріали третьої групи періодичної таблиці елементів Менделєєва (галій Ga, індій In) або п'ятої групи (сурма Sb, фосфор P). Додавання до чистого напівпровідника малого (10^{-5} – $10^{-6}\%$), але точно встановленої кількості домішок забезпечує багатократне (у 10^3 – 10^5 разів) збільшення додаткових носіїв у порівнянні з зарядами, що відносяться до власної електропровідності провідника. При цьому домішка надає напівпровіднику різко виражений характер електронної або діркової електропровідності. Електронна домішкова електро-

провідність виникає у напівпровіднику, коли домішка має на один валентний електрон більше, ніж напівпровідник. У цьому випадку напівпровідник зветься напівпровідником n -типу, а домішка – донором.

Діркова домішкова електропровідність виникає у напівпровіднику, коли домішка має на один валентний електрон менше, ніж напівпровідник. У цьому випадку напівпровідник зветься напівпровідником p -типу, а домішка – акцептором. Разом з носіями зарядів, що утворилися в напівпровіднику з'являються нерухомі позитивні іони у n -напівпровіднику (рис. 3.8 *а*) і від'ємні іони в p -напівпровіднику (рис. 3.6 *б*).

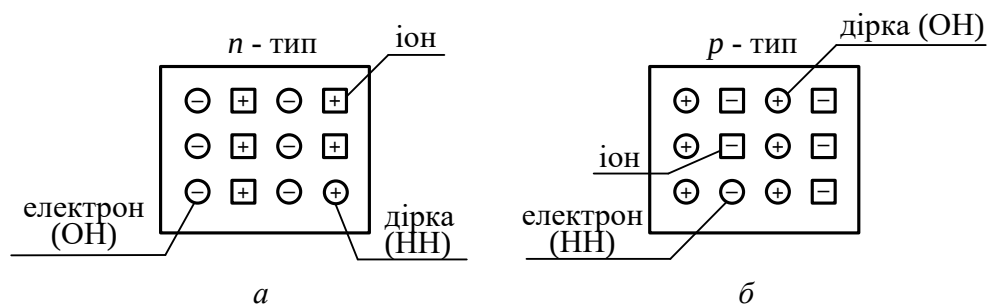


Рисунок 3.8 – Позначення нерухомих та рухомих носіїв заряду

Носії зарядів у напівпровіднику, обумовлені домішкою, називаються основними (ОН). У напівпровідниках n -типу – це електрони, p -типу – дірки. Але разом з основними носіями зарядів у напівпровідниках є в малій кількості неосновні носії зарядів (НН), що утворюються термогенерацією (під впливом тепла) електронно-діркових пар та визначають власну електропровідність.

Властивості p - n переходу. Принцип роботи більшості напівпровідникових приладів заснований на специфічних явищах, що виникають на межі контакту між напівпровідниками n - та p -типу, де у прилягаючому тонкому шарі утворюється електронно-дірковий або p - n перехід. Тип напівпровідника визначається його основними носіями заряду, зумовленими наявністю домішки. У напівпровіднику n -типу – це електрони, p -типу - дірки. Розглянемо ці явища, використовуючи рис. 3.9.

Внаслідок різної концентрації основних носіїв заряду по обидві сторони від межі розділу напівпровідників частина дірок з приграничної області напівпровідника p -типу дифундує (проникає) в напівпровідник n -типу, а частина електронів з приграничної області напівпровідника n -типу

дифундує в напівпровідник p -типу. У результаті вздовж межі розподілу напівпровідників утворюється шар нерухомих іонів, в якому відсутні рухомі носії заряду, і внаслідок цього такий запірний шар має високий електричний опір. Товщина запірного шару l звичайно не перевищує декількох мікронів (рис.3.9).

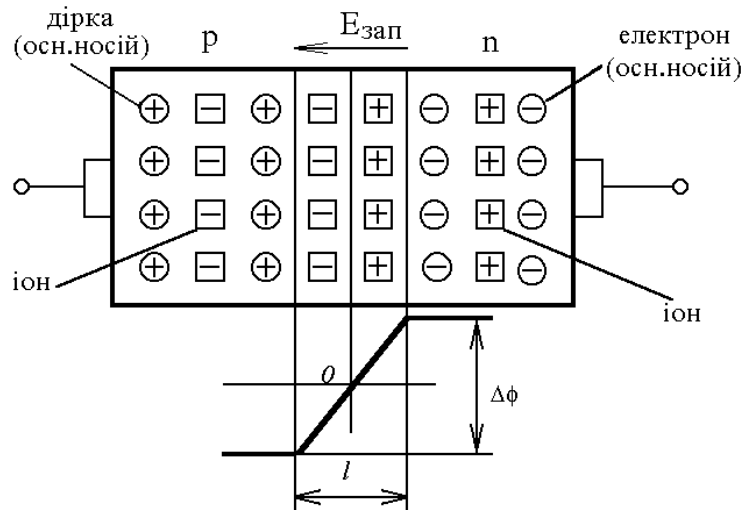


Рисунок 3.9 – До фізичних процесів у p - n переході

Розширенню запірного шару перешкоджають нерухомі іони домішок, які утворюють подвійний електричний шар. Цей шар визначає контактну різницю потенціалів $\Delta\phi$ (потенціальний бар'єр) на межі напівпровідників, що дорівнює, звичайно, 0,3–0,5 В. Різниця потенціалів створює в запірному шарі електричне поле з напруженістю $E_{\text{зап}}$, яке перешкоджає переходу основних носіїв заряду через p - n перехід і не перешкоджає переходу через нього неосновних носіїв заряду.

По досягненні деякого значення $E_{\text{зап}}$ настає динамічна рівновага, при якій сила дифузійного струму $I_{\text{диф}}$, зумовленого дифузією основних носіїв заряду, стає рівною силі дрейфового струму $I_{\text{др}}$, зумовленого рухом неосновних носіїв заряду під впливом електричного поля $E_{\text{зап}}$.

При підключенні джерела ЕРС з напругою U до p - n переходу (рис. 3.10, а) в прямому напрямку («плюс» джерела до p -області та «мінус» джерела до n -області) електричне поле джерела $E_{\text{зовн}}$ ослабляє поле $E_{\text{зап}}$, знижує потенціальний бар'єр до $\Delta\phi'$ та зменшує товщину запірного шару до l' . Внаслідок цього різко збільшується дифузія і разом з нею струм через p - n перехід.

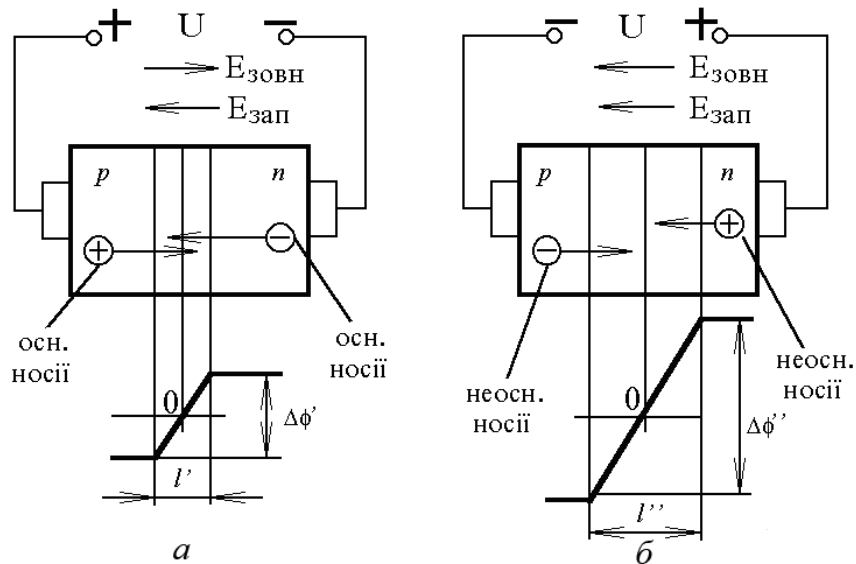


Рисунок 3.10 – Пряме та зворотне підключення p - n переходу

При зворотньому підключенні джерела ЕРС до p - n переходу (рис. 3.10, б) зовнішнє поле $E_{\text{зовн}}$ співпадає по напрямку з полем $E_{\text{зап}}$ і тим самим сприяє розширенню запірного шару до l'' та збільшенню потенціального бар'єра до $\Delta\phi''$. При цьому опір p - n переходу різко збільшується, і струм через цей перехід практично не проходить. Отже, p - n перехід володіє односторонньою провідністю що практично використовується в цілому ряди напівпровідникових приладів – діодах, транзисторах, тиристорах тощо.

Загальні відомості і параметри підсилювачів

Часто виникає потреба переводити слабкий вхідний електричний сигнал (від електромагнітного поля, різного роду датчиків) на більш високий енергетичний рівень, сумісний з можливостями його сприйняття різного виду виконавчими пристроями або органами чуття живих організмів.

Найбільш поширений спосіб такого підсилювання полягає в тому, що вхідний електричний сигнал $u_{\text{вх}}$ за допомогою керуючого елемента (КЕ) може впливати на роботу джерела електричної енергії (джерело живлення $E_{\text{ж}}$), відтворюючись завдяки цьому на більш високому енергетичному рівні (рис. 3.11). Якщо керуючий елемент КЕ побудований на базі електронного приладу, то таке підсилювання буде називатися *електронним*.

Основою електронного підсилювача є підсилювальний каскад, який має в якості керуючого елемента біполярний або польовий транзистор. Він характеризується коефіцієнтами підсилювання, що визначаються співвідношеннями вихідних параметрів до вхідних:

– коефіцієнт підсилювання з напруги

$$K_U = U_{\text{вих}} / U_{\text{вх}} ;$$

– коефіцієнт підсилювання зі струму

$$K_I = I_{\text{вих}} / I_{\text{вх}} .$$

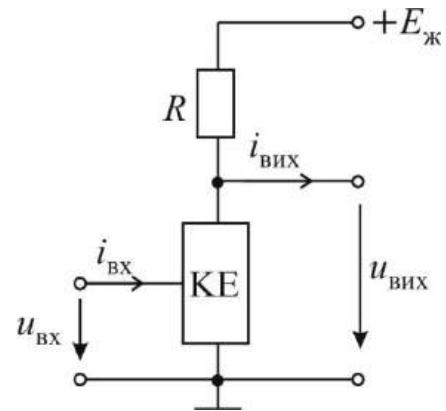


Рисунок 3.11 – Структурна схема підсилювального каскаду

У залежності від того, який параметр домінує, розрізняють підсилювальні каскади напруги, струму і потужності. Якщо забезпечити потрібне підсилювання одним каскадом неможливо, то його вихідний сигнал можна подати як вхідний на наступний каскад, і так далі, поки не буде досягнутий необхідний коефіцієнт підсилювання. Так створюється багатокаскадний підсилювач (рис. 3.2).

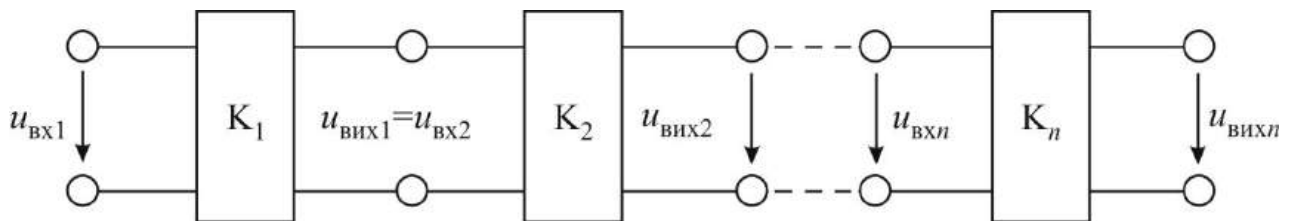


Рисунок 3.12 – Структурна схема багатокаскадного підсилювача

Його коефіцієнт підсилювання, наприклад, з напруги

$$K_U = U_{\text{вих}n} / U_{\text{вх}1} . \quad (3.1)$$

Відповідно до того, що $U_{\text{вих}1} = U_{\text{вх}2}$, $U_{\text{вих}2} = U_{\text{вх}3}$, ..., $U_{\text{вих}n-1} = U_{\text{вх}n}$, коефіцієнт підсилювання багатокаскадного підсилювача дорівнює добутку коефіцієнтів підсилювання всіх каскадів

$$K_U = U_{\text{вих}n} / U_{\text{вх}1} = K_1 K_2 \dots K_n . \quad (3.2)$$

У залежності від діапазону частот вхідних сигналів розрізняють:

- *підсилювачі постійного струму (ППС)* для підсилювання сигналів, які змінюються повільно (від 0 Гц і вище);

- *підсилювачі низької частоти* (ПНЧ) для підсилювання в діапазоні від звукових частот і вище (від десятків герц до 10...десятків кГц);
- *підсилювачі високої частоти* (ПВЧ) для підсилювання в діапазоні частот від десятків кілогерц до сотень мегагерц;
- *широкопasmові підсилювачі* (ШСП) для підсилювання імпульсних сигналів, що мають спектр частот від десятків герц до сотень мегагерц;
- *вузькопasmові (вибірні) підсилювачі* (ВСП) для підсилювання сигналів у вузькому діапазоні частот.

Способи з'єднання (зв'язок) каскадів у багатокаскадному підсилювачі залежать від його виду.

У підсилювачах постійного струму каскади з'єднуються безпосередньо або за допомогою резисторів. Такі підсилювачі називають *підсилювачами з безпосереднім або резистивним зв'язком*.

У підсилювачах змінної напруги (ПНЧ, ПВЧ, ШСП) зв'язок між каскадами найчастіше створюється за допомогою конденсаторів і резисторів. Такі підсилювачі називають *підсилювачами з резистивно-ємнісним зв'язком*.

І нарешті, у вибіркових підсилювачах для з'єднування каскадів між собою, у підсилювачах потужності для зв'язку вихідного каскаду з навантажувальним пристроєм іноді використовують трансформатори. Такі підсилювачі називають *підсилювачами з трансформаторним зв'язком*.

Устрій і принцип дії підсилювального каскаду зі спільним емітером. Найбільш поширеним підсилювальним каскадом на біполярному транзисторі є каскад зі спільним емітером (рис. 3.13). Його підключення до джерела живлення $E_{\text{ж}}$ таке, що колектор знаходиться під зворотною напругою. Якщо транзистор є типу $n\text{-}p\text{-}n$, то полярність живлення така, як на рис. 3.13. Для підсилювального каскаду з транзистором $p\text{-}n\text{-}p$ -типу полярність протилежна. Напруга живлення підсилювального каскаду на біполярному транзисторі дорівнює, як правило, 10...30 В.

Транзистор VT з'єднується із входом і виходом підсилювального каскаду конденсаторами $C_{\text{вх}}$ та $C_{\text{вих}}$, ємність яких обирається такою, щоб в діапазоні робочих частот змінний струм проходив крізь них без помітного падіння напруги.

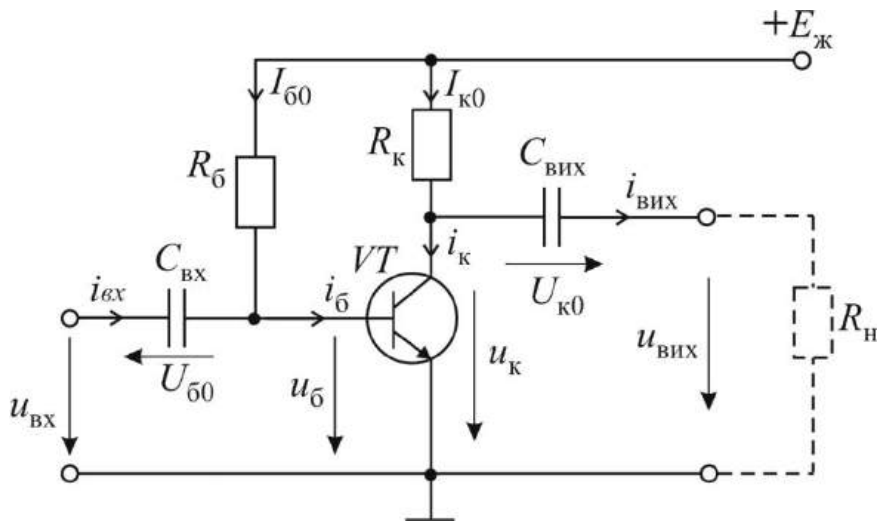


Рисунок 3.13 – Схема підсилювального каскаду зі спільним емітером

Значення опору R_k обирається таким, щоб при короткому замиканні транзистора ($U_k = 0$) його колекторний струм I_{k3} не перевищував допустимого значення (рис. 3.14). Тобто

$$R_k = E_{\text{ж}} / I_{k3}. \quad (3.3)$$

Вольт-амперна характеристика цього опору, якщо скористатися другим законом Кірхгофа для колекторного контуру, буде мати вигляд

$$U_k = E_{\text{ж}} - R_k i_k, \quad (3.4)$$

що відповідає прямій, проведеній між точками ($u_k = 0, i_k = I_{k3}$) і ($u_k = E_{\text{ж}}, i_k = 0$).

Визначальним для роботи підсилювального каскаду є *режим спокою*, який відповідає розподілу напруг і струмів за відсутності вхідного сигналу. Щоб забезпечити обраний режим, який відповідає точці спокою $c'(U_{k0}, I_{k0})$ на вольт-амперній характеристиці R_k , треба знайти відповідне значення опору R_6 (рис. 3.13). Цьому сприяє перехідна характеристика $i_k(i_6)$, яка зв'язує вихідну характеристику транзистора з вхідною (рис. 3.14).

За допомогою цієї характеристики знаходиться точка c'' вхідної характеристики і в ній визначаються базова напруга U_{60} та базовий струм I_{60} , а далі з рівняння, записаного за другим законом Кірхгофа для базового контуру, опір

$$R_6 = \frac{E_{\text{ж}} - U_{60}}{I_{60}} \cong \frac{E_{\text{ж}}}{I_{60}}, \quad (3.5)$$

тому що $E_{\text{ж}} \gg U_{\text{б0}}$.

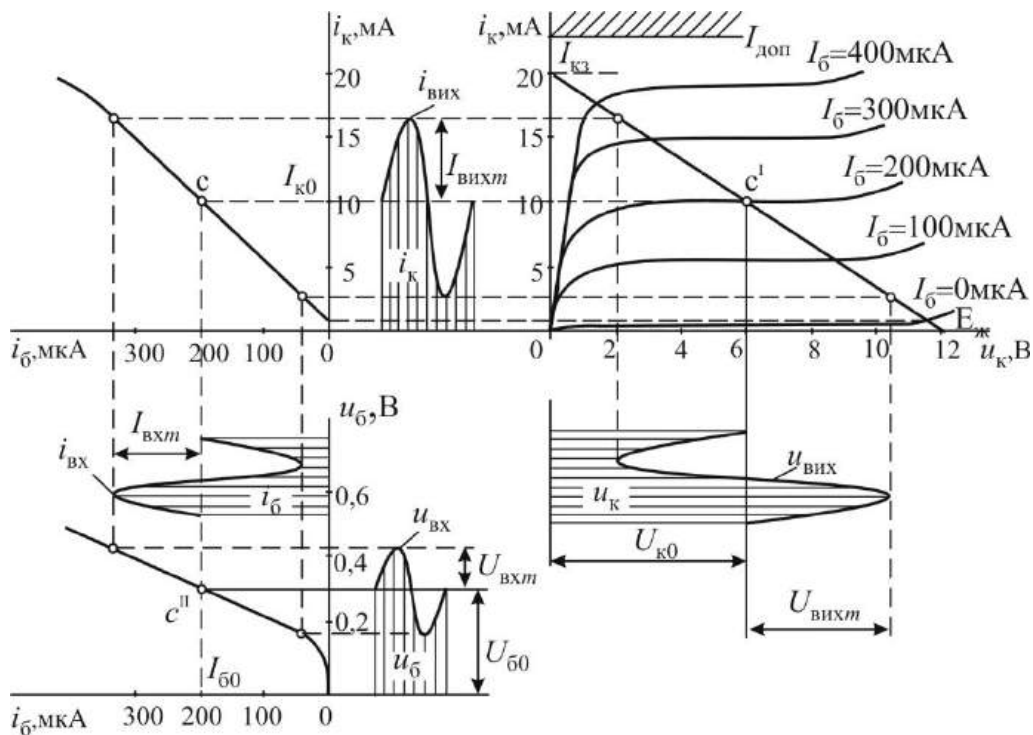


Рисунок 3.14 – Робота підсилювального каскаду на біполярному транзисторі при $E_{\text{ж}} = 12 \text{ В}$ і $R_{\text{к}} = 600 \text{ Ом}$

Процес підсилювання вхідного сигналу відбувається наступним чином (рис.3.14). Змінна напруга $u_{\text{вх}}$, яка попадає на вхід, додається до напруги $U_{\text{б0}}$ на конденсаторі $C_{\text{вх}}$ і утворює змінну напругу на базі $u_{\text{б}} = U_{\text{б0}} + u_{\text{вх}}$. Змінюючись у межах, визначених зміною напруги на вході, базова напруга змінює в тих же межах базовий струм, який буде тепер складатися зі струму спокою і змінного вхідного струму $i_{\text{б}} = I_{\text{б0}} + i_{\text{вх}}$. Зміна базового струму змінює колекторний струм. А це, у свою чергу, призводить до зміни напруги на колекторі. Виникають змінні струм і напруга на виході: $i_{\text{вих}} = I_{\text{к0}} - i_{\text{к}}$; $u_{\text{вих}} = u_{\text{к}} - U_{\text{к0}}$.

Важливо також відзначити, що крім підсилювання відбувається фазовий зсув на 180° напруги і струму на виході з підсилювального каскаду по відношенню до входу, тобто збільшення вхідного сигналу призводить до зменшення напруги на виході і навпаки (рис. 3.14).

Якщо зміна вхідної напруги, струмів бази і колектора лежить в межах лінійних частин вхідної і перехідної характеристик, то форма вихідної напруги буде відповідати формі вхідної. Наприклад, за наявності синусоїдної напруги на вході, напруга на виході також буде синусоїдною. Але занадто велика вхідна напруга буде виводити змінні складові струмів за межі лінійних ділянок вхідної і перехідної характеристик, внаслідок цього форма вихідної напруги значно спотворюється, а коефіцієнт підсилювання з напруги $K_U = U_{\text{вихт}} / U_{\text{вхт}}$ зменшується. Це добре відображає амплітудна характеристика підсилювального каскаду (рис. 3.15), лінійна частина якої відповідає діапазону вхідних напруг, які не спотворюють вихідну напругу.

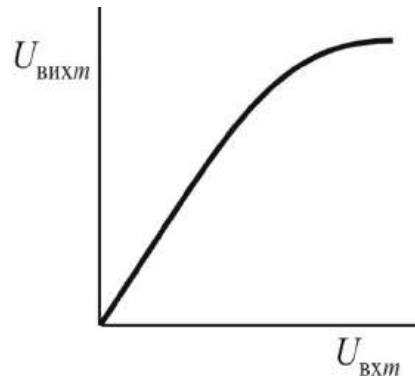


Рисунок 3.15 – Амплітудна характеристика підсилювального каскаду

Схема заміщення підсилювального каскаду. При роботі підсилювального каскаду в режимі, який відповідає лінійним частинам характеристик, коефіцієнт підсилювання можна визначити аналітично, за допомогою h -параметрів транзистора. Враховуючи те, що для змінних складових струмів падіння напруги на конденсаторах і в джерелі живлення можна прийняти рівним нулю, схему заміщення підсилювального каскаду можна представити як таку, що зображена на рис. 3.16, де пунктиром обведена схема заміщення біполярного транзистора.

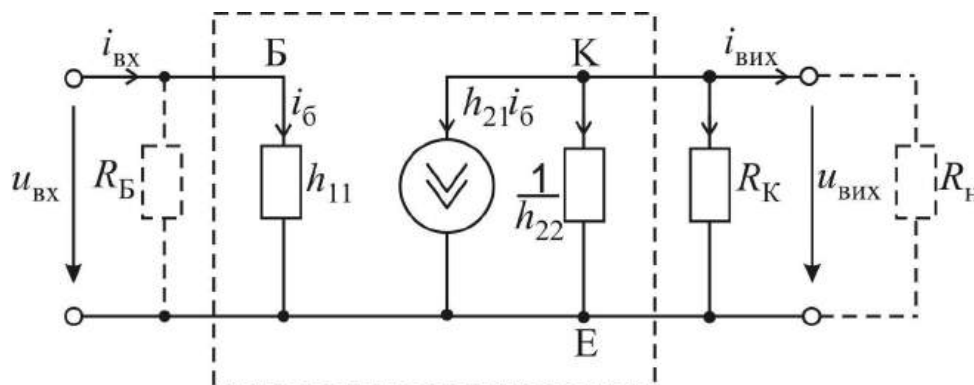


Рисунок 3.16 – Схема заміщення підсилювального каскаду зі спільним емітером

Як правило, $R_6 \gg h_{11}$, тому

$$u_{\text{ВХ}} = \frac{h_{11}R_6}{h_{11} + R_6} \cdot i_{\text{ВХ}} \cong h_{11}i_{\text{ВХ}}. \quad (3.6)$$

За першим законом Кірхгофа для колекторного вузла

$$h_{21}i_6 + h_{22}u_{\text{ВІХ}} + u_{\text{ВІХ}} / R_K + u_{\text{ВІХ}} / R_H = 0. \quad (3.7)$$

Використовуючи те, що $R_H \gg R_K$, а $i_6 \cong i_{\text{ВХ}}$, це рівняння зводиться до вигляду

$$h_{21}i_{\text{ВХ}} + h_{22}u_{\text{ВІХ}} + u_{\text{ВІХ}} / R_K = 0. \quad (3.8)$$

Підставляючи у нього із (3.6) $i_{\text{ВХ}} = u_{\text{ВХ}} / h_{11}$, остаточно отримуємо

$$u_{\text{ВІХ}} = -\frac{u_{\text{ВХ}}}{h_{11}} \cdot \frac{h_{21}}{h_{22} + 1/R_K}. \quad (3.9)$$

Знак “мінус” ще раз підтверджує, що вихідна напруга знаходиться у протифазі з вхідною.

Таким чином, коефіцієнт підсилювання по напрузі неперевантаженого підсилювального каскаду зі спільним емітером буде дорівнювати

$$K_U = \frac{U_{\text{ВІХ}m}}{U_{\text{ВХ}m}} = \frac{h_{21}R_K}{h_{11}(1 + h_{22}R_K)} \cong h_{21} \frac{R_K}{h_{11}}, \quad (3.10)$$

тому що $h_{22}R_K \ll 1$ (зазвичай $h_{22}=10^{-5} \dots 10^{-6}$ см; $R_K=10^3 \dots 10^4$ Ом).

Тобто коефіцієнт підсилювання по напрузі є пропорційним коефіцієнту підсилювання за струмом $K_I = I_{\text{ВІХ}m} / I_{\text{ВХ}m} = h_{21}$ і співвідношенню опорів колекторного резистора R_K та входу в транзистор h_{11} .

Температурна стабілізація підсилювального каскаду. На роботу біполярного транзистора суттєво впливає температура. При її підвищенні колекторні характеристики змінюються і колекторний струм зростає (рис. 3.17). Це спричиняє до погіршення роботи підсилювального каскаду, тому що лінійний діапазон підсилювання звужується.

Щоб запобігти цього, у коло емітера підсилювального каскаду зі спільним емітером додається резистор R_E і паралельно ньому конденсатор C_E , ємнісний опір якого в діапазоні робочих частот вхідного сигналу

близький до нуля (рис. 3.17). У коло бази вводиться розподільовач напруг $R'_B R''_B$ для створення початкової напруги зсуву між базою і емітером

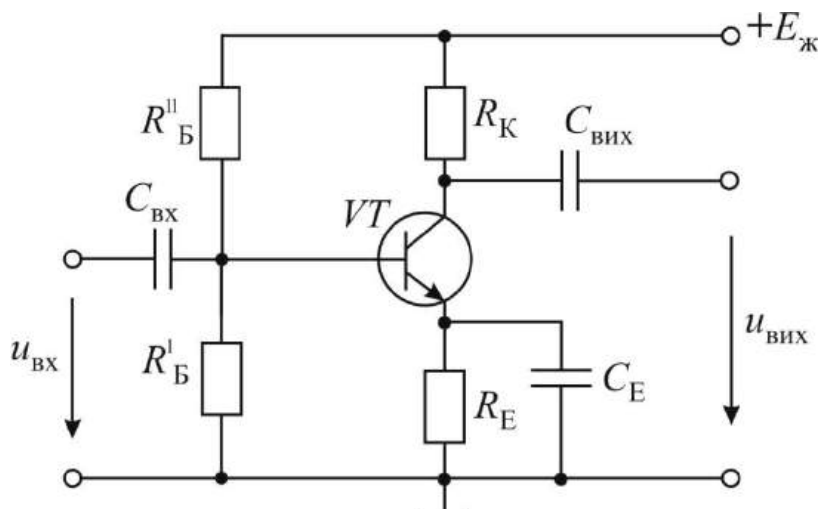


Рисунок 3.17 – Підсилювальний каскад з емітерною температурною стабілізацією

$$U_{BE} = \frac{E_{\text{ж}} R'_B}{R'_B + R''_B} - R_E I_E. \quad (3.11)$$

При збільшенні струму емітера $I_E \cong I_K$, внаслідок підвищення температури, зменшується U_{BE} і, відповідно, базовий струм. Зменшення базового струму сприяє поверненню назад точки спокою на колекторній характеристиці (рис. 3.18).

Одночасно конденсатор C_E , що шунтує резистор R_E , дозволяє уникнути зменшення змінної напруги вхідного сигналу при передачі її на базу – емітер:

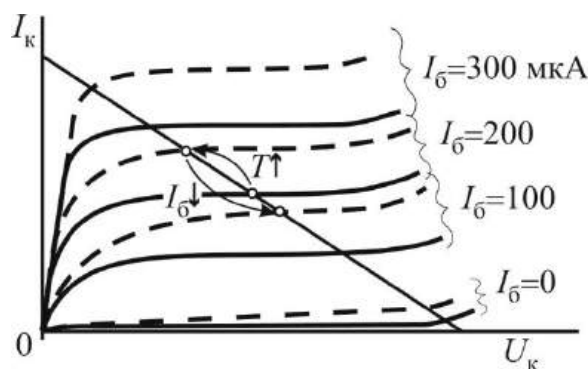


Рисунок 3.18 – Механізм стабілізації роботи підсилювального каскаду при підвищенні температури

$$u_{BE} = u_{\text{ВХ}} - \frac{R_E x_{CE}}{R_E + x_{CE}} \cdot i_E \cong u_{\text{ВХ}}, \quad (3.12)$$

тому що $x_{CE} \rightarrow 0$.

Контрольні запитання

1. Що таке напівпровідники або напівпровідникові матеріали?
2. Які бувають домішки в електронних приладах і як утворюються напівпровідники n -типу та p -типу ?
3. Пояснити структуру та феномен ємності p - n переходу.
4. Що таке пряме і зворотне вмикання p - n переходу?
5. Які фізичні процеси відбуваються в p - n переході при його прямому та зворотному вмиканнях?
6. Пояснити принцип дії підсилювача, використовуючи вольт-амперні характеристики транзистора.
7. Пояснити призначення окремих елементів у схемі підсилювача.
8. Пояснити причини нелінійності амплітудної характеристики.
9. Пояснити причини «завалу» амплітудно-частотної характеристики підсилювача на низьких та високих частотах.
10. У чому суть та призначення від'ємного зворотного зв'язку?
11. Чому робота підсилювача залежить від температурного режиму та яким чином зменшують таку залежність?

3.3. Приклад розрахунку підсилювального каскаду низької частоти

Каскад підсилювача низької частоти (рис.3.1) виконаний на транзисторі ГТ 122 А (структура $n - p - n$) за схемою зі спільним емітером. Вихідні дані: опір навантаження $R_H = 500$ Ом, струм покою $I_{к0} = 8$ мА, напруга покою $U_{к0} = 5$ В, ЕРС джерела $E_{п} = 12$ В, нижня гранична частота $f = 50$ Гц, допустимий коефіцієнт частотних спотворень каскаду у області нижніх частот $M_H = 1,25$. Каскад працює у стаціонарних умовах при $T = + 15 \div 25$ °С. При розрахунку впливом температури на режим транзистора знехтувати.

Визначити параметри схеми підсилювача R_e , R_k , R_1 , R_2 , C_e , C_p , h – параметри транзистора, коефіцієнт підсилення за напругою K_u , коефіцієнт

температурної нестабільності S , амплітудні значення напруги та струму навантаженні $U_{\text{вих.т}}, I_{\text{вих.т}}$.

Розв'язання

Побудуємо вхідну характеристику $I_{\text{б}}(U_{\text{бe}})$ при $U_{\text{ке}} = 5 \text{ В}$ та сімейство вихідних характеристик $I_{\text{к}}(U_{\text{ке}})$ при $I_{\text{б}} = \text{const}$ транзистора ГТ122А (рис.3.19). Відмітимо, що вхідні характеристики, які зняті при різних вихідних напругах $U_{\text{ке}}$, знаходяться близько одна до одної, тому будують одну вхідну характеристику при $U_{\text{ке}} \neq 0$.

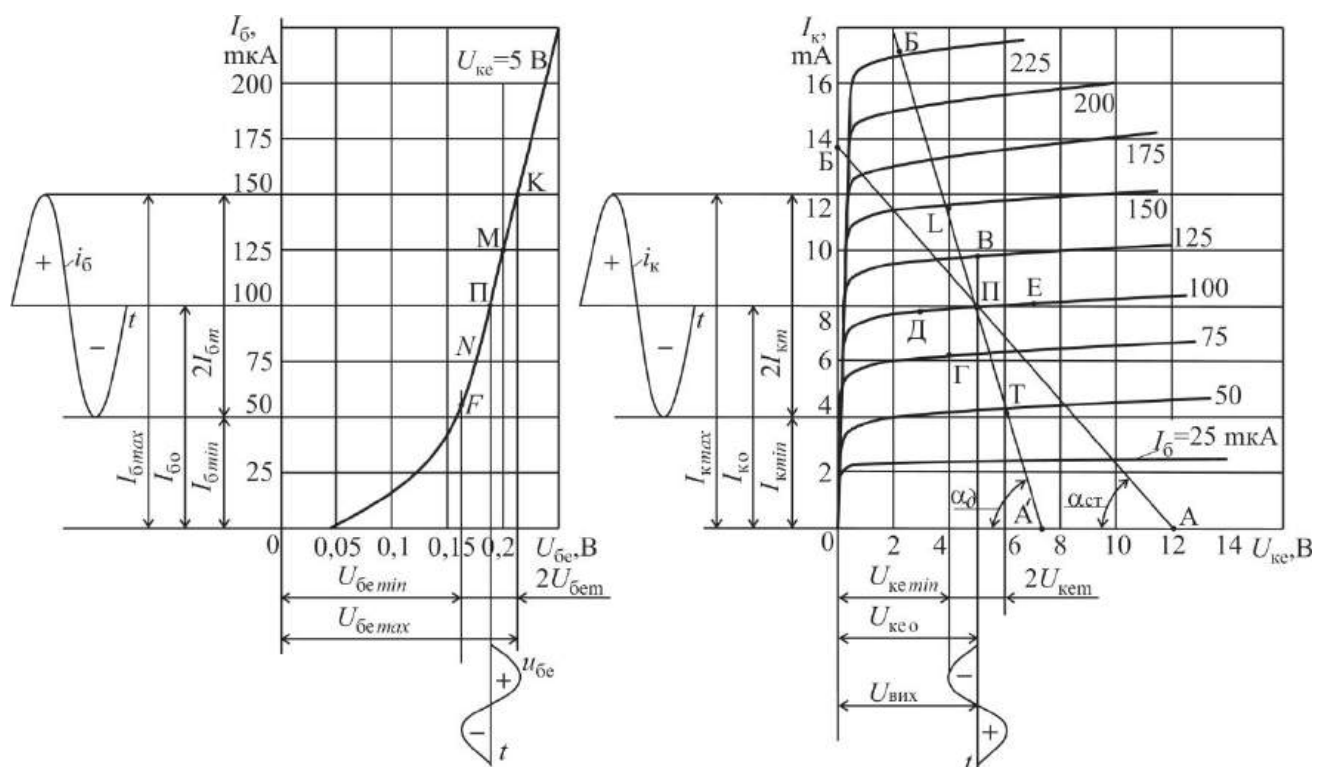


Рисунок 3.19 – Вхідна та вихідні характеристики транзистора ГТ122А

На сімействі вихідних характеристик транзистора будуюмо лінію навантаження А – В по постійному струму (статичну характеристику) аналітичний вираз якої визначається за другим законом Кірхгофа для контуру каскада, до якого відноситься джерело живлення з напругою $E_{\text{п}}$, резистори $R_{\text{к}}$ та $R_{\text{е}}$, транзистор

$$U_{\text{ке}} = E_{\text{ж}} - R_{\text{к}} I_{\text{к}} - R_{\text{е}} I_{\text{е}} = E_{\text{ж}} - R_{\text{к}} I_{\text{к}} - \frac{I_{\text{к}}}{\alpha} R_{\text{е}}, \quad (3.13)$$

де I_K – струм колектора; I_e – струм емітера; α – коефіцієнт струму емітера, який знаходиться в межах $0,9 - 0,995$.

З урахуванням того, що коефіцієнт α близький до одиниці, тоді можна прийняти $I_K = I_e$, таким чином рівняння (3.1) можна написати як

$$U_{ке} = E_{ж} - (R_K + R_e)I_K = E_{ж} - R_3 I_K, \quad (3.14)$$

де $R_3 = R_K + R_e$ – загальний опір у колі емітер-колектор.

Слід зауважити, що за допомогою резистора R_K створюється вихідна напруга. Резистор R_e , шунтований конденсатором C_e , який вмикається у коло емітера для зменшення впливу температури на характеристики підсилювального каскаду.

Лінію навантаження А-Б будуємо за двома точками:

точка А із координатами $E_{ж} = 12 \text{ В}$, $I_K = 0 \text{ А}$;

точка П із координатами $E_{ке0} = 12 \text{ В}$, $I_{к.0.} = 8 \text{ А}$.

Для точки спокою П рівняння (3.14) має вигляд:

$$U_{ке0} = E_{ж} - R_3 I_{к0} \quad (3.15)$$

$$\text{звідки } R_3 = \frac{E_{ж} - U_{ке0}}{I_{к0}} = \frac{12 - 5}{8 \cdot 10^{-3}} = 875 \text{ Ом}.$$

Нехай $R_3 = (0,15 - 0,3) R_K$

$$R_K = \frac{R_3}{1,15 \div 1,3} = \frac{875}{1,15 \div 1,3} = 760 \div 670 \text{ Ом}.$$

Приймаємо $R_K = 670 \text{ Ом}$, тоді

$$R_e = R_3 - R_K = 875 - 670 = 205 \text{ Ом}.$$

Точка спокою розташована на вихідній характеристиці, яка знімається при струмі бази $I_B = 100 \text{ мкА} = 0,1 \text{ мА}$, тому це значення струму бази називається струмом бази спокою $I_{БЕ0} = 100 \text{ мкА} = 0,1 \text{ мА}$. За вхідною характеристикою визначаємо для $I_{БЕ0}$ напругу бази спокою $U_{БЕ0} = 0,19 \text{ В}$ (точка П).

Електричний стан транзистора за схемою із загальним емітером характеризуються чотирма величинами: струмом бази I_B , напругою база-емітер $U_{БЕ}$, струмом емітера I_E та напругою колектор-емітер $U_{КЕ}$. У якості незалежних величин обирають $U_{КЕ}$ та I_B , а інші величини визначають як функції двох перших величин. Транзистор представляють у вигляді чоти-

рьохполюсника. У межах лінійної частини характеристик транзистора за схемою з загальним емітером записують наступні для прирощувань ΔU_{BE} та ΔI_K :

$$\Delta U_{BE} = h_{11} \Delta I_B + h_{12} \Delta U_{KE} \quad (3.16)$$

$$\Delta I_K = h_{21} \Delta I_B + h_{22} \Delta U_{KE}$$

де h – параметри відповідні часткової похідної, які визначаються за сімейством вихідних та вхідних характеристик транзистора:

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \right|_{U_{KE} = \text{const}}; \quad h_{12} = \left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta U_{KE}} \right|_{I_B = \text{const}} \quad (3.17)$$

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_{KE} = \text{const}}; \quad h_{22} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KE}} \right|_{I_B = \text{const}}$$

h_{11} – вхідний опір транзистора.

h_{12} – коефіцієнт зворотного зв'язку за напругою та знаходиться в межах $0,0002 \div 0,002$. При практичних розрахунках його приймають рівним нулю.

h_{21} – безрозмірний коефіцієнт передачі за струмом $h_{21} = \beta$;

h_{22} – характеризує вихідну провідність транзистора при незмінному струму бази.

У відповідності з рівнянням (3.15) на рис.3.20 зображена схема заміщення транзистора для змінних складових струмів та напруг при $h_{22} = 0$.

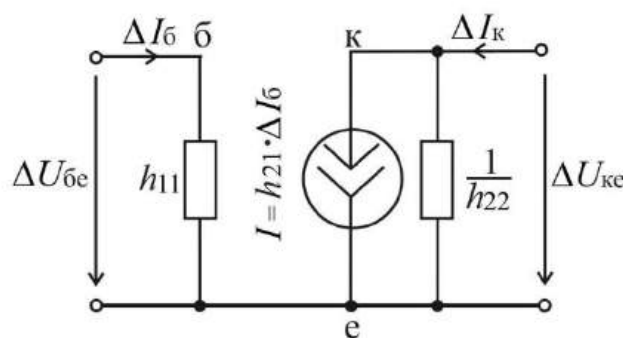


Рисунок 3.20 – Схема заміщення транзистора для змінних складових струмів та напруг при $h_{22} = 0$

Розрахунки параметрів підсилювача проводять поблизу робочої точки П за сімейством відповідних характеристик. За точками В та Г визначаємо

$$h_{21} = \beta = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B} \right|_{U_{KE} = \text{const}} = \frac{(9,9-6) \cdot 10^{-3}}{(125-75) \cdot 10^{-6}} = 78.$$

За точками Д та Е визначаємо

$$h_{22} = \left. \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{KE}} \right|_{I_B = \text{const}} = \frac{(8,1-7,8) \cdot 10^{-3}}{7-3} = 76 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

За точками М та N визначаємо:

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \right|_{U_{KE} = \text{const}} = \frac{0,205-0,18}{(125-75) \cdot 10^{-6}} = 500 \text{ Ом.}$$

Визначаємо опори R_1 та R_2 , вхідного подільника, призначеного для створення напруги бази спокою U_{BE0} при відсутності вхідного сигналу $U_{BX} = 0$:

$$R_1 = \frac{E_{ж} - U_{BE0} - U_{RE}}{I_1}; \quad (3.18)$$

$$R_2 = \frac{U_{BE0} + U_{RE}}{I_2}; \quad (3.19)$$

де I_1 – струм у резисторі R_1 , I_2 – струм у резисторі R_2 .

$$I_1 = I_2 + I_{BE0} \quad (3.20)$$

$$U_{RE} = R_{E0} I_E = R_{K0} I_E. \quad (3.21)$$

Приймають $I_2 = (10 \div 15) I_{BE0}$, таким чином,

$$I_2 = 10 I_{BE0} = 10 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} = 0,001 \text{ А,}$$

Визначаємо:

$$U_{RE} = R_{E0} I_E = 8 \cdot 10^{-3} \cdot 205 = 1,64 \text{ В;}$$

$$I_1 = I_2 + I_{BE0} = 10^{-3} + 0,1 \cdot 10^{-3} = 0,0011 \text{ А.}$$

Нехай $U_{BE0} = 0,19 \text{ В}$, тоді;

$$R_1 = \frac{E_{ж} - U_{BE0} - U_{RE}}{I_1} = \frac{12 - 0,19 - 1,64}{0,0011} = 9245 \text{ Ом;}$$

$$R_2 = \frac{U_{BE0} + U_{RE}}{I_2} = \frac{1,64 + 0,19}{0,01} = 1830 \text{ Ом.}$$

Розрахуємо коефіцієнт температурної нестабільності

$$S = \frac{R_E(R_1 + R_2) + R_1 \cdot R_2}{R_E(R_1 + R_2) + R_1 \cdot R_2 / (1 + \beta)} =$$

$$= \frac{205 \cdot (9245 + 1830) + 9245 \cdot 1830}{205 \cdot (9245 + 1830) + 9245 \cdot 1830 / (1 + 78)} = 7,72. \quad (3.22)$$

З точки зору економічності та стабільності роботи режиму вважають прийнятними значення $S = 2 \div 5$. Тому що у даній задачі розраховано значення $S > 5$, то слід зменшити значення R_1 , хоча при цьому зростає потужність, яка витрачається у колах стабілізації.

Приймаємо значення $R_1 = 5270$ Ом, тоді

$$I_1 = \frac{E_{\text{ж}} - U_{\text{БЕ0}} - U_{\text{РЕ}}}{R_1} = \frac{12 - 0,19 - 1,64}{5270} = 0,00193 \text{ А};$$

$$I_2 = I_1 - I_{\text{БЕ0}} = 0,00193 - 0,0001 = 0,00183 \text{ А}.$$

$$R_2 = \frac{U_{\text{БЕ0}} + U_{\text{РЕ}}}{I_2} = \frac{0,19 + 1,64}{0,00188} = 1000 \text{ Ом};$$

$$S = \frac{R_E(R_1 + R_2) + R_1 \cdot R_2}{R_E(R_1 + R_2) + R_1 \cdot R_2 / (1 + \beta)} =$$

$$= \frac{205 \cdot (5270 + 1000) + 5270 \cdot 1000}{205 \cdot (5270 + 1000) + 5270 \cdot 1000 / (1 + 78)} = 4,83.$$

При роботі підсилювального каскаду на лінійних ділянках характеристик коефіцієнт підсилення K_U , вхідний опір $R_{\text{ВХ}}$ та вихідний опір $R_{\text{ВИХ}}$ розраховують, використовуючи схему заміщення каскаду для змінних складових струмів та напруг (рис.3.21).

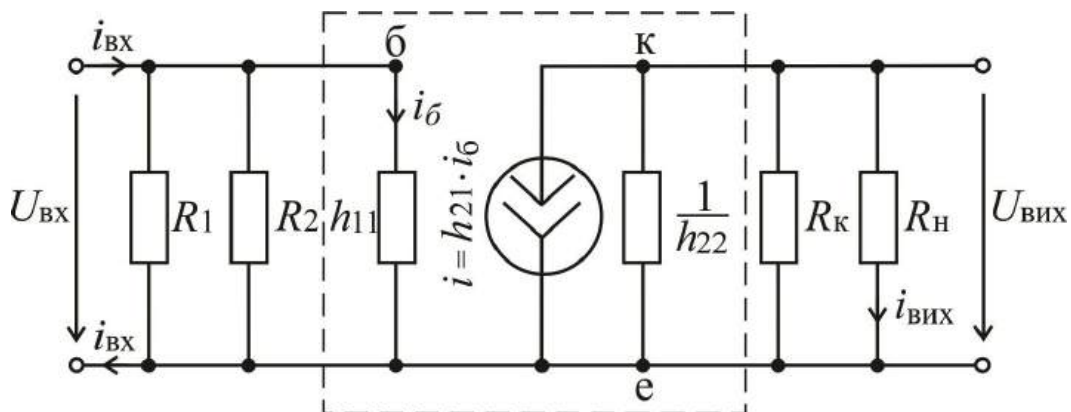


Рисунок 3.21 – Схема заміщення каскаду для змінних складових струмів та напруг

Основою цієї схеми є схема заміщення транзистора (яка обведена пунктиром). У схемі заміщення підсилювального каскада не враховані конденсатори C_p та C_E та ЕРС джерела живлення $E_{ж}$, тому що змінні складові напруги та струми на них приймають рівними нулю. Тому елементи R_H та R_K вмикаються паралельно між точками К та Е, а елементи R_1 та R_2 вмикаються паралельно в коло бази.

На схемі заміщення маємо:

$$U_{BX} = h_{11} \cdot i_B;$$

$$U_{ВИХ} = h_{21} \cdot i_B R_{ВИХ};$$

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{5270 \cdot 1000}{5270 + 1000} = 840 \text{ Ом};$$

$$R_{BX} = \frac{R \cdot h_{11}}{R + h_{11}} = \frac{840 \cdot 500}{840 + 500} = 313 \text{ Ом};$$

$$R_{ВИХ} = \frac{R_{KH} \cdot \frac{1}{h_{22}}}{R_{KH} + \frac{1}{h_{2211}}} = \frac{R_{KH}}{R_{KH} h_{22} + 1} \approx R_{KH} = \frac{R_K \cdot R_H}{R_K + R_H} = \frac{670 \cdot 500}{670 + 500} = 286 \text{ Ом};$$

слід мати на увазі, що $R_{KH} h_{22} \leq 1$;

$$K_U = \frac{U_{ВИХ}}{U_{BX}} = \frac{h_{21} i_B R_{ВИХ}}{h_{11} i_B} = \frac{h_{21} R_{ВИХ}}{h_{11}} = \frac{h_{21} R_{KH}}{h_{11}} = \frac{78 \cdot 286}{500} = 44,6.$$

Визначаємо ємність розподільного конденсатора C_p , який призначений для виділення з колекторної напруги змінної складової, яка подається на резистор навантаження R_H :

$$C_p = \frac{1}{2\pi f_H (R_K + R_H) \sqrt{M_H^2 - 1}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot (670 + 500) \cdot \sqrt{1,25^2 - 1}} = 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

приймаємо $C_p = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 4 \text{ мкФ}$.

$$C_E = \frac{10}{2\pi f_H R_K} = \frac{10}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 670} = 47,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 47,5 \text{ мкФ}.$$

C_E звичайно приймають від 10 до 30 мкФ, нехай $C_E = 30 \text{ мкФ}$. Для роботи підсилювача на лінійних ділянках характеристики (см.рис.3.19), приймаємо значення струму бази $I_{Бсп} = 50 \text{ мА}$, тоді $I_{Бmin} = 50 \text{ мА}$ (точка

F), $I_{B\max} = 150$ мА (точка К). Цим точкам відповідають $U_{BE\min} = 0,16$ В, $U_{BE\max} = 0,215$ В.

Амплітуда змінної складової напруги бази визначаємо як середнє значення

$$U_B = \frac{U_{B\max} - U_{B\min}}{2} = \frac{0,215 - 0,16}{2} = 0,0275 \text{ В.}$$

На сімействі вихідних характеристик будуємо динамічну характеристику лінії навантаження $A' - B'$, яка проходить через точку спокою П під кутом α_E , який є більшим ніж кут статичної характеристики $\alpha_{\text{ст}}$.

$$\alpha_E = \text{arcctg } R_{KH} \frac{m_I}{m_H} = \text{arcctg } 286 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-3}}{2} = \text{arcctg } 0,286 = 74^\circ,$$

де m_I , m_H – відповідно масштаб струму та напруги колектор-емітер на вихідних характеристиках.

Точки перетину динамічної лінії навантаження із вихідними характеристиками, які отримані при $I_B = 150$ мА та $I_B = 50$ мА (точки L та T), визначаємо значення:

$$I_{K\max} = 11,4 \text{ мА}; \quad I_{K\min} = 4,2 \text{ мА};$$

$$U_{KE\max} = 6 \text{ В}, \quad U_{KE\min} = 4,1 \text{ В.}$$

Амплітуду змінної напруги на навантаженні визначаємо як середнє значення

$$U_{KE\text{м}} = U_{\text{вихм}} = \frac{U_{KE\max} - U_{KE\min}}{2} = \frac{6 - 4}{2} = 1 \text{ В.}$$

Амплітуду змінного струму в навантаженні визначаємо як середнє значення

$$I_{Km} = U_{\text{вихм}} = \frac{I_{K\max} - I_{K\min}}{2} = \frac{11,4 - 4,2}{2} = 3,6 \text{ мА.}$$

ДОДАТОК 1

Зразок титульного аркушу розрахунково-графічного завдання

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Кафедра загальної електротехніки

Розрахунково-графічне завдання

Розрахунок електричних кіл

Варіант № _____

Завдання виконав студент _____;
(прізвище, ініціали)

Група _____;
(індекс групи)

(дата виконання)

Завдання прийняв _____
(посада, прізвище, ініціали)

Харків
рік виконання

ДОДАТОК 2

Як оформляти розрахунково-графічне завдання

Розрахункове завдання оформляти можна як на стандартних аркушах паперу, так і на зошитових у клітинку. Прохання не писати в обріз аркуша! Залишати поля хоча б по 1 см. Все має бути написано від руки, включаючи титульний лист. Все оформляється українською.

Назва роботи «РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ»

Трохи нижче за назву, приблизно посередині титульного листа пишеться номер варіанта. Більше його не треба писати в дужках біля кожного завдання.

Нумерація задач наскрізна від 1 до 10. Тобто перша задача на змінний струм нумерується як п'ята, відповідно шоста змінного струму – десята.

Рисунки та формули нумерувати не треба!

Спочатку пишеться слово ЗАДАЧА №., потім назву і повністю переписуєте з навчального посібника умову, нижче в один або два рядки (у стовпець не треба!) пишете чисельні значення ЕРС, напружень, опорів. Міжрядковий інтервал – одна клітина, якщо оформляєте на стандартних аркушах, формату А4, то не менше 5-7 мм.

Далі – схема. Зображується під лінійку олівцем, елементи кола, струми та напруги позначаються ручкою.

Розміри елементів такі:

джерело ЕРС – коло 10 мм,

опір – прямокутник 4 на 10 мм,

індуктивність – три півкола, радіус півкола 2 - 3 мм,

ємність – два відрізки паралельні один одному по 8 мм, відстань між якими 1,5 мм.

У першій задачі достатньо однієї схеми, перетворені схеми малювати не треба.

У другій задачі навести дві схеми: вихідну та перетворену.

У третій задачі намалювати одну схему на якій показати дійсні та контурні струми.

У четвертій задачі дві схеми: вихідну, на якій показати струми холостого ходу та напругу холостого ходу, та другу, яка пояснює, як знаходиться опір еквівалентного генератора.

У задачах по змінному струму в кожній задачі – одна схема з персональними схемами заміщення приймачів замість Зальфа, Zбетта і Zгамма.

Потім пишеться посередині рядка слово РОЗВ'ЯЗАННЯ без крапки або двокрапки. Нижче йде само розв'язання задачі. Пишеться формула у буквену вигляді, потім знак «дорівнює» і підставлені у формулу чисельні значення, потім «дорівнює» і число з точністю до двох знаків після коми, якщо число не ціле, та розмірність без дужок. На рядку писати одну формулу. ***Супровідний текст, як у посібнику, наводити не треба!***

Особливо це стосується пояснень, як будувати векторні діаграми в 8, 9, 10 задачах.

У третій задачі (контурні струми) треба докладно в числах розписувати, як знайдені визначники матриць.

У перших трьох задачах обов'язковий баланс потужностей. Окремо розраховуєте потужність джерела, окремо суму потужностей споживачів. Якщо вони рівні, то відносну похибку (дельту) не треба розраховувати. Вона дорівнює нулю, що зрозуміло. Якщо числа вийшли різними, треба шукати відносну похибку. Орієнтуватися треба на зразок у другій задачі.

Усі векторні діаграми робляться під лінійку, вони повинні бути нормального розміру, не надто маленькі, обов'язково вказувати масштаб струму та напруги. Проекції векторів також повинні підписуватися. Усі векторні величини на векторних діаграмах під буквеним позначенням підкреслюються. Це ж стосується розрахунку в комплексних числах у 7-мій та 10-тій задачах.

У п'ятій задачі малюються графіки струму та напруги строго за зразком у посібнику, не забувати вказувати масштаб на вертикальних осях: зліва по струму, а праворуч по напрузі.

В умовах он-лайн навчання все фотографується, фотографії послідовно збираються до одного файлу у форматі doc (docx) чи pdf. Бажано, щоб фото займало увесь аркуш документа Word або PDF. З фотографій необхідно прибрати все, що не стосується завдання, наприклад, фото поверхні, на якій знаходяться аркуші з розв'язанням та інші зайві предмети. У назві файлу вказати своє прізвище, групу та номер варіанта та надіслати на корпоративну пошту викладача. Наприклад, **Семенюк_MIT-221и_варіант_03**

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Розрахунок електричних кіл. Методичні вказівки до розрахунково-графічних робіт з курсу «Електротехніка» для студентів усіх не-електротехнічних спеціальностей / В.Г. Данько, І.В. Поляков, А.К. Черкасов. За ред. В.Г. Данька. – Харків: НТУ «ХП», 2007. – 55 с.
2. Мілих В. І. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : підручник / В. І. Мілих, О. О. Шавьолкін ; за ред. В. І. Мілих. – К. : Каравела, 2007. – 688 с.
3. Електричні кола / В.Г.Данько, С.М. Кожемякін, В.С. Марков, та ін.: навч.-метод. посібник, за ред. В.Г. Данька. – Харків: НТУ “ХП”, 2010. – 108 с.
4. Збірник тестів з електротехніки / В.Ф. Болюх, С.М. Кожемякін, В.С. Марков та інш. – Харків: НТУ “ХП”, 2012. – 170 с.
5. В.Ф. Болюх Розрахунок електротехнічних пристроїв / В.Ф. Болюх, С.М. Кожемякін, В.С. Марков; за ред. В. Ф. Болюха: навч.посібник. – Харків: НТУ “ХП”, 2016. – 116 с.
6. Електротехніка та електромеханіка: навч. посібник/ В.Ф. Болюх, П.А.Бондарук, К.В. Коритченко та ін. – Харків: ВІТВ НТУ «ХП», 2020. – 352 с.
7. Конкурсні задачі з електротехніки / Н. П. Мусихіна, В. І.Коруд, І. І. Васильчишин, та ін. – Львів: Львівська політехніка, 2020, – 200 с.
8. Збірник задач з електротехніки: збірник задач / В. Ф. Болюх, К. В. Коритченко, В. С. Марков та інш.; за ред. В. Ф. Болюха. – Харків: НТУ «ХП», 2021. – 196 с.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ.....	5
1.1. Формулювання задач на розрахунок електричних кіл постійного струму	5
1.2. Основні теоретичні положення для розв'язання задач на постійний струм	24
1.3. Приклади розрахунку електричних кіл постійного струму та питання для самоконтролю	31
1.4. Формулювання задач на розрахунок електричних кіл змінного синусоїдного струму	42
1.5. Основні теоретичні положення для розв'язання задач на змінний струм	48
1.6. Приклади розрахунку електричних кіл змінного струму та питання для самоконтролю.....	66
 РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНОК МАГНІТНИХ КІЛ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ.....	 84
2.1. Формулювання задач.....	84
2.2. Основні теоретичні положення для розв'язання задач на розрахунок магнітних кіл.....	128
2.3 Приклади розрахунку магнітних кіл.....	140
2.4. Електромагніти та реле. Основні теоретичні положення.....	151
2.5. Приклади розрахунку параметрів електромагнітів та реле.....	154
2.6. Трансформатори. Основні теоретичні положення.....	158
2.7. Приклади розрахунку параметрів і характеристик однофазних трансформаторів.....	164
2.8. Двигуни постійного струму. Основні теоретичні положення.....	169
2.9. Приклади розрахунку параметрів і характеристик двигунів постійного струму.....	175
2.10. Асинхронні двигуни. Основні теоретичні положення.....	179
2.11. Приклади розрахунку параметрів і характеристик асинхронних двигунів.....	189

РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ.....	194
3.1 Постановка задачі з розрахунку підсилювача низької частоти.....	194
3.2. Основні теоретичні положення.....	199
3.3. Приклад розрахунку підсилювального каскаду низької частоти.....	210
 ДОДАТОК 1. Зразок титульного аркушу розрахунково-графічного завдання	 218
ДОДАТОК 2. Як оформляти розрахунково-графічне завдання.....	219
 СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	 221

Навчальне видання

Укладачі: БОЛЮХ Володимир Федорович
МАРКОВ Владислав Сергійович
ПОЛЯКОВ Ігор Володимирович
ГОНЧАРОВ Євген Вікторович
КРЮКОВА Наталія Валерійовна

ЗАДАВДАННЯ З ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ З ПРИКЛАДАМИ ТА ПОЯСНЕННЯМИ

до розрахункових, розрахунково-графічних та курсових робіт з дисциплін:
«Електротехніка та електромеханіка», «Електротехніка та електроніка»,
«Електротехніка та основи електроніки»,
«Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка»,
«Електричне обладнання, основи електроніки»
для студентів неелектротехнічних спеціальностей
денної та заочної (дистанційної) форми навчання

Відповідальний за випуск доц. Марков В.С.

Комп'ютерне верстання та рисунки В. С. Марков та І. В. Поляков

Роботу рекомендувала до видання проф. Безпрозваних Г. В.

В авторській редакції

План 2025, поз.99

Підписано до друку. 07.11.2025. Формат 60x84 1/16. Папір друк.
Друк ризографія. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 14.
Наклад 200 прим. Зам. № 27469. Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХП».
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5478
від 21.08.2017 р.
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2
Друкарня ООО «Скан+»
