

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет водного господарства та  
природокористування

Навчально-науковий механічний інститут  
Кафедра будівельних, дорожніх та меліоративних машин

**02-01-603М**

## **РОЗРАХУНКОВИЙ ПРАКТИКУМ**

до самостійного вивчення навчальної дисципліни

**«Мехатроніка»**

для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня

за освітньо-професійною програмою

«Створення та експлуатація машин і обладнання»

спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

денної та заочної форм навчання

Рекомендовано  
науково-методичною радою  
з якості ННМІ  
Протокол № 4 від 31.12.2024 р.

Рівне – 2025

Розрахунковий практикум до самостійного вивчення навчальної дисципліни «Мехатроніка» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Створення та експлуатація машин і обладнання» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» денної та заочної форм навчання. [Електронне видання] / Науменко Ю. В. – Рівне : НУВГП, 2025. – 29 с.

Укладач: Науменко Ю. В., д.т.н., професор кафедри будівельних, дорожніх та меліоративних машин.

Відповідальний за випуск: Тхорук Є. І., к.т.н., доцент, в. о. завідувача кафедри будівельних, дорожніх та меліоративних машин.

Керівник групи забезпечення спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» Кравець С. В.

© Ю. В. Науменко, 2025

© НУВГП, 2025

## Зміст

<b>Розрахункова робота 1.</b> Розрахунок електроприводу мехатронного модуля змінного струму з асинхронним двигуном.....	4
<b>Розрахункова робота 2.</b> Розрахунок електроприводу мехатронного модуля постійного струму з двигуном з незалежним збудженням.....	20

## РОЗРАХУНКОВА РОБОТА 1

### РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ ЗМІННОГО СТРУМУ З АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ

#### Мета роботи:

1. Розрахувати штучну статичну механічну характеристику двигуна.
2. Розрахувати природну статичну механічну характеристику двигуна.

#### 1.1. ВИХІДНІ ДАНІ

Асинхронний електродвигун мехатронного модуля працює на природній механічній характеристиці, долаючи опір робочого процесу пристрою.

#### 1.2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ 1

1. Вибрати за варіантом з табл. 1.1 вихідні дані роботи: номінальна потужність  $P_n$ , номінальна частота обертання  $n_n$ , стандартна синхронна швидкість обертання  $\omega_s$ , активний опір фази якоря  $R_2$ , реактивний опір фази статора  $X_1$ , реактивний опір фази ротора  $X_2$ , додатковий опір  $R_{\text{дод}}$ , коефіцієнт приведення електрорушійних сил  $k_e$ , коефіцієнт статичного моменту  $K_s$ .

Таблиця 1.1

Варіанти вихідних даних для виконання розрахункової роботи 1

Варіант	$P_n$	$n_n$	$\omega_c$	$R_2$	$X_1$	$X_2$	$R_{\text{дод}}$	$k_e$	$K_c$
	кВт	об./хв.	1/с	Ом			-		
1	5	885	104,7	0,38	1,37	0,8	0,32	2,66	0,8
2	6	892	104,7	0,32	1,16	0,67	0,27	2,62	0,7
3	7	899	104,7	0,28	1	0,58	0,23	2,58	0,6
4	8	906	104,7	0,25	0,89	0,52	0,21	2,54	0,5
5	9	913	104,7	0,22	0,8	0,47	0,19	2,5	0,4
6	10	920	104,7	0,2	0,72	0,42	0,17	2,47	0,5
7	11,5	927	104,7	0,18	0,63	0,37	0,15	2,44	0,6
8	13	935	104,7	0,16	0,57	0,33	0,13	2,41	0,7
9	14,5	943	104,7	0,14	0,51	0,3	0,12	2,38	0,8
10	16	955	104,7	0,13	0,47	0,27	0,11	2,35	0,9
11	26	710	78,5	0,084	0,3	0,17	0,07	2,32	0,8
12	40	712	78,5	0,056	0,2	0,12	0,047	2,29	0,7
13	55	714	78,5	0,042	0,15	0,087	0,035	2,26	0,6
14	70	717	78,5	0,033	0,12	0,07	0,028	2,23	0,5
15	85	720	78,5	0,028	0,1	0,058	0,023	2,2	0,4
16	100	723	78,5	0,024	0,086	0,05	0,02	2,17	0,5
17	115	726	78,5	0,021	0,075	0,044	0,017	2,14	0,6
18	130	729	78,5	0,019	0,067	0,039	0,016	2,11	0,7
19	145	732	78,5	0,017	0,061	0,035	0,014	2,08	0,8
20	160	735	78,5	0,012	0,042	0,024	0,0098	2,05	0,9
21	60	577	62,8	0,039	0,14	0,081	0,033	2,02	0,8
22	140	578	62,8	0,018	0,063	0,037	0,015	1,99	0,7
23	220	579	62,8	0,011	0,041	0,024	0,0095	1,96	0,6
24	310	580	62,8	0,0084	0,03	0,017	0,007	1,93	0,5
25	400	581	62,8	0,0067	0,024	0,014	0,0056	1,9	0,6
26	490	582	62,8	0,0056	0,02	0,012	0,0047	1,87	0,7
27	580	584	62,8	0,0047	0,017	0,01	0,004	1,84	0,8
28	670	586	62,8	0,0042	0,015	0,0087	0,0035	1,81	0,9
29	760	588	62,8	0,0036	0,013	0,0076	0,003	1,78	1
30	850	590	62,8	0,0033	0,012	0,007	0,0028	1,75	0,8

2. Визначити номінальну кутову швидкість  $\omega_n$ , 1/с:

$$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60}.$$

3. Визначити номінальний електромагнітний момент двигуна  $M_n$ , Нм:

$$M_n = 1,05 \frac{P_n}{\omega_n}.$$

4. Визначити приведений активний опір ротора  $R'_2$ , Ом:

$$R'_2 = R_2 k_e^2.$$

5. Визначити приведений реактивний опір ротора  $X'_2$ , Ом:

$$X'_2 = X_2 k_e^2.$$

6. Визначити сумарний реактивний опір  $X_k$ , Ом:

$$X_k = X_1 + X'_2.$$

7. Визначити критичне ковзання для природної характеристики  $s_{кп}$ :

$$s_{кп} = \frac{R'_2}{X_k}.$$

8. Визначити критичний момент для природної та штучної характеристики  $M_k$ , Нм:

$$M_k = \frac{3U^2}{2\omega_c X_k},$$

де  $U=220$  В – фазна напруга ротора.

9. Визначити додатковий опір ротора  $R'_{дод}$ , Ом:

$$R'_{дод} = R_{дод} k_e^2.$$

10. Визначити сумарний опір ротора  $R'_{2\Sigma}$ , Ом:

$$R'_{2\Sigma} = R'_2 + R'_{дод}.$$

11. Визначити критичне ковзання для штучної характеристики  $s_{кш}$ :

$$s_{кш} = \frac{R'_{2\Sigma}}{X_k}.$$

12. Визначити момент природної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,01}=0,01$ ,  $M_{п0,01}$ , Нм:

$$M_{п0,01} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,01}}{s_{кп}} + \frac{s_{кп}}{s_{0,01}}}.$$

13. Визначити момент природної характеристики, для

значення ковзання  $s_{0,05}=0,05$ ,  $M_{п0,05}$ , Нм:

$$M_{п0,05} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,05}}{s_{кп}} + \frac{s_{кп}}{s_{0,05}}}.$$

14. Визначити момент природної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,1}=0,1$ ,  $M_{п0,1}$ , Нм:

$$M_{п0,1} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,1}}{s_{кп}} + \frac{s_{кп}}{s_{0,1}}}.$$

15. Визначити момент природної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,2}=0,2$ ,  $M_{п0,2}$ , Нм:

$$M_{п0,2} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,2}}{s_{кп}} + \frac{s_{кп}}{s_{0,2}}}.$$

16. Визначити момент природної характеристики, для значення ковзання  $s = s_{кп}$ ,  $M_{пs_{кп}}$ , Нм:

$$M_{пs_{кп}} = \frac{2M_k}{\frac{s_{кп}}{s_{кп}} + \frac{s_{кп}}{s_{кп}}} = M_k.$$

17. Визначити момент природної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,6}=0,6$ ,  $M_{п0,6}$ , Нм:

$$M_{п0,6} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,6}}{s_{кп}} + \frac{s_{кп}}{s_{0,6}}}.$$

18. Визначити момент природної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,8}=0,8$ ,  $M_{п0,8}$ , Нм:

$$M_{п0,8} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,8}}{s_{кп}} + \frac{s_{кп}}{s_{0,8}}}.$$

19. Визначити момент природної характеристики, для значення ковзання  $s_1=1$ ,  $M_{п1}$ , Нм:

$$M_{п1} = \frac{2M_k}{\frac{s_1}{s_{кп}} + \frac{s_{кп}}{s_1}}.$$

20. Визначити кутову швидкість характеристик, для значення ковзання  $s_{0,01}=0,01$ ,  $\omega_{0,01}$ , 1/с:

$$\omega_{0,01} = \omega_c(1 - s_{0,01}).$$

21. Визначити кутову швидкість характеристик, для значення ковзання  $s_{0,05}=0,05$ ,  $\omega_{0,05}$ , 1/с:

$$\omega_{0,05} = \omega_c(1 - s_{0,05}).$$

22. Визначити кутову швидкість характеристик, для значення ковзання  $s_{0,1}=0,1$ ,  $\omega_{0,1}$ , 1/с:

$$\omega_{0,1} = \omega_c(1 - s_{0,1}).$$

23. Визначити кутову швидкість характеристик, для значення ковзання  $s_{0,2}=0,2$ ,  $\omega_{0,2}$ , 1/с:

$$\omega_{0,2} = \omega_c(1 - s_{0,2}).$$

24. Визначити кутову швидкість характеристик, для значення ковзання  $s_{0,3}=0,3$ ,  $\omega_{0,3}$ , 1/с:

$$\omega_{0,3} = \omega_c(1 - s_{0,3}).$$

25. Визначити кутову швидкість характеристик, для значення ковзання  $s_{0,5}=0,5$ ,  $\omega_{0,5}$ , 1/с:

$$\omega_{0,5} = \omega_c(1 - s_{0,5}).$$

26. Визначити кутову швидкість характеристик, для значення ковзання  $s_{0,6}=0,6$ ,  $\omega_{0,6}$ , 1/с:

$$\omega_{0,6} = \omega_c(1 - s_{0,6}).$$

27. Визначити кутову швидкість характеристик, для значення ковзання  $s_{0,8}=0,8$ ,  $\omega_{0,8}$ , 1/с:

$$\omega_{0,8} = \omega_c(1 - s_{0,8}).$$

28. Визначити кутову швидкість характеристик, для значення ковзання  $s_{0,9}=0,9$ ,  $\omega_{0,9}$ , 1/с:

$$\omega_{0,9} = \omega_c(1 - s_{0,9}).$$

29. Визначити кутову швидкість природної характеристики, для значення ковзання  $s = s_{кп}$ ,  $\omega_{пs_{кп}}$ , 1/с:

$$\omega_{пs_{кп}} = \omega_c(1 - s_{кп}).$$

30. Визначити кутову швидкість штучної характеристики, для значення ковзання  $s = s_{кш}$ ,  $\omega_{шs_{кш}}$ , 1/с:

$$\omega_{шs_{кш}} = \omega_c(1 - s_{кш}).$$

31. Визначити момент штучної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,01}=0,01$ ,  $M_{ш0,01}$ , Нм:

$$M_{ш0,01} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,01}}{s_{кш}} + \frac{s_{кш}}{s_{0,01}}}.$$



32. Визначити момент штучної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,05}=0,05$ ,  $M_{ш0,05}$ , Нм:

$$M_{ш0,05} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,05}}{s_{кш}} + s_{0,05}}.$$

33. Визначити момент штучної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,1}=0,1$ ,  $M_{ш0,1}$ , Нм:

$$M_{ш0,1} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,1}}{s_{кш}} + s_{0,1}}.$$

34. Визначити момент штучної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,3}=0,3$ ,  $M_{ш0,3}$ , Нм:

$$M_{ш0,3} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,3}}{s_{кш}} + s_{0,3}}.$$

35. Визначити момент штучної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,5}=0,5$ ,  $M_{ш0,5}$ , Нм:

$$M_{ш0,5} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,5}}{s_{кш}} + s_{0,5}}.$$

36. Визначити момент штучної характеристики, для значення ковзання  $s = s_{кш}$ ,  $M_{шs_{кш}}$ , Нм:

$$M_{шs_{кш}} = \frac{2M_k}{\frac{s_{кш}}{s_{кш}} + s_{кш}} = M_k.$$

37. Визначити момент штучної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,8}=0,8$ ,  $M_{ш0,8}$ , Нм:

$$M_{ш0,8} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,8}}{s_{кш}} + s_{0,8}}.$$

38. Визначити момент штучної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,9}=0,9$ ,  $M_{ш0,9}$ , Нм:

$$M_{ш0,9} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,9}}{s_{кш}} + s_{0,9}}.$$

39. Визначити момент штучної характеристики, для значення ковзання  $s_1=1$ ,  $M_{ш1}$ , Нм:

$$M_{ш1} = \frac{2M_K}{\frac{s_1}{s_{кш}} + \frac{s_{кш}}{s_1}}$$

40. Визначити статичний момент  $M_c$ , Нм:

$$M_c = K_M M_H$$

41. Визначити ковзання, що відповідає статичній швидкості  $\omega_{c1}$  на штучній характеристиці,  $s_{c1}$ :

$$s_{c1} = s_{кш} \left[ \frac{M_K}{M_c} - \sqrt{\left(\frac{M_K}{M_c}\right)^2 - 1} \right]$$

42. Визначити статичну швидкість на штучній характеристиці  $\omega_{c1}$ , 1/с:

$$\omega_{c1} = \omega_c(1 - s_{c1})$$

43. Визначити ковзання, що відповідає статичній швидкості  $\omega_2$  на природній характеристиці,  $s_{c2}$ :

$$s_{c2} = s_{кп} \left[ \frac{M_K}{M_c} - \sqrt{\left(\frac{M_K}{M_c}\right)^2 - 1} \right]$$

44. Визначити статичну швидкість на природній характеристиці  $\omega_{c2}$ , 1/с:

$$\omega_{c2} = \omega_c(1 - s_{c2})$$

45. Визначити початковий момент штучної характеристики при переході на природну характеристику  $M_{поч}$ , Нм:

$$M_{поч} = \frac{2M_K}{\frac{s_{c1}}{s_{кп}} + \frac{s_{кп}}{s_{c1}}}$$

46. Скласти таблицю значень ковзання  $s$ , кутової швидкості  $\omega$ , моменту двигуна  $M_p$  для 9 розрахункових точок природної механічної характеристики.

Таблиця 1.2

Таблиця параметрів розрахункових точок  
природної характеристики

№ розрахункової точки	Параметри		
	s	$\omega$	$M_{п}$
	-	1/c	Нм
1	0	$\omega_c$	0
2	0,01	$\omega_{0,01}$ (п. 20)	$M_{п0,01}$ (п. 12)
3	0,05	$\omega_{0,05}$ (п. 21)	$M_{п0,05}$ (п. 13)
4	0,1	$\omega_{0,1}$ (п. 22)	$M_{п0,1}$ (п. 14)
5	0,2	$\omega_{0,2}$ (п. 23)	$M_{п0,2}$ (п. 15)
6	$s_{кп}$ (п. 7)	$\omega_{пs_{кп}}$ (п. 29)	$M_{пs_{кп}}=M_k$ (п. 16)
-	0,4	-	-
7	0,6	$\omega_{0,6}$ (п. 26)	$M_{п0,6}$ (п. 17)
8	0,8	$\omega_{0,8}$ (п. 27)	$M_{п0,8}$ (п. 18)
9	1	0	$M_{п1}$ (п. 19)

47. Скласти таблицю значень ковзання s, кутової швидкості  $\omega$ , моменту двигуна  $M_{ш}$  для 10 розрахункових точок штучної механічної характеристики.

Таблиця 1.3

Таблиця параметрів розрахункових точок  
штучної характеристик

№ розрахункової точки	Параметри		
	s	$\omega$	$M_{ш}$
	-	1/c	Hм
1	0	$\omega_c$	0
2	0,01	$\omega_{0,01}$ (п. 20)	$M_{ш0,01}$ (п. 31)
3	0,05	$\omega_{0,05}$ (п. 21)	$M_{ш0,05}$ (п. 32)
4	0,1	$\omega_{0,1}$ (п. 22)	$M_{ш0,1}$ (п. 33)
-	0,2	-	-
5	0,3	$\omega_{0,3}$ (п. 24)	$M_{ш0,3}$ (п. 34)
6	0,5	$\omega_{0,5}$ (п. 25)	$M_{ш0,5}$ (п. 35)
-	0,6	-	-
7	$s_{кш}$ (п. 11)	$\omega_{шs_{кш}}$ (п. 30)	$M_{шs_{кш}} = M_{к}$ (п. 36)
8	0,8	$\omega_{0,8}$ (п. 27)	$M_{ш0,8}$ (п. 37)
9	0,9	$\omega_{0,9}$ (п. 28)	$M_{ш0,9}$ (п. 38)
10	1	0	$M_{ш1}$ (п. 39)

### 1.3. ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ РОБОТИ 1

#### РОЗРАХУНКОВА РОБОТА 1

#### РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ ЗМІННОГО СТРУМУ З АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ

##### Мета роботи:

1. Розрахувати штучну статичну механічну характеристику двигуна.
2. Розрахувати природну статичну механічну характеристику двигуна.

#### 1. ВИХІДНІ ДАНІ

Асинхронний електродвигун мехатронного модуля працює на природній механічній характеристиці, долаючи опір робочого процесу пристрою.

1. Вихідні дані роботи: номінальна потужність  $P_n=17,5$  кВт; номінальна частота обертання  $n_n=945$  об./хв.; стандартна синхронна швидкість обертання  $\omega_c=104,7$  1/с; активний опір фази якоря  $R_2=0,12$  Ом; реактивний опір фази статора  $X_1=0,43$  Ом; реактивний опір фази ротора  $X_2=0,25$  Ом; додатковий опір  $R_{\text{дод}}=0,1$  Ом; коефіцієнт приведення електрорушійних сил  $k_c=2,66$ ; коефіцієнт статичного моменту  $K_c=0,5$ .

2. Номінальна кутова швидкість:

$$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 945}{60} = 99 \text{ 1/с.}$$

3. Номінальний електромагнітний момент двигуна:

$$M_n = 1,05 \frac{P_n}{\omega_n} = 1,05 \cdot \frac{17,5 \cdot 10^3}{99} = 186 \text{ Нм.}$$

4. Приведений активний опір ротора:

$$R_2' = R_2 k_c^2 = 0,12 \cdot 2,66^2 = 0,849 \text{ Ом.}$$

5. Приведений реактивний опір ротора:

$$X_2' = X_2 k_c^2 = 0,25 \cdot 2,66^2 = 1,77 \text{ Ом.}$$

6. Сумарний реактивний опір  $X_2$ , Ом:

$$X_k = X_1 + X_2' = 0,43 + 1,77 = 2,2 \text{ Ом.}$$

7. Критичне ковзання для природної характеристики:

$$s_{кп} = \frac{R'_2}{X_k} = \frac{0,849}{2,2} = 0,386.$$

8. Критичний момент для природної та штучної характеристики:

$$M_k = \frac{3U^2}{2\omega_c X_k} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 104,7 \cdot 2,2} = 315 \text{ Нм},$$

де  $U=220 \text{ В}$  – фазна напруга ротора.

9. Додатковий опір ротора:

$$R'_{\text{дод}} = R_{\text{дод}} k_e^2 = 0,1 \cdot 2,66^2 = 0,708 \text{ Ом}.$$

10. Сумарний опір ротора:

$$R'_{2\Sigma} = R'_2 + R'_{\text{дод}} = 0,849 + 0,708 = 1,56 \text{ Ом}.$$

11. Критичне ковзання для штучної характеристики:

$$s_{кш} = \frac{R'_{2\Sigma}}{X_k} = \frac{1,56}{2,2} = 0,709.$$

12. Момент природної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,01}=0,01$ :

$$M_{п0,01} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,01}}{s_{кп}} + \frac{s_{кп}}{s_{0,01}}} = \frac{2 \cdot 315}{\frac{0,01}{0,386} + \frac{0,386}{0,01}} = 16,3 \text{ Нм}.$$

13. Момент природної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,05}=0,05$ :

$$M_{п0,05} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,05}}{s_{кп}} + \frac{s_{кп}}{s_{0,05}}} = \frac{2 \cdot 315}{\frac{0,05}{0,386} + \frac{0,386}{0,05}} = 80,3 \text{ Нм}.$$

14. Момент природної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,1}=0,1$ :

$$M_{п0,1} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,1}}{s_{кп}} + \frac{s_{кп}}{s_{0,1}}} = \frac{2 \cdot 315}{\frac{0,1}{0,386} + \frac{0,386}{0,1}} = 153 \text{ Нм}.$$

15. Момент природної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,2}=0,2$ :

$$M_{п0,2} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,2}}{s_{кп}} + \frac{s_{кп}}{s_{0,2}}} = \frac{2 \cdot 315}{\frac{0,2}{0,386} + \frac{0,386}{0,2}} = 257 \text{ Нм}.$$

16. Момент природної характеристики, для значення

ковзання  $s = s_{\text{кп}}$ :

$$M_{\text{пс}_{\text{кп}}} = \frac{2M_{\text{к}}}{\frac{s_{\text{кп}}}{s_{\text{кп}}} + \frac{s_{\text{кп}}}{s_{\text{кп}}}} = M_{\text{к}} = 315 \text{ Нм.}$$

17. Момент природної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,6}=0,6$ :

$$M_{\text{п}0,6} = \frac{2M_{\text{к}}}{\frac{s_{0,6}}{s_{\text{кп}}} + \frac{s_{\text{кп}}}{s_{0,6}}} = \frac{2 \cdot 315}{\frac{0,6}{0,386} + \frac{0,386}{0,6}} = 287 \text{ Нм.}$$

18. Момент природної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,8}=0,8$ :

$$M_{\text{п}0,8} = \frac{2M_{\text{к}}}{\frac{s_{0,8}}{s_{\text{кп}}} + \frac{s_{\text{кп}}}{s_{0,8}}} = \frac{2 \cdot 315}{\frac{0,8}{0,386} + \frac{0,386}{0,8}} = 247 \text{ Нм.}$$

19. Момент природної характеристики, для значення ковзання  $s_1=1$ :

$$M_{\text{п}1} = \frac{2M_{\text{к}}}{\frac{s_1}{s_{\text{кп}}} + \frac{s_{\text{кп}}}{s_1}} = \frac{2 \cdot 315}{\frac{1}{0,386} + \frac{0,386}{1}} = 212 \text{ Нм.}$$

20. Кутова швидкість характеристик, для значення ковзання  $s_{0,01}=0,01$ :

$$\omega_{0,01} = \omega_c(1 - s_{0,01}) = 104,7 \cdot (1 - 0,01) = 104 \text{ 1/с.}$$

21. Кутова швидкість характеристик, для значення ковзання  $s_{0,05}=0,05$ :

$$\omega_{0,05} = \omega_c(1 - s_{0,05}) = 104,7 \cdot (1 - 0,05) = 99,5 \text{ 1/с.}$$

22. Кутова швидкість характеристик, для значення ковзання  $s_{0,1}=0,1$ :

$$\omega_{0,1} = \omega_c(1 - s_{0,1}) = 104,7 \cdot (1 - 0,1) = 94,2 \text{ 1/с.}$$

23. Кутова швидкість характеристик, для значення ковзання  $s_{0,2}=0,2$ :

$$\omega_{0,2} = \omega_c(1 - s_{0,2}) = 104,7 \cdot (1 - 0,2) = 83,8 \text{ 1/с.}$$

24. Кутова швидкість характеристик, для значення ковзання  $s_{0,3}=0,3$ :

$$\omega_{0,3} = \omega_c(1 - s_{0,3}) = 104,7 \cdot (1 - 0,3) = 73,3 \text{ 1/с.}$$

25. Кутова швидкість характеристик, для значення ковзання  $s_{0,5}=0,5$ :

$$\omega_{0,5} = \omega_c(1 - s_{0,5}) = 104,7 \cdot (1 - 0,5) = 52,4 \text{ 1/с.}$$

26. Кутова швидкість характеристик, для значення ковзання  $s_{0,6}=0,6$ :

$$\omega_{0,6} = \omega_c(1 - s_{0,6}) = 104,7 \cdot (1 - 0,6) = 41,9 \text{ 1/с.}$$

27. Кутова швидкість характеристик, для значення ковзання  $s_{0,8}$ :

$$\omega_{0,8} = \omega_c(1 - s_{0,8}) = 104,7 \cdot (1 - 0,8) = 20,9 \text{ 1/с.}$$

28. Кутова швидкість характеристик, для значення ковзання  $s_{0,9}=0,9$ :

$$\omega_{0,9} = \omega_c(1 - s_{0,9}) = 104,7 \cdot (1 - 0,9) = 10,5 \text{ 1/с.}$$

29. Кутова швидкість природної характеристики, для значення ковзання  $s = s_{кп}$ :

$$\omega_{пс_{кп}} = \omega_c(1 - s_{кп}) = 104,7 \cdot (1 - 0,386) = 64,3 \text{ 1/с.}$$

30. Кутова швидкість штучної характеристики, для значення ковзання  $s = s_{кш}$ :

$$\omega_{шс_{кш}} = \omega_c(1 - s_{кш}) = 104,7 \cdot (1 - 0,709) = 30,5 \text{ 1/с.}$$

31. Момент штучної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,01}=0,01$ :

$$M_{ш0,01} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,01}}{s_{кш}} + \frac{s_{кш}}{s_{0,01}}} = \frac{2 \cdot 315}{\frac{0,01}{0,709} + \frac{0,709}{0,01}} = 8,88 \text{ Нм.}$$

32. Момент штучної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,05}=0,05$ :

$$M_{ш0,05} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,05}}{s_{кш}} + \frac{s_{кш}}{s_{0,05}}} = \frac{2 \cdot 315}{\frac{0,05}{0,709} + \frac{0,709}{0,05}} = 44,2 \text{ Нм.}$$

33. Момент штучної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,1}=0,1$ :

$$M_{ш0,1} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,1}}{s_{кш}} + \frac{s_{кш}}{s_{0,1}}} = \frac{2 \cdot 315}{\frac{0,1}{0,709} + \frac{0,709}{0,1}} = 87,1 \text{ Нм.}$$

34. Момент штучної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,3}=0,3$ :

$$M_{ш0,3} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,3}}{s_{кш}} + \frac{s_{кш}}{s_{0,3}}} = \frac{2 \cdot 315}{\frac{0,3}{0,709} + \frac{0,709}{0,3}} = 226 \text{ Нм.}$$



35. Момент штучної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,5}=0,5$ :

$$M_{ш0,5} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,5}}{s_{кш}} + \frac{s_{кш}}{s_{0,5}}} = \frac{2 \cdot 315}{\frac{0,5}{0,709} + \frac{0,709}{0,5}} = 297 \text{ Нм.}$$

36. Момент штучної характеристики, для значення ковзання  $s = s_{кш}$ :

$$M_{шs_{кш}} = \frac{2M_k}{\frac{s_{кш}}{s_{кш}} + \frac{s_{кш}}{s_{кш}}} = M_k = 315 \text{ Нм.}$$

37. Момент штучної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,8}=0,8$ :

$$M_{ш0,8} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,8}}{s_{кш}} + \frac{s_{кш}}{s_{0,8}}} = \frac{2 \cdot 315}{\frac{0,8}{0,709} + \frac{0,709}{0,8}} = 313 \text{ Нм.}$$

38. Момент штучної характеристики, для значення ковзання  $s_{0,9}=0,9$ :

$$M_{ш0,9} = \frac{2M_k}{\frac{s_{0,9}}{s_{кш}} + \frac{s_{кш}}{s_{0,9}}} = \frac{2 \cdot 315}{\frac{0,9}{0,709} + \frac{0,709}{0,9}} = 306 \text{ Нм.}$$

39. Момент штучної характеристики, для значення ковзання  $s_1=1$ :

$$M_{ш1} = \frac{2M_k}{\frac{s_1}{s_{кш}} + \frac{s_{кш}}{s_1}} = \frac{2 \cdot 315}{\frac{1}{0,709} + \frac{0,709}{1}} = 297 \text{ Нм.}$$

40. Статичний момент:

$$M_c = K_M M_H = 0,5 \cdot 186 = 93 \text{ Нм.}$$

41. Ковзання, що відповідає статичній швидкості  $\omega_{c1}$  на штучній характеристиці:

$$s_{c1} = s_{кш} \left[ \frac{M_k}{M_c} - \sqrt{\left(\frac{M_k}{M_c}\right)^2 - 1} \right] = 0,709 \cdot \left[ \frac{315}{93} - \sqrt{\left(\frac{315}{93}\right)^2 - 1} \right] = 0,107.$$

42. Статична швидкість на штучній характеристиці:

$$\omega_{c1} = \omega_c (1 - s_{c1}) = 104,7 \cdot (1 - 0,107) = 93,5 \text{ 1/с.}$$

43. Ковзання, що відповідає статичній швидкості  $\omega_2$  на природній характеристиці:

$$s_{c2} = s_{кп} \left[ \frac{M_K}{M_c} - \sqrt{\left(\frac{M_K}{M_c}\right)^2 - 1} \right] = 0,386 \cdot \left[ \frac{315}{93} - \sqrt{\left(\frac{315}{93}\right)^2 - 1} \right] = 0,0583.$$

44. Статична швидкість на природній характеристиці:

$$\omega_{c2} = \omega_c(1 - s_{c2}) = 104,7 \cdot (1 - 0,0583) = 98,6 \text{ 1/с.}$$

45. Початковий момент штучної характеристики при переході на природну характеристику:

$$M_{\text{поч}} = \frac{2M_K}{\frac{s_{c1}}{s_{кп}} + \frac{s_{кп}}{s_{c1}}} = \frac{2 \cdot 315}{\frac{0,107}{0,386} + \frac{0,386}{0,107}} = 162 \text{ Нм.}$$

46. Параметри розрахункових точок природної характеристики

№ розрахункової точки	Параметри		
	s	$\omega$	$M_{п}$
	-	1/с	Нм
1	0	104,7	0
2	0,01	104	16,3
3	0,05	99,5	80,3
4	0,1	94,2	153
5	0,2	83,8	257
6	0,386	64,3	315
-	0,4	-	-
7	0,6	41,9	287
8	0,8	20,9	247
9	1	0	212

47. Параметри розрахункових точок штучної характеристики

№ розрахункової точки	Параметри		
	s	$\omega$	$M_{ш}$
	-	1/c	$H_M$
1	0	104,7	0
2	0,01	104	8,88
3	0,05	99,5	44,2
4	0,1	94,2	87,1
-	0,2	-	-
5	0,3	73,3	226
-	0,4	-	-
6	0,5	52,4	297
-	0,6	-	-
7	0,709	98,6	315
8	0,8	20,9	313
9	0,9	10,5	306
10	1	0	297

## **РОЗРАХУНКОВА РОБОТА 2**

### **РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З ДВИГУНОМ З НЕЗАЛЕЖНИМ ЗБУДЖЕННЯМ**

#### **Мета роботи:**

1. Розрахувати штучну та природну статичні механічні характеристики двигуна.
2. Розрахувати перехідні процеси  $\omega=f(t)$  та  $M=f(t)$  при переході у нову статичну робочу точку.

#### **2.1. ВИХІДНІ ДАНІ**

Електродвигун постійного струму з незалежним збудженням мехатронного модуля працює на природній механічній характеристиці, долаючи опір робочого процесу мехатронного пристрою.

#### **2.2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ 2**

1. Вибрати за варіантом з табл. 2.1 вихідні дані роботи: номінальна потужність  $P_n$ , номінальна частота обертання  $n_n$ , номінальний струм якоря  $I_n$ , активний опір якоря  $R_a$ , додатковий опір якоря  $R_{\text{дод}}$ , приведений сумарний момент інерції механічної частини електропривода  $J$ , коефіцієнт статичного моменту  $K_c$ .

Таблиця 2.1

Варіанти вихідних даних для виконання розрахункової роботи 2

Варіант	$P_n$	$n_n$	$I_n$	$R_{я}$	$R_{дод}$	$J$	$K_c$
	кВт	об./хв.	А	Ом		кг·м <sup>2</sup>	-
1	3	1000	18,1	1,52	3,6	0,7	0,3
2	4	1500	21,4	0,9	3,1	1,2	0,4
3	5,4	1000	27	0,2	2,4	1,8	0,7
4	7	1500	37,4	0,27	1,8	1,5	0,6
5	8	1060	43,8	0,303	1,5	0,85	0,45
6	9	900	48	0,3	1,5	3,1	0,5
7	10	1000	55	0,279	1,2	1,9	0,71
8	11	2200	56	0,109	1,2	1,2	0,6
9	12	1500	64	0,1	1	1,4	0,7
10	14	1000	75	0,09	0,9	1,6	0,6
11	16	2000	86	0,095	0,77	1,8	0,45
12	18	2200	96	0,082	0,69	2	0,5
13	20	1500	107	0,085	0,62	2,1	0,71
14	22	1000	118	0,08	0,56	2,3	0,6
15	23	2000	126	0,73	10	2,4	0,5
16	24	1500	128	0,07	0,5	8	0,7
17	26	1000	139	0,075	0,47	10	0,6
19	28	1500	150	0,068	0,44	12	0,5
19	30	1060	161	0,069	0,41	15,1	0,5
20	31	900	166	0,07	0,4	14	0,71
21	33	1000	176	0,083	0,38	12	0,6
22	35	1060	187	0,077	0,35	10	0,7
23	37	1000	198	0,082	1,7	7,2	0,63
24	38	900	203	0,08	0,3	8	0,64
25	39	1060	209	0,075	0,32	9	0,66
26	40	1000	214	0,07	0,31	9,5	0,68
27	41	850	219	0,06	0,3	10	0,7
28	42	800	226	0,05	0,29	11	0,73
29	44	900	230	0,04	0,28	12	0,77
30	46	625	233	0,03	0,21	12,5	0,8

2. Визначити номінальну кутову швидкість  $\omega_n$ , 1/с:

$$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60}.$$

3. Визначити добуток конструктивної сталої  $c$  та магнітного потоку  $\Phi$   $c\Phi_n$ , В·с:

$$c\Phi_n = \frac{U_n - I_n R_n}{\omega_n},$$

де  $U_n=220$  В – номінальна напруга якоря.

4. Визначити номінальне значення електромагнітного моменту двигуна  $M_n$ , Нм:

$$M_n = c\Phi_n I_n.$$

5. Визначити статичний момент  $M_c$ , Нм:

$$M_c = K_c M_n.$$

6. Визначити кутову швидкість ідеального холостого ходу  $\omega_0$ , 1/с:

$$\omega_0 = \frac{U_n}{c\Phi_n}.$$

7. Визначити жорсткість штучної характеристики  $\beta_1$ , Нм·с:

$$\beta_1 = \frac{(c\Phi_n)^2}{R_{я} + R_{дод}}.$$

8. Визначити жорсткість природної характеристики  $\beta_2$ , Нм·с:

$$\beta_2 = \frac{(c\Phi_n)^2}{R_{я}}.$$

9. Визначити статичну кутову швидкість на штучній характеристиці  $\omega_1$ , 1/с:

$$\omega_1 = \omega_0 - \frac{M_c}{\beta_1}.$$

10. Визначити статичну кутову швидкість на природній характеристиці  $\omega_2$ , 1/с:

$$\omega_2 = \omega_0 - \frac{M_c}{\beta_2}.$$

11. Визначити початковий момент при переході на природну механічну характеристику  $M_{поч}$ , Нм:

$$M_{поч} = \beta_2 (\omega_0 - \omega_1).$$

12. Визначити електромеханічну сталу часу  $T_m$ , с:

$$T_M = \frac{J}{\beta_2}.$$

13. Визначити момент завершення перехідного процесу  $t_{пп}$ , с:

$$t_{пп} = 4T_M.$$

14. Визначити момент часу 2 розрахунку перехідного процесу  $t_2$ , с:

$$t_2 = \frac{t_{пп}}{8}.$$

15. Визначити момент часу 3 розрахунку перехідного процесу  $t_3$ , с:

$$t_3 = \frac{t_{пп}}{4}.$$

16. Визначити момент часу 4 розрахунку перехідного процесу  $t_4$ , с:

$$t_4 = 3 \frac{t_{пп}}{8}.$$

17. Визначити момент часу 5 розрахунку перехідного процесу  $t_5$ , с:

$$t_5 = \frac{t_{пп}}{2}.$$

18. Визначити момент часу 6 розрахунку перехідного процесу  $t_6$ , с:

$$t_6 = 3 \frac{t_{пп}}{4}.$$

19. Визначити кутову швидкість для моменту часу  $t_2$   $\omega_{t_2}$ , 1/с:

$$\omega_{t_2} = \omega_2 + (\omega_1 - \omega_2)e^{-\frac{t_2}{T_M}}.$$

20. Визначити кутову швидкість для моменту часу  $t_3$   $\omega_{t_3}$ , 1/с:

$$\omega_{t_3} = \omega_2 + (\omega_1 - \omega_2)e^{-\frac{t_3}{T_M}}.$$

21. Визначити кутову швидкість для моменту часу  $t_4$   $\omega_{t_4}$ , 1/с:

$$\omega_{t_4} = \omega_2 + (\omega_1 - \omega_2)e^{-\frac{t_4}{T_M}}.$$

22. Визначити кутову швидкість для моменту часу  $t_5$   $\omega_{t_5}$ ,

1/с:

$$\omega_{t_5} = \omega_2 + (\omega_1 - \omega_2)e^{-\frac{t_5}{T_M}}$$

23. Визначити кутову швидкість для моменту часу  $t_6$   $\omega_{t_6}$ ,

1/с:

$$\omega_{t_6} = \omega_2 + (\omega_1 - \omega_2)e^{-\frac{t_6}{T_M}}$$

24. Визначити кутову швидкість для моменту часу  $t_7$   $\omega_{t_7}$ ,

1/с:

$$\omega_{t_7} = \omega_2 + (\omega_1 - \omega_2)e^{-\frac{t_{\text{III}}}{T_M}}$$

25. Визначити момент двигуна для моменту часу  $t_2$   $M_{t_2}$ ,

Нм:

$$M_{t_2} = M_c + (M_{\text{поч}} - M_c)e^{-\frac{t_2}{T_M}}$$

26. Визначити момент двигуна для моменту часу  $t_3$   $M_{t_3}$ ,

Нм:

$$M_{t_3} = M_c + (M_{\text{поч}} - M_c)e^{-\frac{t_2}{T_M}}$$

27. Визначити момент двигуна для моменту часу  $t_4$   $M_{t_4}$ ,

Нм:

$$M_{t_4} = M_c + (M_{\text{поч}} - M_c)e^{-\frac{t_2}{T_M}}$$

28. Визначити момент двигуна для моменту часу  $t_5$   $M_{t_5}$ ,

Нм:

$$M_{t_5} = M_c + (M_{\text{поч}} - M_c)e^{-\frac{t_2}{T_M}}$$

29. Визначити момент двигуна для моменту часу  $t_6$   $M_{t_6}$ ,

Нм:

$$M_{t_6} = M_c + (M_{\text{поч}} - M_c)e^{-\frac{t_2}{T_M}}$$

30. Визначити момент двигуна для моменту часу  $t_7$   $M_{t_7}$ ,

Нм:

$$M_{t_7} = M_c + (M_{\text{поч}} - M_c)e^{-\frac{t_{\text{III}}}{T_M}}$$

31. Скласти таблицю значень моменту часу  $t$ , кутової швидкості  $\omega$ , моменту двигуна  $M$  для 7 розрахункових точок графіків перехідних процесів двигуна.



Таблиця 2.2

Таблиця параметрів розрахункових точок  
перехідних процесів двигуна

№ розрахункової точки	Параметри		
	t	$\omega$	M
	c	1/c	Hm
1	0	$\omega_1$ (п. 9)	$M_{\text{поч}}$ (п. 11)
2	$t_2$ (п. 14)	$\omega_{t_2}$ (п. 19)	$M_{t_2}$ (п. 25)
3	$t_3$ (п. 15)	$\omega_{t_3}$ (п. 20)	$M_{t_3}$ (п. 26)
4	$t_4$ (п. 16)	$\omega_{t_4}$ (п. 21)	$M_{t_4}$ (п. 27)
5	$t_5$ (п. 17)	$\omega_{t_5}$ (п. 22)	$M_{t_5}$ (п. 28)
6	$t_6$ (п. 18)	$\omega_{t_6}$ (п. 23)	$M_{t_6}$ (п. 29)
7	$t_{\text{III}}$ (п. 13)	$\omega_{t_7}$ (п. 24)	$M_{t_7}$ (п. 30)

## 2.3. ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ РОБОТИ 2

### РОЗРАХУНКОВА РОБОТА 2

#### РОЗРАХУНОК МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ З ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ З НЕЗАЛЕЖНИМ ЗБУДЖЕННЯМ

##### Мета роботи:

1. Розрахувати штучну та природну статичні механічні характеристики двигуна.
2. Розрахувати перехідні процеси  $\omega=f(t)$  та  $M=f(t)$  при переході у нову статичну робочу точку.

### 1. ВИХІДНІ ДАНІ

Двигун постійного струму з незалежним збудженням працює на природній механічній характеристиці, долаючи опір робочого процесу мехатронного пристрою.

1. Вихідні дані роботи: номінальна потужність  $P_n=6$  кВт; номінальна частота обертання  $n_n=1500$  об./хв.; номінальний струм якоря  $I_n=33,2$  А; активний опір якоря  $R_a=0,472$  Ом; додатковий опір якоря  $R_{\text{дод}}=2$  Ом; приведений сумарний момент інерції механічної частини електропривода  $J=0,7$  кг·м<sup>2</sup>; коефіцієнт статичного моменту  $K_c=0,8$ .

2. Номінальна кутова швидкість:

$$\omega_n = \frac{2\pi n_n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1500}{60} = 157 \text{ 1/с.}$$

3. Добуток конструктивної сталої  $c$  та магнітного потоку  $\Phi$ :

$$c\Phi_n = \frac{U_n - I_n R_n}{\omega_n} = \frac{220 - 33,2 \cdot 0,472}{157} = 1,3 \text{ В} \cdot \text{с,}$$

де  $U_n=220$  В – номінальна напруга якоря.

4. Номінальне значення електромагнітного моменту двигуна:

$$M_n = c\Phi_n I_n = 1,3 \cdot 33,2 = 43,2 \text{ Нм.}$$

5. Статичний момент:

$$M_c = K_c M_H = 0,8 \cdot 43,2 = 34,6 \text{ Нм.}$$

6. Кутова швидкість ідеального холостого ходу:

$$\omega_0 = \frac{U_H}{c\Phi_H} = \frac{220}{1,3} = 169 \text{ 1/с.}$$

7. Жорсткість штучної характеристики:

$$\beta_1 = \frac{(c\Phi_H)^2}{R_{я} + R_{\text{дод}}} = \frac{1,3^2}{0,472 + 2} = 0,684 \text{ Нм} \cdot \text{с.}$$

8. Жорсткість природної характеристики:

$$\beta_2 = \frac{(c\Phi_H)^2}{R_{я}} = \frac{1,3^2}{0,472} = 3,58 \text{ Нм} \cdot \text{с.}$$

9. Статична кутова швидкість на штучній характеристиці:

$$\omega_1 = \omega_0 - \frac{M_c}{\beta_1} = 169 - \frac{34,6}{0,684} = 118 \text{ 1/с.}$$

10. Статична кутова швидкість на природній характеристиці:

$$\omega_2 = \omega_0 - \frac{M_c}{\beta_2} = 169 - \frac{34,6}{3,58} = 159 \text{ 1/с.}$$

11. Початковий момент при переході на природну механічну характеристику:

$$M_{\text{поч}} = \beta_2(\omega_0 - \omega_1) = 3,58 \cdot (169 - 118) = 183 \text{ Нм.}$$

12. Електромеханічна стала часу:

$$T_M = \frac{J}{\beta_2} = \frac{0,7}{3,58} = 0,196 (\approx 0,2) \text{ с.}$$

13. Момент завершення перехідного процесу:

$$t_{\text{пп}} = 4T_M = 4 \cdot 0,196 = 0,784 (\approx 0,8) \text{ с.}$$

14. Момент часу 2 розрахунку перехідного процесу:

$$t_2 = \frac{t_{\text{пп}}}{8} = \frac{0,784}{8} = 0,098 (\approx 0,1) \text{ с.}$$

15. Момент часу 3 розрахунку перехідного процесу:

$$t_3 = \frac{t_{\text{пп}}}{4} = \frac{0,784}{4} = 0,196 (\approx 0,2) \text{ с.}$$

16. Момент часу 4 розрахунку перехідного процесу:

$$t_4 = 3 \frac{t_{\text{пп}}}{8} = 3 \cdot \frac{0,784}{8} = 0,294 (\approx 0,3) \text{ с.}$$

17. Момент часу 5 розрахунку перехідного процесу:

$$t_5 = \frac{t_{\text{пп}}}{2} = \frac{0,784}{2} = 0,392 (\approx 0,4) \text{ с.}$$

18. Момент часу 6 розрахунку перехідного процесу:

$$t_6 = 3 \frac{t_{\text{пп}}}{4} = 3 \cdot \frac{0,784}{4} = 0,588 (\approx 0,6) \text{ с.}$$

19. Кутова швидкість для моменту часу  $t_2$ :

$$\omega_{t_2} = \omega_2 + (\omega_1 - \omega_2)e^{-\frac{t_2}{T_M}} = 159 + (118 - 159) \cdot e^{-\frac{0,098}{0,196}} = 134 \text{ 1/с.}$$

20. Кутова швидкість для моменту часу  $t_3$ :

$$\omega_{t_3} = \omega_2 + (\omega_1 - \omega_2)e^{-\frac{t_3}{T_M}} = 159 + (118 - 159) \cdot e^{-\frac{0,196}{0,196}} = 144 \text{ 1/с.}$$

21. Кутова швидкість для моменту часу  $t_4$ :

$$\omega_{t_4} = \omega_2 + (\omega_1 - \omega_2)e^{-\frac{t_4}{T_M}} = 159 + (118 - 159) \cdot e^{-\frac{0,294}{0,196}} = 150 \text{ 1/с.}$$

22. Кутова швидкість для моменту часу  $t_5$ :

$$\omega_{t_5} = \omega_2 + (\omega_1 - \omega_2)e^{-\frac{t_5}{T_M}} = 159 + (118 - 159) \cdot e^{-\frac{0,392}{0,196}} = 153 \text{ 1/с.}$$

23. Кутова швидкість для моменту часу  $t_6$ :

$$\omega_{t_6} = \omega_2 + (\omega_1 - \omega_2)e^{-\frac{t_6}{T_M}} = 159 + (118 - 159) \cdot e^{-\frac{0,588}{0,196}} = 157 \text{ 1/с.}$$

24. Кутова швидкість для моменту часу  $t_7$ :

$$\omega_{t_7} = \omega_2 + (\omega_1 - \omega_2)e^{-\frac{t_{\text{пп}}}{T_M}} = 159 + (118 - 159) \cdot e^{-\frac{0,784}{0,196}} = 158 \text{ 1/с}$$

25. Момент двигуна для моменту часу  $t_2$ :

$$M_{t_2} = M_c + (M_{\text{поч}} - M_c)e^{-\frac{t_2}{T_M}} = 34,6 + (183 - 34,6) \cdot e^{-\frac{0,098}{0,196}} = 125 \text{ Нм.}$$

26. Момент двигуна для моменту часу  $t_3$ :

$$M_{t_3} = M_c + (M_{\text{поч}} - M_c)e^{-\frac{t_3}{T_M}} = 34,6 + (183 - 34,6) \cdot e^{-\frac{0,196}{0,196}} = 89,2 \text{ Нм.}$$

27. Момент двигуна для моменту часу  $t_4$ :

$$M_{t_4} = M_c + (M_{\text{поч}} - M_c)e^{-\frac{t_2}{T_m}} = 34,6 + (183 - 34,6) \cdot e^{-\frac{0,294}{0,196}} = 67,7 \text{ Нм.}$$

28. Момент двигуна для моменту часу  $t_5$ :

$$M_{t_5} = M_c + (M_{\text{поч}} - M_c)e^{-\frac{t_2}{T_m}} = 34,6 + (183 - 34,6) \cdot e^{-\frac{0,392}{0,196}} = 54,7 \text{ Нм.}$$

29. Момент двигуна для моменту часу  $t_6$ :

$$M_{t_6} = M_c + (M_{\text{поч}} - M_c)e^{-\frac{t_2}{T_m}} = 34,6 + (183 - 34,6) \cdot e^{-\frac{0,588}{0,196}} = 42 \text{ Нм.}$$

30. Момент двигуна для моменту часу  $t_7$ :

$$M_{t_7} = M_c + (M_{\text{поч}} - M_c)e^{-\frac{t_{\text{пп}}}{T_m}} = 34,6 + (183 - 34,6) \cdot e^{-\frac{0,784}{0,196}} = 37,3 \text{ Нм.}$$

31. Параметри розрахункових точок перехідних процесів двигуна

№ розрахункової точки	Параметри		
	t	$\omega$	M
	c	1/c	Нм
1	0	118	183
2	0,1	134	125
3	0,2	144	89,2
4	0,3	150	67,7
5	0,4	153	54,7
6	0,6	157	42
7	0,8	158	37,3