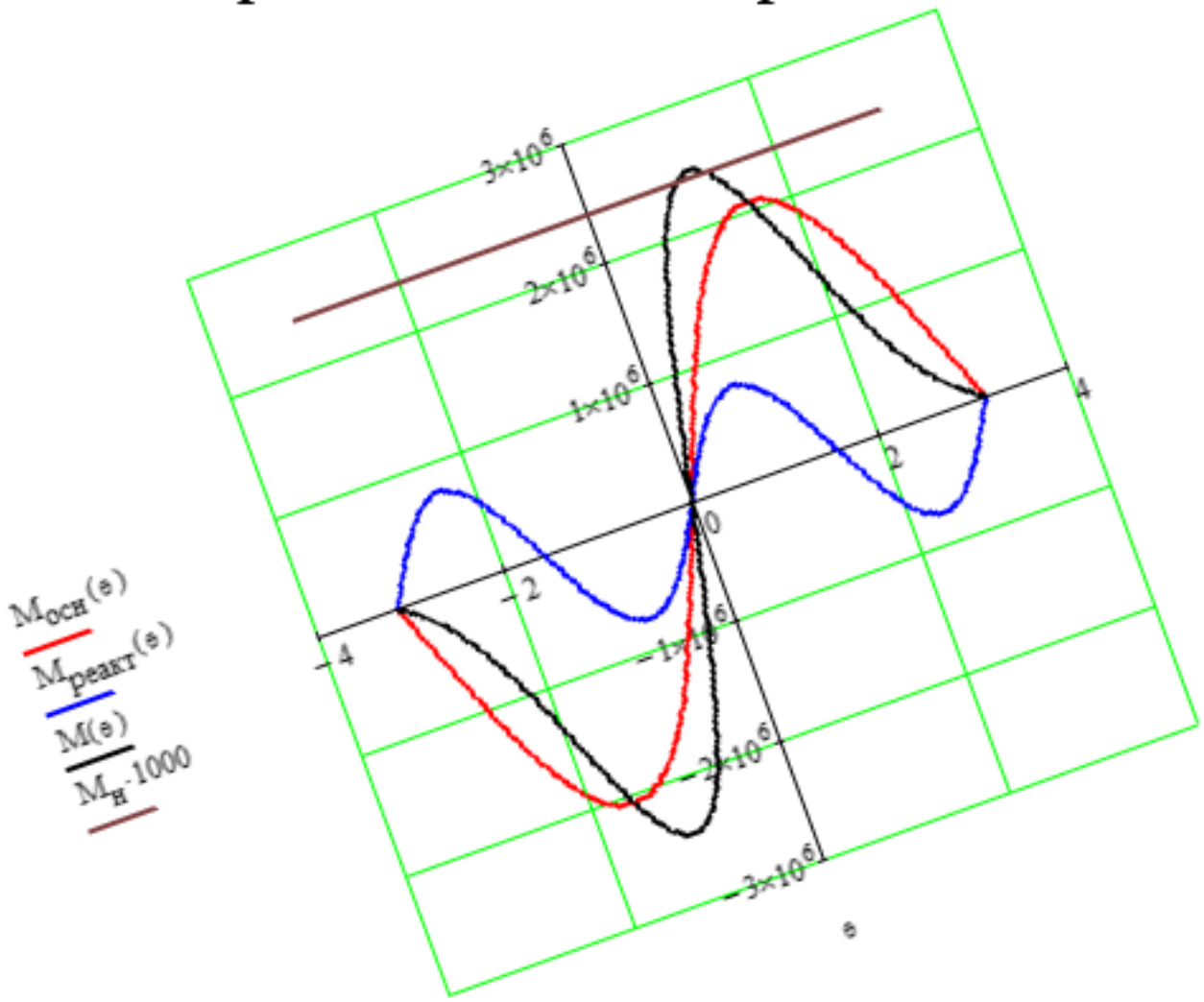
М. П. Розводюк, С. М. Левицький

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ.

Контрольні завдання для студентів напрямів підготовки «Електромеханіка», «Електротехніка та електротехнології»



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

М. П. Розводюк, С. М. Левицький

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ.

Контрольні завдання для студентів напрямів підготовки «Електромеханіка», «Електротехніка та електротехнології»

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2016

УДК 621.313
ББК 31.261я73
Р64

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 2 від 24.09.2013 р.)

Рецензенти:
В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор
О. Б. Мокін, доктор технічних наук, доцент
В.В. Прус, кандидат технічних наук, доцент

Розводюк, М. П.

Р64 Електричні машини. Контрольні завдання для студентів напрямів підготовки «Електромеханіка», «Електротехніка та електротехнології» : навчальний посібник / М. П. Розводюк, С. М. Левицький. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 108 с.

В навчальному посібнику приведені контрольні завдання з розділів «Трансформатори», «Асинхронні машини», «Синхронні машини», «Машини постійного струму» дисципліни «Електричні машини». Навчальний посібник рекомендовано для студентів, що навчаються за напрямками 6.050702 «Електромеханіка», 6.050701 – «Електротехніка та електротехнології».

УДК 621.313
ББК 31.261я73

© М. Розводюк, С. Левицький, 2016

Зміст

Вступ ……..... 5

1 Трансформатори 6
1.1 Завдання..... 6
1.2 Рекомендації до розрахунку 9
Розрахунок номінальних струмів та напруг обмоток..... 9
Розрахунок параметрів схеми заміщення трансформатора 10
Розрахунок напруги короткого замикання та зміни вторинної напруги, вторинних напруг і струмів при номінальному навантаженні 13
Побудова векторної діаграми..... 14
Дослідження паралельної роботи трансформаторів..... 17
Розрахунок ударних струмів 21
1.3 Приклад розрахунку 22

2 Асинхронні машини..... 31
2.1 Завдання..... 31
2.2 Рекомендації до розрахунку 34
Розрахунок фазних напруги та струму обмотки статора 34
Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна 35
Розрахунок параметрів двигуна при номінальному навантаженні 37
Розрахунок пускового та максимальних моментів..... 40
Розрахунок та побудова механічної характеристики 41
Розрахунок та побудова робочих характеристик..... 41
2.3 Приклад розрахунку 42

3 Синхронні машини..... 50
3.1 Завдання..... 50
3.2 Рекомендації до розрахунку 54
Визначення базисних величин 54
Побудова векторної діаграми генератора для режиму номінального навантаження 55
Визначення напруги на обмотці збудження..... 60
Визначення втрат, коефіцієнту корисної дії та моменту генератора 60
Побудова кутової характеристики генератора..... 61

Визначення струмів короткого замикання 63
Визначення повної потужності генератора при паралельній роботі на мережу 65
Визначення реактивної потужності генератора при зниженому моменті 65
Визначення струмів якоря при синхронізації з мережею 66
Визначення механічної потужності при синхронізації з мережею 66
Визначення максимального моменту машини при зниженому збудженні 67
Визначення потужності машини в режимі холостого ходу двигуна 67
Визначення струмів та потужності машини в режимі синхронного компенсатора 68
Визначення потужності машини в режимі синхронного компенсатора при втраті збудження 68
3.3 Приклад розрахунку 69

4 Машини постійного струму 81
4.1 Завдання 81
4.2 Рекомендації до розрахунку 85
Режим генератора 85
Режим двигуна паралельного збудження 91
4.3 Приклад розрахунку 95

Література 105

Глосарій … 106

Вступ

Навчальний посібник призначений для перевірки знань студентів з дисципліни «Електричні машини» за рахунок виконання контрольних робіт.

Задачі складено таким чином, що охоплюють практично весь матеріал по кожному з розділів:

– «Трансформатори»;

– «Асинхронні машини»;

– «Синхронні машини»;

– «Машини постійного струму».

Для зручного користування до кожного з розділів наведено рекомендації для розрахунку, що містять всі необхідні формули для успішного розв’язання заданих задач.

Крім того, подано приклади розрахунку для кожної з задач.

Завдання для розділів «Трансформатори», «Асинхронні машини» та «Машини постійного струму» взято з [1], а для розділу «Синхронні машини» – з [2].

Рекомендується ознайомитися з літературою [3 – 10].

1 Трансформатори

1.1 Завдання

Виходячи із даних табл. 1.1, необхідно для трансформатора:

1) визначити лінійні й фазні первинні та вторинні напруги й струми в номінальному режимі;

2) накреслити електричну схему заміщення однієї фази приведеного трансформатора, визначити її параметри;

3) розрахувати активну й реактивну складові напруги короткого замикання, зміну вторинної напруги; приведені значення вторинних напруг і струму при номінальному навантаженні;

4) записати рівняння напруг і струмів приведеного трансформатора і накреслити в масштабі його повну векторну діаграму при номінальному навантаженні і заданому значенні коефіцієнта потужності $\cos\varphi_2$;

5) визначити розподіл струмів навантаження між двома трансформаторам однакової (заданої) потужності при їх паралельній роботі на спільне навантаження з заданим $\cos\varphi_2$, а також недовикористану потужність цих трансформаторів для двох випадків:

5.1) один із трансформаторів включений на відпайку +2,5%, а інший – на відпайку, що відповідає номінальній напрузі;

5.2) напруга короткого замикання другого трансформатора на 8% більша, ніж першого, вказаного в табл. 1.1;

6) розрахувати значення ударних струмів короткого замикання первинної й вторинної обмоток трансформатора та їх кратності відносно номінальних струмів обмоток.

Примітка. В табл. 1.1 введені такі позначення:

$S_н$ – номінальна повна потужність;

$U_{1н}$ – номінальна лінійна напруга первинної обмотки;

$U_{2н}$ – номінальна лінійна напруга вторинної обмотки;

$U_{к\%}$ – напруга короткого замикання;

$I_{0\%}$ – струм холостого ходу;

P_0 – потужність холостого ходу;

$P_к$ – потужність короткого замикання;

$\cos\varphi_2$ – коефіцієнт потужності вторинної обмотки.

Таблиця 1.1 – Варіанти завдань до розділу «Трансформатори»

№ вар.	$S_н$, кВ·А	$U_{1н}$, кВ	$U_{2н}$, кВ	$U_{к\%}$, %	$I_{0\%}$, %	P_0, кВт	$P_к$, кВт	Схема і група	$\cos\varphi_2$	Тип навантаження
1.	1000	6,3	0,23	8	2	3	12	$Y/Y_н - 0$	1	активне
2.	630	15,75	0,4	8	2	2,3	8,7	$\Delta/Y_н - 11$	0,86	індуктивний
3.	400	10,5	0,4	5,5	3	1,3	5,4	$\Delta/Y - 11$	0,46	ємнісний
4.	250	6,5	0,23	5,5	3	1,3	5,4	$\Delta/Y_н - 11$	0,36	індуктивний
5.	16000	38,5	10,5	8	0,6	17,8	90	$Y_н/\Delta - 11$	0	ємнісний
6.	6300	20	3,15	7,5	0,9	9,4	46,5	$Y_н/\Delta - 11$	0,8	індуктивний
7.	25	0,38	0,23	4	3,2	0,105	0,6	$Y/\Delta - 11$	0	індуктивний
8.	100	6,3	0,23	4,5	2,6	0,31	1,97	$Y/\Delta - 11$	1	активний
9.	40	3,15	0,23	4,6	4,5	0,24	0,88	$Y/Y_н - 0$	0,45	ємнісний
10.	63	0,66	0,4	4	2,8	0,22	1,28	$Y/Y_н - 0$	0,65	індуктивний
11.	100	20	0,69	6,5	2,6	0,465	1,97	$Y/\Delta - 11$	0,85	ємнісний
12.	160	6,3	0,4	4,5	3,86	0,73	2,65	$Y/Y_н - 0$	0,7	індуктивний
13.	250	35	10,5	6,5	2,3	0,82	3,7	$Y/\Delta - 11$	0,2	ємнісний
14.	400	10	3,15	4,5	2,1	0,92	5,5	$Y/\Delta - 11$	1	активний
15.	630	3	0,4	5,5	2	1,42	7,6	$Y/Y_н - 0$	0	індуктивний
16.	1000	35	0,69	6,5	1,5	2,75	12,2	$Y/Y_н - 0$	0,92	ємнісний
17.	1600	20	6,3	6,5	1,4	3,65	16,5	$Y/\Delta - 11$	0,82	індуктивний
18.	630	35	10,5	6,5	2	1,7	7,6	$Y/\Delta - 11$	0,68	ємнісний
19.	25	0,66	0,4	4	3,2	0,125	0,6	$Y/Y_н - 0$	0,1	індуктивний
20.	40	6	0,69	4,5	3	0,15	0,88	$Y/\Delta - 11$	0,55	ємнісний
21.	63	6	0,23	4,5	4,5	0,36	1,28	$Y/Y_н - 0$	0,75	індуктивний
22.	250	10	0,4	4,7	3,68	1,05	4,2	$Y/Y_н - 0$	0,35	ємнісний
23.	25	6	0,23	4,5	5,15	0,17	0,6	$Y/Y_н - 0$	1	активний
24.	630	35	3,15	6,5	2	2	7,6	$Y/\Delta - 11$	0,6	індуктивний
25.	1000	10,5	6,3	5,5	5	3,3	12,2	$Y/\Delta - 11$	0,95	ємнісний
26.	160	20	0,4	6,5	2,4	0,66	2,65	$Y/Y_н - 0$	0,5	індуктивний
27.	6300	20	6,3	7,5	0,9	9,4	46,5	$Y/\Delta - 11$	0,5	ємнісний
28.	4000	35	10,5	7,5	1	6,7	33,5	$Y/\Delta - 11$	0,4	індуктивний
29.	16000	38,5	6,3	8	0,75	21	90	$Y_н/\Delta - 11$	0,4	ємнісний
30.	2500	35	0,69	6,5	1,1	5,1	25	$Y/Y_н - 0$	1	активний
31.	160	10	0,69	5,5	4	0,7	2,7	$\Delta/Y_н - 11$	0,45	індуктивний
32.	25	3	0,4	4,5	3,2	0,125	0,6	$Y/Y_н - 0$	0,45	ємнісний
33.	40	0,38	0,23	4	3	0,15	0,88	$Y/\Delta - 11$	0,35	індуктивний
34.	63	20	0,4	5	2,8	0,29	1,28	$Y/Y_н - 0$	0,35	ємнісний
35.	100	35	0,4	6,5	4,15	0,625	1,97	$Y/Y_н - 0$	0,25	індуктивний
36.	250	10	0,69	4,5	2,3	0,78	3,7	$Y/\Delta - 11$	0,25	ємнісний
37.	160	10	3,15	4,5	2,4	0,46	2,65	$Y/\Delta - 11$	1	активний
38.	400	6	0,69	4,5	3,7	1,05	3,7	$Y/\Delta - 11$	0	індуктивний

Продовження таблиці 1.1

№ вар.	$S_н$, кВ·А	$U_{1н}$, кВ	$U_{2н}$, кВ	$U_{к\%}$, %	$I_{0\%}$, %	P_0, кВт	$P_к$, кВт	Схема і група	$\cos\varphi_2$	Тип навантаження
39.	630	20	0,4	6,5	2	2	7,6	$Y/Y_н - 0$	0	ємнісний
40.	1600	20	10,5	6,5	1,4	3,65	16,5	$Y/\Delta - 11$	0,7	ємнісний
41.	2500	10,5	0,69	5,5	3,5	6,2	25	$Y/\Delta - 11$	0,65	індуктивний
42.	4000	20	10,5	7,5	1	6,7	33,5	$Y/\Delta - 11$	0,65	ємнісний
43.	6300	35	11	7,5	0,9	8	46,5	$Y/\Delta - 11$	0,15	індуктивний
44.	4000	35	6,3	7,5	1	6,7	33,5	$Y/\Delta - 11$	0,15	ємнісний
45.	10000	38,5	10,5	7,5	0,8	14,5	65	$Y_н/\Delta - 11$	0,25	індуктивний
46.	630	13,8	0,4	8	2	2,3	8,7	$\Delta/Y_н - 11$	0,25	ємнісний
47.	1000	6	0,69	5,5	1,5	3	11,2	$\Delta/Y_н - 11$	1	активний
48.	400	13,8	0,4	8	3,5	1,4	6	$\Delta/Y_н - 11$	0	індуктивний
49.	250	3	0,23	4,5	2,3	0,78	3,7	$Y/\Delta - 11$	0,77	ємнісний
50.	63	10	0,69	4,5	2,8	0,265	1,28	$Y/\Delta - 11$	0,87	індуктивний
51.	1000	35	11	6,5	1,5	2,35	11,6	$Y/\Delta - 11$	0	ємнісний
52.	630	10	0,69	5,5	2	1,42	7,6	$\Delta/Y_н - 11$	0,87	ємнісний
53.	1600	15,75	0,4	8	2	4,3	16	$\Delta/Y_н - 11$	0,77	індуктивний
54.	100	20	0,4	6,5	4,5	0,625	1,97	$Y/Y_н - 0$	0,9	індуктивний
55.	40	10	3,15	4,5	3	0,18	0,88	$Y/\Delta - 11$	0	ємнісний
56.	250	6	0,69	4,5	2,3	0,66	3,7	$Y/Y_н - 0$	1	активний
57.	400	3	0,4	4,5	2,1	1,08	5,5	$Y/Y_н - 0$	0,8	ємнісний
58.	1000	15,75	0,4	8	2	3,2	12	$\Delta/Y_н - 11$	0,43	індуктивний
59.	6300	35	6,3	7,5	0,9	9,4	46,5	$Y_н/\Delta - 11$	0,1	ємнісний
60.	4000	10,5	3,15	6,5	3	9,9	33,5	$Y/\Delta - 11$	0,47	індуктивний
61.	2500	10,5	6,3	5,5	3,5	6,2	25,0	$Y/\Delta - 11$	0,57	ємнісний
62.	63	20	0,23	5	4,5	0,39	1,28	$Y/Y_н - 0$	0,47	ємнісний
63.	40	0,66	0,4	4	3	0,18	0,88	$Y/Y_н - 0$	0,57	індуктивний
64.	25	6	0,69	4,5	3,2	0,105	0,6	$Y/\Delta - 11$	0,27	індуктивний
65.	100	10	0,23	4,5	4,15	0,49	1,97	$Y/Y_н - 0$	0,37	ємнісний
66.	160	3	0,69	4,5	2,4	0,46	2,65	$Y/Y_н - 0$	0,37	індуктивний
67.	630	20	0,23	6	2,2	2,2	7,8	$Y/Y_н - 0$	0,48	ємнісний
68.	1000	10,5	0,69	5,5	5	4,6	12,2	$Y/\Delta - 11$	0,88	індуктивний
69.	2500	35	10,5	6,5	1,1	5,1	23,5	$Y/\Delta - 11$	0,88	ємнісний
70.	4000	20	6,3	7,5	1	6,7	33,5	$Y/\Delta - 11$	1	активний
71.	6300	10,5	3,15	6,5	3	12,3	46,5	$Y/\Delta - 11$	0,48	індуктивний
72.	10000	38,5	6,3	7,5	0,8	14,5	65	$Y_н/\Delta - 11$	0,57	ємнісний
73.	25	10	0,4	4,7	5,15	0,17	0,69	$Y/Y_н - 0$	0,57	індуктивний
74.	160	10	0,4	4,5	3,85	0,73	2,65	$Y/Y_н - 0$	0,67	ємнісний
75.	250	6	0,69	4,5	2,3	0,78	3,7	$Y/\Delta - 11$	0	індуктивний

Продовження таблиці 1.1

№ вар.	$S_н$, кВ·А	$U_{1н}$, кВ	$U_{2н}$, кВ	$U_{к\%}$, %	$I_{0\%}$, %	P_0, кВт	$P_к$, кВт	Схема і група	$\cos\varphi_2$	Тип навантаження
76.	4000	20	0,69	6,5	2,1	1,15	5,5	Y/Δ – 11	1	активний
77.	1000	6,3	0,4	5,5	5	3,3	12,2	Y/Y$_н$ – 0	0	ємнісний
78.	4000	10	6,3	6,5	0,9	6,3	33,5	Y/Δ – 11	0,67	індуктивний
79.	6300	10,5	6,3	6,5	3	13	46,5	Y/Δ – 11	0,17	ємнісний
80.	2500	20	10,5	6,5	1,1	5,1	23,5	Y/Δ – 11	0,72	індуктивний
81.	100	3	0,69	4,5	2,5	0,38	2,1	Y/Y$_н$ –0	0,28	ємнісний
82.	250	13,8	0,4	8	4	1,1	4,4	Δ/Y$_н$ – 11	0,17	індуктивний
83.	4000	35	3,15	7,5	1	6,7	33,5	Y/Δ – 11	0,22	ємнісний
84.	2500	10,5	3,15	5,5	3,6	7,4	25	Y/Δ – 11	0,52	індуктивний
85.	40	6	0,4	4,5	4,5	0,24	0,88	Y/Y$_н$ – 0	0,22	індуктивний
86.	160	6	0,23	4,5	2,4	0,54	2,65	Y/Y$_н$ – 0	1	активний
87.	1000	10	0,23	5,5	1,4	3	11,2	Y/Y$_н$ – 0	0	ємнісний
88.	1600	13,8	0,4	8	2	4,3	16	Δ/Y$_н$ – 11	0,52	ємнісний
89.	250	15,75	0,4	8	4	1,1	4,4	Δ/Y$_н$ – 11	0	індуктивний
90.	6300	20	10,5	7,5	1,2	9,4	47,5	Y$_н$/Δ – 11	1	активний

1.2 Рекомендації до розрахунку

Розрахунок номінальних струмів та напруг обмоток

Співвідношення номінальних лінійних $U_{лн}$ та фазних $U_{фн}$ напруг трифазного трансформатора при з'єднанні його обмоток в

- «зірку»:

$$U_{фн} = \frac{U_{лн}}{\sqrt{3}}; \tag{1.1}$$

- «трикутник»:

$$U_{лн} = U_{фн}. \tag{1.2}$$

Визначаються номінальні лінійна $U_{1лн}$ і фазна $U_{1фн}$ напруги первинної обмотки та номінальні лінійна $U_{2лн}$ і фазна $U_{2фн}$ напруги вторинної обмотки залежно від їх схем з'єднання.

Номінальні лінійні струми (rated linear currents) первинної $I_{1лн}$ та вторинної $I_{2лн}$ обмоток трансформатора незалежно від їх схем з'єднання ви-

значаються через номінальну потужність $S_н$:

$$I_{1лн} = \frac{S_н}{\sqrt{3}U_{1лл}}, \quad (1.3)$$

$$I_{2лн} = \frac{S_н}{\sqrt{3}U_{2лл}}. \quad (1.4)$$

Співвідношення номінального фазного струму (rated phase currents) $I_{фн}$ і номінального лінійного $I_{лн}$ струму трансформатора при з'єднанні обмоток в

- «зірку»:

$$I_{фн} = I_{лн}; \quad (1.5)$$

- «трикутник»:

$$I_{фн} = \frac{I_{лн}}{\sqrt{3}}. \quad (1.6)$$

Визначаються номінальні фазні струми первинної $I_{1фн}$ та вторинної $I_{2фн}$ обмоток залежно від їх схем з'єднання.

Розрахунок параметрів схеми заміщення трансформатора

Схема заміщення (replacement scheme) для однієї фази трансформатора подана на рис. 1.1.

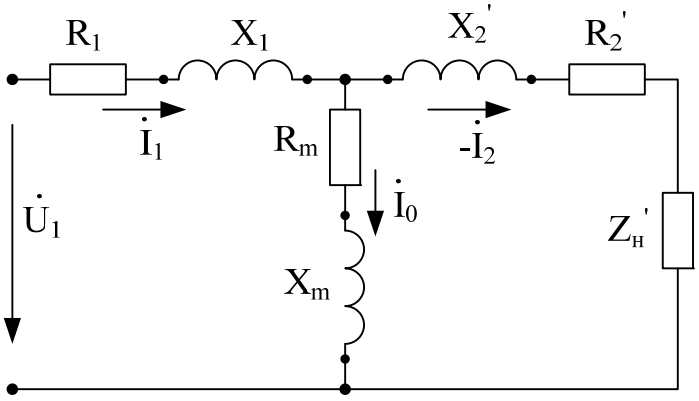


Рисунок 1.1 – Схема заміщення однієї фази трансформатора

Потужність короткого замикання (capacity of short circuit) на одну фазу трифазного трансформатора визначається через втрати короткого замикання $P_к$:

$$P_{кф} = \frac{P_к}{3}. \tag{1.7}$$

Фазна напруга короткого замикання (voltage of short circuit) визначається через напругу короткого замикання $U_{к\%}$:

$$U_{1кф} = \frac{U_{к\%}}{100} \cdot U_{1фн}. \tag{1.8}$$

Опори трансформатора при короткому замиканні:

- повний

$$Z_к = \frac{U_{1кф}}{I_{1фн}}; \tag{1.9}$$

- активний

$$R_к = \frac{P_{кф}}{I_{1фн}^2}; \tag{1.10}$$

- реактивний

$$X_к = \sqrt{Z_к^2 - R_к^2}. \tag{1.11}$$

Коефіцієнт потужності (power factor) при короткому замиканні:

$$\cos\varphi_к = \frac{R_к}{Z_к}. \tag{1.12}$$

Визначається аргумент $\varphi_к$ коефіцієнта потужності при короткому замиканні:

$$\varphi_к = \arccos\varphi_к. \tag{1.13}$$

Опори обмоток трансформатора:

- повний

$$Z_1 = Z'_2 = \frac{Z_к}{2}; \tag{1.14}$$

- активний

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_к}{2}; \tag{1.15}$$

- реактивний

$$X_1 = X'_2 = \frac{X_к}{2}. \tag{1.16}$$

Потужність втрат холостого ходу (capacity of idle movement losses) на одну фазу визначається через втрати холостого ходу P_0:

$$P_{0ф} = \frac{P_0}{3}. \tag{1.17}$$

Фазний струм холостого ходу $I_{0ф}$ визначається через струм холостого ходу $I_{0\%}$, взятий у відсотках від номінального струму:

$$I_{0ф} = \frac{I_{0\%}}{100} \cdot I_{1фн}. \tag{1.18}$$

Опори кола намагнічування (magnetize circuit):

- повний

$$Z_m = \frac{U_{1фн}}{I_{0ф}} - Z_1; \tag{1.19}$$

- активний

$$R_m = \frac{P_{0ф}}{I_{0ф}^2} - R_1; \tag{1.20}$$

- реактивний

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}. \tag{1.21}$$

Кут магнітних втрат:

$$\alpha = \text{arctg}\frac{R_m}{X_m}. \tag{1.22}$$

Коефіцієнт трансформації (transformer factor):

$$k = \frac{U_{1фн}}{U_{2фф}}. \tag{1.23}$$

Розрахунок напруги короткого замикання та зміни вторинної напруги, вторинних напруг і струмів при номінальному навантаженні

Складові напруг короткого замикання:

- активна

$$U_{ка\%} = R_к I_{1фн} \frac{100}{U_{1фн}}; \tag{1.24}$$

- реактивна

$$U_{кр\%} = X_к I_{1фн} \frac{100}{U_{1фн}}. \tag{1.25}$$

Відсоткова зміна вторинної напруги (change of secondary voltage) при номінальному навантаженні:

$$\Delta U_{\%} = U_{ка\%} \cdot \cos\varphi_2 + U_{кр\%} \cdot \sin\varphi_2, \tag{1.26}$$

де $\cos\varphi_2$ – коефіцієнт потужності.

При активному, активно-індуктивному чи індуктивному характері навантаження потрібно прийняти кут φ_2 *додатним, а при активно-ємнісному чи ємнісному характері навантаження – від'ємним. Тобто*

$$\varphi_2 = \begin{cases} \arccos(\cos\varphi_2) & \text{при активному та індуктивному навантаженнях;} \\ -\arccos(\cos\varphi_2) & \text{при ємнісному навантаженні.} \end{cases} \quad (1.27)$$

Приведені значення вторинних струму та напруги при номінальному навантаженні:

$$I'_2 = \frac{I_{2фн}}{k}, \quad (1.28)$$

$$U'_2 = U_{1фн} \cdot \left(1 - \frac{\Delta U_{\%}}{100}\right). \quad (1.29)$$

Побудова векторної діаграми

Величини спаду напруг на опорах обмоток:

- активні

$$R_1 I_{1фн} \approx R'_2 I'_{2фн}; \quad (1.30)$$

- реактивні

$$X_1 I_{1фн} \approx X'_2 I'_{2фн}. \quad (1.31)$$

Векторна діаграма (vector plot) будується на основі рівнянь напруг і струмів обмоток трансформатора:

$$\begin{cases} \dot{U}_{1фн} = -\dot{E}_{1фн} + R_1 \dot{I}_{1фн} + jX_1 \dot{I}_{1фн}; \\ \dot{E}'_{2фн} = \dot{U}'_{2фн} + R'_2 \dot{I}'_{2фн} + jX'_2 \dot{I}'_{2фн}; \\ \dot{I}_{1фн} = \dot{I}_{0ф} - \dot{I}'_{2фн}. \end{cases} \quad (1.32)$$

Побудова діаграми здійснюється в такій послідовності:

1) вибирається зручний масштаб струмів та напруг;

2) відкладаємо напрям вектора магнітного потоку $\dot{\Phi}$ по дійсній осі (рис. 1.2);

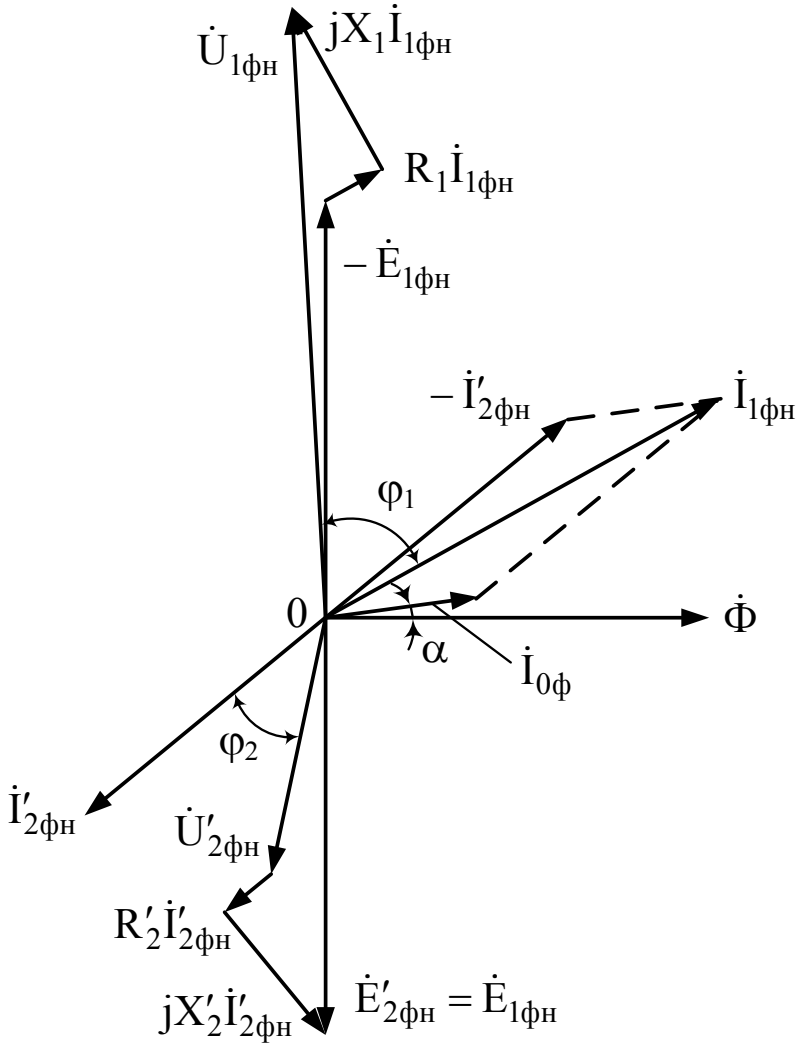


Рисунок 1.2 – Векторна діаграма трансформатора
при активно-індуктивному навантаженні

3) під кутом α, розрахованим за (1.22), від вектора магнітного потоку $\dot{\Phi}$ в масштабі струму відкладається від початку координат (від точки 0) вектор струму холостого ходу $\dot{I}_{0ф}$;

4) в масштабі напруги від початку координат відкладається вектор приведеної вторинної напруги $\dot{U}'_{2фн}$;

5) в масштабі струму під кутом φ_2 до вектора $\dot{U}'_{2фн}$ з початку координат відкладається вектор приведеного струму вторинної обмотки $\dot{I}'_{2фн}$;

6) з кінця вектора $\dot{U}'_{2фн}$ паралельно вектору $\dot{I}'_{2фн}$ будується в масштабі напруги вектор спаду напруги $R'_2\dot{I}'_{2фн}$;

7) з кінця вектора спаду напруги $R'_2\dot{I}'_{2фн}$ під кутом 90° в масштабі напруги будується вектор спаду напруги $jX'_2\dot{I}'_{2фн}$ (якщо навантаження активне, то вектор $jX'_2\dot{I}'_{2фн}$ відкладається за годинниковою стрілкою, а якщо від'ємне, то в протилежному напрямі);

8) згрупувавши вектор струму $\dot{I}'_{2фн}$ та вектори напруги $\dot{U}'_{2фн}$ й спадів напруг $R'_2\dot{I}'_{2фн}$, $jX'_2\dot{I}'_{2фн}$, потрібно їх розмістити на комплексній площині таким чином, щоб початки векторів $\dot{I}'_{2фн}$ та $\dot{U}'_{2фн}$ знаходилися в точці 0, а кінець вектора $jX'_2\dot{I}'_{2фн}$ – на уявній осі –j;

9) після з'єднання початку координат з кінцем вектора $jX'_2\dot{I}'_{2фн}$, утвориться вектор приведеної фазної ЕРС вторинної обмотки $\dot{E}'_{2фн}$, рівний ЕРС первинної обмотки $\dot{E}_{1фн}$;

10) від початку координат відкладається вектор $-\dot{I}'_{2фн}$;

11) за правилом паралелограма додаються вектори струмів $-\dot{I}'_{2фн}$ та $\dot{I}_{0ф}$. Результатом побудов є вектор струму первинної обмотки $\dot{I}_{1фн}$;

12) з початку координат відкладається вектор $-\dot{E}_{1фн}$;

13) з кінця вектора $-\dot{E}_{1фн}$ в масштабі напруг паралельно вектору $\dot{I}_{1фн}$ відкладається вектор спаду напруги $R_1\dot{I}_{1фн}$;

14) з кінця вектора спаду напруги $R_1\dot{I}_{1фн}$ під кутом 90° в масштабі напруги в сторону випередження відкладається вектор спаду напруги $jX_1\dot{I}_{1фн}$;

15) після з'єднання початку координат з кінцем вектора $jX_1\dot{I}_{1фн}$, отримується вектор первинної напруги $\dot{U}_{1фн}$.

Дослідження паралельної роботи трансформаторів

Трансформатори з різними коефіцієнтами трансформації і однаковими напругами короткого замикання

Розглядаються два трансформатори з однаковими потужностями $S_{нI} = S_{нII} = S_н$, різними коефіцієнтами трансформації $k_I \neq k_{II}$ і однаковими напругами короткого замикання $U_{кI\%} = U_{кII\%}$, причому перший трансформатор включений на відпайку $\Delta U_{I\%} = 2{,}5\%$.

Обидва трансформатори живляться від однієї мережі, тому номінальні фазні напруги обох трансформаторів однакові, тобто $U_{1фнI} = U_{1фнII} = U_{1фн}$. Вторинна напруга другого трансформатора $U_{2фнII} = U_{2фн}$.

Оскільки перший трансформатор увімкнений на відпайку $\Delta U_{I\%}$, то при цьому збільшується (при $+\Delta U_{I\%}$) або зменшується (при $-\Delta U_{I\%}$) на $\Delta U_{I\%}$ число витків обмотки високої напруги, а вторинна напруга на $\Delta U_{I\%}$ знижується (при $+\Delta U_{I\%}$) або підвищується (при $-\Delta U_{I\%}$), тобто

$$U_{2фнI} = \left(1 - \frac{\Delta U_{I\%}}{100}\right) \cdot U_{2фнII}. \tag{1.33}$$

Коефіцієнти трансформації:

$$k_I = \frac{U_{1фнI}}{U_{2фнI}}, \tag{1.34}$$

$$k_{II} = \frac{U_{1фнII}}{U_{2фнII}}. \tag{1.35}$$

Різниця коефіцієнтів трансформації:

$$\Delta k = \left|k_I - k_{II}\right|. \tag{1.36}$$

Середній коефіцієнт трансформації:

$$k_{ср} = \sqrt{k_I k_{II}}. \tag{1.37}$$

Різниця коефіцієнтів трансформації у відсотках від $k_{ср}$:

$$\Delta k_{\%} = \frac{\Delta k}{k_{ср}} \cdot 100. \quad (1.38)$$

Струм зрівноваження (equilibrating current), який протікає по вторинних обмотках:

$$I_{зр2} = \frac{\Delta k_{\%} \cdot I_{2фн}}{2U_{к\%}}. \quad (1.39)$$

За виконання умови $k_I > k_{II}$ при номінальному навантаженні другий трансформатор буде перевантаженим за рахунок струму зрівноваження, а за $k_I < k_{II}$ – перевантаженим буде перший трансформатор.

Оскільки перевантажувати трансформатори не можна, то потрібно при визначенні результуючих струмів, які протікають по вторинних обмотках трансформаторів, виходити з того, що результуючий вторинний струм перевантаженого трансформатора не повинен перевищувати його номінального значення, тобто потрібно прийняти при

- $k_I > k_{II}$ $I_{2II} = I_{2фн}$;
- $k_I < k_{II}$ $I_{2I} = I_{2фн}$.

Струм $I_{нав}$ ($I_{навII}$ при $k_I > k_{II}$ або $I_{навI}$ при $k_I < k_{II}$), який перевантажений трансформатор віддає в навантаження, визначається з рівняння

$$I_{нав} = -I_{вр2} \cdot \cos(\varphi_к + \varphi_2) \pm \sqrt{\left[I_{зр2}\cos(\varphi_к + \varphi_2)\right]^2 - \left(I_{зр2}^2 - I_{2фн}^2\right)}. \quad (1.40)$$

Оскільки струм, який віддається в навантаження, повинен бути меншим результуючого струму, то в виразі (1.40) *вибирається знак «+» або «–» виходячи з виконання умови:*

$$I_{нав} \le I_{2фн}. \quad (1.41)$$

Напруга на шинах навантаження за рахунок дії струму зрівноваження дорівнює середньому значенню, тобто

$$U_{2ср} = \frac{U_{1фн}}{k_{ср}}. \quad (1.42)$$

Струми, що віддаються обома трансформаторами навантаженню, однакові за значенням, тобто $I_{навI} = I_{навII}$.

Результуючий струм вторинної обмотки недовантаженого трансформатора (I_{2I} при $k_I > k_{II}$ і I_{2II} при $k_I < k_{II}$) становить:

$$I_2 = \sqrt{I_{нав}^2 + I_{зр2}^2 + 2I_{нав} \cdot I_{зр2} \cos(\varphi_к \pm \varphi_2)}. \quad (1.43)$$

У формулі (1.41) *знак «+» береться при активно-індуктивному чи індуктивному навантаженні, а знак «–» – при активно-ємнісному чи ємнісному навантаженні.*

Ступінь завантаження трансформаторів результуючими струмами:

$$N_I = \frac{I_{2I}}{I_{2фн}} \cdot 100; \quad (1.44)$$

$$N_{II} = \frac{I_{2II}}{I_{2фн}} \cdot 100. \quad (1.45)$$

При $k_I > k_{II}$ *завантаженість другого трансформатора повинна вийти* $N_{II} = 100\%$ ($N_I < 100\%$)*, а при* $k_I < k_{II}$ *завантаженість першого трансформатора повинна вийти* $N_I = 100\%$ ($N_{II} < 100\%$).

Установлена потужність:

$$S_{уст} = S_{нI} + S_{нII} = 2S_н. \quad (1.46)$$

Сумарна потужність, що віддається трансформаторами навантаженню:

$$S_\Sigma = 3U_{2ср}(I_{навI} + I_{навII}). \quad (1.47)$$

Недовикористана потужність:

$$\Delta S = S_{уст} - S_\Sigma, \quad (1.48)$$

а у відсотках –

$$\Delta S_{\%} = \frac{\Delta S}{S_{уст}} \cdot 100. \qquad (1.49)$$

Трансформатори з однаковими коефіцієнтами трансформації і різними напругами короткого замикання

Розглядаються два трансформатори з однаковими потужностями $S_{нI} = S_{нII} = S_н$, однаковими коефіцієнтами трансформації $k_I = k_{II}$ і різними напругами короткого замикання $U_{кII\%} \neq U_{кI\%}$, причому напруга короткого замикання другого трансформатора на $\Delta U_{кз\%} = 8\%$ більша, ніж першого:

$$U_{кII\%} = \left(1 + \frac{\Delta U_{кз\%}}{100}\right) \cdot U_{кI\%}. \qquad (1.50)$$

При паралельній роботі (parallel work) трансформаторів з різними напругами короткого замикання їхні струми навантаження розподіляються обернено пропорційно напругам короткого замикання і прямо пропорційно їх номінальним потужностям.

При $U_{кI\%} < U_{кII\%}$ перший трансформатор віддає в навантаження струм в $1 + (\Delta U_{кз\%}/100)$ разів більший, ніж другий трансформатор. При $U_{кI\%} > U_{кII\%}$ другий трансформатор віддає в навантаження струм в $1 + (\Delta U_{кз\%}/100)$ разів більший, ніж перший трансформатор.

Для запобігання перевантаження потрібно прийняти струм навантаження перевантаженого трансформатора рівним номінальному струму вторинної обмотки:

- при $U_{кI\%} < U_{кII\%}$ $\quad I_I = I_{2фн}$;
- при $U_{кI\%} > U_{кII\%}$ $\quad I_{II} = I_{2фн}$.

Тоді недовантажений трансформатор буде віддавати в навантаження струм $I_{I(II)}$ (I_{II} при $U_{кI\%} < U_{кII\%}$; I_I при $U_{кI\%} > U_{кII\%}$)

$$I_{I(II)} = \frac{I_{2фн}}{1 + \frac{\Delta U_{кз\%}}{100}}. \qquad (1.51)$$

Ступінь завантаження трансформаторів:

$$N_I = \frac{I_I}{I_{2фн}} \cdot 100; \qquad (1.52)$$

$$N_{II} = \frac{I_{II}}{I_{2фн}} \cdot 100. \quad (1.53)$$

При $U_{кI\%} < U_{кII}$ *завантаженість першого трансформатора повинна вийти* $N_I = 100\%$ ($N_{II} < 100\%$)*, а при* $U_{кI\%} > U_{кII}$ *завантаженість другого трансформатора повинна вийти* $N_{II} = 100\%$ ($N_I < 100\%$).

Сумарна потужність, що віддається трансформаторами навантаженню:

$$S_{\Sigma} = 3U_{2фн} \cdot (I_I + I_{II}). \quad (1.54)$$

Недовикористана потужність ΔS розраховується за (1.48) та (1.49) з врахуванням усталеної потужності $S_{уст}$, розрахованої за (1.46), та сумарної потужності S_{Σ}, розрахованої за (1.54).

Розрахунок ударних струмів

Ударний струм короткого замикання (short circuit percussive current):

$$i_{к.уд} = К_{уд} I_{к.m}, \quad (1.55)$$

де $К_{уд}$ – ударний коефіцієнт:

$$К_{уд} = 1 + e^{-\pi \frac{R_к}{X_к}}; \quad (1.56)$$

$I_{к.m}$ – амплітуда усталеного струму короткого замикання:

$$I_{к.m} = \sqrt{2} I_н \frac{100}{U_{к\%}}, \quad (1.57)$$

де $I_н$ – номінальний струм в обмотці.

Амплітуда усталеного струму короткого замикання:

- для первинної обмотки

$$I_{к.m1} = \sqrt{2} I_{1фн} \frac{100}{U_{к\%}}; \quad (1.58)$$

- для вторинної обмотки

$$I_{к.m2} = \sqrt{2} I_{2фн} \frac{100}{U_{к\%}}. \quad (1.59)$$

Ударні струми короткого замикання:

- для первинної обмотки

$$i_{1к.уд} = К_{уд} I_{к.m1}; \quad (1.60)$$

- для вторинної обмотки

$$i_{2к.уд} = К_{уд} I_{к.m2}. \quad (1.61)$$

1.3 Приклад розрахунку

Розглядається трансформатор з параметрами, вказаними в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Дані трансформатора

$S_н$, кВ·А	$U_{1лн}$, кВ	$U_{2лн}$, кВ	$U_{к\%}$, %	$I_{0\%}$, %	P_0, кВт	$P_к$, кВт	Схема і група	$\cos\varphi_2$	Тип навантаж.
100	3	0,4	4,5	2,6	0,365	1,97	$Y/Y_н$–0	0,72	ємнісний

В ППП MathCAD розрахунок трансформатора можна здійснити у такій послідовності.

$S_н := 100 \cdot 10^3$ В·А; $U_{1лн} := 3 \cdot 10^3$ В; $U_{2лн} := 0.4 \cdot 10^3$ В;

$U_{к\%} := 4.5$ % ; $I_{0\%} := 2.6$ % ;

$P_0 := 0.365 \cdot 10^3$ Вт; $P_к := 1.97 \cdot 10^3$ Вт; $\cos\phi_2 := 0.72$.

Навантаження – ємнісне

Розрахунок номінальних струмів та напруг обмоток

обмотка ВН: $U_{1фн} := \frac{U_{1лн}}{\sqrt{3}}$, $U_{1фн} = 1.732 \times 10^{3}$ В;

$I_{1лн} := \frac{S_н}{\sqrt{3} \cdot U_{1лн}}$, $I_{1лн} = 19.245$ А;

$I_{1фн} := I_{1лн}$, $I_{1фн} = 19.245$ А;

обмотка НН: $U_{2фн} := \frac{U_{2лн}}{\sqrt{3}}$, $U_{2фн} = 230.94$ В;

$I_{2лн} := \frac{S_н}{\sqrt{3} \cdot U_{2лн}}$, $I_{2лн} = 144.338$ А;

$I_{2фн} := I_{2лн}$, $I_{2фн} = 144.338$ А.

Розрахунок параметрів схеми заміщення трансформатора

Потужність КЗ на фазу:

$P_{кф} := \frac{P_к}{3}$, $P_{кф} = 656.667$ Вт.

Напруга КЗ:

$U_{1кф} := \frac{U_{к\%}}{100} \cdot U_{1фн}$ $U_{1кф} = 77.942$ В.

Опір трансформатора при КЗ:

повний -

$Z_к := \frac{U_{1кф}}{I_{1фн}}$, $Z_к = 4.05$ Ом;

активний -

$R_к := \frac{P_{кф}}{I_{1фн}^{2}}$, $R_к = 1.773$ Ом;

реактивний -

$X_к := \sqrt{Z_к^{2} - R_к^{2}}$, $X_к = 3.641$ Ом.

Коефіцієнт потужності при КЗ:

$$\cos\phi_к := \frac{R_к}{Z_к}, \qquad \cos\phi_к = 0.438 ;$$

$$\phi_к := \operatorname{acos}\left(\cos\phi_к\right)\cdot\frac{180}{\pi}, \qquad \phi_к = 64.038 \text{ град}.$$

Опори обмоток трансформатора:

повні -

$$Z_1 := \frac{Z_к}{2}, \qquad Z_1 = 2.025 \text{ Ом}, \qquad Z_{2'} := Z_1;$$

активні -

$$R_1 := \frac{R_к}{2}, \qquad R_1 = 0.887 \text{ Ом}, \qquad R_{2'} := R_1 ;$$

реактивні -

$$X_1 := \frac{X_к}{2}, \qquad X_1 = 1.821 \text{ Ом}, \qquad X_{2'} := X_1 .$$

Потужність втрат ХХ на фазу:

$$P_{0ф} := \frac{P_0}{3}, \qquad P_{0ф} = 121.667 \text{ Вт}.$$

Фазний струм ХХ:

$$I_{0ф} := I_{0\%}\cdot\frac{I_{1фн}}{100}, \qquad I_{0ф} = 0.5 \text{ А}.$$

Опори кола намагнічування:

повний -

$$Z_m := \frac{U_{1фн}}{I_{0ф}} - Z_1 , \qquad Z_m = 3.46 \times 10^3 \text{ Ом};$$

активний -

$$R_m := \frac{P_{0ф}}{I_{0ф}^{\,2}} - R_1 , \qquad R_m = 485.06 \text{ Ом};$$

реактивний -

$$X_m := \sqrt{Z_m^{\,2} - R_m^{\,2}}, \qquad X_m = 3.425 \times 10^3 \text{ Ом}.$$

Кут магнітних втрат:

$$\alpha := \operatorname{atan}\left(\frac{R_m}{X_m}\right)\cdot\frac{180}{\pi}, \qquad \alpha = 8.06 \text{ град}.$$

Коефіцієнт трансформації:

$$k := \frac{U_{1фн}}{U_{2фн}}, \qquad k = 7.5 .$$

Розрахунок напруги короткого замикання та зміни вторинної напруги

Складові напруг КЗ:

активна -

$$U_{ка\%} := R_к \cdot I_{1фн} \cdot \frac{100}{U_{1фн}} \qquad U_{ка\%} = 1.97 \ \% ;$$

реактивна -

$$U_{кр\%} := X_к \cdot I_{1фн} \cdot \frac{100}{U_{1фн}} \qquad U_{кр\%} = 4.046 \ \% ;$$

$$\phi_2 := -\operatorname{acos}\left(\cos\phi_2\right) \cdot \frac{180}{\pi}, \qquad \phi_2 = -43.946 \ \text{град} .$$

Відсоткова зміна вторинної напруги при номінальному навантаженні:

$$\Delta U\% := U_{ка\%} \cdot \cos\phi_2 + U_{кр\%} \cdot \sin\left(\phi_2 \cdot \frac{\pi}{180}\right) \qquad \Delta U\% = -1.389 \ \% .$$

Приведене значення вторинної напруги при номінальному навантаженні:

$$U_{2фн'} := U_{1фн} \cdot \left(1 - \frac{\Delta U\%}{100}\right), \qquad U_{2фн'} = 1.756 \times 10^3 \ \text{В}.$$

Приведений струм вторинної обмотки:

$$I_{2фн'} := \frac{I_{2фн}}{k}, \qquad I_{2фн'} = 19.245 \ \text{А}.$$

Побудова векторної діаграми

Величини спаду напруги на опорах обмоток:

активні -

$$R_1 \cdot I_{1фн} = 17.061 \ \text{В}, \qquad R_{2'} \cdot I_{2фн'} = 17.061 \ \text{В};$$

реактивні -

$$X_1 \cdot I_{1фн} = 35.038 \ \text{В}, \qquad X_{2'} \cdot I_{2фн'} = 35.038 \ \text{В}.$$

Векторна діаграма трансформатора за результатами розрахунків показана на рис. 1.3.

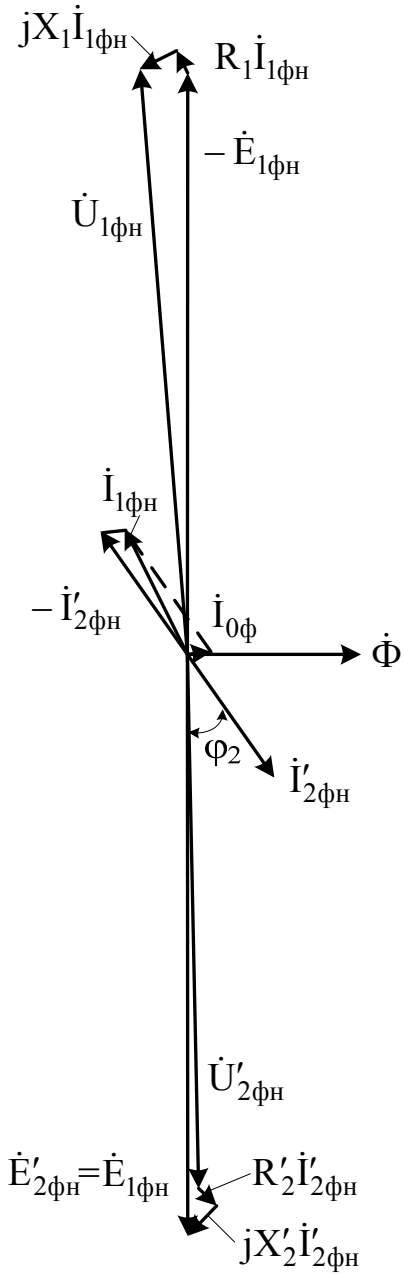


Рисунок 1.3 – Векторна діаграма трансформатора

Дослідження паралельної роботи двох трансформаторів

Трансформатори з різними коефіцієнтами трансформації і однаковими напругами короткого замикання

$k_I \neq k_{II}$, $U_{кI\%} = U_{кII\%}$.

$U_{1фнI} := U_{1фн}$, $U_{1фнII} := U_{1фнI}$, $U_{2фнII} := U_{2фн}$.

Перший трансформатор увімкнений на відпайку $\Delta U_I := 2.5\,\%$.

Вторинна напруга першого трансформатора:

$$U_{2\phi I} := \left(1 - \frac{\Delta U_I}{100}\right)\cdot U_{2\phi нII}\ , \qquad U_{2\phi I} = 225.167\ \text{В}.$$

Коефіцієнти трансформації:

$$k_I := \frac{U_{1\phi нI}}{U_{2\phi I}}\ , \qquad k_I = 7.692\ ;$$

$$k_{II} := \frac{U_{1\phi нII}}{U_{2\phi нII}}\ , \qquad k_{II} = 7.5\ .$$

Оскільки $k_I > k_{II}$, то перевантажений другий трансформатор.

Різниця коефіцієнтів трансформації:

$$\Delta k := k_I - k_{II}\ , \qquad \Delta k = 0.192\ .$$

Середній коефіцієнт трансформації:

$$k_{ср} := \sqrt{k_I \cdot k_{II}}\ , \qquad k_{ср} = 7.596\ .$$

Різниця коефіцієнтів трансформації у відсотках від $k_{ср}$:

$$\Delta k_{\%} := \frac{\Delta k}{k_{ср}}\cdot 100\ , \qquad \Delta k_{\%} = 2.532\ \%\ .$$

Зрівноважувальний струм:

$$I_{зр2} := \Delta k_{\%}\cdot\frac{I_{2\phi н}}{2\cdot U_{к\%}}\ , \qquad I_{зр2} = 40.605\ \text{А}.$$

Оскільки результуючий вторинний струм перевантаженого першого трансформатора не повинен перевищувати його номінального значення, то приймаємо

$$I_{2II} := I_{2\phi н}\ , \qquad I_{2II} = 144.338\ \text{А}.$$

Струм, який перевантажений трансформатор віддає навантаженню:

$$I_{навII.} := -I_{зр2}\cdot\cos\left[\left(\phi_к + \phi_2\right)\cdot\frac{\pi}{180}\right] + \sqrt{\left[I_{зр2}\cdot\cos\left[\left(\phi_к + \phi_2\right)\cdot\frac{\pi}{180}\right]\right]^2 - \left(I_{зр2}{}^2 - I_{2\phi н}{}^2\right)}\ ,$$

$$I_{навII} := \left|I_{навII.}\right|, \qquad I_{навII} = 105.529 \ \text{А}.$$

Умова $I_{нав} < I_{2фн}$ виконується.

Напруга на шинах навантаження за рахунок дії зрівноважувального струму дорівнює середньому значенню:

$$U_{2ср} := \frac{U_{1фн}}{k_{ср}}, \qquad U_{2ср} = 228.035 \ \text{В}.$$

Струми, що віддаються обома трансформаторами навантаженню однакові за значенням:

$$I_{навI} := I_{навII}, \qquad I_{навI} = 105.529 \ \text{А}.$$

Результуючий струм вторинної обмотки недовантаженого трансформатора:

$$I_{2I} := \sqrt{I_{навI}^{2} + I_{зр2}^{2} + 2 \cdot I_{навI} \cdot I_{зр2} \cdot \cos\left[\left(\phi_к - \phi_2\right) \cdot \frac{\pi}{180}\right]}, \qquad I_{2I} = 100.693 \ \text{А}.$$

Ступінь завантаження трансформаторів результуючими струмами:

$$N_I := \frac{I_{2I}}{I_{2фн}} \cdot 100, \qquad N_I = 69.762 \ \%;$$

$$N_{II} := \frac{I_{2II}}{I_{2фн}} \cdot 100, \qquad N_{II} = 100 \ \%.$$

Усталена потужність:

$$S_{уст} := 2 \cdot S_н, \qquad S_{уст} = 2 \times 10^{5} \ \text{кВ·А}.$$

Сумарна потужність, що віддається трансформаторами навантаженню:

$$S_\Sigma := 3 \cdot U_{2ср} \cdot \left(I_{навI} + I_{навII}\right), \qquad S_\Sigma = 1.444 \times 10^{5} \ \text{кВ·А}.$$

Недовикористана потужність:

$$\Delta S := S_{уст} - S_\Sigma, \qquad \Delta S = 5.561 \times 10^{4} \ \text{кВ·А};$$

$$\Delta S_\% := 100 \cdot \frac{\Delta S}{S_{уст}}, \qquad \Delta S_\% = 27.807 \ \%.$$

Трансформатори з однаковими коефіцієнтами трансформації і різними напругами короткого замикання

$k_I = k_{II}$, $U_{кI\%} \neq U_{кII\%}$, $\Delta U_{к\%} := 8$ % .

$$U_{кII} := \left(1 + \frac{\Delta U_{к\%}}{100}\right) \cdot U_{к\%} \quad , \qquad U_{кII} = 4.86 \ \% \ .$$

Щоб запобігти перевантаженню, приймемо струм навантаження першого трансформатора

$$I_I := I_{2фн} \quad , \qquad I_I = 144.338 \ \text{A} \ .$$

Тоді другий трансформатор буде віддавати в навантаження струм

$$I_{II} := \frac{I_{2фн}}{1 + \frac{\Delta U_{к\%}}{100}} \quad , \qquad I_{II} = 133.646 \ \text{A} \ .$$

Ступінь навантаження трансформаторів:

$$N_{I.} := \frac{I_I}{I_{2фн}} \cdot 100 , \qquad N_{I.} = 100 \ \% \ ;$$

$$N_{II.} := \frac{I_{II}}{I_{2фн}} \cdot 100 , \qquad N_{II.} = 92.593 \% \ .$$

Сумарна потужність, що віддається трансформаторами навантаженню:

$$S_{\Sigma.} := 3 \cdot U_{2фн} \cdot \left(I_I + I_{II}\right) \quad , \qquad S_{\Sigma.} = 1.926 \times 10^5 \ \text{В·А} \ .$$

Недовикористана потужність:

$$\Delta S := S_{уст} - S_{\Sigma} , \qquad \Delta S = 5.561 \times 10^4 \ \text{В·А} \ ;$$

$$\Delta S_{\%.} := 100 \cdot \frac{\Delta S}{S_{уст}} \quad , \qquad \Delta S_{\%.} = 27.807 \ \% \ .$$

Визначення ударних струмів КЗ

Ударний коефіцієнт для заданого трансформатора:

$$K_{yd} := 1 + e^{-\pi \cdot \frac{R_к}{X_к}}, \qquad K_{yd} = 1.217 .$$

Амплітуда усталеного струму КЗ:

для первинної обмотки -

$$I_{km1} := \sqrt{2} \cdot 100 \cdot \frac{I_{1фн}}{U_{к\%}} , \qquad I_{km1} = 604.812 \quad A;$$

для вторинної обмотки -

$$I_{km2} := \sqrt{2} \cdot 100 \cdot \frac{I_{2фн}}{U_{к\%}}, \qquad I_{km2} = 4.536 \times 10^3 \ A.$$

Ударні струми КЗ:

$$i_{kyd1} := K_{yd} \cdot I_{km1} , \qquad i_{kyd1} = 735.816 \quad A;$$

$$i_{kyd2} := K_{yd} \cdot I_{km2} , \qquad i_{kyd2} = 5.519 \times 10^3 \ A .$$

2 Асинхронні машини

2.1 Завдання

Для трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором за даними табл. 2.1, необхідно:

1) розрахувати номінальні значення фазних напруги й струму статорної обмотки;

2) накреслити Г-подібну схему заміщення однієї фази двигуна та визначити її параметри;

3) для номінального режиму за знайденими параметрами схеми заміщення розрахувати:

– спожитий двигуном струм;
– коефіцієнт потужності;
– підведену до двигуна активну потужність;
– сумарні втрати;
– корисну потужність на валу;
– ККД;
– обертовий електромагнітний момент двигуна;

4) розрахувати пусковий момент при введеному пусковому реостаті, максимальний момент, а також необхідні для отримання максимального пускового моменту значення пускового реостата;

5) розрахувати й побудувати графік механічної характеристики двигуна при зміні ковзання від нуля до одиниці;

6) розрахувати робочі характеристики двигуна в діапазоні зміни ковзання від нуля до $1{,}2s_н$ і за результатами розрахунку побудувати їх графіки.

Примітка. Частота напруги мережі 50 Гц. Фази обмотки ротора з'єднані в зірку. В табл. 2.1 введено такі позначення:

$P_н$ – номінальна потужність на валу двигуна;

$U_{1н}$ – номінальна лінійна напруга обмотки статора;

$I_{1н}$ – номінальний лінійний струм обмотки статора;

$n_н$ – номінальна швидкість обертання ротора;

R_1 – активний опір обмотки статора;

X_1 – реактивний опір обмотки статора;

R'_2 – приведений активний опір обмотки ротора;

X'_2 – приведений реактивний опір обмотки ротора;

$I_{0ф}$ – фазний струм холостого ходу;

$\cos\varphi_0$ – коефіцієнт потужності холостого ходу;

$\Delta P_{мех}$ – механічні втрати.

Таблиця 2.1 – Варіанти завдань до розділу «Асинхронні машини»

№ вар.	$P_н$, кВт	$U_{1н}$, кВ	$I_{1н}$, А	Схема обм. статора	$n_н$, об/хв	R_1, Ом	X_1, Ом	R'_2, Ом	X'_2, Ом	$I_{0ф}$, А	$\cos\varphi_0$	$\Delta P_{мех}$, кВт
1.	500	3	116	Δ	1480	0,56	6,6	0,558	6,597	28	0,03	1,45
2.	125	0,38	235	Y	1460	0,0167	0,1414	0,0246	0,1412	65	0,055	0,4
3.	13	0,38	26,4	Y	960	0,3	1,33	0,319	1,328	8	0,045	0,06
4.	50	0,22	182	Δ	735	0,083	0,415	0,0397	0,416	31	0,07	0,24
5.	100	3	25	Y	1470	1,89	10,28	1,3828	10,3	8	0,07	0,37
6.	320	6	37,5	Y	980	1,66	13,16	1,846	13,13	12	0,05	0,78
7.	132	0,66	142	Y	1455	0,0511	0,381	0,0778	0,38	36	0,06	0,42
8.	4	0,38	10,2	Y	710	1,22	3,9	1,3	3,877	4	0,11	0,04
9.	320	3	80	Δ	585	0,93	11,43	1,58	11,4	20	0,045	0,52
10.	2,8	0,127	20	Δ	1370	0,46	1,79	1,04	1,792	3,5	0,1	0,02
11.	160	0,66	171	Y	1455	0,0359	0,285	0,068	0,28	45	0,05	0,45
12.	110	0,22	347	Δ	1455	0,0175	0,145	0,032	0,146	52	0,06	0,4
13.	90	0,38	172,5	Y	970	0,0314	0,113	0,04	0,112	48	0,07	0,38
14.	110	0,22	363	Δ	970	0,0255	0,145	0,0303	0,1455	60	0,04	0,37
15.	75	0,38	143	Y	980	0,0382	0,2155	0,0283	0,215	40	0,07	0,34
16.	500	3	115	Δ	980	0,56	6,303	0,868	6,3	18	0,05	1,2
17.	90	0,22	294	Δ	970	0,0287	0,187	0,037	0,185	47	0,055	0,4
18.	55	0,38	111,5	Y	725	0,05	0,325	0,066	0,382	34	0,06	0,25
19.	320	3	76,5	Y	980	0,364	3,288	0,47	3,3	21	0,065	0,9
20.	4,5	0,22	17,8	Δ	1375	0,71	3,34	2	3,86	3,5	0,09	0,018
21.	40	0,38	83,8	Y	965	0,074	0,416	0,094	0,418	24	0,06	0,27
22.	75	0,5	110	Y	1460	0,0515	0,3875	0,0687	0,386	30	0,05	0,55
23.	250	6	32	Y	585	2,18	20,8	2,53	20,61	12	0,05	0,6
24.	7	0,22	26	Δ	1375	0,708	2,16	1,2072	2,161	4,5	0,08	0,035
25.	100	0,38	191	Y	1460	0,022	0,167	0,031	0,169	47,5	0,06	0,69
26.	14	0,5	22	Y	950	0,447	1,92	0,66	1,94	7	0,065	0,08
27.	800	3	181	Δ	1480	0,26	4,38	0,381	4,387	26	0,025	1,95
28.	160	0,38	324	Y	735	0,0311	0,12	0,013	0,103	100	0,05	1,1
29.	10	0,5	17,7	Y	940	0,837	2,693	1,05	2,674	5,4	0,07	0,026
30.	20	0,38	44,2	Y	950	0,16	0,789	0,269	0,78	12	0,053	0,12
31.	400	0,5	624	Δ	1480	0,0154	0,22	0,02	0,243	80	0,03	1,6
32.	200	3	47,8	Y	1475	0,734	5,55	0,59	5,54	12	0,06	1,4
33.	132	0,38	246	Δ	1485	0,051	0,37	0,0258	0,39	38	0,065	0,45
34.	55	0,5	90	Y	580	0,101	0,6	0,1025	0,624	35	0,06	0,18
35.	160	3	42,5	Y	490	0,76	8,1	0,7973	8,16	16,5	0,04	0,55
36.	28	0,38	56	Y	1420	0,099	0,556	0,216	0,56	15	0,06	0,16
37.	75	0,22	270	Δ	720	0,0367	0,24	0,0557	0,25	55	0,05	0,28

Продовження таблиці 2.1

№ вар.	$P_н$, кВт	$U_{1н}$, кВ	$I_{1н}$, А	Схема обм. статора	$n_н$, об/хв	R_1, Ом	X_1, Ом	R'_2, Ом	X'_2, Ом	$I_{0ф}$, А	$\cos\varphi_0$	$\Delta P_{мех}$, кВт
38.	14	0,38	33,3	Y	700	0,278	1,2	0,4635	1,22	10	0,065	0,1
39.	37	0,22	144,5	Δ	580	0,0599	0,52	0,088	0,534	33	0,05	0,08
40.	250	0,38	474	Y	1470	0,01	0,07	0,009	0,072	112	0,035	1,4
41.	90	0,22	298	Δ	970	0,0314	0,19	0,038	0,202	48	0,05	0,55
42.	200	6	24,1	Y	1480	2,75	21,6	1,897	21,85	6	0,04	1,42
43.	125	3	30,6	Y	1470	1,28	8,84	1,0983	8,85	8	0,077	0,73
44.	132	0,66	165	Y	580	0,0488	0,474	0,075	0,46	58	0,055	0,68
45.	40	0,5	60,5	Y	1440	0,121	0,717	0,204	0,715	16	0,05	0,3
46.	4	0,22	16,1	Δ	925	1,42	3,27	1,874	3,28	4	0,085	0,015
47.	75	0,5	110	Y	970	0,054	0,387	0,0795	0,385	32	0,055	0,35
48.	100	0,22	330	Δ	1460	0,022	0,176	0,03	0,1774	50	0,04	0,85
49.	200	0,5	282	Y	1470	0,0131	0,14	0,0211	0,16	70	0,05	1,3
50.	400	3	102	Δ	735	0,68	9,3	1,004	9,1	20	0,035	1,8
51.	500	6	57,5	Y	1480	0,72	9,3	0,7724	9,45	15	0,03	1,6
52.	75	0,38	163	Y	580	0,035	0,27	0,0441	0,281	60	0,04	0,21
53.	55	0,22	211	Δ	580	0,0505	0,37	0,0591	0,381	46	0,07	0,15
54.	320	0,5	448	Δ	980	0,0216	0,28	0,0385	0,294	69	0,05	1,35
55.	125	3	31	Y	975	1,105	9	1,379	9,05	9	0,04	0,85
56.	160	0,38	303	Δ	975	0,0354	0,34	0,0535	0,355	47,5	0,045	0,95
57.	100	0,5	144	Y	975	0,0357	0,317	0,0495	0,31	38	0,055	0,6
58.	14	0,5	22,3	Y	1400	0,494	1,9	0,0886	1,88	7	0,07	0,028
59.	132	0,66	144	Y	1465	0,043	0,37	0,061	0,393	35	0,04	0,75
60.	110	0,22	372	Δ	975	0,0203	0,17	0,0251	0,169	64	0,05	1,15
61.	55	0,5	80	Y	1440	0,0725	0,55	0,1414	0,543	20	0,045	0,33
62.	630	3	147	Δ	1480	0,41	5,56	0,4589	5,572	20	0,035	1,7
63.	400	3	95,5	Y	980	0,286	3	0,353	3,14	24	0,045	1
64.	320	0,38	604	Δ	980	0,0125	0,18	0,0213	0,17	90	0,035	1,3
65.	10	0,38	21	Y	1400	0,454	1,543	0,69	1,537	6	0,075	0,022
66.	45	0,38	98,8	Y	580	0,0536	0,423	0,0764	0,42	39	0,045	0,09
67.	200	0,66	212	Y	1470	0,0287	0,25	0,0351	0,256	51	0,05	1,3
68.	55	0,22	225	Δ	475	0,0517	0,36	0,0839	0,378	52	0,065	0,2
69.	132	0,66	146	Y	980	0,043	0,4	0,0515	0,405	42	0,04	0,68
70.	110	0,38	210	Y	970	0,0255	0,18	0,0303	0,14	60	0,065	0,67
71.	90	0,38	189	Y	720	0,0297	0,208	0,0475	0,2	64	0,04	0,325
72.	75	0,22	288	Δ	480	0,0292	0,25	0,0541	0,267	65	0,04	0,21
73.	200	3	52	Y	735	0,59	5,8	0,6759	5,84	18	0,06	0,75
74.	250	0,38	498	Y	735	0,0061	0,078	0,0088	0,08	160	0,055	1,15

Продовження таблиці 2.1

№ вар.	$P_н$, кВт	$U_{1н}$, кВ	$I_{1н}$, А	Схема обм. статора	$n_н$, об/хв	R_1, Ом	X_1, Ом	R'_2, Ом	X'_2, Ом	$I_{0ф}$, А	$\cos\varphi_0$	$\Delta P_{мех}$, кВт
75.	100	0,22	329	Δ	975	0,0206	0,193	0,0282	0,18	50	0,06	0,65
76.	1,7	0,38	5,8	Y	835	5,78	3,6	7,45	3,17	4,17	0,166	0,01
77.	400	3	92	Y	1475	0,229	2,85	0,3054	2,7	22	0,035	1,57
78.	250	0,5	350	Δ	1475	0,0326	0,36	0,0414	0,38	52	0,055	1,35
79.	160	3	38	Y	1470	0,915	6,78	0,8873	6,7	10	0,06	0,92
80.	200	0,38	370	Δ	1470	0,0221	0,271	0,0351	0,26	54	0,045	1,35
81.	125	0,5	179	Δ	1470	0,089	0,6	0,0962	0,8	26	0,04	0,7
82.	110	0,22	419	Δ	580	0,0207	0,18	0,03	0,195	86	0,07	0,57
83.	320	3	73,7	Y	1480	0,351	3,45	0,309	3,505	18	0,04	1,5
84.	10	0,22	42,4	Δ	700	0,366	1,69	0,6275	1,71	8,6	0,07	0,021
85.	250	6,0	29,5	Y	1480	2,13	17,3	1,561	17,45	7	0,045	1,38
86.	160	0,38	301	Δ	1470	0,0345	0,33	0,0429	0,334	44	0,035	0,85
87.	250	3	58,3	Y	1480	0,51	4,4	0,387	4,51	15	0,05	1,4
88.	160	0,66	183	Y	735	0,0311	0,34	0,0415	0,36	58	0,045	1,25
89.	630	6	73	Y	1480	0,53	7,5	0,6188	7,47	18	0,03	1,75
90.	7	0,38	15	Y	940	0,676	2,21	0,8877	2,236	5	0,07	0,02

2.2 Рекомендації до розрахунку

Розрахунок фазних напруги та струму обмотки статора

Номінальна фазна напруга $U_{1фн}$ обмотки статора залежить від номінальної лінійної напруги $U_{1лн}$. Вона визначається при з'єднанні обмотки в

- «зірку»:

$$U_{1фн} = \frac{U_{1лн}}{\sqrt{3}}; \qquad (2.1)$$

- «трикутник»:

$$U_{1фн} = U_{1лн}. \qquad (2.2)$$

Номінальний фазний струм $I_{1фн}$ обмотки статора також залежить від номінального лінійного струму $I_{1лн}$. Він визначається при з'єднанні обмотки в

➢ «зірку»:

$$I_{1фн} = I_{1лн}; \tag{2.3}$$

➢ «трикутник»:

$$I_{1фн} = \frac{I_{1лн}}{\sqrt{3}}. \tag{2.4}$$

Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна

Розраховуємо Г-подібну схему заміщення (рис. 2.1).

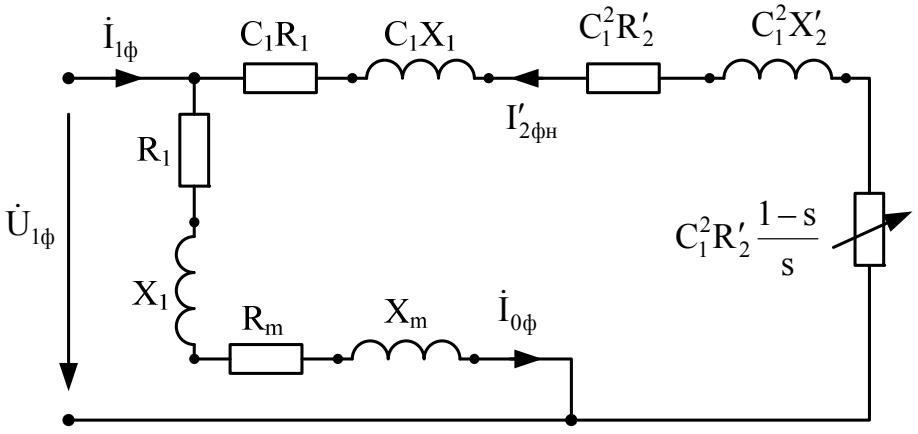


Рисунок 2.1 – Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Активна потужність, що споживається двигуном на холостому ході, визначається через фазний струм холостого ходу $I_{0ф}$ і коефіцієнт потужності холостого ходу $\cos\varphi_0$:

$$P_0 = 3U_{1фн}I_{0ф}\cos\varphi_0. \tag{2.5}$$

Електричні втрати (electrical losses) в обмотці статора на холостому ході:

$$\Delta p_{ел10} = 3I_{0ф}^2R_1, \tag{2.6}$$

де R_1 – активний опір обмотки статора.
Втрати потужності в сталі статора (магнітні втрати):

$$\Delta p_{м1} = P_0 - \Delta p_{ел10} - \Delta p_{мех}, \tag{2.7}$$

де $\Delta p_{мех}$ – механічні втрати.
Повний опір обмотки статора:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}, \tag{2.8}$$

де X_1 – реактивний опір обмотки статора.
Повний опір двигуна в режимі холостого ходу:

$$Z_0 = \frac{U_{1фн}}{I_{0ф}}. \tag{2.9}$$

Опори кола намагнічування схеми заміщення:

- повний

$$Z_m = Z_0 - Z_1; \tag{2.10}$$

- активний

$$R_m = \frac{\Delta p_{м1}}{3I_{0ф}^2}; \tag{2.11}$$

- реактивний

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}. \tag{2.12}$$

Коефіцієнт схеми заміщення:

$$C_1 = 1 + \frac{X_1}{X_m}. \tag{2.13}$$

Далі визначаються параметри головної вітки схеми заміщення: C_1R_1, C_1X_1, а також $C_1^2R_2'$ і $C_1^2X_2'$ через приведені активний R_2' та реактивний X_2' опори обмотки ротора.

Розрахунок параметрів двигуна при номінальному навантаженні

Номінальне ковзання (rated slipping):

$$s_н = \frac{n_1 - n_н}{n_1}, \tag{2.14}$$

де n_1 – синхронна частота обертання магнітного поля;
$n_н$ – номінальна частота обертання.
Повний опір головної вітки схеми заміщення:

$$Z_\Sigma = \sqrt{\left(C_1R_1 + \frac{C_1^2R_2'}{s_н}\right)^2 + \left(C_1X_1 + C_1^2X_2'\right)^2}. \tag{2.15}$$

Приведений струм ротора:

$$I_{2ф}' = \frac{U_{1фн}}{Z_\Sigma}. \tag{2.16}$$

Косинус і синус кута між векторами $\dot{U}_{1фн}$ і $I_{2ф}'$:

$$\cos\varphi_2' = \frac{C_1R_1 + \dfrac{C_1^2R_2'}{s_н}}{Z_\Sigma}; \tag{2.17}$$

$$\sin\varphi_2' = \frac{C_1X_1 + C_1^2X_2'}{Z_\Sigma}. \tag{2.18}$$

Активна і реактивна складові струму головної вітки:

$$I_{2a}' = I_{2ф}'\cos\varphi_2'; \tag{2.19}$$

$$I'_{2р} = I'_{2ф} \sin \varphi'_2. \quad (2.20)$$

Активна і реактивна складові струму холостого ходу:

$$I_{0а} = I_{0ф} \cos \varphi_0; \quad (2.21)$$

$$I_{0р} = I_{0ф} \sqrt{1 - \cos \varphi_0^2}. \quad (2.22)$$

Активна і реактивна складові повного струму статора:

$$I_{1а} = I_{0а} + I'_{2а}; \quad (2.23)$$

$$I_{1р} = I_{0р} + I'_{2р}. \quad (2.24)$$

Номінальний фазний струм, що споживається двигуном із мережі:

$$I_{1фн} = \sqrt{I_{1а}^2 + I_{1р}^2}. \quad (2.25)$$

Коефіцієнт потужності двигуна:

$$\cos \varphi_{1н} = \frac{I_{1а}}{I_{1фн}}. \quad (2.26)$$

Номінальна активна потужність, що споживається двигуном із мережі:

$$P_{1н} = 3U_{1фн} I_{1фн} \cos \varphi_{1фн}. \quad (2.27)$$

Втрати потужності в двигуні:

- в обмотці статора

$$\Delta p_{e1} = 3I_{1фн}^2 R_1; \quad (2.28)$$

- в обмотці ротора

$$\Delta p_{e2} = 3I'^{2}_{2ф} C_1^2 R'_2; \tag{2.28}$$

➢ додаткові

$$\Delta p_{д} = 0{,}005 P_{1н}. \tag{2.29}$$

Сумарні втрати (total capacity losses) потужності в двигуні:

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_{e1} + \Delta p_{e2} + \Delta p_{д} + \Delta p_{м1} + \Delta p_{мех}. \tag{2.30}$$

Корисна потужність (efficient capacity) на валу:

$$P_{2н} = P_{1н} - \Delta p_{\Sigma}. \tag{2.31}$$

Відхилення розрахованої величини $P_{2н}$ корисної потужності від заданої $P_н$

$$\Delta P_{2н} = \frac{P_{2н} - P_н}{P_н} \cdot 100 \tag{2.31}$$

не повинно перевищувати 5%.

Номінальний ККД:

$$\eta_н = \frac{P_н}{P_{1н}} \cdot 100. \tag{2.32}$$

Кількість пар полюсів обмотки статора:

$$p = \frac{60 f_1}{n_1}. \tag{2.33}$$

Номінальний електромагнітний обертовий момент (nominal electromagnetic rotating moment) двигуна:

$$M_н = \frac{3pU_{1фн}^2 \dfrac{C_1^2 R_2'}{s_н}}{2\pi f_1 \left[\left(C_1 R_1 + C_1^2 \dfrac{R_2'}{s_н} \right)^2 + \left(C_1 X_1 + C_1^2 X_2' \right)^2 \right]}. \quad (2.34)$$

Розрахунок пускового та максимальних моментів

Пусковий момент (starting moment) двигуна (при ковзанні s = 1):

$$M_п = \frac{3pU_{1фн}^2 C_1^2 R_2'}{2\pi f_1 \left[\left(C_1 R_1 + C_1^2 R_2' \right)^2 + \left(C_1 X_1 + C_1^2 X_2' \right)^2 \right]}. \quad (2.35)$$

Критичне ковзання (critical slidding):

$$s_{кр} = \frac{C_1^2 R_2'}{\sqrt{\left(C_1 R_1 \right)^2 + \left(C_1 X_1 + C_1^2 X_2' \right)^2}}. \quad (2.36)$$

Критична частота обертання (critical frequency of ration) ротора:

$$n_{кр} = \left(1 - s_{кр} \right) n_1. \quad (2.37)$$

Максимальний момент (maximal moment):

$$M_п = \frac{3pU_{1фн}^2}{4\pi f_1 \left[\sqrt{\left(C_1 R_1 \right)^2 + \left(C_1 X_1 + C_1^2 X_2' \right)^2} + C_1 R_1 \right]}. \quad (2.38)$$

Значення додаткового опору, при вмиканні якого в коло ротора при пуску можна отримати максимальний момент:

$$R_д = \sqrt{\left(C_1 R_1 \right)^2 + \left(C_1 X_1 + C_1^2 X_2' \right)^2} - C_1^2 R_2'. \quad (2.39)$$

Розрахунок та побудова механічної характеристики

Механічна характеристика (mechanical characteristics) s = f(M) будується за формулою (2.34) при зміні ковзання від 0,0001 до 1 (рис. 2.2).

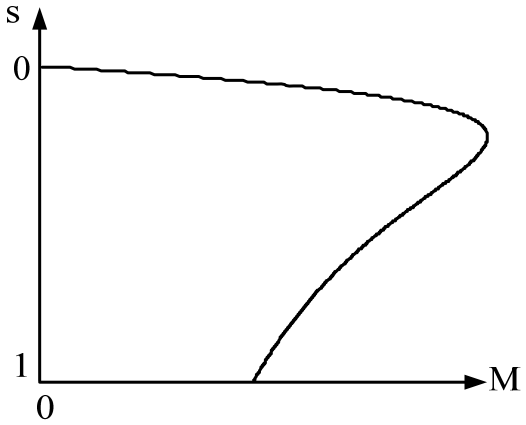


Рисунок 2.2 – Механічна характеристика асинхронного двигуна

Розрахунок та побудова робочих характеристик

Для побудови робочих характеристик (working characteristics) двигуна (I_1, P_1, η, $\cos\varphi_1$, n, s, M) = f (P_2) потрібно задатися зміною ковзання від близького до нуля (наприклад, 0,0001) до $1{,}2s_н$ та перевести осі характеристик у відносні одиниці для наочності (рис. 2.3).

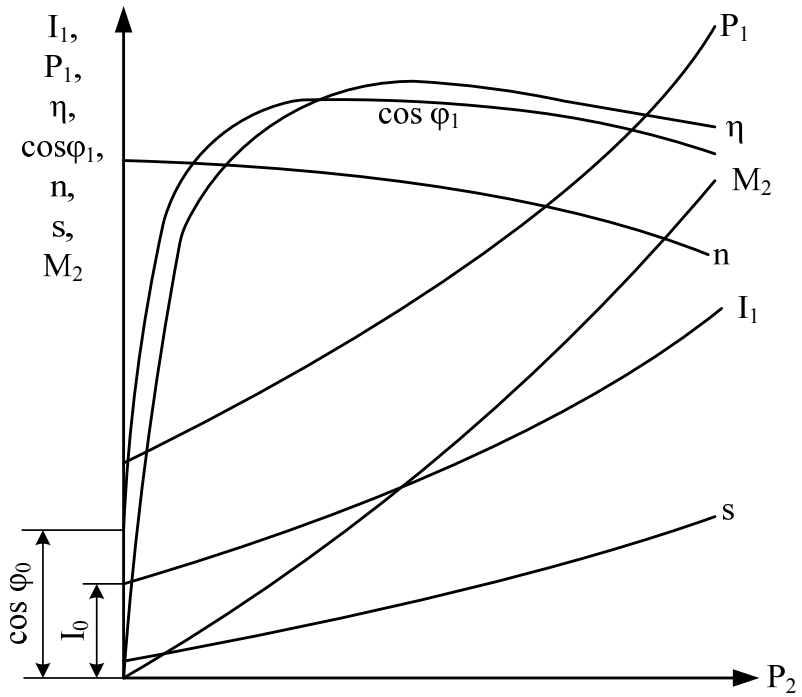


Рисунок 2.3 – Робочі характеристики асинхронного двигуна

2.3 Приклад розрахунку

Розглядається асинхронний двигун з параметрами, вказаними в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Дані асинхронного двигуна

$P_н$, кВт	$U_{1н}$, кВ	$I_{1н}$, А	Схема обм. статора	$n_н$, об/хв	R_1, Ом	X_1, Ом	R'_2, Ом	X'_2, Ом	$I_{0ф}$, А	$\cos\varphi_0$	$\Delta P_{мех}$, кВт
320	6	37	Y	1480	1,17	13,85	1,2264	13,98	10	0,045	1,45

В ППП MathCAD розрахунок асинхронного двигуна можна здійснити у такій послідовності.

$P_н := 320 \cdot 10^3$ Вт; $n_1 := 1500$ хв$^{-1}$; $f_1 := 50$ Гц;

$U_{1лн} := 6 \cdot 10^3$ В; $I_{1лн} := 37$ А; $n_н := 1480$ хв$^{-1}$;

$R_1 := 1.17$ Ом; $X_1 := 13.85$ Ом; $R_{2'} := 1.2264$ Ом;

$X_{2'} := 13.98$ Ом; $I_{0ф} := 10$ А; $\cos\phi_0 := 0.045$;

$\Delta p_{мех} := 1.45 \cdot 10^3$ Вт; схема обмотки статора - Y

Розрахунок фазних напруги та струму обмотки статора

Фазні напруги й струми обмотки статора:

$$U_{1фн} := \frac{U_{1лн}}{\sqrt{3}}, \qquad U_{1фн} = 3.464 \times 10^3 \text{ В};$$

$$I_{1фн} := I_{1лн}, \qquad I_{1фн} = 37 \text{ А}.$$

Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна

Активна потужність, що споживається двигуном на ХХ:

$$P_0 := 3 \cdot U_{1фн} \cdot I_{0ф} \cdot \cos\phi_0, \quad P_0 = 4.677 \times 10^3 \text{ Вт}.$$

Електричні втрати в обмотці статора на ХХ:

$$\Delta p_{e10} := 3 \cdot I_{0ф}^2 \cdot R_1, \qquad \Delta p_{e10} = 351 \text{ Вт}.$$

Втрати потужності в сталі статора (магнітні втрати):

$$\Delta p_{м1} := P_0 - \Delta p_{e10} - \Delta p_{мех}\ , \qquad \Delta p_{м1} = 2.876 \times 10^3 \ \text{Вт}.$$

Повний опір обмотки статора:

$$Z_1 := \sqrt{R_1^{\,2} + X_1^{\,2}}, \qquad Z_1 = 13.899\ \text{Ом}\ .$$

Повний опір двигуна:

$$Z_0 := \frac{U_{1фн}}{I_{0ф}}\ , \qquad Z_0 = 346.41\ \text{Ом}\ .$$

Опори кола намагнічування схеми заміщення:

повний -

$$Z_м := Z_0 - Z_1, \qquad Z_м = 332.5\,\text{Ом}\ ;$$

активний -

$$R_м := \frac{\Delta p_{м1}}{3 \cdot I_{0ф}^{\,2}}\ , \qquad R_м = 9.585\ \ \text{Ом}\ ;$$

реактивний -

$$X_м := \sqrt{Z_м^{\,2} - R_м^{\,2}}, \qquad X_м = 332.373\ \text{Ом}\ .$$

Поправочний коефіцієнт:

$$C_1 := 1 + \frac{X_1}{X_м}, \qquad C_1 = 1.042\ \ .$$

Параметри головної вітки схеми заміщення:

$$C_1 \cdot R_1 = 1.219\ \ \text{Ом}\ ; \qquad C_1 \cdot X_1 = 14.427\ \text{Ом}\ ;$$

$$C_1^{\,2} \cdot R_{2'} = 1.331\ \text{Ом}\ ; \qquad C_1^{\,2} \cdot X_{2'} = 15.169\ \ \text{Ом}\ .$$

Розрахунок параметрів двигуна при номінальному навантаженні

Ковзання:

$$s_н := \frac{n_1 - n_н}{n_1}\ , \qquad s_н = 0.013\ .$$

Повний опір головної вітки схеми заміщення:

$$Z_\Sigma := \sqrt{\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^{\,2} \cdot \frac{R_{2'}}{s_н}\right)^2 + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^{\,2} \cdot X_{2'}\right)^2}, \qquad Z_\Sigma = 105.27\ \ \text{Ом}\ .$$

Приведений струм ротора:

$$I_{2\phi'} := \frac{U_{1\phi н}}{Z_\Sigma}, \qquad I_{2\phi'} = 32.907 \text{ А}.$$

Косинус і синус кута:

$$\cos\phi_{2'} := \frac{C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_{2'}}{s_н}}{Z_\Sigma}, \qquad \sin\phi_{2'} := \frac{C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_{2'}}{Z_\Sigma},$$

$$\cos\phi_{2'} = 0.96; \qquad \sin\phi_{2'} = 0.281.$$

Активна і реактивна складові струму головної вітки:

$$I_{2a'} := I_{2\phi'} \cdot \cos\phi_{2'}, \qquad I_{2a'} = 31.579 \text{ А};$$

$$I_{2p'} := I_{2\phi'} \cdot \sin\phi_{2'}, \qquad I_{2p'} = 9.252 \text{ А}.$$

Активна і реактивна складові струму ХХ:

$$I_{0a} := I_{0\phi} \cdot \cos\phi_0, \qquad I_{0a} = 0.45 \text{ А};$$

$$\sin\phi_0 := \sqrt{1 - \cos\phi_0^2}, \qquad \sin\phi_0 = 0.999;$$

$$I_{0p} := I_{0\phi} \cdot \sin\phi_0, \qquad I_{0p} = 9.99 \text{ А}.$$

Активна і реактивна складові повного струму статора:

$$I_{1a} := I_{0a} + I_{2a'}, \qquad I_{1a} = 32.029 \text{ А};$$

$$I_{1p} := I_{0p} + I_{2p'}, \qquad I_{1p} = 19.242 \text{ А}.$$

Номінальний фазний струм, що споживається двигуном із мережі:

$$I_{1\phi н.} := \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}, \qquad I_{1\phi н.} = 37.365 \text{ А}.$$

Коефіцієнт потужності двигуна:

$$\cos\phi_{1н} := \frac{I_{1a}}{I_{1\phi н.}}, \qquad \cos\phi_{1н} = 0.857.$$

Номінальна активна потужність, що споживається двигуном із мережі:

$$P_{1н} := 3 \cdot U_{1\phi н} \cdot I_{1\phi н.} \cdot \cos\phi_{1н}, \qquad P_{1н} = 3.3286 \times 10^5 \text{ Вт}.$$

Втрати потужності в двигуні:
в обмотці статора -

$$\Delta p_{e1} := 3 \cdot I_{1\phi н}^2 \cdot R_1, \qquad \Delta p_{e1} = 4.805 \times 10^3 \text{ Вт};$$

в обмотці ротора -

$$\Delta p_{e2} := 3 \cdot I_{2\phi'}^{2} \cdot C_1^{2} \cdot R_{2'}, \quad \Delta p_{e2} = 4.323 \times 10^{3} \text{ Вт};$$

додаткові -

$$\Delta p_{д} := 0.005 \cdot P_{1н}, \quad \Delta p_{д} = 1.664 \times 10^{3} \text{ Вт}.$$

Сумарні втрати потужності в двигуні:

$$\Delta p_{\Sigma} := \Delta p_{e1} + \Delta p_{e2} + \Delta p_{д} + \Delta p_{м1} + \Delta p_{мех},$$

$$\Delta p_{\Sigma} = 1.5118 \times 10^{4} \text{ Вт}.$$

Корисна потужність на валу:

$$P_{2н} := P_{1н} - \Delta p_{\Sigma}, \quad P_{2н} = 3.1774 \times 10^{5} \text{ Вт}.$$

Відхилення розрахованої величини корисної потужності від заданої:

$$\Delta P_{2н} := \frac{P_{2н} - P_{н}}{P_{н}} \cdot 100, \quad \Delta P_{2н} = -0.706 \ \%.$$

Номінальний ККД:

$$\eta_{н} := \frac{P_{2н}}{P_{1н}}, \quad \eta_{н} = 0.955.$$

Кількість пар полюсів обмотки статора:

$$p := \frac{60 \cdot f_1}{n_1}, \quad p = 2.$$

Електромагнітний обертовий момент двигуна:

$$M_{н} := \frac{3 \cdot p \cdot U_{1\phi н}^{2} \cdot \left(C_1^{2} \cdot \frac{R_{2'}}{s_{н}} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^{2} \cdot \frac{R_{2'}}{s_{н}} \right)^{2} + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^{2} \cdot X_{2'} \right)^{2} \right]},$$

$$M_{н} = 2.064 \times 10^{3} \text{ Н·м}.$$

Розрахунок пускового та максимальних моментів

Пусковий момент двигуна при $s := 1$

$$M_{п} := \frac{3 \cdot p \cdot U_{1фн}^{2} \cdot \left(C_1^{2} \cdot \frac{R_{2'}}{s} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^{2} \cdot \frac{R_{2'}}{s} \right)^{2} + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^{2} \cdot X_{2'} \right)^{2} \right]} ,$$

$$M_{п} = 345.608 \text{ . Н·м}$$

Критичне ковзання:

$$s_{кр} := \frac{C_1^{2} \cdot R_{2'}}{\sqrt{\left(C_1 \cdot R_1 \right)^{2} + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^{2} \cdot X_{2'} \right)^{2}}} , \qquad s_{кр} = 0.045 \text{ .}$$

$$n_{кр} := \left(1 - s_{кр} \right) \cdot n_1 \qquad n_{кр} = 1.433 \times 10^{3} \text{ хв}^{-1} .$$

Максимальний момент:

$$M_{max} := \frac{3 \cdot p \cdot U_{1фн}^{2}}{4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\sqrt{\left(C_1 \cdot R_1 \right)^{2} + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^{2} \cdot X_{2'} \right)^{2}} + C_1 \cdot R_1 \right]} ,$$

$$M_{max} = 3.716 \times 10^{3} \text{ Н·м .}$$

Значення додаткового опору, при вмиканні якого в коло ротора при пуску можна отримати максимальний момент:

$$R_d := \sqrt{\left(C_1 \cdot R_1 \right)^{2} + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^{2} \cdot X_{2'} \right)^{2}} - C_1^{2} \cdot R_{2'} ,$$

$$R_d = 28.291 \text{ Ом .}$$

Розрахунок та побудова механічної характеристики

Механічна характеристика s=f(M) будується за співвідношенням:

$s := 0.00001 , 0.001 .. 1$

$$M(s) := \frac{3 \cdot p \cdot U_{1фн}^{2} \cdot \left(C_1^{2} \cdot \frac{R_{2'}}{s} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^{2} \cdot \frac{R_{2'}}{s} \right)^{2} + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^{2} \cdot X_{2'} \right)^{2} \right]}$$

Механічна характеристика асинхронного двигуна показана на рис. 2.4.

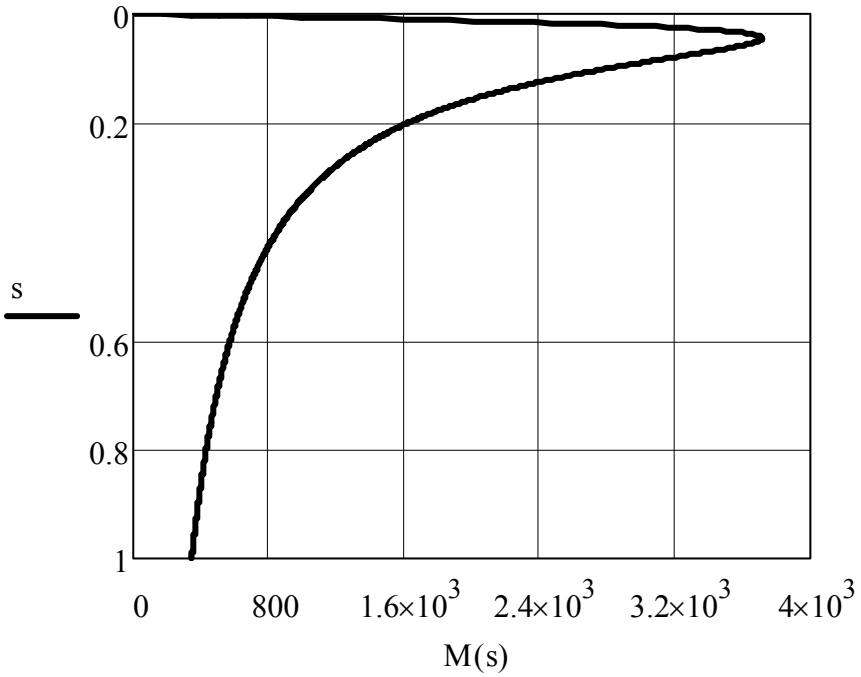


Рисунок 2.4 – Механічна характеристика асинхронного двигуна

Розрахунок та побудова робочих характеристик

Для побудови робочих характеристик двигуна переходимо до відносних одиниць:

$$s := 0.00001\ ,0.0002\ ..\ 1.2\cdot s_{н};$$

$$Z_{\Sigma.}(s) := \sqrt{\left(C_1\cdot R_1 + C_1{}^2\cdot\frac{R_{2'}}{s}\right)^2 + \left(C_1\cdot X_1 + C_1{}^2\cdot X_{2'}\right)^2}\ ;$$

$$I_{2ф'.}(s) := \frac{U_{1фн}}{Z_{\Sigma.}(s)}\ ;$$

$$\cos\phi_{2'.}(s) := \frac{C_1\cdot R_1 + C_1{}^2\cdot\frac{R_{2'}}{s}}{Z_{\Sigma.}(s)};\qquad \sin\phi_{2'.}(s) := \frac{C_1\cdot X_1 + C_1{}^2\cdot X_{2'}}{Z_{\Sigma.}(s)};$$

$$I_{2a'.}(s) := I_{2ф'.}(s)\cdot\cos\phi_{2'.}(s)\ ;\qquad I_{2p'.}(s) := I_{2ф'.}(s)\cdot\sin\phi_{2'.}(s);$$

$$I_{1a.}(s) := I_{0a} + I_{2a'.}(s); \qquad I_{1p.}(s) := I_{0p} + I_{2p'.}(s);$$

$$I_{1\phi}(s) := \sqrt{I_{1a.}(s)^2 + I_{1p.}(s)^2}, \qquad I_{1\phi vidn}(s) := \frac{I_{1\phi}(s)}{I_{1\phi н}};$$

$$\cos\phi_1(s) := \frac{I_{1a.}(s)}{I_{1\phi}(s)}, \qquad \cos\phi_{1vidn}(s) := \frac{\cos\phi_1(s)}{\cos\phi_{1н}};$$

$$P_1(s) := 3\cdot U_{1\phi н}\cdot I_{1\phi}(s)\cdot\cos\phi_1(s), \qquad P_{1vidn}(s) := \frac{P_1(s)}{P_{1н}};$$

$$\Delta p_{e1.}(s) := 3\cdot I_{1\phi}(s)^2\cdot R_1; \qquad \Delta p_{e2.}(s) := 3\cdot I_{2\phi'.}(s)^2\cdot C_1{}^2\cdot R_{2'};$$

$$\Delta p_{Д.}(s) := 0.005\cdot P_1(s);$$

$$\Delta p_{\Sigma.}(s) := \Delta p_{e1.}(s) + \Delta p_{e2.}(s) + \Delta p_{Д.}(s) + \Delta p_{м1} + \Delta p_{мех};$$

$$P_2(s) := P_1(s) - \Delta p_{\Sigma.}(s); \qquad P_{2vidn}(s) := \frac{P_2(s)}{P_{2н}};$$

$$M(s) := \frac{3\cdot p\cdot U_{1\phi н}{}^2\cdot\left(C_1{}^2\cdot\frac{R_{2'}}{s}\right)}{2\cdot\pi\cdot f_1\cdot\left[\left(C_1\cdot R_1 + C_1{}^2\cdot\frac{R_{2'}}{s}\right)^2 + \left(C_1\cdot X_1 + C_1{}^2\cdot X_{2'}\right)^2\right]},$$

$$M_{vidn}(s) := \frac{M(s)}{M_н}; \qquad \eta(s) := \frac{P_2(s)}{P_1(s)};$$

$$s_{н.} := \frac{n_1 - n_н}{n_1}; \qquad n(s) := n_1\cdot(1 - s),$$

$$s_{vidn}(s) := \frac{n_1 - n(s)}{n_1}; \qquad n_{vidn}(s) := \frac{n(s)}{n_1}.$$

Робочі характеристики асинхронного двигуна показано на рис. 2.5.

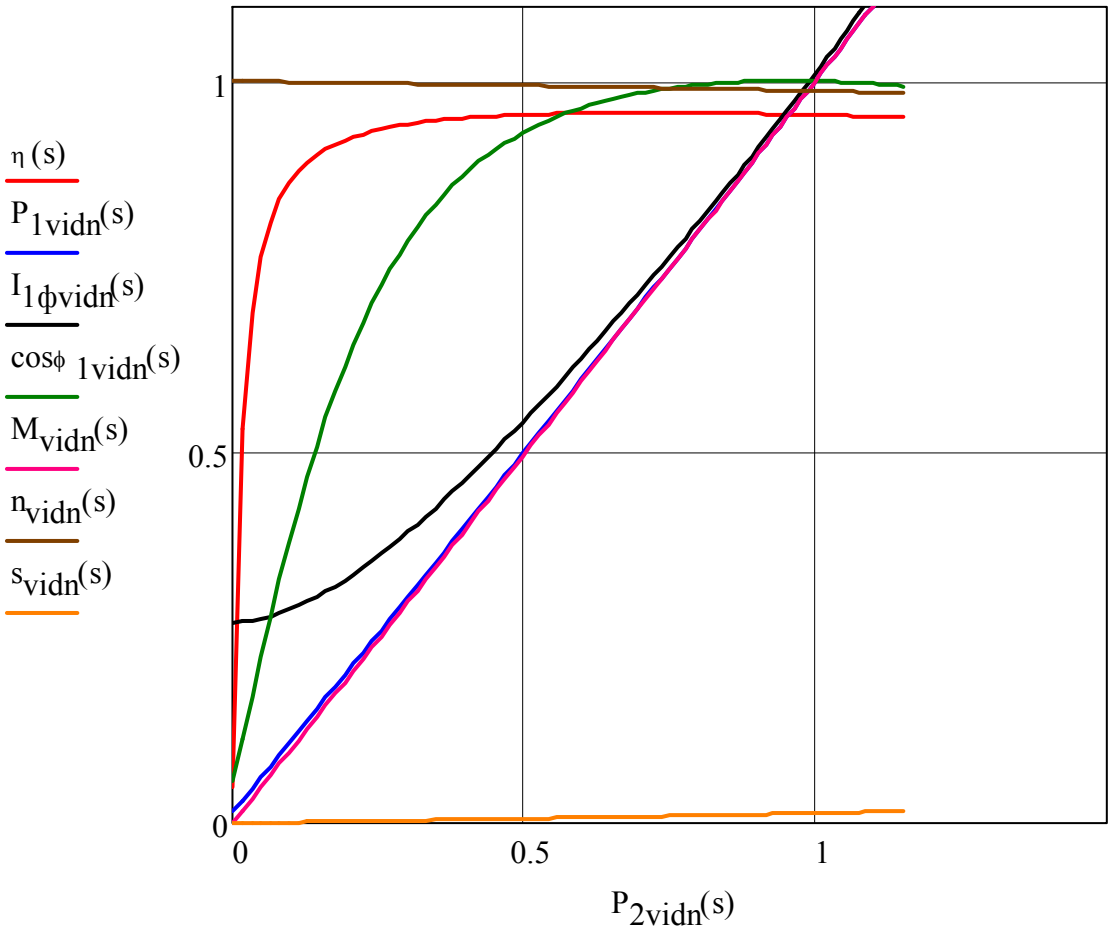


Рисунок 2.5 – Робочі характеристики асинхронного двигуна

3 Синхронні машини

3.1 Завдання

Для синхронного генератора з вихідними даними, вказаними в табл. 3.1, виконати такі розрахунки та побудови:

1) визначити базисні значення напруги, струму, опору обмотки якоря, потужності та моменту електричної машини;

2) побудувати векторну діаграму генератора для номінального режиму;

3) визначити за допомогою векторної діаграми струм збудження $i_{fн}$ у відносних одиницях та амперах та зміну напруги при зменшенні навантаження (у вольтах та % до номінальної напруги);

4) визначити напругу на обмотці збудження $u_{fн}$ у вольтах;

5) визначити втрати та коефіцієнт корисної дії генератора;

6) розрахувати обертовий момент турбіни $M_{об}$, що передається через вал до генератора;

7) для режиму паралельної роботи генератора з мережею:

7.1) побудувати кутову характеристику генератора при номінальній напрузі та номінальному струмі збудження без врахування насичення;

7.2) визначити кут θ між ЕРС E_0, що індукується полем збудження, та напругою U при номінальній потужності, максимальній потужності, а також визначити статичну перевантаженість генератора;

7.3) визначити частоту власних коливань швидкості ротора відносно синхронної частоти обертання при номінальному режимі;

8) визначити усталені значення струмів при трифазному, двофазному та однофазному коротких замиканнях на затискачах генератора, а також ударний струм (найбільше миттєве значення) трифазного короткого замикання в амперах та відносних одиницях;

9) визначити повну потужність, яку генератор може видавати в мережу при номінальній напрузі, номінальному струмі збудження та $\theta = \theta_н$;

10) знайти реактивну потужність, що може віддавати генератор в мережу при $U = U_н$, $M = 0{,}5 \cdot M_н$, $i_f = i_{fн}$;

11) знайти амплітудне значення струму якоря при увімкненні незбудженого генератора в мережу з номінальною напругою, що дорівнює номінальній напрузі генератора. Знайти амплітуду струму, якщо генератор буде збуджений до номінальної напруги, але умови точної синхронізації не будуть виконані;

Таблиця 3.1 – Варіанти завдань до розділу «Синхронні машини»

№	Основні дані				Опори, Ом								i_{f0}, А	Втрати, кВт		J, $т \cdot м^2$
	$S_н$, МВА	$P_н$, МВт	$n_н$, об/хв	$U_{нл}$, кВ	X_σ	X_d	X_q	X''_d	X_2	X_0	R_a	r_f		$\Delta p_{маг}$	$\Delta p_{мех}$	
Турбогенератори																
1.	1,25	1	3000	0,4	0,0184	0,211	0,211	0,0184	0,0225	0,00457	0,00162	0,64	45	15,5	15	10,050
2.	1,5	1,2	3000	0,4	0,0150	0,170	0,170	0,0150	0,0185	0,00410	0,00130	0,60	53	17,5	17	0,55
3.	1,875	1,5	3000	0,4	0,0126	0,133	0,133	0,0126	0,0153	0,0382	0,00102	0,68	60	20,0	20	0,060
4.	3,00	2,5	3000	3,15	0,60	8,0	8,0	0,6	0,75	0,25	0,06	0,60	65	32	23	0,07
5.	1,875	1,5	3000	6,3	2,40	32,9	32,9	2,40	2,93	0,995	0,235	0,60	60	20	20	0,060
6.	3,75	3,0	3000	3,15	0,32	4,0	4,0	0,32	0,4	0,152	0,020	0,30	125	30	35	0,130
7.	3,75	3,0	3000	6,3	1,28	16,2	16,2	1,28	1,56	0,69	0,0852	0,326	116	36	35	0,125
8.	4,38	3,5	3000	3,15	0,25	3,5	3,5	0,25	0,32	0,20	0,017	0,28	135	42	41	0,130
9.	4,38	3,5	3000	6,3	1,06	13,8	13,8	1,06	1,29	0,805	0,0755	0,269	132	41,5	40	0,125
10.	7,5	6,0	3000	10,5	1,80	23,0	23,0	1,80	2,1	0,970	0,12	0,40	132	62	80	0,350
11.	7,5	6,0	3000	3,15	0,154	1,98	1,98	0,154	0,189	0,083	0,00863	0,404	132	62	80	0,325
12.	15	12	3000	3,15	0,08	1,25	1,25	0,08	0,090	0,035	0,0030	0,700	98	105	150	0,650
13.	7,15	6,0	3000	6,3	0,650	8,35	8,35	0,650	0,795	0,350	0,0350	0,404	132	62	80	0,350
14.	11,3	9	3000	6,3	0,41	6,5	6,5	0,41	0,50	0,180	0,020	0,55	100	80	110	0,450
15.	15	12	3000	6,3	0,31	4,93	4,93	0,31	0,379	0,138	0,0144	0,678	95	103	140	0,600
16.	15	12	3000	10,5	0,97	15,4	15,4	0,97	0,18	0,53	0,0406	0,678	90	103	140	0,620
17.	18,75	15	3000	10,5	0,8	12,3	12,3	0,8	0,95	0,42	0,0300	0,80	100	125	170	0,800
18.	37,5	30	3000	6,3	0,157	2,49	2,49	0,157	0,19	0,101	0,00562	0,409	163	136	79,5	1,3
19.	37,5	30	3000	10,5	0,445	7,43	7,43	0,445	0,542	0,196	0,0164	0,409	152	138	79,5	1,4
20.	37,5	32	3000	6,3	0,28	3,26	3,26	0,36	0,45	0,18	0,0026	0,103	149	139	81,2	1,3
21.	1,25	1	3000	0,4	0,0184	0,211	0,211	0,0184	0,0225	0,00457	0,00162	0,64	45	15,5	15	10,05
22.	1,5	1,2	3000	0,4	0,015	0,170	0,170	0,0150	0,0185	0,00410	0,00130	0,60	53	17,5	17	0,55
23.	1,875	1,5	3000	0,4	0,0126	0,133	0,133	0,0126	0,0153	0,0382	0,00102	0,68	60	20,0	20	0,06
24.	3,00	2,5	3000	3,15	0,60	8,0	8,0	0,6	0,75	0,25	0,06	0,60	65	32	23	0,07
25.	1,875	1,5	3000	6,3	2,40	32,9	32,9	2,40	2,93	0,995	0,235	0,60	60	20	20	0,06
26.	3,75	3,0	3000	3,15	0,32	4,0	4,0	0,32	0,4	0,152	0,020	0,30	125	30	35	0,13
27.	3,75	3,0	3000	6,3	1,28	16,2	16,2	1,28	1,56	0,69	0,0852	0,326	116	36	35	0,125
28.	4,38	3,5	3000	3,15	0,25	3,5	3,5	0,25	0,32	0,20	0,017	0,28	135	42	41	0,13
29.	4,38	3,5	3000	6,3	1,06	13,8	13,8	1,06	1,29	0,805	0,0755	0,269	132	41,5	40	0,125
30.	7,5	6,0	3000	10,5	1,80	23,0	23,0	1,80	2,1	0,970	0,12	0,40	132	62	80	0,35
31.	7,5	6,0	3000	3,15	0,154	1,98	1,98	0,154	0,189	0,083	0,00863	0,404	132	62	80	0,325
32.	15	12	3000	3,15	0,08	1,25	1,25	0,08	0,090	0,035	0,0030	0,700	98	105	150	0,65
33.	7,15	6,0	3000	6,3	0,650	8,35	8,35	0,650	0,795	0,350	0,0350	0,404	132	62	80	0,35
34.	11,3	9	3000	6,3	0,41	6,5	6,5	0,41	0,50	0,180	0,020	0,55	100	80	110	0,45
35.	15	12	3000	6,3	0,31	4,93	4,93	0,31	0,379	0,138	0,0144	0,678	95	103	140	0,60
36.	15	12	3000	10,5	0,97	15,4	15,4	0,97	0,18	0,53	0,0406	0,678	90	103	140	0,62
37.	18,75	15	3000	10,5	0,8	12,3	12,3	0,8	0,95	0,42	0,0300	0,80	100	125	170	0,800

Продовження таблиці 3.1

№	Основні дані				Опори, Ом								i_{f0}, А	Втрати, кВт		J, $т \cdot м^2$
	$S_н$, МВА	$P_н$, МВт	$n_н$, об/хв	$U_{нл}$, кВ	X_σ	X_d	X_q	X''_d	X_2	X_0	R_a	r_f		$\Delta p_{маг}$	$\Delta p_{мех}$	
38.	37,5	30	3000	6,3	0,157	2,49	2,49	0,157	0,19	0,101	0,00562	0,409	163	136	79,5	1,3
39.	37,5	30	3000	10,5	0,445	7,43	7,43	0,445	0,542	0,196	0,0164	0,409	152	138	79,5	1,4
40.	37,5	32	3000	6,3	0,28	3,26	3,26	0,36	0,45	0,18	0,0026	0,103	149	139	81,2	1,3
41.	1111	1000	1500	24	0,029	1,24	1,24	0,405	0,16	0,024	0,00186	0,05	2250	1486	2890	15,6
42.	1333	1200	3000	24	0,014	1,04	1,04	0,259	0,078	0,012	0,00195	0,051	2460	1497	3280	13,4
Гідрогенератори																
43.	68,75	55	62,5	13,8	0,424	2,02	1,53	0,758	1,07	2,57	0,018	0,268	850	335	333	12500
44.	18	14,4	100	10,5	1,21	6,10	3,54	1,71	2,46	0,478	0,0445	0,302	430	96,5	148	1300
45.	15,6	12,2	150	6,3	0,468	2,56	1,55	0,771	1,07	0,278	0,0209	0,302	430	80,85	107	320
46.	15	12	167	6,6	0,603	3,16	1,98	1,09	1,46	0,362	0,0339	0,264	357	60	125	300
47.	25	20	167	6,6	0,360	2,00	1,25	0,66	0,90	0,218	0,0204	0,400	370	100	200	500
48.	4	3,2	214	6,6	1,81	9,89	6,03	3,12	4,32	0,497	0,147	0,221	304	24	*56,5*	*55*
49.	7	5,6	214	6,6	1,00	5,60	3,40	1,75	2,5	0,300	0,080	0,350	300	41	90	85
50.	10	8	250	6,6	0,695	4,44	2,63	1,19	1,77	0,302	0,0365	0,604	194	42,5	101,4	90
51.	15	12	250	6,6	0,462	3,0	1,72	0,81	1,15	0,200	0,0240	0,850	200	64,0	130	120
52.	27	21,6	150	10,5	0,715	4,02	2,407	0,817	1,00	0,283	0,0233	0,21	615	112	256	100
53.	20	16	150	10,5	0,950	5,5	3,3	1,10	1,35	0,380	0,0330	0,17	600	83	200	85
54.	33	23	375	11	0,58	3,73	2,27	1,047	1,54	0,289	0,0145	0,308	395	128	292	130
55.	25	20	375	11	0,75	5,00	3,00	1,40	2,00	0,380	0,0210	0,257	400	100	243	110
56.	25	20	375	11	0,75	5,00	3,00	1,40	2,00	0,380	0,0210	0,257	400	100	243	110
57.	30	24	100	10,5	0,588	3,5	2,22	1,11	1,57	0,544	0,314	0,309	602	132	185,5	1750
58.	40	32	100	10,5	0,440	2,60	1,65	0,830	1,17	0,410	0,0210	0,251	600	175	225	2140
59.	90	72	83,3	13,8	0,39	1,89	1,125	0,506	0,549	0,179	0,0100	0,282	736	451	497	10000
60.	103	583	83,3	13,8	0,284	1,63	1,11	0,475	0,485	0,184	0,0100	0,282	708	451	497	9500
61.	40	32	68,2	13,8	0,84	4,00	3,10	1,10	1,15	0,420	0,0800	0,280	800	310	218	6000
62.	50	40	68,2	15,75	0,90	3,15	2,47	1,15	1,17	0,451	0,0320	0,336	810	391,5	257	7000
63.	70	56	68,2	13,8	0,45	2,00	1,50	0,61	0,62	0,220	0,0141	0,435	800	550	334	9100
64.	30	25,5	187	10,5	0,587	3,92	2,37	0,722	0,755	0,293	0,0249	0,285	430	122	198	525
65.	85	68	68,2	15,75	0,351	2,25	1,50	0,392	0,400	0,150	0,0241	0,070	1400	500	610	20000
66.	123,5	105,0	68,2	13,8	0,138	0,781	0,513	0,235	0,227	0,0835	0,00546	0,210	622	730	900	30000
67.	590	500	93,8	15,75	0,084	0,672	0,378	0,126	0,130	0,0462	0,00084	0,118	1820	2000	2500	46700
68.	264,7	225	125	15,75	0,171	0,955	0,627	0,208	0,209	0,0935	0,00216	0,242	766	1000	1460	18200
69.	711	640	142,8	15,75	0,064	0,551	0,338	0,105	0,076	0,110	0,0034	0,0007	3500	2841	4153	25500
70.	590	472	93,8	15,75	0,085	0,660	0,404	0,126	0,092	0,132	0,0054	0,00096	3770	2096	3063	46500
71.	282,5	240	125	15,75	0,152	1,071	0,685	0,220	0,191	0,276	0,0024	0,00039	1555	1066	1558	13750
72.	253	202	136,4	15,75	0,134	1,030	0,588	0,206	0,214	0,308	0,0024	0,00038	2060	899	1314	11250
73.	206	146	100	15,75	0,172	1,216	0,807	0,265	0,262	0,378	0,0023	0,00043	1400	647	945	18250
74.	195,5	156	75	13,8	0,148	0,594	0,516	0,224	0,212	0,306	0,0030	0,00039	1620	694	1015	25000

Продовження таблиці 3.1

№	Основні дані				Опори, Ом								i_{f0}, А	Втрати, кВт		J, $т \cdot м^2$
	$S_н$, МВА	$P_н$, МВт	$n_н$, об/хв	$U_{нл}$, кВ	X_σ	X_d	X_q	X''_d	X_2	X_0	R_a	r_f		$\Delta p_{маг}$	$\Delta p_{мех}$	
75.	190	142,5	71,5	15,75	0,227	1,423	0,953	0,339	0,284	0,410	0,0036	0,00058	1720	633	925	20500
76.	150	105	75	13,8	0,166	1,079	0,711	0,254	0,277	0,399	0,0030	0,00039	1500	466	681	18750
77.	133,3	106	68,2	13,8	0,133	0,771	0,514	0,214	0,311	0,449	0,0037	0,00036	1900	473	692	25000
78.	91,8	64,3	57,7	13,8	0,297	1,494	1,058	0,498	0,452	0,652	0,0047	0,00046	1185	285	417	15500
79.	203,5	157	300	13,8	0,102	0,983	0,646	0,168	0,204	0,294	0,0021	0,00024	1730	696	1017	1750
80.	144,4	122,8	187,5	10,5	0,109	0,885	0,595	0,168	0,166	0,240	0,0022	0,00054	1600	545	797	3500
81.	127,7	102	300	11	0,092	0,815	0,512	0,142	0,206	0,298	0,0031	0,00033	1500	454	663	1120
82.	107	85,6	500	13,8	0,208	2,563	1,459	0,320	0,388	0,559	0,002	0,0004	1075	380	556	220
83.	68,75	55	428,6	10,5	0,178	1,828	1,107	0,305	0,349	0,504	0,0021	0,00038	930	244	357	180
84.	66,7	50	375	11	0,152	1,596	0,980	0,236	0,395	0,570	0,00185	0,00037	875	222	325	380
85.	65,5	52,4	500	10,5	0,162	2,171	1,296	0,269	0,367	0,529	0,0028	0,00047	947	233	340	100
86.	63	41	200	10,5	0,207	1,855	1,138	0,315	0,381	0,550	0,0036	0,00043	915	182	266	1120
87.	31,25	23,4	375	10,5	0,420	4,304	2,575	0,706	0,768	1,108	0,0039	0,00048	786	104	152	130
88.	31,18	26,5	150	10,5	0,594	4,137	2,652	0,884	0,770	1,111	0,0059	0,00075	945	118	172	770

12) знайти механічну потужність, яку розвиває приводна турбіна при вмиканні генератора на паралельну роботу з мережею методом самосинхронізації та точної синхронізації;

13) визначити без урахування явнополюсності максимальний момент, при якому машина в режимі двигуна утримається в синхронізмі, якщо струм збудження зменшити до $0{,}5i_{fн}$;

14) знайти потужність, яка споживається машиною, що працює в режимі двигуна на холостому ході, якщо $U = U_н$ і $\cos\varphi = 1$;

15) визначити реактивну потужність, яку машина зможе віддавати в мережу в режимі синхронного компенсатора при $i_f = i_{fн}$ та номінальній напрузі. Знайти для цього режиму активний струм та активну потужність, які споживаються з мережі, втрати активної потужності в машині;

16) визначити реактивну потужність, яку машина буде споживати з мережі в режимі компенсатора при номінальній напрузі та нульовому струмі збудження $i_f = 0$.

Примітки:

1) генератори призначені для роботи з частотою 50 Гц;

2) обмотки якоря всіх машин з'єднані в схему «зірка» Y;

3) генератори мають пряму електромашинну систему збудження (збуджувачі знаходяться на одному валу з генератором);

4) опори R_a та r_f наведені при робочій температурі 75 °С;

5) наведено моменти інерції J лише для ротора генератора. Моменти інерції агрегатів з урахуванням моментів інерції турбіни та збуджувача потрібно брати для турбогенераторів в 1,5 раза більшими, а для гідрогенераторів в 1,1 раза більшими;

6) в графі X''_d для турбогенераторів без демпферної обмотки наведено значення перехідних індуктивних опорів X'_d, які мало відрізняються від надперехідних опорів X''_d;

7) вказане значення номінальної напруги є лінійним.

3.2 Рекомендації до розрахунку

Визначення базисних величин

Для порівняння характеристик машин різної потужності зручно користуватись системою вимірювання величин у відносних одиницях. В такій системі одиниць кожна величина характеризується її відношенням до відповідного одиничного (базисного) значення величини. За базисні значення струму та напруги беруться відповідно номінальні фазні значення струму та напруги машин. При з'єднанні в зірку використовуються такі співвідношення для визначення базисних струму та напруги:

$$I_б = I_н = \frac{S_н}{\sqrt{3} \cdot U_н}, \tag{3.1}$$

$$U_б = U_н = \frac{U_{нл}}{\sqrt{3}}. \tag{3.2}$$

За базисне значення опору обмотки якоря береться відношення базисної напруги до базисного струму:

$$Z_б = \frac{U_б}{I_б}. \tag{3.3}$$

За базисне значення потужності береться повна номінальна потужність $S_н$:

$$S_б = S_н = 3 \cdot U_б \cdot I_б = \sqrt{3} \cdot U_{лн} \cdot I_{лн}. \tag{3.4}$$

За базисне значення обертового моменту береться момент, який визначений за базисною повною потужністю:

$$M_{б} = \frac{S_{б}}{\omega_{н}}, \tag{3.5}$$

де $\omega_{н}$ – номінальна кутова швидкість обертання ротора, рад/с:

$$\omega_{н} = \frac{2\pi n_{н}}{60}.$$

За базисне значення струму збудження береться такий струм збудження i_{f0}, який відповідає номінальній напрузі за характеристикою холостого ходу, тобто $i_{fб} = i_{f0}$.

За базисне значення МРС обмотки збудження береться МРС, що створюється струмом збудження $i_{fб}$:

$$F_{б} = F_{f0} = i_{f0} \cdot w_{f}. \tag{3.6}$$

Для визначення струму, напруги, опору фази, потужності, електромагнітного моменту в системі відносних одиниць потрібно поділити їх на відповідну базисну величину.

Побудова векторної діаграми генератора для режиму номінального навантаження

При побудові діаграм потрібно користуватися нормальними характеристиками холостого ходу синхронних машин, поданими в табл. 3.2 у відносних одиницях.

Таблиця 3.2 – Нормальні характеристики холостого ходу

Струм збудження i_f*, в.о.	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3,0	3,5
ЕРС турбогенератора E_0*, в.о.	0	0,58	1	1,21	1,33	1,4	1,46	1,51
ЕРС гідрогенератора E_0*, в.о.	0	0,53	1	1,16	1,25	1,31	1,35	1,38

Діаграми можуть бути побудовані для відомих напруги U, струму I та кута φ між ними. За допомогою діаграми визначається струм збудження, необхідний для забезпечення заданого режиму. Коефіцієнт потужності машини при номінальному навантаженні визначається з паспортних даних:

$$\cos\varphi_н = \frac{P_н}{S_н}. \qquad (3.7)$$

Побудова векторної діаграми неявнополюсного генератора
Визначення струму збудження в номінальному режимі та зміни напруги

Побудова векторної діаграми неявнополюсної синхронної машини в режимі генератора з врахуванням насичення наведено на рис. 3.1. Розглянуто автономну роботу машини з активно-індуктивним навантаженням.

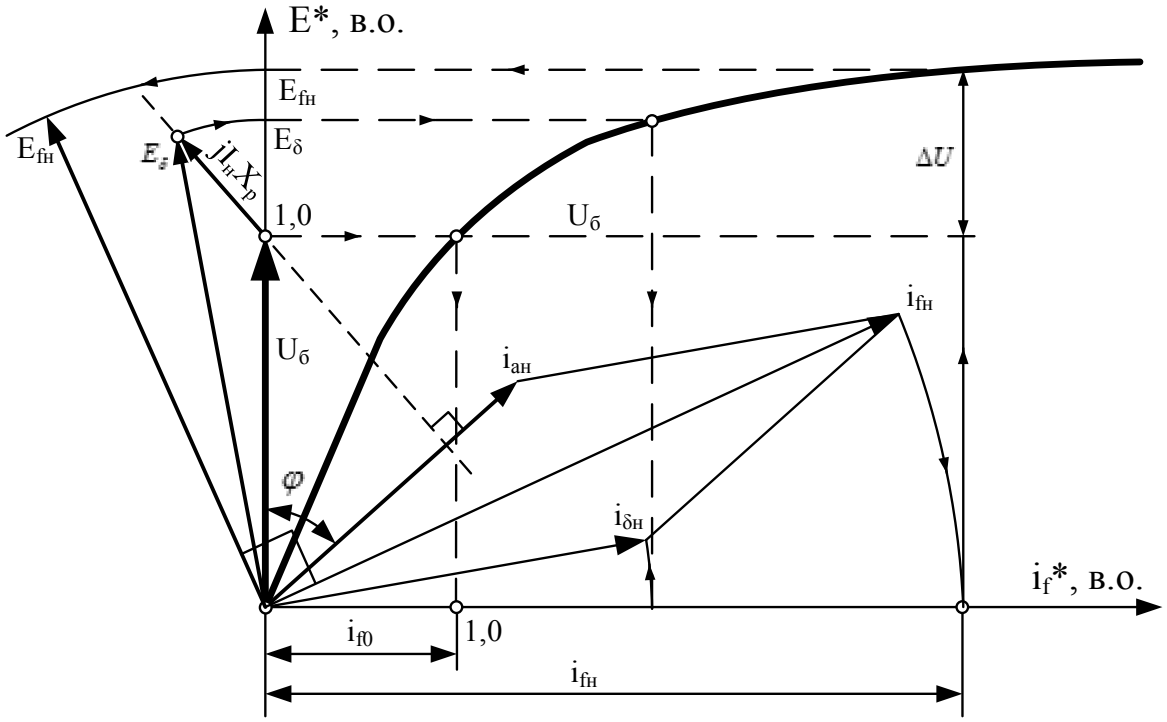


Рисунок 3.1 – Векторна діаграма неявнополюсного синхронного генератора

На площині характеристики холостого ходу відкладається з початку координат по осі ЕРС вектор напруги заданої величини (номінальне значення $U_н$). Відповідно до заданого характеру навантаження cosφ в сторону відставання на кут φ відносно вектора $U_н$ відкладається вектор струму $i_{ан}$ в масштабі струму збудження. Перпендикулярно до напрямку струму якоря з кінця вектора $U_н$ відкладається в масштабі напруг спад напруги на індуктивному опорі Потьє $I_нX_р$. Геометрична сума векторів $U_н$ та $I_нX_р$ дорівнює ЕРС $E_δ$, яка наводиться в повітряному зазорі результуючим магнітним потоком:

$$\dot{\Phi}_\delta = \dot{\Phi}_0 + \dot{\Phi}_a. \tag{3.8}$$

Значенню ЕРС E_δ відповідає значення струму збудження i_δ, яке знаходиться за допомогою характеристики холостого ходу. Геометричне місце вектора струму i_δ визначається на площині побудови практичної діаграми як перпендикуляр до E_δ – це пояснюється тим, що вектор магнітного потоку Φ_δ (та відповідно вектор МРС F_δ) проходить перпендикулярно до ЕРС. При побудові практичної діаграми допускають спрощення, яке полягає в тому, що фактично вектори Φ_δ, F_δ та i_δ випереджають вектор E_δ на кут $\pi/2$, а на діаграмі будуються в сторону відставання. Однак при побудові результатом є визначення скалярного значення струму збудження, а тому таке спрощення є правомірним, оскільки дає ті ж результати, що й при використанні повної векторної діаграми машини.

Виходячи з рівняння рівноваги МРС та рівноваги приведених струмів

$$\dot{i}_f = \dot{i}_a + \dot{i}_\delta \tag{3.9}$$

знаходиться вектор струму збудження $i_{fн}$, що відповідає номінальному навантаженню.

За відомим значенням струму збудження $i_{fн}$ в режимі номінального навантаження можна за допомогою практичної діаграми знайти зміну напруги ΔU як різницю між ЕРС в номінальному режимі й напругою U. Часто цю різницю виражають у відсотках до номінальної напруги:

$$\Delta U_{\%} = \frac{E_{fн} - U_б}{U_б} \cdot 100\%. \tag{3.10}$$

Зміна напруги для турбогенераторів становить (25…35)%, що враховується при різкому скиданні навантаження й переході до роботи в режимі холостого ходу.

Побудова векторної діаграми явнополюсного синхронного генератора
Визначення струму збудження в номінальному режимі та зміни напруги

Побудову векторної діаграми синхронного явнополюсного генератора проводять згідно з його основним рівнянням:

$$\dot{E}_f = \dot{U}_б + \dot{I}R_a + j\dot{I}X_\sigma + j\dot{I}_q X_{aq.н} + j\dot{I}_d X_{ad.н}, \tag{3.11}$$

де $X_{aq.н}$ та $X_{ad.н}$ – індуктивні опори реакції якоря з врахуванням насичення по поперечній та поздовжній осях машини, відповідно.

Точний розрахунок впливу насичення магнітної системи явнополюсної машини на складові основного рівняння ускладнений, оскільки в ній поперечний магнітний потік впливає на поздовжній і навпаки. Відповідно, значення $X_{ad.н}$ залежить не тільки від поздовжнього магнітного потоку, але й від поперечного, це ж стосується і $X_{aq.н}$. Для спрощення побудови враховується насичення магнітної системи лише по поздовжній осі, де воно найбільше проявляється. Індуктивний опір $X_{aq.н}$ береться постійним і згідно з рекомендаціями рівним $X_{aq.н} = X_{aq} / 1{,}15$. Індуктивний опір $X_{ad.н}$ визначається за характеристикою холостого ходу відповідно до МРС якоря по поздовжній осі.

Приклад векторної діаграми явнополюсного генератора з врахуванням насичення наведено на рис. 3.2. Побудова виконується в такій послідовності.

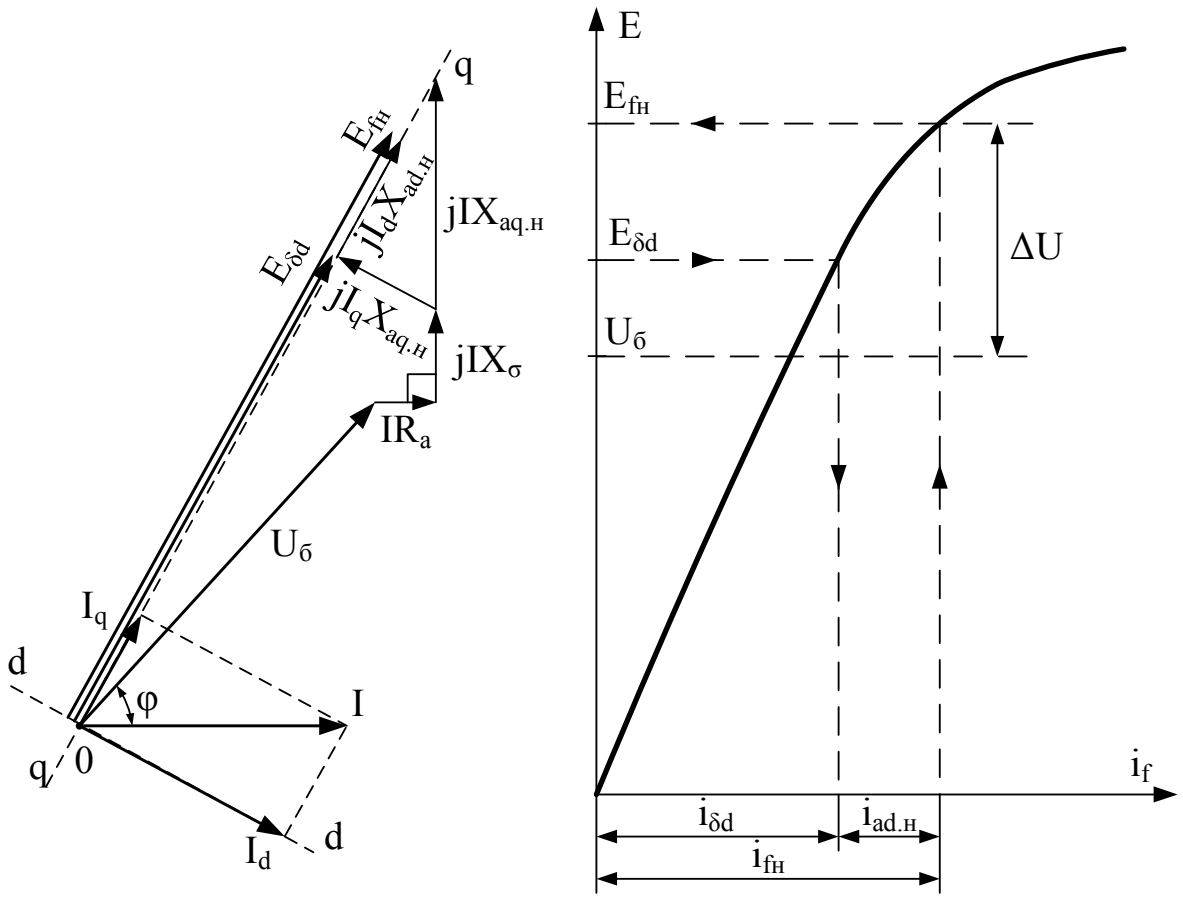


Рисунок 3.2 – Векторна діаграма явнополюсного синхронного генератора

В горизонтальному напрямку відкладається вектор струму якоря I та під кутом φ до нього в сторону випередження вектор напруги U. Потім до кінця вектора напруги додають спад напруги на активному опорі обмотки якоря IR_a (паралельно до напрямку I) та спад напруги на індуктивному опорі розсіювання обмотки якоря jIX_σ (перпендикулярно до I в сторону випередження).

Для подальшої побудови потрібно визначити напрямки поздовжньої та поперечної складових струму якоря I_d та I_q. На продовженні вектора jIX_σ відкладають відрізок довжиною $IX_{aq.н}$. Пряма, проведена від точки 0 до кінця вектора $jIX_{aq.н}$, є поперечною віссю машини q, на цій прямій буде знаходитись вектор ЕРС E_f. Поздовжня вісь машини d на комплексній площині отримується як перпендикуляр до поперечної осі, проведений через початок побудови в точці 0. Проекції вектора струму I на осі q та d є відповідно поперечною I_q та поздовжньою I_d складовими струму.

З кінця вектора jIX_σ опускається перпендикуляр на поперечну вісь машини q. Проведений відрізок відповідає спаду напруги $jI_qX_{aq.н}$ й фізично тотожний зниженню напруги на виводах обмотки якоря за рахунок дії поперечного магнітного потоку в повітряному проміжку машини. Після сполучення початку побудови точки 0 з кінцем вектора $jI_qX_{aq.н}$ отримують вектор ЕРС $E_{\delta d}$, яка індукується результуючим магнітним потоком машини по поздовжній осі (магнітний потік збудження та поздовжньої реакції якоря).

Довжину вектора $E_{\delta d}$ відкладають на осі ординат характеристики холостого ходу та визначають струм збудження $i_{\delta d}$, який відповідає результуючій МРС машини по поздовжній осі.

Згідно з рівнянням рівноваги МРС (для індуктивного навантаження)

$$\dot{F}_f - \dot{F}_{ad} = \dot{F}_{\delta d}, \tag{3.12}$$

струм збудження машини, необхідний для підтримання заданого (номінального) режиму буде дорівнювати

$$i_{fн} = i_{ad.н} + i_{\delta d}. \tag{3.13}$$

Вказана сума є алгебраїчною, оскільки додавання векторів МРС та відповідних їх струмів збудження ведеться лише в межах однієї (поздовжньої) осі.

Для продовження побудови в масштабі струму збудження до струму $i_{\delta d}$ додається приведене значення поздовжньої складової струму якоря, якщо

побудова ведеться у відносних одиницях, то $I_d^* = i_{ad.н}^*$. По зворотній побудові на площині характеристики холостого ходу для знайденого струму збудження в номінальному режимі $i_{fн}$ визначається величина ЕРС $E_{fн}$ та відкладається відповідно вектор на поперечній осі машини q. Визначається зміна напруги за виразом (3.10).

Визначення напруги на обмотці збудження

В п. 4 завдання слід визначити напругу на обмотці збудження в номінальному режимі $u_{fн}$, вона розраховується за відомим струмом збудження, знайденим за векторною діаграмою та опором обмотки збудження

$$u_{fн} = i_{fн} \cdot r_f. \tag{3.14}$$

Визначення втрат, коефіцієнта корисної дії та моменту генератора

Механічні втрати машини вказані в табл. 3.1. Магнітні втрати з врахуванням додаткових втрат для заданого режиму роботи машини визначаються за співвідношенням (для номінального режиму $U = U_н$)

$$\Delta p_{маг} = \Delta p_{маг.н} \cdot \left(\frac{U}{U_н} \right)^2, \tag{3.15}$$

де $\Delta p_{маг.н}$ – магнітні втрати для номінального режиму роботи машини з табл. 3.1.

Електричні втрати в обмотці якоря:

$$\Delta p_{ел} = 3 \cdot I^2 \cdot R_a. \tag{3.16}$$

Потужність, що споживається збуджувачем на валу генератора (береться ККД збуджувача 0,85):

$$\Delta p_{зб} = \frac{u_f \cdot i_f}{0{,}85}. \tag{3.17}$$

Повні втрати потужності в машині:

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_{мех} + \Delta p_{маг} + \Delta p_{ел} + \Delta p_{зб}. \tag{3.18}$$

Потужність на валу машини в режимі генератора:

$$P_{вал} = P_н + \Delta p_\Sigma. \tag{3.19}$$

Коефіцієнт корисної дії в режимі генератора:

$$\eta_н = \frac{P_н}{P_{вал}}. \tag{3.20}$$

Момент, який передається через вал машини:

$$M_н = \frac{P_{вал}}{\omega_н}. \tag{3.21}$$

Побудова кутової характеристики генератора

Для побудови кутової характеристики неявнополюсного генератора при паралельній роботі з мережею слід скористатись виразом

$$M = \frac{m \cdot U_б \cdot E_{fн}}{\omega_н \cdot X_c} \sin(\theta), \tag{3.22}$$

а для явнополюсного генератора – виразом

$$M = \frac{m \cdot U_б \cdot E_{fн}}{\omega_н \cdot X_d} \sin(\theta) + \frac{m U_б^2}{2 \cdot \omega_н} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\theta), \tag{3.23}$$

задаючись при цьому значеннями кута електромагнітного навантаження θ від $-\pi$ до $+\pi$ з кроком 0,01 рад.

Кутові характеристики справедливі як для генераторного, так і для двигунного режимів роботи синхронної машини. Тому для всього можливого діапазону значень кута $\theta \in [-\pi; \pi]$ повна кутова характеристика моменту (явнополюсної машини) матиме наближений вигляд, наведений на рис. 3.3.

Визначити кут $\theta_н$, що відповідає номінальній потужності генератора та номінальному моменту (з нехтуванням втратами) можна графічно з використанням отриманої кутової характеристики, як наведено на рис. 3.3. Для

цього з точки $M_н$ проводять паралельно до осі кута θ відрізок до його перетину з кутовою характеристикою. З отриманої точки перетину опускають перпендикуляр на вісь кута навантаження θ. Отриманий відрізок на осі кута θ в масштабі відповідає шуканому значенню $\theta_н$.

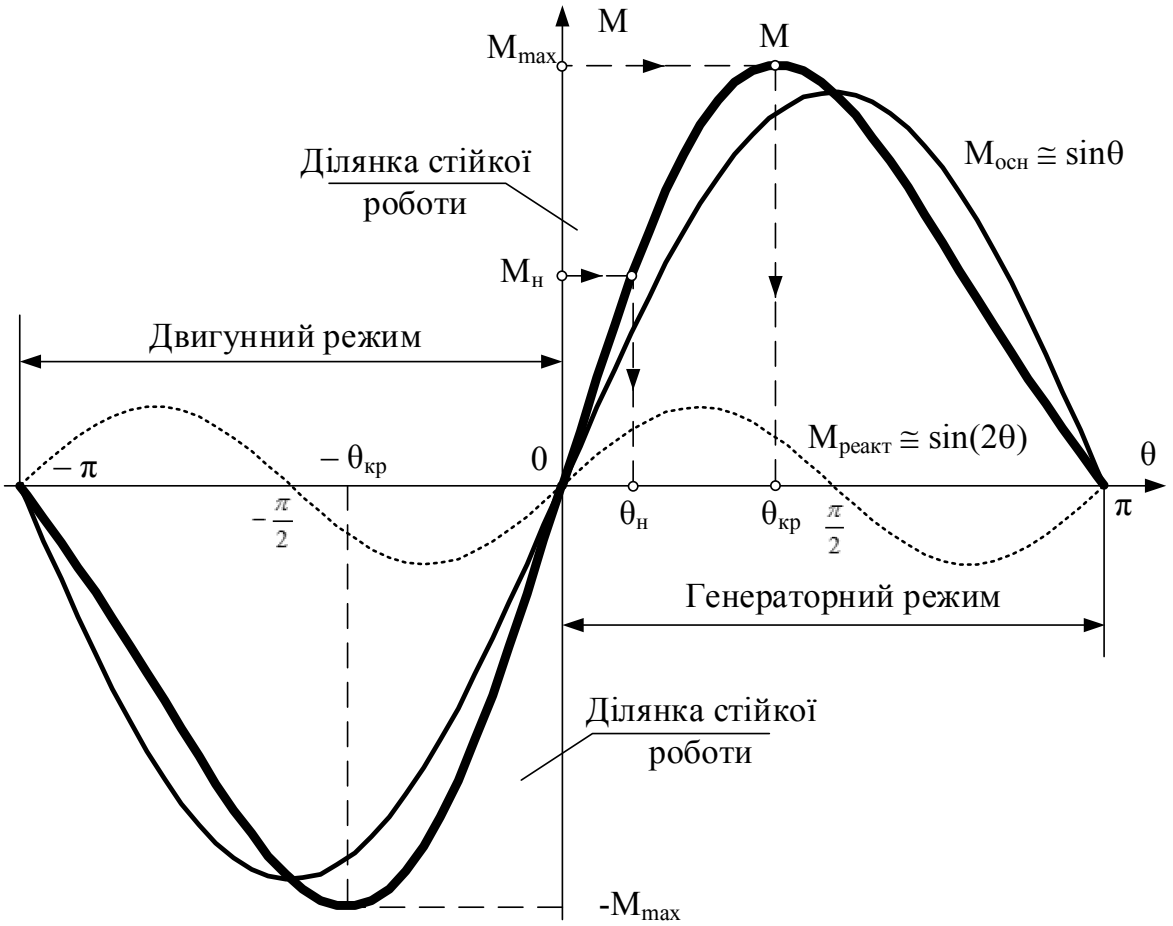


Рисунок 3.3 – Повна кутова характеристика моменту синхронної машини

Критичний кут навантаження $\theta_{кр}$, що відповідає максимальній потужності та моменту, для неявнополюсної машини має значення π/2. Для явнополюсної машини цей кут можна обчислити таким способом. Визначається спеціальний коефіцієнт співвідношення напруг

$$\beta = \frac{E_{fн}}{4 \cdot U_н \cdot \left(\frac{X_d}{X_q} - 1 \right)}. \qquad (3.24)$$

Потім за допомогою цього коефіцієнта визначається критичний кут $\theta_{кр}$:

$$\theta_{кр} = \arccos\left(\sqrt{\beta^2 + 0{,}5} - \beta\right). \tag{3.25}$$

Критичне значення моменту електричної машини M_{max} отримують при підстановці знайденого значення $\theta_{кр}$ у вираз кутової характеристики моменту (3.22) або (3.23) залежно від типу машини. Отримане після обчислення значення M_{max} дозволяє обчислити статичну перевантаженість генератора:

$$\lambda = \frac{M_{max}}{M_н}. \tag{3.26}$$

Для визначення частоти власних коливань ротора необхідно попередньо визначити питомий синхронізувальний момент при номінальному режимі роботи машини:

$$M_c = \frac{m \cdot U_б \cdot E_{fн}}{\omega_н \cdot X_d}\cos(\theta_н) + \frac{mU_б^2}{\omega_н}\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\cos(2\theta_н). \tag{3.27}$$

Кількість пар полюсів синхронної машини ($p \in N$):

$$p = \frac{60 \cdot f}{n_н}. \tag{3.28}$$

Частота власних коливань швидкості ротора відносно синхронної частоти обертання

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{M_c \cdot p}{J}}. \tag{3.29}$$

Визначення струмів короткого замикання

Визначаються повні опори обмотки якоря прямої Z_1, зворотної Z_2 та нульової Z_0 послідовностей:

$$Z_1 = \sqrt{R_a^2 + X_d^2}, \tag{3.30}$$

$$Z_2 = \sqrt{R_a^2 + X_2^2}, \tag{3.31}$$

$$Z_0 = \sqrt{R_a^2 + X_0^2}. \tag{3.32}$$

Визначаються усталені значення струмів короткого замикання (в амперах):

– трифазного:

$$I_{к3} = \frac{E_{fн}}{Z_1}; \tag{3.33}$$

– двофазного:

$$I_{к2} = \frac{\sqrt{3} \cdot E_{fн}}{Z_1 + Z_2}; \tag{3.34}$$

– однофазного:

$$I_{к1} = \frac{3 \cdot E_{fн}}{Z_1 + Z_2 + Z_0}. \tag{3.35}$$

У відносних одиницях отримані значення струмів короткого замикання обчислюються шляхом ділення на базисне значення струму генератора (3.1):

$$I_к^* = \frac{I_к}{I_н}. \tag{3.36}$$

Ударний струм короткого замикання (в амперах) згідно з ГОСТ 183-74 визначається за виразом

$$I_{уд} = 1{,}05 \cdot 1{,}8 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot U_б}{X_d''}, \tag{3.37}$$

а у відносних одиницях, відповідно

$$I^{*}_{уд} = \frac{I_{уд}}{I_{н}}. \qquad (3.38)$$

Визначення повної потужності генератора при паралельній роботі на мережу

Активна потужність (для явнополюсного генератора):

$$P = \frac{m \cdot U_{б} \cdot E_{fн}}{X_{d}} \sin(\theta_{н}) + \frac{mU_{б}^{2}}{2}\left(\frac{1}{X_{q}} - \frac{1}{X_{d}}\right)\sin(2\theta_{н}). \qquad (3.39)$$

Рективна потужність (для явнополюсного генератора):

$$Q = \frac{m \cdot U_{б} \cdot E_{fн}}{X_{d}} \cos(\theta_{н}) + \frac{mU_{б}^{2}}{2}\left(\frac{1}{X_{q}} - \frac{1}{X_{d}}\right)\cos(2\theta_{н}) - \frac{mU_{б}^{2}}{2}\left(\frac{1}{X_{q}} + \frac{1}{X_{d}}\right). \qquad (3.40)$$

Повна потужність обчислюється за формулою:

$$S = \sqrt{P^{2} + Q^{2}}. \qquad (3.41)$$

Для неявнополюсних машин вирази (3.39) та (3.40) спрощуються внаслідок рівності синхронних індуктивних опорів по поздовжній та поперечній осях $X_q = X_d$.

Визначення реактивної потужності генератора при зниженому моменті

При визначенні реактивної потужності, що може віддаватись генератором в мережу за вказаних умов, слід скористатись побудованою кутовою характеристикою моменту (рис. 3.3) для визначення необхідного значення кута електромагнітного навантаження, що відповідає $0{,}5M_{н}$. Варто зазначити, що в області значень кута електромагнітного навантаження $\theta = [0; \theta_{н}]$ момент машини прямо пропорційний куту навантаження. Тому для даних умов з достатньою точністю можна брати $\theta = 0{,}5\theta_{н}$. Далі обчислення реактивної потужності для відомого кута навантаження проводиться за виразом (3.40).

Визначення струмів якоря при синхронізації з мережею

При вмиканні незбудженого синхронного генератора на паралельну роботу амплітудне значення струму якоря буде визначатись за законом Ома:

$$I_{max\,0} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{мер}}{X_d}, \tag{3.42}$$

де $U_{мер}$ – напруга мережі, на яку підключається машина, $U_{мер} = U_н$;

Якщо генератор буде збуджений до номінальної напруги, але умови синхронізації не будуть дотримані, то його увімкнення на паралельну роботу може призвести до важкої аварії. Найскладніший випадок матиме місце тоді, коли вектори напруги мережі та ЕРС генератора будуть мати однакову фазу в контурі підключення обмотки якоря до мережі. Результуюча ЕРС в цьому контурі

$$\Delta\dot{E} = \dot{U}_{мер} + \dot{U}_{ген} = 2 \cdot \dot{U}_{мер}. \tag{3.43}$$

Таке взаємне розташування векторів напруги та ЕРС еквівалентне до подвійного короткого замикання. Ударне значення струму в такому випадку перевищить ударний струм раптового короткого замикання в два рази, а електромагнітні моменти та зусилля зростуть в чотири рази. Амплітудне значення струму якоря у випадку невиконання умов синхронізації

$$I_{max} = \frac{\sqrt{2} \cdot \Delta E}{X_d} = \frac{2\sqrt{2} \cdot U_б}{X_d}. \tag{3.44}$$

Визначення механічної потужності при синхронізації з мережею

Механічна потужність, яка передається через вал приводної турбіни до генератора при вмиканні генератора на паралельну роботу методом точної синхронізації, дорівнює втратам потужності на нагрівання магнітопроводу від перемагнічування та вихрових струмів (магнітним втратам), втратам потужності на подолання опору тертя в підшипниках та системі вентиляції (механічним втратам) та втратам в збуджувачі. Перед вмиканням генератора на паралельну роботу струм в обмотці якоря відсутній, тому електричні втрати рівні в такому режимі нулю. Тобто

$$P_{мех.син} = \Delta p_{мех} + \Delta p_{маг} + \Delta p_{зб}. \quad (3.45)$$

При вмиканні генератора на паралельну роботу методом самосинхронізації струм в обмотку збудження не подається, тому з боку приводної турбіни магнітні втрати потужності не долаються, втрати на збудження також беруться рівними нулю. Таким чином механічна потужність на валу турбіни при вмиканні способом самосинхронізації визначається лише механічними втратами в машині при швидкості обертання, близькій до номінальної:

$$P_{мех.сам} = \Delta p_{мех}. \quad (3.46)$$

Визначення максимального моменту машини при зниженому збудженні

Згідно з рівнянням кутової характеристики моменту синхронної машини без урахування явнополюсності (3.22) її максимальний момент має місце при $\sin\theta = 1$ ($\theta_{кр} = \pi/2$) та прямо пропорційний ЕРС E_f. Якщо струм збудження зменшити до $0{,}5i_{fн}$, то магнітна система машини насичена не буде, і ЕРС E_f також зменшиться наполовину. Отже, максимальний момент, за якого машина зможе утриматись в синхронізмі при половинному збудженні, буде дорівнювати половині свого максимального моменту при повному збудженні, тобто:

$$M_{max\,0,5} = \frac{m \cdot U_б \cdot E_{fн}}{2 \cdot \omega_н \cdot X_c}. \quad (3.47)$$

Визначення потужності машини в режимі холостого ходу двигуна

При виконанні п. 14 завдання потрібно пам’ятати, що при $\cos\varphi = 1$ реактивна потужність машини дорівнює нулю. При роботі синхронного двигуна на холостому ході потужність на валу також дорівнює нулю. Споживана потужність дорівнює втратам холостого ходу машини, що складаються з механічних та магнітних втрат, а також втрат на збудження (електричними втратами можна знехтувати). Відповідно споживана потужність дорівнює:

$$S_{сп} = P_{сп} = \Delta p_{маг} + \Delta p_{мех} + \Delta p_f. \quad (3.48)$$

Визначення струмів та потужності машини в режимі синхронного компенсатора

Для знаходження реактивної потужності, що віддається машиною в режимі синхронного компенсатора при номінальному збудженні (п. 15) знайдемо струм, що протікає через точку підключення машини до мережі:

$$I_р = \frac{\Delta U}{X_d}, \tag{3.49}$$

де ΔU – різниця між ЕРС компенсатора та напругою мережі при номінальному струмі збудження (рис. 3.1, 3.2) та формула (3.10), виражена у вольтах $\Delta U = \Delta U^* \cdot U_б$.

Реактивна потужність, яка віддається в такому режимі в мережу, визначатиметься за виразом

$$Q_р = 3 \cdot U_б \cdot I_р. \tag{3.50}$$

Втрати активної потужності в такому режимі визначатимуться механічними, магнітними та електричними втратами в такому режимі без врахування втрат на збудження. Сумарні втрати, що відповідають вказаному режиму, дорівнюють активній потужності, яка споживається з мережі:

$$P_р = \Delta p_{маг} + \Delta p_{мех} + 3 \cdot I_р^2 \cdot R_а. \tag{3.51}$$

Активний струм, який споживається з мережі в режимі синхронного компенсатора:

$$I_{ра} = \frac{P_р}{3 \cdot U_б}. \tag{3.52}$$

Визначення потужності машини в режимі синхронного компенсатора при втраті збудження

При паралельній роботі синхронного генератора з мережею існує можливість втрати збудження (п. 16). В такому випадку синхронні генератори переходять в асинхронний режим і їх швидкість обертання буде збільшуватись до тих пір, поки не встановиться рівновага між обертовим моментом на валу та електромагнітним моментом машини. При цьому машина

буде споживати з мережі намагнічувальний струм $I_м$, який визначатиме споживану реактивну потужність в такому режимі:

$$I_м = \frac{2 \cdot U_б}{X_d + X_q}. \quad (3.53)$$

Споживана реактивна потужність при втраті збудження:

$$Q_м = 3 \cdot U_б \cdot I_м. \quad (3.54)$$

3.3 Приклад розрахунку

Розглядається синхронний генератор з параметрами, вказаними в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Дані синхронного генератора

Основні дані				Опори, Ом								i_{f0}, А	Втрати, кВт		J, т·м^2
$S_н$, МВА	$P_н$, МВт	$n_н$, об/хв	$U_{нл}$, кВ	$X_σ$	X_d	X_q	X''_d	X_2	X_0	R_a	r_f		$Δp_{маг}$	$Δp_{мех}$	
40	36	150	11	0,465	4,5	2,4	1,35	2,25	0,275	0,085	0,325	525	150	95	95

В ППП MathCAD розрахунок синхронного генератора можна здійснити у такій послідовності.

$S_н := 40$ МВА; $P_н := 36$ МВт; $U_н := 11$ кВ;

$n_н := 150$ об/хв;

$X_σ := 0.465$ Ом; $X_d := 4.5$ Ом; $X_q := 2.4$ Ом.

$X''_d := 1.35$ Ом; $X_2 := 2.25$ Ом; $X_0 := 0.275$ Ом;

$R_a := 0.085$ Ом; $r_f := 0.325$ Ом; $i_{f0} := 525$ А;

$Δp_{маг} := 150$ кВт; $Δp_{мех} := 95$ кВт; $J := 95$ т·м^2.

Визначення базисних величин

Базисний струм генератора:

$$I_б := \frac{S_н \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_н}, \qquad I_б = 2099.46 \text{ А}.$$

Базисна напруга генератора:

$$U_б := \frac{U_н \cdot 10^3}{\sqrt{3}}, \qquad U_б = 6350.85 \text{ В}.$$

Базисний опір генератора:

$$Z_б := \frac{U_б}{I_б}, \qquad Z_б = 3.03 \text{ Ом}.$$

Базисна потужність генератора:

$$S_б := S_н \cdot 10^6, \qquad S_б = 4 \times 10^7 \text{ Вт}.$$

Кутова швидкість генератора:

$$\omega_н := \frac{2\pi n_н}{60}, \qquad \omega_н = 15.71 \text{ рад/с}.$$

Базисний момент генератора:

$$M_б := \frac{S_б}{\omega_н}, \qquad M_б = 2.55 \times 10^6 \text{ Нм}.$$

Базисний струм збудження:

$$i_{fб} := i_{f0}, \qquad i_{fб} = 525 \text{ А}.$$

Побудова векторної діаграми для номінального режиму

Аргумент коефіцієнта потужності генератора:

$$\phi := \operatorname{acos}\left(\frac{P_н}{S_н}\right), \qquad \frac{\phi \cdot 180}{\pi} = 25.84 \text{ град}.$$

Номінальний коефіцієнт потужності генератора: $\cos(\phi) = 0.9$.

Нормальна характеристика холостого ходу генератора:

$$i_f := (0 \quad 0.5 \quad 1 \quad 1.5 \quad 2 \quad 2.5 \quad 3 \quad 3.5),$$

$$E_f := (0 \quad 0.53 \quad 1 \quad 1.16 \quad 1.25 \quad 1.31 \quad 1.35 \quad 1.38).$$

Графік нормальної характеристики синхронного генератора приведений на рисунку 3.4.

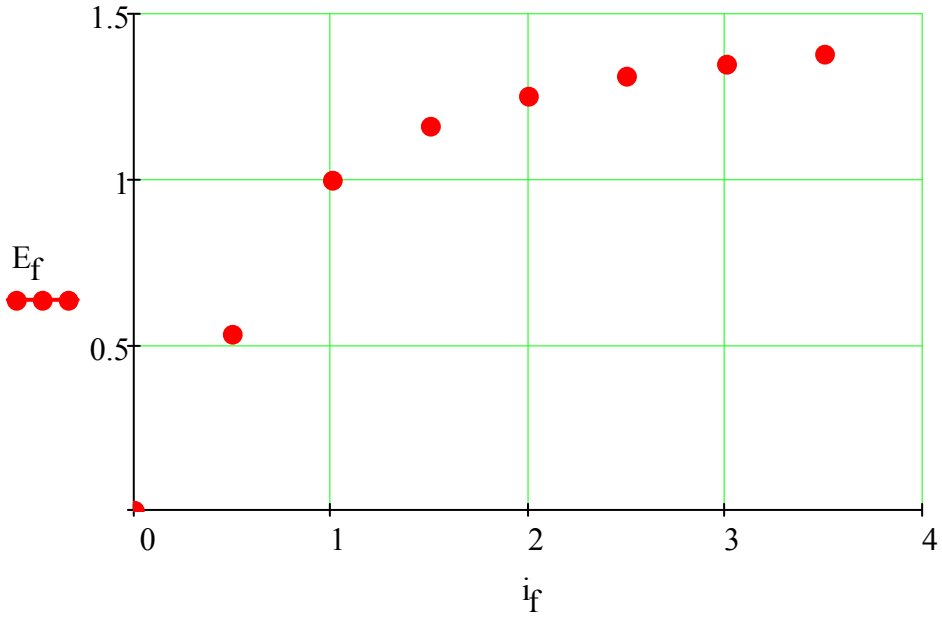


Рисунок 3.4 – Графік нормальної характеристики синхронного генератора

Індуктивний опір реакції якоря по поздовжній осі:

$X_{ad} := X_d - X_\sigma,$ $X_{ad} = 4.04$ Ом.

Індуктивний опір реакції якоря по поперечній осі:

$X_{aq} := X_q - X_\sigma,$ $X_{aq} = 1.93$ Ом.

Насичене значення індуктивного опору реакції якоря по поперечній осі:

$X_{aqн} := X_{aq} \cdot 1.15$, $X_{aqн} = 2.23$ Ом.

Спади напруг на опорах обмотки якоря згідно з основним рівнянням:

$$IR_a := \frac{I_б \cdot R_a}{U_б},$$ $IR_a = 0.03$ в.о.

$$IX_\sigma := \frac{I_б \cdot X_\sigma}{U_б},$$ $IX_\sigma = 0.15$ в.о.

$$IX_{aqн} := \frac{I_б \cdot X_{aqн}}{U_б},$$ $IX_{aqн} = 0.74$ в.о.

Векторна діаграма явнополюсного синхронного генератора подана на рисунку 3.5.

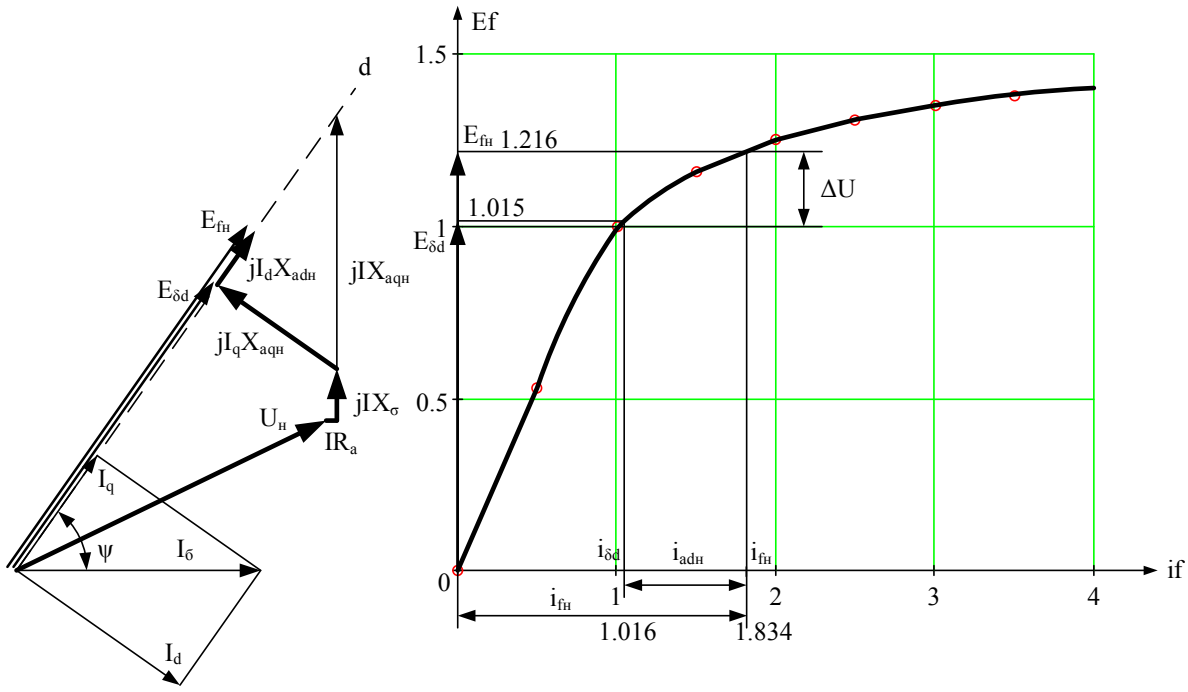


Рисунок 3.5 – Векторна діаграма явнополюсного синхронного генератора

Визначаємо з векторної діаграми кут ψ між ЕРС та струмом якоря:

$$\psi := \frac{54.92 \cdot \pi}{180}, \qquad \psi = 0.96 \text{ рад.}$$

Поздовжня складова струму якоря:

$$I_d := I_б \cdot \sin(\psi), \qquad I_d = 1718.09 \text{ А.}$$

Номінальна фазна напруга генератора:

$$U_{нф} := U_б, \qquad U_{нф} = 6350.85 \text{ В.}$$

Поперечна складова струму якоря та спад напруги від нього:

$$I_q := I_б \cdot \cos(\psi), \qquad I_q = 1206.6 \text{ А.}$$

$$IqX_{aqн} := \frac{I_q \cdot X_{aqн}}{U_б}, \qquad IqX_{aqн} = 0.42 \text{ в.о.}$$

ЕРС від сумарного магнітного потоку за векторною діаграмою:

$$E_{δd} := 1.015 \text{ в.о.}$$

Струм збудження для індукування ЕРС Eδd за векторною діаграмою:

$$i_{δd} := 1.016 \text{ в.о.}$$

Відносне значення струму якоря по поздовжній осі:

$$i_{adн} := \frac{I_d}{I_б}, \qquad i_{adн} = 0.818 \text{ в.о.}$$

Відносне значення струму збудження в номінальному режимі:

$$I_{fн} := i_{δd} + i_{adн}, \qquad I_{fн} = 1.834 \text{ в.о.}$$

ЕРС генератора в номінальному режимі з векторної діаграми:

$$e_{fн} := 1.216 \text{ в.о.}$$

Зміна напруги при скиданні навантаження:

$$Δu_{\%} := \left(e_{fн} - \frac{U_{нф}}{U_б}\right)\cdot 100, \qquad Δu_{\%} = 21.6 \text{ \%.}$$

Струм збудження та зміна напруги у фізичних одницях:

$$i_{fн} := I_{fн}\cdot i_{fб}, \qquad i_{fн} = 963.03 \text{ А.}$$

$$E_{fн} := e_{fн}\cdot U_б, \qquad E_{fн} = 7722.64 \text{ В.}$$

$$ΔU := \frac{Δu_{\%}}{100}\cdot U_б, \qquad ΔU = 1371.78 \text{ В.}$$

Визначення напруги на обмотці збудження

$$u_{fн} := i_{fн}\cdot r_f, \qquad u_{fн} = 312.99 \text{ В.}$$

Визначення втрат, ККД та моменту генератора

Електричні втрати в номінальному режимі:

$$Δp_{ел} := \frac{3\cdot I_б^2\cdot R_a}{1000}, \qquad Δp_{ел} = 1123.97 \text{ кВт.}$$

Потужність, що споживається збуджувачем:

$$Δp_{зб} := \frac{u_{fн}\cdot i_{fн}}{0.85\cdot 1000}, \qquad Δp_{зб} = 354.61 \text{ кВт.}$$

Повні втрати потужності:

$$Δp_{\sum} := Δp_{ел} + Δp_{зб} + Δp_{маг} + Δp_{мех},$$

$$Δp_{\sum} = 1723.57 \text{ кВт.}$$

Потужність на валу машини в режимі генератора:

$$P_{вал} := P_н + \frac{\Delta p_\Sigma}{1000} \quad , \qquad P_{вал} = 37.72 \ \text{МВт}.$$

Коефіцієнт корисної дії генератора:

$$\eta_н := \frac{P_н}{P_{вал}} \quad , \qquad \eta_н = 0.954 \ \text{в.о.}$$

Момент, який передається через вал машини:

$$M_н := \frac{P_{вал} \cdot 1000}{\omega_н} \quad , \qquad M_н = 2401.56 \ \text{кНм}.$$

Побудова кутової характеристики генератора

Діапазон зміни кута електромагнітного навантаження:

$$\theta := -3.14 , -3.13 .. 3.14 .$$

Кутова характеристика моменту електричної машини:

$$M_{осн}(\theta) := \frac{3 \cdot U_б \cdot E_{fн}}{\omega_н \cdot X_d} \cdot \sin(\theta),$$

$$M_{реакт}(\theta) := \frac{3 \cdot U_б^2}{2 \cdot \omega_н} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin(2 \cdot \theta),$$

$$M(\theta) := M_{осн}(\theta) + M_{реакт}(\theta) .$$

Кутові характеристики синхронної машини подані на рисунку 3.6.

Номінальний кут навантаження:

$\theta := 0$

Given

$M(\theta) = M_н \cdot 1000$

$\theta_н := \text{Find}(\theta)$

$\theta_н = 0.95 \ \ (\text{рад})$

$$\theta_{н.гр} := \frac{\theta_н \cdot 180}{\pi}, \qquad \theta_{н.гр} = 54.41 \ \text{град}.$$

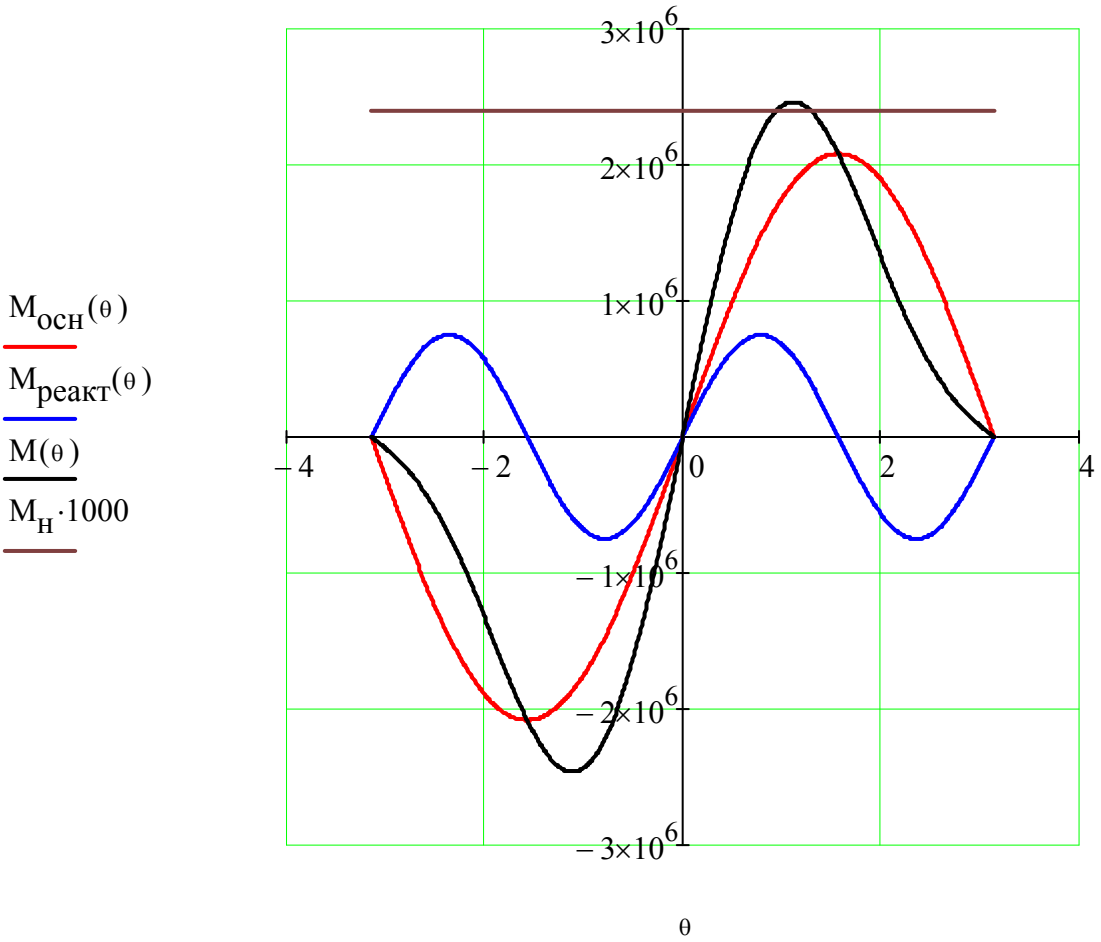


Рисунок 3.6 – Кутові характеристики синхронної машини

Коефіцієнт співвідношення напруг:

$$\beta := \frac{E_{fн}}{4 \cdot U_б \cdot \left(\frac{X_d}{X_q} - 1\right)}, \qquad \beta = 0.35 \text{ в.о.}$$

Критичний кут навантаження:

$$\theta_{кр} := \operatorname{acos}\left(\sqrt{\beta^2 + 0.5} - \beta\right), \qquad \theta_{кр} = 1.11 \text{ рад.}$$

$$\theta_{кр.гр} := \frac{\theta_{кр} \cdot 180}{\pi}, \qquad \theta_{кр.гр} = 63.87 \text{ рад.}$$

Критичний момент:

$$M_{кр} := \frac{M(\theta_{кр})}{1000}, \qquad M_{кр} = 2461.05 \text{ кНм.}$$

Статична перевантаженість генератора:

$$\lambda := \frac{M_{кр}}{M_н}, \qquad \lambda = 1.02 \quad .$$

Питомий синхронізуючий момент при номінальному навантаженні

$$M_c := \left[\frac{3\cdot U_б\cdot E_{fн}}{\omega_н\cdot X_d}\cdot\cos\left(\theta_н\right) + \frac{3\cdot U_б^{\,2}}{\omega_н}\cdot\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\cdot\cos\left(2\cdot\theta_н\right)\right]\cdot 1000^{-1},$$

$$M_c = 728.45 \text{ кНм}.$$

Кількість пар полюсів машини (частота напруги $f := 50$ Гц):

$$p := \frac{60\cdot f}{n_н}, \qquad p = 20 \text{ пар полюсів}.$$

Частота власних коливань ротора відносно швидкості обертання:

$$f_0 := \frac{1}{2\pi}\cdot\sqrt{\frac{M_c\cdot p}{J}}, \qquad f_0 = 1.97 \text{ Гц}.$$

Визначення струмів короткого замикання

Повний опір обмотки якоря при короткому замиканні :

- для струмів прямої послідовності:

$$Z_1 := \sqrt{R_a^{\,2} + X_d^{\,2}}, \qquad Z_1 = 4.5 \text{ Ом};$$

- для струмів зворотної послідовності:

$$Z_2 := \sqrt{R_a^{\,2} + X_2^{\,2}}, \qquad Z_2 = 2.25 \text{ Ом};$$

- для струмів нульової послідовності:

$$Z_0 := \sqrt{R_a^{\,2} + X_0^{\,2}}, \qquad Z_0 = 0.29 \text{ Ом}.$$

Струм трифазного симетричного короткого замикання:

$$I_{к3} := \frac{E_{fн}}{Z_1}, \qquad I_{к3} = 1715.84 \text{ А}.$$

$$I'_{к3} := \frac{I_{к3}}{I_б}, \qquad I'_{к3} = 0.82 \text{ в.о.}$$

Струм двофазного короткого замикання:

$$I_{к2} := \frac{\sqrt{3}\cdot E_{fн}}{Z_1 + Z_2}, \qquad I_{к2} = 1980.92 \text{ А.}$$

$$I'_{к2} := \frac{I_{к2}}{I_б}, \qquad I'_{к2} = 0.94 \text{ в.о.}$$

Струм однофазного короткого замикання:

$$I_{к1} := \frac{3\cdot E_{fн}}{Z_1 + Z_2 + Z_0}, \qquad I_{к1} = 3290.78 \text{ А.}$$

$$I'_{к1} := \frac{I_{к1}}{I_б}, \qquad I'_{к1} = 1.57 \text{ в.о.}$$

Ударний струм короткого замикання:

$$I_{уд} := 1.05\cdot 1.8\cdot \frac{\sqrt{2}\cdot U_б}{X''_d}, \qquad I_{уд} = 12574.05 \text{ А.}$$

$$I'_{уд} := \frac{I_{уд}}{I_б}, \qquad I'_{уд} = 5.99 \text{ в.о.}$$

Визначення потужності при паралельній роботі на мережу

Активна потужність, яка віддається при номінальному куті $\theta_н$:

$$P := \left[\frac{3\cdot U_б\cdot E_{fн}}{X_d}\cdot\sin(\theta_н) + \frac{3\cdot U_б^2}{2}\cdot\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\cdot\sin(2\cdot\theta_н)\right]\cdot 1000^{-1},$$

$$P = 37723.57 \text{ кВт.}$$

Реактивна потужність, яка віддається при номінальному куті $\theta_н$:

$$Q := \frac{\left[\frac{3\cdot U_б\cdot E_{fн}}{X_d}\cdot\cos(\theta_н) + \frac{3\cdot U_б^2}{2}\cdot\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\cdot\cos(2\cdot\theta_н) - \frac{3\cdot U_б^2}{2}\cdot\left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d}\right)\right]}{1000},$$

$$Q = -23416.38 \text{ квар.}$$

Від’ємне значення реактивної потужності свідчить про напрямок передачі її від мережі до машини.

Повна потужність, яка віддається в мережу:

$$S := \sqrt{P^2 + Q^2} \qquad S = 44400.39 \text{ кВА}.$$

Визначення реактивної потужності при зниженому моменті

Кут електромагнітного навантаження при зниженому моменті:

Given

$$M(\theta) = \frac{M_н \cdot 1000}{2}$$

$$\theta_{05н} := \text{Find}(\theta)$$

$$\theta_{05н} = 0.35 \text{ (рад)}$$

$$\theta_{05н.гр} := \frac{\theta_{05н} \cdot 180}{\pi}, \qquad \theta_{05н.гр} = 20.14 \text{ град}.$$

Реактивна потужність, яка віддається при зниженому моменті:

$$Q_{05} := \frac{\left[\frac{3 \cdot U_б \cdot E_{fн}}{X_d} \cdot \cos(\theta_{05н}) + \frac{3 \cdot U_б^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \cdot \cos(2 \cdot \theta_{05н}) - \frac{3 \cdot U_б^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d}\right)\right]}{1000},$$

$$Q_{05} = 1020.45 \text{ квар}.$$

Отже, при зниженні активного навантаження на генератор, реактивна потужність змінила знак і віддається в мережу.

Визначення струмів якоря при синхронізації з мережею

Амплітудне значення струму якоря при вмиканні незбудженого генератора на паралельну роботу:

$$I_{max0} := \frac{\sqrt{2} \cdot U_б}{X_d}, \qquad I_{max0} = 1995.88 \text{ А}.$$

Амплітудне значення струму якоря при вмиканні генератора на паралельну роботу з невитриманими умовами синхронізації:

$$I_{max} := \frac{2\sqrt{2} \cdot U_б}{X_d}, \qquad I_{max} = 3991.76 \text{ А}.$$

Визначення механічної потужності при синхронізації з мережею

Механічна потужність турбіни при вмиканні генератора на паралельну роботу методом точної синхронізації:

$$P_{мех.син} := \Delta p_{мех} + \Delta p_{маг} + \Delta p_{зб},$$

$$P_{мех.син} = 599.61 \text{ кВт.}$$

Механічна потужність турбіни при вмиканні генератора на паралельну роботу методом самосинхронізації:

$$P_{мех.сам} := \Delta p_{мех}, \qquad P_{мех.сам} = 95 \text{ кВт.}$$

Визначення максимального моменту при зниженому збудженні

Максимальний момент при зниженому збудженні без врахування явнополюсності:

$$M_{max05} := \frac{3 \cdot U_б \cdot E_{fн}}{2 \cdot \omega_н \cdot X_d} \cdot 1000^{-1}, \quad M_{max05} = 1040.77 \text{ кНм.}$$

Визначення потужності машини в режимі холостого ходу

$$S_{сп} := \Delta p_{мех} + \Delta p_{маг} + \Delta p_{зб}, \quad S_{сп} = 599.61 \text{ кВт.}$$

Визначення струмів та потужності машини в режимі синхронного компенсатора

Струм, що протікає через вузол підключення компенсатора:

$$I_p := \frac{\Delta U}{X_d}, \qquad I_p = 304.84 \text{ А.}$$

Реактивна потужність, яка віддається компенсатором:

$$Q_p := 3 \cdot U_б \cdot I_p \cdot 10^{-3}, \qquad Q_p = 5808 \text{ квар.}$$

Активна потужність, яка споживається компенсатором:

$$P_p := \Delta p_{мех} + \Delta p_{маг} + \frac{3 \cdot I_p^{\,2} \cdot R_a}{10^3}, \quad P_p = 268.7 \text{ кВт.}$$

Активний струм, який споживається з мережі:

$$I_{pa} := \frac{P_p \cdot 1000}{3 \cdot U_б}, \qquad I_{pa} = 14.1 \text{ А.}$$

Визначення потужності машини в режимі синхронного компенсатора при втраті збудження

Намагнічувальний струм при втраті збудження

$$I_м := \frac{2 \cdot U_б}{X_d + X_q}, \qquad I_м = 1840.83 \ \text{А}.$$

Споживана реактивна потужність при втраті збудження

$$Q_м := 3 \cdot U_б \cdot I_м \cdot 10^{-3}, \qquad Q_м = 35072.46 \ \text{квар}.$$

4 Машини постійного струму

4.1 Завдання

Для машини постійного струму, що має дані, наведені в табл. 4.1, виконати такі розрахунки й побудови:

- для режиму генератора:

1) визначити тип обмотки якоря, розрахувати її кроки, накреслити розгорнуту схему обмотки, вказавши на ній положення й полярність полюсів і щіток, напрямок обертання якоря, напрямок ЕРС (струму) в усіх активних провідниках обмотки. Накреслити схему паралельних віток (електричну схему) обмотки, вказавши на ній номери секцій, що входять в паралельні вітки і комутувальних, напрямки струмів в колах і загального струму якоря;

2) накреслити принципові електричні схеми генераторів незалежного й паралельного збудження та описати призначення всіх елементів схем;

3) використовуючи задану нормальну характеристику холостого ходу (ХХ) (табл. 4.2), побудувати характеристичний трикутник генератора, що відповідає його номінальному режиму роботи. Визначити номінальний і одиничний (базовий) струми збудження генератора, а також струм збудження, необхідний для компенсації розмагнічувальної дії поперечної реакції якоря. Визначити номінальну зміну напруги генератора для випадків незалежного й паралельного збудження;

4) для генератора паралельного збудження в номінальному режимі навантаження розрахувати:

а) постійні й змінні втрати потужності;

б) номінальний і максимальний ККД;

- для режиму двигуна паралельного збудження:

5) розрахувати значення пускового струму в початковий момент безреостатного (прямого) пуску при номінальній напрузі на затискачах двигуна. Визначити значення опору пускового реостата, який необхідно ввімкнути в коло якоря двигуна, щоб його пусковий струм дорівнював $1{,}5I_{я.н.}$. Розрахувати кратності пускового струму при прямому й реостатному способах пуску;

6) визначити значення додаткового опору, при вмиканні якого в коло якоря двигуна він продовжував би обертатися з номінальною швидкістю при номінальній напрузі мережі, струмі якоря, рівному 80% номінального, але при послабленому на 40% магнітному потоці основних полюсів (дією реакції якоря знехтувати);

Таблиця 4.1 – Варіанти завдань до розділу «Машини постійного струму»

№ вар.	$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$n_{ном}$, об/хв	2p	Z	N	2a	$R_я$, Ом	$R_д$, Ом	$R_в$, Ом	$\Delta p_{мех}$, кВт	$\Delta p_м$, кВт
1.	33	230	1470	4	37	1056	2	0,084	0,033	86,1	0,42	0,51
2.	3,8	115	2850	4	25	720	2	0,135	0,04	88,6	0,015	0,017
3.	6,2	230	2840	4	28	702	2	0,384	0,172	154	0,03	0,045
4.	2,6	230	2850	4	18	1008	2	1,05	0,35	345	0,01	0,02
5.	50	115	1450	4	48	162	4	0,0087	0,00473	11	0,8	0,95
6.	3,8	230	2880	4	28	720	4	0,54	0,16	390	0,016	0,025
7.	27	230	1430	4	38	420	4	0,0957	0,032	51,6	0,42	0,047
8.	50	230	1450	4	50	290	2	0,0336	0,0145	35,8	0,8	1,0
9.	100	460	950	8	49	490	2	0,0563	0,02115	154,6	0,96	1,4
10.	130	230	915	8	52	648	8	0,00684	0,00312	17,5	1,2	1,25
11.	190	460	1430	6	50	300	2	0,017	0,0092	63	1,67	1,9
12.	6,2	115	2860	6	39	648	6	0,089	0,0352	30	0,03	0,02
13.	3,2	115	1450	4	26	1080	4	0,266	0,124	60	0,006	0,015
14.	50	460	1420	6	38	580	2	0,134	0,0544	129,2	0,8	1,3
15.	100	115	975	6	48	232	6	0,0027	0,00122	7,85	0,98	1,0
16.	7,2	230	2810	4	26	1080	2	0,266	0,125	180	0,042	0,05
17.	11	115	2880	4	37	992	4	0,0395	0,0156	42,4	0,08	0,045
18.	14	230	2830	6	34	744	2	0,1	0,05	134	0,2	0,28
19.	9	115	1450	4	31	1488	2	0,072	0,0334	35	0,032	0,04
20.	25	230	2850	4	39	992	2	0,044	0,018	76	0,45	0,55
21.	100	230	1000	6	51	252	6	0,0136	0,00544	49	1,0	1,25
22.	7,8	230	950	4	24	810	4	0,414	0,132	43	0,06	0,08
23.	11	460	1450	4	30	1240	2	1,0	0,304	372	0,09	0,28
24.	130	460	1000	8	57	324	2	0,028	0,018	113	1,25	1,5
25.	21	115	1450	4	38	420	2	0,033	0,011	12,5	0,4	0,35
26.	25	115	980	6	36	210	6	0,0263	0,01	6	0,38	0,45
27.	35	115	1450	8	25	162	2	0,0143	0,006	10,1	0,42	0,47
28.	105	115	1000	8	56	464	8	0,03	0,0014	10	1,0	1,1
29.	80	230	960	4	45	296	2	0,0215	0,0075	34	0,95	1,2
30.	10,5	230	1460	4	32	560	4	0,44	0,05	136	0,02	0,06
31.	40	230	1450	4	34	544	2	0,0181	0,005	59	0,45	0,54
32.	3,2	230	1480	4	27	1026	2	1,0	0,56	180	0,01	0,032
33.	190	230	980	4	48	200	4	0,0043	0,0028	19	1,5	1,55
34.	70	115	1450	4	44	252	4	0,0051	0,002	12	0,8	0,75
35.	19	230	980	4	40	580	4	0,18	0,063	51,5	0,23	0,37
36.	27	115	1450	4	36	210	4	0,024	0,008	12,85	0,42	0,4
37.	5	230	1450	4	30	868	4	0,56	0,23	126	0,015	0,05
38.	11	230	2850	4	38	992	4	0,182	0,084	160	0,08	0,12

Продовження таблиці 4.1

№ вар.	$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$n_{ном}$, об/хв	2p	Z	N	2a	$R_я$, Ом	$R_д$, Ом	$R_в$, Ом	$\Delta p_{мех}$, кВт	$\Delta p_м$, кВт
39.	80	460	1050	8	48	490	8	0,081	0,033	198	1,0	1,6
40.	63	115	980	4	50	300	4	0,007	0,028	15	0,7	0,76
41.	19	115	1000	4	48	290	2	0,045	0,016	13	0,23	0,28
42.	25	230	1100	4	49	420	2	0,105	0,0383	23,4	0,3	0,4
43.	11,5	115	1500	6	36	992	6	0,044	0,018	25	0,05	0,047
44.	9	230	1440	4	36	1488	4	0,25	0,1	120	0,032	0,09
45.	18	230	2870	4	38	1080	4	0,078	0,0334	120	0,25	0,35
46.	5	115	1450	4	30	868	4	0,14	0,052	32	0,015	0,021
47.	16	230	1400	4	32	576	2	0,224	0,076	10,7	0,12	0,25
48.	35	230	1450	6	39	290	6	0,05	0,019	40,4	0,45	0,52
49.	25	460	980	8	36	870	8	0,51	0,18	36	0,32	0,65
50.	16	115	1430	4	34	578	4	0,0535	0,036	11	0,11	0,12
51.	24,5	230	1000	6	36	432	6	0,105	0,039	40,5	0,31	0,4
52.	30	230	1500	4	32	192	4	0,027	0,016	40,4	0,52	0,6
53.	6,5	115	1420	4	42	756	2	0,1	0,05	36	0,06	0,022
54.	90	230	1450	6	43	172	2	0,013	0,006	38	1,3	1,23
55.	4,8	230	1500	4	27	864	2	0,115	0,067	188	0,02	0,05
56.	70	230	980	4	40	280	2	0,0055	0,0016	16,5	0,6	1,2
57.	110	230	1450	8	44	264	8	0,0045	0,0024	32,5	1,3	1,65
58.	150	230	1440	4	42	252	4	0,00655	0,0028	28	1,62	1,87
59.	13,5	230	1460	4	36	540	2	0,12	0,02	96,4	0,06	0,053
60.	85	230	1000	6	40	200	2	0,0127	0,005	38	1,2	1,2
61.	6	230	1480	4	24	816	2	0,3	0,1	220	0,09	0,06
62.	63	230	980	6	42	302	6	0,025	0,001	56	0,55	1,15
63.	85	460	1470	4	41	410	2	0,059	0,022	177	1,45	1,7
64.	55	115	1450	4	46	568	4	0,0096	0,0035	13,5	0,85	0,97
65.	63	460	1500	4	44	264	2	0,11	0,033	231,2	0,99	1,95
66.	80	115	970	4	44	360	4	0,006	0,0019	8,5	0,96	0,95
67.	27	230	1500	6	48	686	6	0,16	0,09	92	0,45	0,48
68.	3,3	230	1440	4	29	1044	2	0,166	0,11	298	0,005	0,03
69.	32	115	980	4	40	410	4	0,029	0,0075	9	0,42	0,6
70.	32	230	1450	4	43	301	2	0,075	0,03	36	0,75	1,12
71.	32	460	1000	8	48	840	8	0,343	0,14	129,2	0,44	1,6
72.	42	115	980	4	22	176	2	0,01	0,0048	8	0,57	0,72
73.	42	460	960	4	23	368	2	0,058	0,0183	48,4	0,56	0,85
74.	42	460	950	6	36	330	6	0,231	0,0815	162,2	0,55	1,1
75.	14,5	230	1430	4	35	630	2	0,276	0,106	65,2	0,07	0,07
76.	21	230	1500	4	42	516	4	0,132	0,0425	50	0,45	0,65
77.	7,2	115	2850	4	26	800	4	0,065	0,038	50	0,11	0,03

Продовження таблиці 4.1

№ вар.	$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$n_{ном}$, об/хв	2p	Z	N	2a	$R_я$, Ом	$R_д$, Ом	$R_в$, Ом	$\Delta p_{мех}$, кВт	$\Delta p_м$, кВт
78.	70	230	1450	6	49	294	2	0,021	0,0075	48,4	0,8	1,3
79.	55	460	975	4	46	564	4	0,146	0,051	130	0,7	1,4
80.	90	460	1450	4	47	470	2	0,0526	0,024	46	1,3	1,85
81.	5,2	230	2860	4	24	1392	4	0,25	0,101	374	0,03	0,05
82.	85	115	1400	6	42	240	6	0,00525	0,00214	10	1,2	1,0
83.	110	460	1470	8	41	287	2	0,00453	0,0023	32,5	1,31	2,0
84.	65	460	1450	6	46	414	2	0,0835	0,03	162,2	1,0	2,0
85.	10	230	970	4	28	748	4	0,45	0,02	76	0,1	0,15
86.	55	230	950	6	45	360	6	0,0385	0,0143	53,5	0,55	1,1
87.	55	460	1460	8	45	328	2	0,25	0,1	115,6	1,4	1,7
88.	43	115	1000	8	40	240	8	0,019	0,0075	11	0,6	0,75
89.	43	230	1500	6	42	504	6	0,075	0,03	44	0,9	1,3
90.	43	460	2850	4	52	936	2	0,245	0,13	170	1,5	2,0

Таблиця 4.2 – Характеристика ХХ

$I_{з*} = I_з/I_{з0}$, в.о.	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$E_{0*} = E_0/U_н$, в.о.	0,05	0,75	1,00	1,12	1,20	1,26	1,30	1,33

7) розрахувати й побудувати механічну характеристику двигуна n = f(M) при постійному номінальному магнітному потоці основних полюсів (Фн = const). За характеристикою визначити процентну зміну (перепад) швидкості двигуна при переході його від холостого ходу до номінального навантаження;

8) двигун при номінальних значеннях швидкості й магнітного потоку має номінальний момент навантаження на валу ($M_{с.н} = M_н$). З метою переходу на іншу швидкість магнітний потік двигуна зменшили на 40%. Визначити:

а) на скільки процентів необхідно знизити навантаження на валу двигуна з тим, щоб струм його якоря залишився номінальним;

б) значення нової швидкості та її процентну зміну відносно номінальної.

Примітка:

1) позначення:

$P_{ном}$ – номінальна потужність;

$U_{ном}$ – номінальна напруга (для двигуна замість значень напруги 115 В, 230 В і 460 В брати відповідно 110 В, 220 В та 440 В);

$n_{ном}$ – номінальна швидкість обертання;

2p – кількість головних полюсів (кількість додаткових полюсів дорівнює кількості головних);

Z – кількість пазів на якорі;

N – кількість активних провідників обмотки якоря;

2a – кількість паралельних віток обмотки якоря;

$R_я$ – опір обмотки якоря при температурі 20 °С;

$R_д$ – опір додаткових полюсів при температурі 20 °С;

$R_в$ – опір обмотки збудження при температурі 20 °С;

$\Delta p_{мех}$ – механічні втрати в машині;

$\Delta p_м$ – магнітні втрати в машині;

2) всі машини виконані без компенсаційної обмотки;

3) кількість секцій обмотки якоря брати рівною кількості пазів;

4) полярність щіток, напрямок ЕДС в провідниках і напрямок обертання якоря на розгорнутій схемі обмотки визначати при непарному номері варіанта для генератора, при парному – для двигуна.

4.2 Рекомендації до розрахунку

Режим генератора

Побудова обмотки якоря

У всіх варіантах завдання як обмотку якоря використовувати просту петльову (ППО) або просту хвильову (ПХО) обмотки. Тип обмотки визначати за заданими числами полюсів і паралельних віток обмотки.

При рівності

$$2a = 2p \tag{4.1}$$

використовується ППО.

Після визначення типу обмотки розрахувати її кроки. Якщо при розрахунку перший крок обмотки по якорю y_1 виходить не повним (не діаметральним), то з метою економії матеріалу на виготовлення обмотки рекомендується виконувати її з укороченим кроком. З цією ж метою, а також для спрощення технологічного намотування рекомендується виконувати обмотку, яка не перехрещується.

Кроки обмоток:

– перший частковий крок (як для ППО, так і для ПХО):

$$y_1 = \frac{Z}{2p} - \varepsilon, \tag{4.2}$$

де ε – правильний дріб, при якому y_1 дорівнює цілому числу;

– результуючий крок та крок по колектору:

- для ППО:

$$y = y_к = 1; \tag{4.3}$$

- для ПХО:

$$y = y_к = \frac{K-1}{p}, \tag{4.4}$$

де K – число колекторних пластин ($K = S = Z$).

Якщо в ПХО крок по колектору $y_к$ виходить дробовим, то необхідно виконувати обмотку з «мертвою» секцією, зменшивши на одиницю число колекторних пластин.

Полюсний розподіл визначається за формулою

$$\tau = \frac{Z}{2p}. \tag{4.5}$$

Нумерація пазів і колекторних пластин на розгорнутій схемі обмотки повинні збігатися. Число щіток при будь-якому типі обмотки якоря береться рівним числу полюсів.

Ширину щіток на розгорнутій схемі беруть рівною ширині колекторного поділу. Щітки по зовнішньому колу колектора розміщувати симетрично. На розгорнутій схемі обмотки вказати напрямок ЕРС (для генератора) або струму (для двигуна) в усіх активних сторонах секцій. Задавшись полярністю полюсів, визначити полярність щіток генератора і напрямок обертання якоря двигуна.

На електричній схемі обмотки зобразити всі секції умовно, нумеруючи їх відповідно до розгорнутої схеми, а колекторні пластини тільки ті, до

яких дотикаються в даний момент щітки. На схемі нанести напрямки струмів в паралельних вітках і повного струму якоря.

Креслення принципових електричних схем генераторів

Зобразити принципові електричні схеми заданих генераторів з врахуванням наявності обмотки додаткових полюсів, які вмикаються послідовно з обмоткою якоря. Описати призначення всіх елементів схеми.

Побудова характеристичного трикутника генератора та визначення номінальних змін напруг

Номінальний струм навантаження генератора:

$$I_н = \frac{P_н}{U_н}. \tag{4.6}$$

ЕРС генератора незалежного збудження на холостому ході у відносних одиницях:

$$E_{01*} = 1 + \Delta U_{я*} + \Delta E_*, \tag{4.7}$$

де $\Delta U_{я*}$ – спад напруги в колі якоря у відносних одиницях:

$$\Delta U_{я*} = \frac{I_н R_{a75} + \Delta U_щ}{U_н}, \tag{4.8}$$

де $\Delta U_щ$ – спад напруги на щітках ($\Delta U_щ$ = 2 В на одну пару полюсів);

ΔE_* – зменшення ЕРС за рахунок розмагнічувальної дії поперечної реакції якоря:

$$\Delta E_* = 0{,}3\Delta U_{я*}, \tag{4.9}$$

R_{a75} – сумарний опір обмоток якоря і додаткових полюсів при робочій температурі 75 °С:

$$R_{a75} = 1{,}215\left(R_{a20} + R_{д20}\right). \tag{4.10}$$

За вихідними даними будується характеристика холостого ходу $E_{0*} = f(I_{з*})$ машини постійного струму (рис. 4.1).

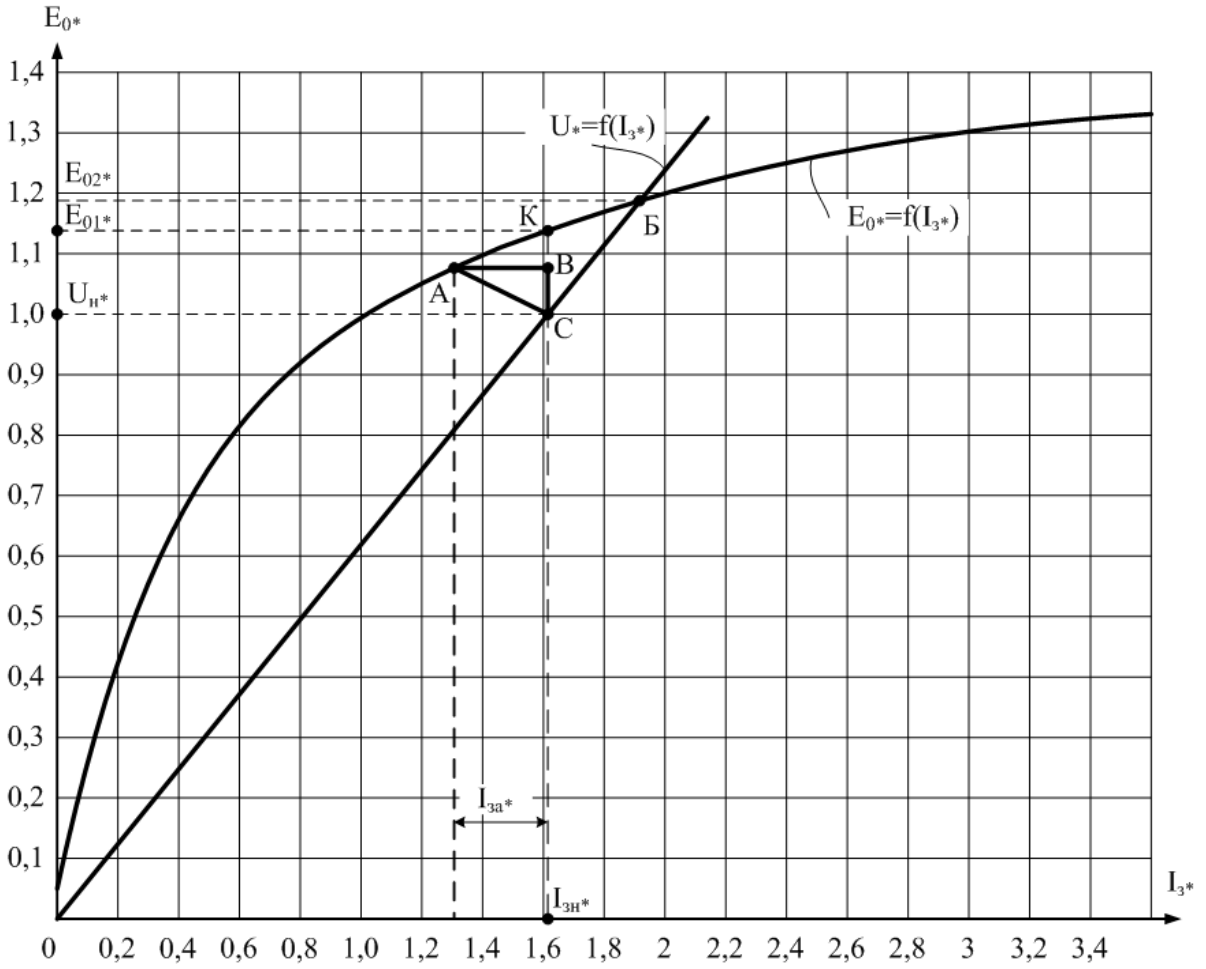


Рисунок 4.1 – Характеристики холостого ходу та кола збудження

Опір обмотки збудження при робочій температурі:

$$R_{з75} = 1{,}215\left(R_{320}\right). \tag{4.11}$$

Номінальний струм збудження:

$$I_{зн} = \frac{U_н}{R_{з75}}. \tag{4.12}$$

Графічні побудови для отримання характеристичного трикутника та розрахунок номінальних величин генератора здійснюють в такій послідовності:

1) будують характеристику холостого ходу генератора у відносних одиницях $E_{0*} = f(I_{з*})$ (рис. 4.1);
2) на осі ординат ЕРС відкладають значення E_{01*}, розраховане за (4.7), що відповідає ЕРС генератора незалежного збудження;
3) провівши пряму з точки, що відповідає E_{01*}, паралельно осі абсцис $I_{з*}$ до перетину з характеристикою холостого ходу, отримують точку К;
4) опустивши перпендикуляр з точки К на вісь $I_{з*}$, отримують відносне значення відносного номінального струму збудження $I_{зн*}$;
5) розраховують базове значення струму збудження генератора:

$$I_{з0} = I_{зн} / I_{зн*}; \tag{4.13}$$

6) на осі ординат відкладають відносне значення номінальної напруги $U_{н*} = 1$;
7) провівши пряму з точки, що відповідає $U_{н*}$, паралельно осі абсцис $I_{з*}$ до перетину з перпендикуляром, що відповідає $I_{зн*}$, отримують точку С;
8) з точки С відкладають відрізок $СВ = \Delta U_{я*}$, розрахований за (4.8);
9) з точки В паралельно осі абсцис проводять відрізок ВА до перетину з характеристикою холостого ходу; з'єднавши точки А, В та С, отримують характеристичний трикутник АВС.

Катет АВ характеристичного трикутника АВС (див. рис. 4.1) характеризує струм збудження у відносних одиницях, необхідний для компенсації розмагнічувальної дії поперечної реакції якоря:

$$АВ = I_{за*} = I_{за}/I_{з0}, \tag{4.14}$$

звідки реальне значення струму збудження, необхідного для компенсації розмагнічувальної дії поперечної реакції якоря:

$$I_{за} = I_{за*}I_{з0}. \tag{4.15}$$

Провівши пряму з початку координат через точку С, отримують характеристику кола збудження $U_* = f(I_{з*})$. З точки Б, точки перетину характеристики холостого ходу $E_{0*} = f(I_{з*})$ з характеристикою кола збудження $U_* = f(I_{з*})$, проводять пряму до перетину з віссю ординат, в результаті чого отримують ЕРС генератора паралельного збудження E_{02}.

Номінальні зміни напруг генераторів незалежного $\Delta U_{н.нез}$ і паралельного $\Delta U_{н.пар}$ збудження:

$$\Delta U_{н.нез} = \frac{E_{01} - U_н}{U_н} \cdot 100 = (E_{01*} - 1) \cdot 100; \quad (4.16)$$

$$\Delta U_{н.пар} = (E_{02*} - 1) \cdot 100. \quad (4.17)$$

ЕРС генератора при номінальному навантаженні:

$$E_{нг} = (1 + \Delta U_{я*}) U_н. \quad (4.18)$$

Розрахунок втрат та ККД для генератора паралельного збудження

Втрати на збудження (excitation losses):

$$\Delta p_{зн} = I_{зн} U_н. \quad (4.19)$$

Постійні втрати (constant losses):

$$\Delta p_{пост\,н} = \Delta p_{мех} + \Delta p_м + \Delta p_{зн}, \quad (4.20)$$

де $\Delta p_{мех}$ – механічні втрати;

$\Delta p_м$ – магнітні втрати.

Номінальний струм якоря:

$$I_{ян} = I_н + I_{зн}. \quad (4.21)$$

Втрати в колі якоря в номінальному режимі

$$\Delta p_{ен} = I_{ян}^2 R_{а\,75} + I_{ян} \Delta U_щ. \quad (4.22)$$

Додаткові втрати (additional losses) в номінальному режимі:

$$\Delta p_{дн} = 0{,}01 P_н. \quad (4.23)$$

Змінні втрати (variable losses) в машині в номінальному режимі:

$$\Delta p_{змін\,н} = \Delta p_{ен} + \Delta p_{дн}. \quad (4.24)$$

Сумарні втрати в машині в номінальному режимі:

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_{\text{пост н}} + \Delta p_{\text{змін н}}. \tag{4.25}$$

Номінальна підведена до генератора потужність

$$P_{1н} = P_{н} + \Delta p_{\Sigma}. \tag{4.26}$$

Номінальний ККД:

$$\eta_{н} = \frac{P_{н}}{P_{1н}} \cdot 100. \tag{4.27}$$

Коефіцієнт навантаження (load factor), при якому $\eta = \eta_{max}$:

$$\beta_{max} = \sqrt{\frac{\Delta p_{\text{пост н}}}{\Delta p_{\text{змін н}}}}, \tag{4.28}$$

а корисна потужність при цьому

$$P_{2m} = \beta_{m} P_{н}. \tag{4.29}$$

Максимальний ККД:

$$\eta_{max} = \frac{P_{2m} \cdot 100}{P_{2m} + 2\Delta p_{\text{пост н}}}. \tag{4.30}$$

Режим двигуна паралельного збудження

Розрахунок процесу пуску

Конструктивні сталі машини:

$$c_{e} = \frac{pN}{60a}, \tag{4.31}$$

$$c_м = \frac{pN}{2\pi a}, \tag{4.32}$$

де p – кількість пар головних полюсів;
N – кількість активних провідників обмотки якоря;
a – кількість паралельних віток обмотки якоря.
Номінальний струм $I_н$, що споживається двигуном з мережі:

$$I_н = \frac{P_н}{U_н}. \tag{4.33}$$

Номінальний струм збудження для двигуна:

$$I_{зн} = \frac{U_н}{R_{з75}}. \tag{4.34}$$

Номінальний струм якоря для двигуна:

$$I_{ян} = I_н - I_{зн}. \tag{4.35}$$

Повний опір кола якоря при 20 °С:

$$R_{а20} = R_{я20} + R_{д20} + R_{щ20}, \tag{4.36}$$

де $R_{щ20}$ – перехідний опір щіткових контактів при 20 °С:

$$R_{щ20} = \frac{\Delta U_щ}{I_{я н} \cdot 1{,}215}. \tag{4.37}$$

Повний опір якірного кола при робочій температурі 75 °С:

$$R_{а75} = 1{,}215 R_{а20}. \tag{4.38}$$

Струм якоря в початковий момент часу:

$$I_{я п} = U_н / R_{а20}. \tag{4.39}$$

Значення пускового реостата для обмеження пускового струму до $1{,}5I_{ян}$:

$$R_{п20} = U_н/1{,}5I_{ян} - R_{а20}, \tag{4.40}$$

Кратності пускових струмів:
– при прямому пуску

$$К_{пі} = I_{яп} / I_{ян}; \tag{4.41}$$

– при реостатному пуску

$$К_{пір} = 1{,}5I_{ян} / I_{ян}, \tag{4.42}$$

Розрахунок додаткового опору в колі якоря

Додатковий опір, який необхідно увімкнути в коло якоря для того, щоб двигун при $I_я = 0{,}8I_{ян}$ і $Ф_1 = 0{,}6Ф_н$ продовжував обертатися з номінальною швидкістю обертання, визначаємо за рівняннями швидкісних характеристик без $R_{дод}$ і з ним:

$$n_н = \frac{U_н - I_{ян} \cdot R_{а75}}{c_e Ф_н} = \frac{U_н - 0{,}8I_{ян} \cdot \left(R_{а75} + R_{дод75}\right)}{c_e \cdot 0{,}6Ф_н}, \tag{4.43}$$

звідки

$$R_{дод75} = 0{,}5\frac{U_н}{I_{ян}} - 0{,}25R_{а75}; \tag{4.44}$$

$$R_{дод20} = \frac{R_{дод75}}{1{,}215}. \tag{4.45}$$

Розрахунок і побудова механічної характеристики

ЕРС двигуна в номінальному режимі:

$$E_{нд} = U_н - I_{ян} \cdot R_{а75}. \tag{4.46}$$

Номінальна швидкість обертання двигуна:

$$n_{нд} = \frac{n_н E_{нд}}{E_{нг}}. \quad (4.47)$$

Номінальний магнітний потік:

$$\Phi_н = \frac{E_{нд}}{c_e n_{нд}}. \quad (4.48)$$

Номінальний обертовий момент:

$$M_н = c_м \Phi_н I_{ян}. \quad (4.49)$$

Швидкість обертання двигуна при різних значеннях навантаження:

$$n = \frac{U_н}{c_e \Phi_н} - \frac{R_{a75} \cdot M}{c_e c_м \Phi_н^2}. \quad (4.50)$$

Змінюючи момент M від M = 0 до 1,2 $M_н$, будується природна механічна характеристика двигуна паралельного збудження (рис. 4.2).

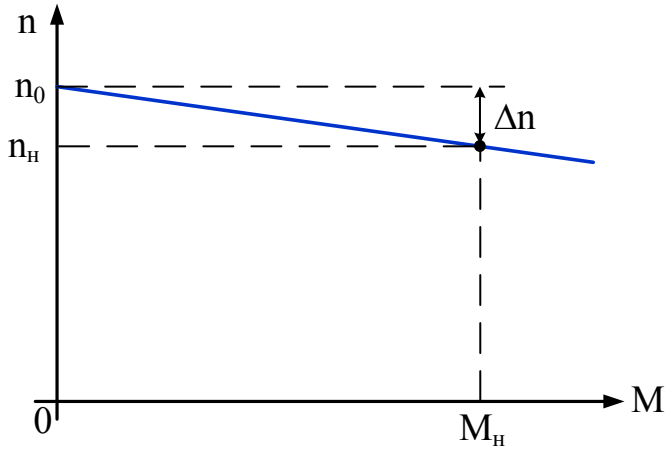


Рисунок 4.2 – Механічна характеристика двигуна паралельного збудження

Номінальна відсоткова зміна частоти обертання двигуна при переході від ХХ до номінального навантаження:

$$\Delta n_{н\%} = \frac{n_0 - n_н}{n_н} \cdot 100. \quad (4.51)$$

Перехід двигуна на другу швидкість

Зменшення моменту навантаження при зниженні потоку на 40%:

$$\Delta M_с = \left(M_{с.н.} - 0{,}6M_{с.н.}\right) \cdot 100 / M_{с.н.} = 40\%. \quad (4.52)$$

Швидкість обертання двигуна при $\Phi_1 = 0{,}6\Phi_н$:

$$n_1 = \frac{U_н - I_{я\,н} \cdot R_{а75}}{0{,}6 c_e \Phi_н}. \quad (4.53)$$

Зміна швидкості:

$$\Delta n_1 = \frac{n_1 - n_н}{n_н} \cdot 100. \quad (4.54)$$

4.3 Приклад розрахунку

Розглядається двигун постійного струму з параметрами, вказаними в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Дані двигуна постійного струму

$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$n_{ном}$, об/хв	2p	Z	N	2a	$R_я$, Ом	$R_д$, Ом	$R_в$, Ом	$\Delta p_{мех}$, кВт	$\Delta p_м$, кВт
27	440	1450	4	46	580	2	0,462	0,1548	208,4	0,42	1,1

В ППП MathCAD розрахунок двигуна постійного струму можна здійснити у такій послідовності.

$P_н := 27 \cdot 10^3$ Вт; $U_н := 440$ В; $n_н := 1450 \frac{об}{хв}$;

$p := 2$; $a := 1$; $Z := 46$; $N := 580$;

$R_я := 0.462$ Ом; $R_д := 0.1548$ Ом; $R_з := 208.4$ Ом;

$\Delta p_{мех} := 0.42 \cdot 10^3$ Вт; $\Delta p_м := 1.1 \cdot 10^3$ Вт.

Режим генератора

Побудова обмотки якоря

Оскільки $2p \neq 2a$, то використовується двошарова ПХО.

Для відношення $\frac{Z}{2 \cdot p} = 11.5$ правильний дріб становить $\varepsilon := \frac{1}{2}$.

Кроки ПХО:

перший частковий крок -

$$y_1 := \frac{Z}{2 \cdot p} - \varepsilon, \qquad y_1 = 11;$$

результуючий крок та крок по колектору -

$$y := \frac{Z - 1}{p}, \qquad y = 22.5.$$

Оскільки y не є цілим числом, тому зменшуємо число пластин на колекторі на одну і виконуємо ПХО з "мертвою" секцією.

Тому приймаємо $y := 22$, $Z := 45$.

Полюсний розподіл:

$$\tau := \frac{Z}{2 \cdot p}, \qquad \tau = 11.25.$$

Схему з'єднань обмотки якоря показано на рис. 4.3.

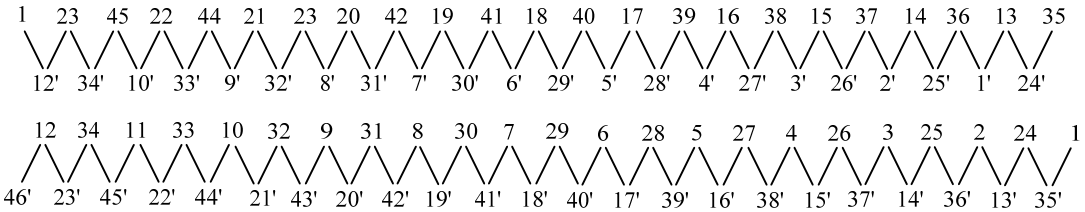


Рисунок 4.3 – Схема з'єднань обмотки якоря

Розгорнута схема обмотки якоря показана на рис. 4.4.

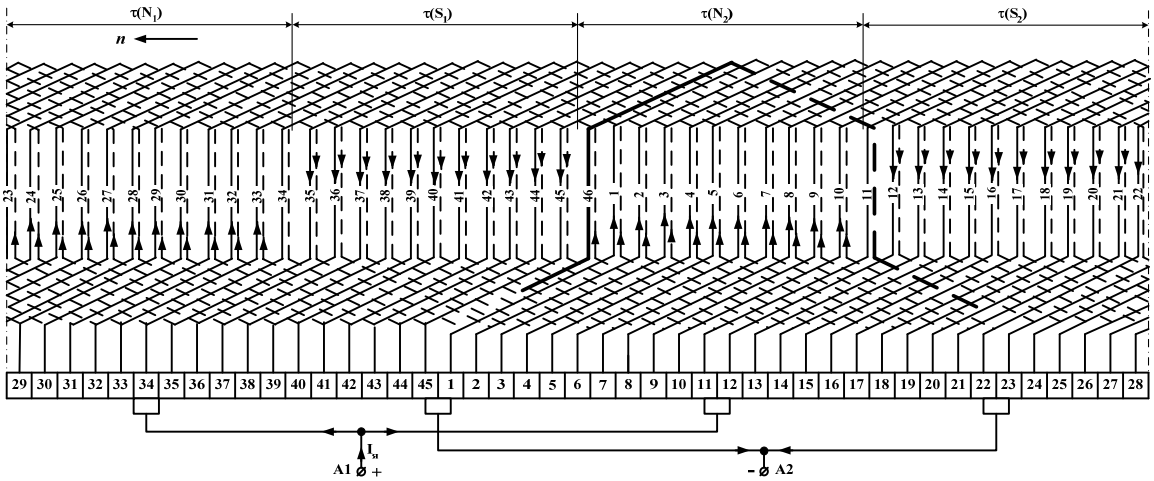


Рисунок 4.4 – Розгорнута схема ПХО якоря

За схемою-розгорткою на рис. 4.5 побудована схема паралельних віток обмотки якоря.

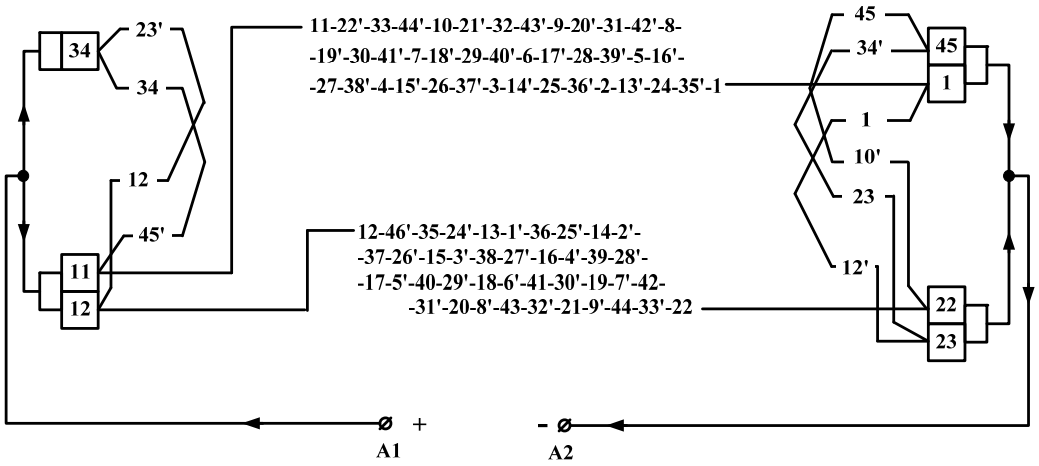


Рисунок 4.5 – Схема паралельних віток обмотки якоря

Креслення принципових електричних схем генераторів

Схеми з'єднань генераторів незалежного й паралельного збуджень та призначення їх елементів є в будь-якому навчальному посібнику, тому в прикладі вони не наводяться.

Побудова характеристичного трикутника генератора та визначення номінальних змін напруг

Номінальний струм навантаження:

$$I_н := \frac{P_н}{U_н}, \qquad I_н = 61.364 \text{ А}.$$

Сумарний опір обмоток якоря і додаткових полюсів при температурі 75 °С:

$$R_{a75} := 1.215 \cdot \left(R_я + R_д\right), \quad R_{a75} = 0.749 \text{ Ом}.$$

Спад напруги на щітках:

$$\Delta U_щ := 2 \cdot p, \qquad \Delta U_щ = 4 \text{ В}.$$

Спад напруги в колі якоря у відносних одиницях:

$$\Delta U_{я_відн} := \frac{I_н \cdot R_{a75} + \Delta U_щ}{U_н}, \qquad \Delta U_{я_відн} = 0.114.$$

Зменшення ЕРС за рахунок розмагнічувальної дії реакції якоря:

$$\Delta E_{відн} := 0.3 \cdot \Delta U_{я_відн}, \qquad \Delta E_{відн} = 0.034.$$

ЕРС генератора на холостому ході у відносних одиницях:

$$E_{01_відн} := 1 + \Delta U_{я_відн} + \Delta E_{відн},$$

$$E_{01_відн} = 1.148.$$

Опір обмотки збудження при температурі 75 °С:

$$R_{з75} := 1.215 \cdot R_з, \qquad R_{з75} = 253.206 \text{ Ом}.$$

Номінальний струм збудження:

$$I_{зн} := \frac{U_н}{R_{з75}}, \qquad I_{зн} = 1.738 \text{ А}.$$

Характеристика холостого ходу:

$j := 0 .. 7$ $Iз_j :=$ $Eo_j :=$

0	0.05
0.5	0.75
1.0	1
1.5	1.12
2.0	1.2
2.5	1.26
3.0	1.3
3.5	1.33

За вихідними даними будуємо характеристику холостого ходу $E_{0*} = f(I_{з*})$, а за розрахованими – характеристичний трикутник (рис. 4.6). Побудови виконані в ППП Microsoft Visio на базі характеристики холостого ходу, перенесеної з ППП MathCAD.

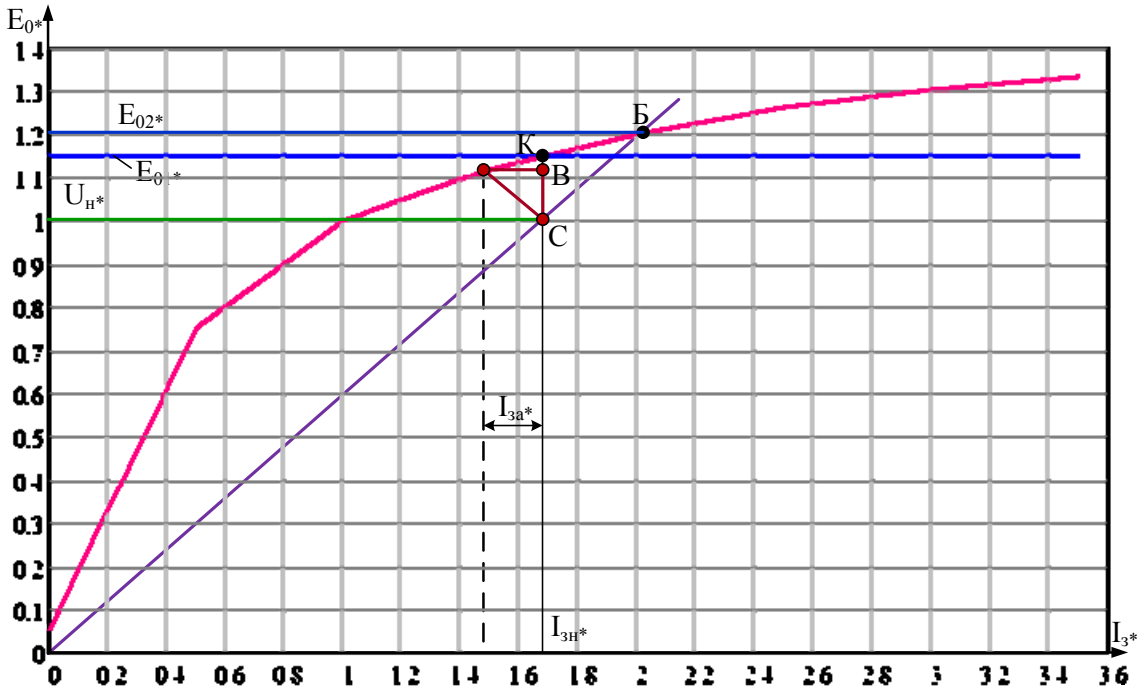


Рисунок 4.6 – Побудова характеристичного трикутника

З графіка знаходимо:

$$I_{зн_відн} := 1.78 , \quad I_{за_відн} := 0.205 , \quad E_{02_відн} := 1.2 .$$

Базове значення струму збудження:

$$I_{з0} := \frac{I_{зн}}{I_{зн_відн}}, \qquad I_{з0} = 0.976 \ \text{А}.$$

Струм збудження, необхідний для компенсації реакції якоря:

$$I_{за} := I_{за_відн} \cdot I_{з0}, \qquad I_{за} = 0.2 \ \text{А}.$$

Номінальні зміни напруг:

$$\Delta U_{н_нез} := \left(E_{01_відн} - 1\right) \cdot 100, \quad \Delta U_{н_нез} = 14.769 \ \%;$$

$$\Delta U_{н_пар} := \left(E_{02_відн} - 1\right) \cdot 100, \quad \Delta U_{н_пар} = 20 \ \%.$$

ЕРС генератора при номінальному навантаженні:

$$E_{нг} := \left(1 + \Delta U_{я_відн}\right) \cdot U_{н}, \qquad E_{нг} = 489.987 \ \text{В}.$$

Розрахунок втрат та ККД для генератора паралельного збудження

Втрати на збудження:

$$\Delta p_{з_н} := I_{зн} \cdot U_{н}, \qquad \Delta p_{з_н} = 764.595 \ \text{Вт}.$$

Постійні втрати:

$$\Delta p_{пост_н} := \Delta p_{мех} + \Delta p_{м} + \Delta p_{з_н},$$

$$\Delta p_{пост_н} = 2.285 \times 10^{3} \ \text{Вт}.$$

Номінальний струм якоря:

$$I_{я_н} := I_{н} + I_{зн}, \qquad I_{я_н} = 63.101 \ \text{А}.$$

Втрати в колі якоря:

$$\Delta p_{е_н} := I_{я_н}^{2} \cdot R_{а75} + I_{я_н} \cdot \Delta U_{щ},$$

$$\Delta p_{е_н} = 3.236 \times 10^{3} \ \text{Вт}.$$

Додаткові втрати:

$$\Delta p_{д_н} := 0.01 \cdot P_{н}, \qquad \Delta p_{д_н} = 270 \ \text{Вт}.$$

Змінні втрати:

$$\Delta p_{змін_н} := \Delta p_{е_н} + \Delta p_{д_н} ,$$

$$\Delta p_{змін_н} = 3.506 \times 10^3 \text{ Вт.}$$

Сумарні втрати:

$$\Delta p_{_сум} := \Delta p_{пост_н} + \Delta p_{змін_н} ,$$

$$\Delta p_{_сум} = 5.791 \times 10^3 \text{ Вт.}$$

Номінальна первинна потужність:

$$P_{1н} := P_н + \Delta p_{_сум} , \qquad P_{1н} = 3.2791 \times 10^4 \text{ Вт.}$$

Номінальний ККД:

$$\eta_н := 100 \cdot \frac{P_н}{P_{1н}} , \qquad \eta_н = 82.34 \text{ \%.}$$

Коефіцієнт навантаження:

$$\beta_m := \sqrt{\frac{\Delta p_{пост_н}}{\Delta p_{змін_н}}}, \qquad \beta_m = 0.807 .$$

Корисна потужність при максимальному ККД:

$$P_{2m} := \beta_m \cdot P_н , \qquad P_{2m} = 2.1794 \times 10^4 \text{ Вт.}$$

Максимальний ККД:

$$\eta_{max} := \frac{P_{2m} \cdot 100}{P_{2m} + 2 \cdot \Delta p_{пост_н}}, \qquad \eta_{max} = 82.668 \text{ \%.}$$

Режим двигуна паралельного збудження

Розрахунок процесу пуску

Сталі машини:

$$c_e := p \cdot \frac{N}{60 \cdot a} , \qquad c_e = 19.333 ;$$

$$c_м := p \cdot \frac{N}{2 \cdot \pi \cdot a}, \qquad c_м = 184.62 .$$

Номінальний струм, що споживається з мережі:

$$I_н := \frac{P_н}{U_н}, \qquad I_н = 61.364 \text{ А}.$$

Номінальний струм збудження двигуна:

$$I_{зн.} := \frac{U_н}{R_{з75}}, \qquad I_{зн.} = 1.738 \text{ А}.$$

Номінальний струм якоря двигуна:

$$I_{ян} := I_н - I_{зн.}, \qquad I_{ян} = 59.626 \text{ А}.$$

Перехідний опір щіткових контактів при температурі 75 °С:

$$R_{щ20} := \frac{\Delta U_щ}{I_{ян} \cdot 1.215}, \qquad R_{щ20} = 0.055 \text{ Ом}.$$

Опір кола якоря при температурі 20 °С:

$$R_{a20} := R_я + R_д + R_{щ20}, \qquad R_{a20} = 0.672 \text{ Ом}.$$

Повний опір якірного кола при температурі 20 °С:

$$R_{a75.} := 1.215 \cdot R_{a20}, \qquad R_{a75.} = 0.816 \text{ Ом}.$$

Струм якоря в початковий момент часу:

$$I_{яп} := \frac{U_н}{R_{a20}}, \qquad I_{яп} = 654.748 \text{ А}.$$

Значення пускового реостата для обмеження пускового струму до 1,5Іян:

$$R_{п20} := \frac{U_н}{1.5 \cdot I_{ян}} + R_{a20}, \qquad R_{п20} = 5.592 \text{ Ом}.$$

Кратності пускових струмів:

при прямому пуску -

$$k_{пі} := \frac{I_{яп}}{I_{ян}}, \qquad k_{пі} = 10.981;$$

при реостатному пуску -

$$k_{пір} := \frac{1.5 \cdot I_{ян}}{I_{ян}}, \qquad k_{пір} = 1.5.$$

Розрахунок додаткового опору в колі якоря

$$R_{дод75} := 0.5 \cdot \frac{U_н}{I_{ян}} - 0.25 \cdot R_{a75.}, \qquad R_{дод75} = 3.486 \text{ Ом};$$

$$R_{дод20} := \frac{R_{дод75}}{1.215}, \qquad R_{дод20} = 2.869 \text{ Ом}.$$

Розрахунок і побудова механічної характеристики

Номінальна ЕРС двигуна:

$$E_{нд} := U_н - I_{ян} \cdot R_{a75.}, \qquad E_{нд} = 391.316 \text{ В}.$$

Номінальна швидкість обертання двигуна:

$$n_{нд} := n_н \cdot \frac{E_{нд}}{E_{нг}}, \qquad n_{нд} = 1.158 \times 10^3 \text{ об/хв}.$$

Номінальна магнітний потік двигуна:

$$Ф_н := \frac{E_{нд}}{c_e \cdot n_{нд}}, \qquad Ф_н = 0.017 \text{ Вб}.$$

Номінальна момент двигуна:

$$M_н := c_м \cdot Ф_н \cdot I_{ян}, \qquad M_н = 192.408 \text{ Нм}.$$

Побудова природної механічної характеристики двигуна:

$$M_{н.} := 0 .. 1.2 \cdot M_н,$$

$$n_{ДM_{н.}} := \frac{U_н}{c_e \cdot Ф_н} - \frac{R_{a75.} \cdot M_{н.}}{c_e \cdot c_м \cdot Ф_н^{\,2}}.$$

Зовнішній вигляд природної механічної характеристики двигуна паралельного збудження подано на рис. 4.7.

Швидкість ідеального холостого ходу:

$$n_0 := \frac{U_н}{c_e \cdot Ф_н}, \qquad n_0 = 1.302 \times 10^3 \text{ об/хв}.$$

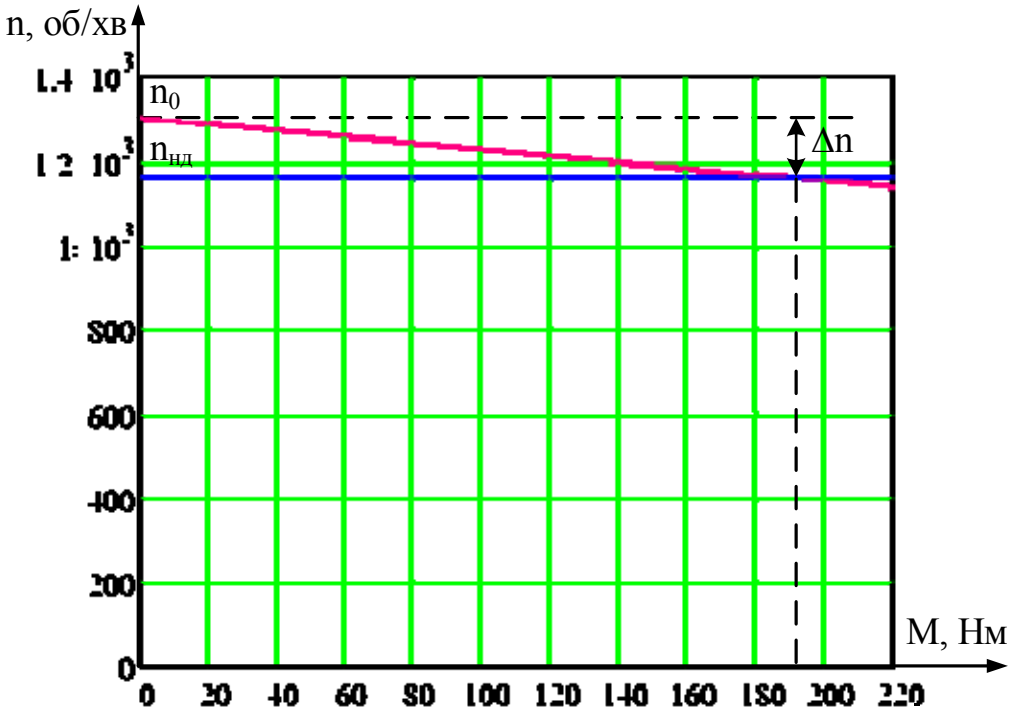


Рисунок 4.7 – Природна механічна характеристика двигуна

Номінальна відсоткова зміна частоти обертання двигуна при переході від ХХ до номінального навантаження:

$$\Delta n_{н\%} := \frac{n_0 - n_{нд}}{n_{нд}} \cdot 100 \quad , \qquad \Delta n_{н\%} = 12.441 \quad \%.$$

Перехід двигуна на другу швидкість

Швидкість обертання двигуна при Ф1=0,6Фн:

$$n_{д1} := \frac{U_н - R_{a75.} \cdot I_{ян}}{0.6 \cdot c_e \cdot \Phi_н} \quad , \qquad n_{д1} = 1.93 \times 10^3 \quad \text{об/хв.}$$

Зміна швидкості:

$$\Delta n_{д1} := \frac{n_{д1} - n_{нд}}{n_{нд}} \cdot 100 \quad , \qquad \Delta n_{д1} = 66.667 \quad \%.$$

Література

1. Павлов И. Ф. Электрические машины : типовая программа, методические указания и контрольные задания для студентов специальностей 0301, 0302, 0303 заочной формы обучения / И. Ф. Павлов, В. И. Нагул. – Винница : ВПИ, 1988. – 72 с.
2. Иванов-Смоленский А. В. Синхронные машины : методические указания к типовому расчету по ЭМ / А. В. Иванов-Смоленский, В. И. Извеков – каф. Электромеханики МЭИ. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://elmech.mpei.ac.ru/books/tr/SM/state.htm
3. Вольдек А. И. Электрические машины / Вольдек А. И. – М. : Энергия, 1978. – 832 с.
4. Токарев Б. Ф. Электрические машины : учеб. пособие для вузов / Токарев Б. Ф. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 624 с.
5. Грабко В. В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина IV. Трансформатори : навчальний посібник / Грабко В. В., Розводюк М. П., Левицький С. М. – Вінниця : ВНТУ, 2008. – 219 с.
6. Електричні машини. трансформатори. Дистанційний курс. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://elearn.vntu.edu.ua/course_structure.php?CID=256. – Назва з екрана.
7. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина III. Асинхронні машини : [навчальний посібник] / В. В. Грабко, М. П. Розводюк, С. М. Левицький, М. О. Казак. – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 197 с.
8. Справочник по электрическим машинам : в 2 –х т. / под ред. Копылова И. П., Клокова Б. К. – М. : Энергоатомиздат, 1988.
   Т. 1. – 1988. – 456 с.
9. Грабко В. В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина I. Машини постійного струму : навчальний посібник / Грабко В. В., Розводюк М. П., Грабенко І. В. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 86 с.
10. Грабко В. В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина I. Машини постійного струму [Електронний ресурс] : електронний навчальний посібник / В. В. Грабко, М. П. Розводюк, І. В. Грабенко. – Вінниця, ВНТУ, 2012. – Режим доступу : http://posibnyky.vntu.edu.ua.

Глосарій

Номінальні лінійні струми – rated linear currents
Номінальні фазні струми – rated phase currents
Схема заміщення – replacement scheme
Потужність короткого замикання – capacity of short circuit
Напруга короткого замикання – voltage of short circuit
Коефіцієнт потужності – power factor
Потужність втрат холостого ходу – capacity of idle movement losses
Опори кола намагнічування – magnetize circuit
Коефіцієнт трансформації – transformer factor
Зміна вторинної напруги – change of secondary voltage
Векторна діаграма – vector plot
Струм зрівноваження – equilibrating current
Електричні втрати – electrical losses
Номінальне ковзання – rated slipping
Сумарні втрати – total capacity losses
Корисна потужність – efficient capacity
Номінальний електромагнітний обертовий момент – nominal electro-magnetic rotating moment
Пусковий момент – starting moment
Критичне ковзання – critical slipping
Критична частота обертання – critical frequency of ration
Максимальний момент – maximal moment
Механічна характеристика – mechanical characteristics
Робочі характеристики – working characteristics
Втрати на збудження – excitation losses
Постійні втрати – constant losses
Додаткові втрати – additional losses
Змінні втрати – variable losses
Коефіцієнт навантаження – load factor

Навчальне видання

Михайло Петрович Розводюк
Сергій Михайлович Левицький

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ.

Контрольні завдання для студентів напрямів підготовки «Електромеханіка», «Електротехніка та електротехнології»

Навчальний посібник

Редактор Т. Старічек

Оригінал-макет підготовлено М. П. Розводюком

Підписано до друку 05.02.2016 р.
Формат 29,7 × 42 ¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різографічний. Ум. друк. арк. 7,1.
Наклад 75 пр. Зам. № 2016-032,

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

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-87-38.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.