

ЗАВДАННЯ 1

Розрахувати процес безреостатного пуску чотириполюсного двигуна паралельного збудження з номінальною напругою 800 В, номінальним струмом 250 А, номінальною частотою обертання 1000 об/хв у режимі неробочого ходу для двох варіантів вихідних даних, припускаючи тривалість пуску 0,5 с.

1. За вихідними даними визначити необхідні для розрахунку параметри двигуна у відносних одиницях.

2. Побудувати та проаналізувати залежності зміни струму якоря в часі при пуску.

3. Побудувати та проаналізувати залежності зміни частоти обертання в часі при пуску.

4. У разі коливального процесу визначити необхідну величину головного потокозчеплення, при якому цей процес припиняється.

Результати розрахунку зазначених залежностей оформити у вигляді таблиць та навести їхні графіки.

Прийняти крок до розрахунку $\Delta t_n = 0,05$ с.

Вихідні дані для розрахунку наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Вихідні дані розрахункового завдання 1

Номер варіанту	Вихідні дані				
	Напруга обмотки якоря U_q , в. о.	Головне потокозчеплення, Ψ_d , в. о.	Опір кола обмотки якоря R_a , в. о.	Індуктивність кола обмотки якоря $L_a \cdot 10^{-3}$, Гн	Момент інерції обертових мас J_a , кг · м ²
1	1,0	1,0	0,05	10	0,5 9,0
2	0,9	0,9	0,07	11	1,0 8,0
3	0,8	0,8	0,08 0,15	12	2,0
4	0,7	0,7	0,09 0,05	13	3,0
5	0,6	0,6	0,1	14	4,0 0,5
6	0,6	1,0	0,11	15	5,0 0,5
7	0,7	0,9	0,12	16	6,0 2,0
8	0,8	0,8	0,13	17	7,0 2,0
9	0,9	0,7	0,14	18	8,0 3,0

10	1,0	0,6	0,15	19	9,0 2,0
11	1,0	0,6	0,05 0,15	19	10,0
12	0,9	0,7	0,07 0,15	18	11,0
13	0,8	0,8 1,0	0,8	17	12,0
14	0,7	0,9 0,6	0,09	16	13,0
15	0,6	1,0 0,6	0,1	15	14,0
16	1,0	0,9	0,11	14	15,0 2,0
17	1,0	0,8	0,12	13	1,0 7,0
18	1,0	0,7	0,13	12	2,0 9,0
19	1,0	0,6	0,14	11 20	3,0
20	1,0	0,85	0,15	10 25	4,0
21	1,0	1,0	0,15	21	0,5 7,0
22	1,0	1,0	0,10	22	1,0 10,0
23	1,0	1,0	0,08	23	2,0 12,0
24	1,0	1,0	0,07	24 10	5,0
25	1,0	1,0	0,12	10	15,0 2,0

Примітка: для кожного варіанту в першому рядку наведені дані основного варіанта, у другому – вказана величина параметра, що змінюється при тих же значеннях інших параметрів.

Методичні вказівки до виконання завдання.

При дослідженні процесу пуску нехтуємо впливом обмоток додаткових полюсів та компенсаційної обмотки і вважатимемо, що в момент вмикання якоря до мережі перехідний процес в обмотці збудження закінчено.

У цьому випадку перетворене диференціальне рівняння, що описує процес пуску двигуна і записане у відносних одиницях, матиме вигляд:

$$\frac{d^2 \cdot i_a}{d \cdot \tau^2} + \frac{R_a}{L_a} \frac{di_a}{d \cdot \tau} + \frac{\psi_d^2}{H \cdot L_a} \cdot i_a = 0$$

де i_a - струм якоря, в.о.;

R_a - опір кола якоря, в.о.;

L_a - Індуктивність кола якоря, в.о.;

ψ_d - головне потокозчеплення, в.о.;

H - електромеханічна постійна двигуна, в.о.;

τ - відносний час.

Вид розв'язання рівняння залежить від коренів характеристичного рівняння:

$$p^2 + \frac{R_a}{L_a} p + \frac{\psi_d^2}{H \cdot L_a} = 0 ;$$

$$P_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2};$$

$$\text{де } \delta = \frac{R_a}{2L_a}; \quad \omega_0 = \frac{\psi_d}{\sqrt{HL_a}}$$

1. Корені дійсні, різні ($\delta > \omega_0$):

$$P_{1,2} = -\delta \pm \sqrt{\delta^2 - \omega_0^2};$$

Аперіодичний процес описується наступними виразами для струму якоря та частоти обертання:

$$i_a = \frac{U_q}{L_a (P_1 - P_2)} \cdot (e^{P_1 \tau} - e^{P_2 \tau});$$

$$\omega = \frac{U_q}{\psi_d} \cdot \frac{P_1 (1 - e^{P_2 \tau}) - P_2 (1 - e^{P_1 \tau})}{P_1 - P_2}$$

де U_q - напруга на якорі, в.о.;

$\omega_{xx} = \frac{U_q}{\psi_d}$ - частота обертання ідеального неробочого ходу, в.о.

2. Корені дійсні, рівні ($\delta = \omega_0$):

$$P_1 = P_2 = -\delta.$$

Аперіодичний процес (граничний випадок) описується виразами для струму якоря та частоти обертання:

$$i_a = \frac{U_q}{L_a} \tau e^{-\delta \tau};$$

$$\omega = \frac{U_q}{\psi_d} [1 - e^{-\delta \tau} (1 + \delta \tau)]$$

3. Корені комплексні, різні ($\delta < \omega_0$):

$$P_{1,2} = -\delta \pm j\beta, \beta = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$$

Коливальний процес описується наступними виразами для струму якоря та частоти обертання:

$$i_a = \frac{U_q}{L_a \beta} \cdot \sin \beta \tau e^{-\delta \tau}$$

$$\omega = \frac{U_q}{\psi_d} \left[1 - \frac{\omega_0}{\beta} \sin \left(\beta \tau + \arcsin \frac{\beta}{\omega_0} \right) e^{-\delta \tau} \right]$$

Для отримання параметрів двигуна у відносних одиницях необхідно визначити базові величини:

$$U_\delta = U_H; I_\delta = I_H; P_\delta = I_\delta U_\delta = I_H U_H; \omega_\delta = p \frac{\pi n_H}{30}; Z_\delta = U_\delta / I_\delta;$$

$$L_\delta = Z_\delta / \omega_\delta; t_\delta = 1 / \omega_\delta.$$

Виразимо параметри двигуна у відносних одиницях:

$$R_a = \frac{r_a}{z_\delta}; L_a = \frac{l_a}{L_\delta}; U_q = \frac{U_a}{U_\delta}; \tau = \frac{t}{t_\delta} = \omega_\delta t;$$

Визначаємо необхідні для розрахунку параметри:

$$\delta = \frac{R_a}{2 L_a} H = \frac{J_1 \omega_\delta^2}{P_\delta} \omega_0 = \frac{\psi_d}{\sqrt{H L_a}}$$

Необхідну величину головного потокозчеплення, при якому процес з коливального переходить в аперіодичний, можна визначити з умови $\delta \geq \omega_0$ за співвідношенням:

$$\delta \geq \frac{\psi_d}{\sqrt{H L_a}}$$

Зразок запису розрахунків наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Частота обертання якоря (1 варіант)

Поточн е Час, τ	$e^{P_2 \tau}$	$1 - e^{P_2 \tau}$	$A = P_1(1 - e^{P_2 \tau})$	$e^{P_1 \tau}$	$1 - e^{P_1 \tau}$	$B = P_2(1 - e^{P_1 \tau})$	AB	ω
16								
32								
48								
...								
160								

Завдання 2

1. Провести розрахунковим способом аналіз процесу раптового КЗ трифазного трансформатора ($U_{1\phi} = 5770 \text{ В}$, $I_{1\phi} = 57,7 \text{ А}$) з режиму неробочого ходу для двох варіантів вихідних даних: 1. За вихідними даними визначити необхідні розрахунку параметри трансформатора у відносних одиницях.

2. Побудувати та проаналізувати криві зміни струму трансформатора $i_k(\tau)$ у режимі раптового КЗ. Визначити з розрахунку максимальні сплески струму.

3. Визначити максимальний сплеск струму для несприятливого випадку включення, коли початкова фаза напруги дорівнює $\psi = 0$

Результати розрахунку оформити у вигляді таблиці та навести графіки, тривалість процесу розглядати протягом одного періоду зміни напруги стандартної частоти. Крок розрахунку $\Delta\tau = 0,628$.

Вихідні дані розрахунку задані у таблиці 3.

Таблиця 3 – Дані варіантів задачі 2

Номер варіанту	Початкові дані			Номер варіанти	Початкові дані			Номер варіанту	Початкові дані		
	Rк Ом	Xк Ом	Ψ рад.		Rк Ом	Xк Ом	Ψ рад.		Rк Ом	Xк Ом	Ψ рад.
1	1,42	6,4	0,314	10	1,7	5,6	3,14	19	2,0	6,4	0,314
	-	-	3,14		2,0	-	-		-	4,0	-
2	0,8	4,0	0,628	11	1,8	5,8	0,314	20	1,9	4,2	0,628
	-	-	2,512		1,9	-	-		-	7,0	-
3	0,9	4,2	0,942	12	1,9	6,0	0,628	21	1,8	4,4	0,942
	-	-	2,826		1,8	-	-		-	6,8	-
4	1,0	4,4	1,256	13	2,0	6,2	0,942	22	1,7	4,6	1,256
	-	-	2,198		1,7	-	-		-	6,6	-
5	1,1	4,6	1,57	14	0,9	6,6	1,256	23	1,6	4,8	1,57
	-	-	1,884		1,6	-	-		-	6,4	-
6	1,2	4,8	1,884	15	1,0	6,8	1,57	24	1,5	5,0	1,884
	-	-	1,57		1,5	-	-		-	6,2	-
7	1,3	5,0	2,198	16	1,1	7,0	1,884	25	1,4	5,2	2,198
	-	-	3,14		1,6	-	-		-	6,0	-
8	1,5	5,2	2,512	17	1,2	4,0	2,198	26	1,3	5,4	2,512
	-	-	0,314		1,7	-	-		-	5,8	-
9	1,6	5,4	2,826	18	1,3	4,2	2,512	27	1,2	5,6	3,14
	-	-	0,942		1,8	-	-		-	4,0	-

Примітка: для кожного варіанта в першому рядку наведені дані основного варіанта, у другому – вказана величина зміненого параметра при тих же значення інших параметрів.

Методичні вказівки до виконання завдання.

Розглянемо режим раптового КЗ трифазного трансформатора, припускаючи його повністю симетричним. Останнє дає можливість обмежитись вивченням процесу лише в одній фазі. Процес раптового КЗ на вторинних затискачах трансформатора описується диференціальним рівнянням,

$$U_{1m} \sin(\tau + \psi) = r_k i_k + L_k \frac{d \cdot i_k}{d \cdot \tau},$$

де параметри трансформатора визначені зі схеми заміщення, якщо знехтувати величиною струму, що намагнічує,

$$r_k = r_1 + r_2'; L_k = \frac{x_1 + x_2'}{\omega}$$

Так як індуктивний опір трансформатора значно більше активного, то фазний кут струму короткого замикання, що встановився, можна прийняти рівним $\varphi_k = \pi/2$. Тоді рішення для струму трансформатора в режимі раптового КЗ у відносних одиницях матиме вигляд:

$$i_k(\tau) = \frac{U_{1m}}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}} \left[-\cos(\tau + \psi) + \cos\psi e^{\tau/T_k} \right]$$

де $\tau = \omega_g \cdot t$ - Відносний час;

$T_k = X_k/r_k$ - постійна часу кола трансформатора;

$I_{my} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}}$ - амплітуда струму короткого замикання, що встановилося.

Найбільш несприятливим за максимальним сплеском струму є випадок включення, якщо початкова фаза напруги $\psi = 0$. Ударне значення струму досягається при $\tau = \pi$ та коефіцієнт ударності:

$$K_{уд} = (1 + e^{-\pi r_k/x_k}),$$

Величина ударного струму раптового КЗ трансформатора у відносних одиницях:

$$I_{уд} = \frac{100}{U_k \%} \cdot K_{уд}$$

де $U_k\%$ - напруга короткого замикання трансформатора. Величина зазначеної напруги може бути визначена за відносними значеннями параметрів трансформатора:

$$U_k\% = \sqrt{r_k^2 + x_k^2} \cdot 100$$

Параметри трансформатора у відносних одиницях виражаються через базові величини:

$$U_\delta = \sqrt{2} \cdot U_{1\phi} = U_{1m}; I_\delta = \sqrt{2} \cdot I_{1\phi}; \omega_\delta = \omega; Z_\delta = U_\delta/I_\delta; t_\delta = 1/\omega_\delta$$

Тоді параметри трансформатора дорівнюють

$$r_k = R_k/Z_\delta; x_k = X_k/Z_\delta; \tau = t/t_\delta = \omega t; U_{1m} = 1$$

Приклад запису розрахункових даних див. у таблиці 4.

Таблиця 4 – Струм раптового КЗ трансформатора (1 варіант)

поточний час τ , о.	$-\cos(\tau + \psi) = A$	$e^{-\tau/T_k}$	$\cos\psi \cdot e^{-\tau/T_k} = B$	A+B	$i_k(\tau)$
0,628					
1,256					
...					
6,28					

Завдання 3

Розрахувати і побудувати криві електромагнітного моменту синхронного генератора в режимі раптового КЗ, параметри якого у відносних одиницях дано в таблиці 6. демпферною обмоткою та за її відсутності, прийнявши $x''_q = 0,2; \gamma_0 = 0$.

Побудувати кривих електромагнітного моменту з урахуванням і без урахування згасання виконати однією графіку для тривалості процесу, що дорівнює двом періодам, прийнявши крок розрахунку $\Delta t = 0,002$ с. Провести порівняльний аналіз отриманих результатів.

Методичні вказівки до виконання завдання

При раптовому КЗ аперіодичний струм статора утворює нерухомий у просторі магнітний потік, який, взаємодіючи з магнітним потоком, що обертається, викликає знакозмінні ударні моменти.

Вираз для моменту матиме вигляд, о.

$$M = E_f^2 \cdot e^{-t/T_{ан}''} \left[\frac{1}{X_d} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot e^{-t/T_d'} + \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) \cdot e^{-t/T_d''} \right] \cdot \sin \omega t,$$

де X_d - синхронний індуктивний опір по поздовжній осі;

X_d' - синхронний перехідний індуктивний опір по поздовжній осі;

X_d'' - синхронний надперехідний індуктивний опір по поздовжній осі;

$T_{ан}''$ - постійна часу аперіодичної складової струму статора;

T_d' - Постійна часу перехідної складової струму статора;

T_d'' - постійна часу надперехідної складової струму статора;

Без урахування згасання максимальний сплеск моменту досягається при $\tau = \pi/2$, о.

$$M_{max} = E_f^2 / X_d'', \text{ де } E_f = 1$$

Таблиця 6 – Дані варіантів задачі 3

Номер вари- анта	Початкові дані						Номер вари- анта	Початкові дані					
	X_d о.е	X_d' о.е	X_d'' о.е	$T_{ан}''$ з	T_d' з	T_d'' з		X_d о.е	X_d' о.е	X_d'' о.е	$T_{ан}''$ з	T_d' з	T_d'' з
1	0,8	0,1	0,08	0,04	0,2	0,01	14	2,0	0,1	0,08	0,066	0,46	0,023
2	0,9	0,12	0,09	0,042	0,22	0,011	15	1,9	0,12	0,09	0,068	0,48	0,024
3	1,0	0,14	0,1	0,044	0,24	0,012	16	1,8	0,14	0,1	0,07	0,05	0,025
4	1,1	0,16	0,11	0,046	0,26	0,013	17	1,7	0,16	0,11	0,072	0,2	0,026
5	1,2	0,18	0,12	0,048	0,28	0,014	18	1,6	0,18	0,12	0,074	0,22	0,027
6	1,3	0,2	0,13	0,05	0,3	0,015	19	1,5	0,2	0,13	0,076	0,24	0,028
7	1,4	0,22	0,14	0,052	0,32	0,016	20	1,4	0,22	0,14	0,078	0,26	0,029
8	1,5	0,24	0,15	0,054	0,34	0,017	21	1,3	0,24	0,15	0,08	0,28	0,03
9	1,6	0,26	0,16	0,056	0,36	0,018	22	1,2	0,26	0,16	0,082	0,3	0,01
10	1,7	0,28	0,17	0,058	0,38	0,019	23	1,1	0,28	0,17	0,084	0,32	0,011
11	1,8	0,30	0,18	0,06	0,4	0,02	24	1,0	0,3	0,18	0,086	0,34	0,015
12	1,9	0,32	0,19	0,062	0,42	0,021	25	0,9	0,32	0,19	0,088	0,36	0,017
13	2,0	0,34	0,20	0,064	0,44	0,022	26	0,8	0,34	0,2	0,09	0,38	0,02

початкове значення аперіодичного струму, в.о.,

$$I_{\text{ап}} = \frac{E_f}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_q''} \right) \cos \gamma_0$$

де X_q'' - синхронний надперехідний індуктивний опір по поперечній осі;

γ_0 - Початкове положення ротора щодо фази а в момент раптового КЗ.

Початкове значення надперехідної складової струму статора, в.о.,

$$I_m'' = E_f \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right)$$

Початкове значення перехідної складової струму статора, в.о.,

$$I_m' = E_f \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right)$$

Значення струму статора, що встановилося, в.о.,

$$I_y = E_f / X_d$$

Ударний струм генератора без демпферної обмотки, в.о.,

$$I'_{\text{уд}} = \frac{1,8 E_f}{x_d'}$$

Ударний струм генератора з демпферною обмоткою, в.о.,

$$I''_{\text{уд}} = \frac{1,8 E_f}{x_d''}$$