

Міністерство освіти і науки України
Державний університет “Одеська політехніка”
Інститут електротехніки та електромеханіки
Кафедра електромеханічної інженерії

Шевченко В.П.
Белікова Л.Я.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до кусової роботи з дисципліни «Електричні машини»
«Аналіз експлуатаційних показників асинхронних електродвигунів»

для бакалаврів спеціальності
141 - “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”

Затверджено
на засіданні кафедри
електромеханічної інженерії
прот. №8 від 15.03.2023 р.

ЗМІСТ

ВСТУП

1. ВХІДНІ ДАНІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

2. АНАЛІЗ ВЛАСТИВОТЕЙ АД ПРИ НОМІНАЛЬНІЙ НАПРУЗІ И ЧАСТОТІ МЕРЕЖІ

2.1 Лістинг показників двигуна при напрузі U_n

2.2 Аналітичний розрахунки показників роботи АД при U_n

3. АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ АД ПРИ РІЗНИХ ЗНАЧЕННЯХ НАПРУГИ

3.1. Аналітичний розрахунки показників роботи АД при $U_{\min} = 0,9 U_n$

3.2 Порівняння результатів розрахунків трьох варіантів розрахунку при U_n, U_{\min}, U_{\max}

3.2.1. Текстовий файл порівняння

3.2.2. Порівняння пускових та робочих характеристик

Висновок

4. АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ АД ПРИ РІЗНИХ ЗНАЧЕННЯХ ОПОРУ ОБМОТКИ РОТОРА

4.1. Аналітичний розрахунки показників роботи АД при $R_{2\max} = 1,5R_{2n}$

4.2 Порівняння результатів трьох варіантів розрахунку при $R_{2n}, 1.5R_{2n}, 2R_{2n}$

4.2.1. Текстовий файл порівняння

4.2.2. Порівняння пускових та робочих характеристик

Висновок

5. АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ АД ПРИ РІЗНИХ ЗНАЧЕННЯХ ЧАСТОТИ МЕРЕЖІ

5.1. Аналітичний розрахунки показників роботи АД при $f_{\max} = 1,2 f_n$

5.2 Порівняння результатів трьох варіантів при f_n, f_{\min}, f_{\max}

5.2.1. Текстовий файл порівняння

5.2.2. Порівняння пускових та робочих характеристик

Висновок

6. АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ АД ПРИ РІЗНИХ ЗНАЧЕННЯХ ПОВІТРЯНОГО ЗАЗОРУ

6.1 Порівняння результатів розрахунків двох варіантів розрахунку при δ_n та $\delta_1 = \delta_n + 25\%(\delta_n)$

6.1.1. Текстовий файл порівняння

6.1.2. Порівняння пускових та робочих характеристик

Висновок

7. РОБОТА АД ЗА СХЕМАМИ З'ЄДНАННЯ ОБМОТКИ СТАТОРА У ТРИКУТНИК ТА ЗІРКУ

7.1. Аналітичний розрахунки показників при з'єднанні обмотки статора у зірку

7.2. Порівняння результатів двох варіантів розрахунку

7.2.1. Текстовий файл порівняння

7.2.2. Порівняння пускових та робочих характеристик

Висновок

8. АНАЛІЗ ЗМІНИ АКТИВНИХ ТА ІНДУКТИВНИХ ОПОРІВ ОБМОТОК АД

9. АНАЛІЗ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І МОМЕНТІВ ВИЩИХ ГАРМОНІК ВІД ВЕЛИЧИН НАПРУГИ

Література

Додаток А ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКУ

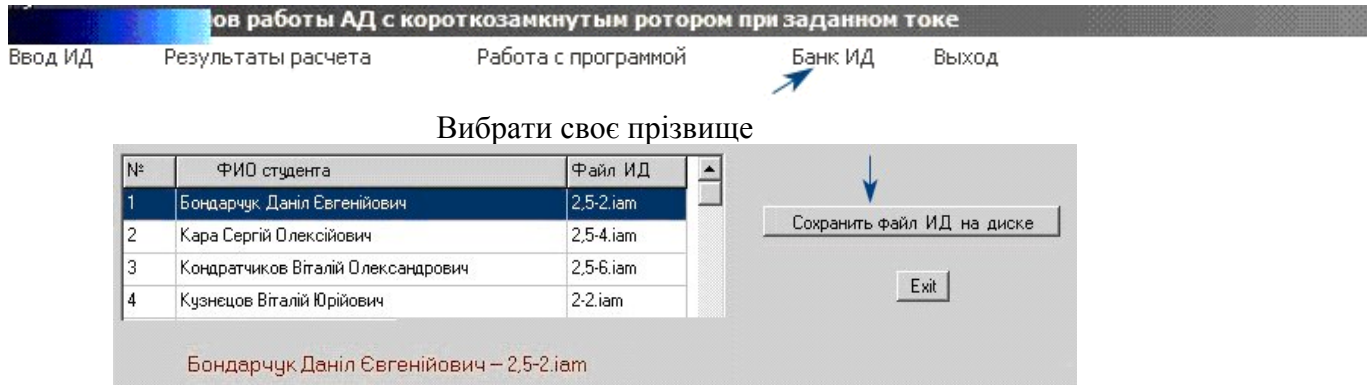
Додаток Б ПЕРЕЛІК ІДЕНТИФІКАТОРІВ ВХІДНИХ ДАНИХ

Додаток В ПЕРЕЛІК ІДЕНТИФІКАТОРІВ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКУ

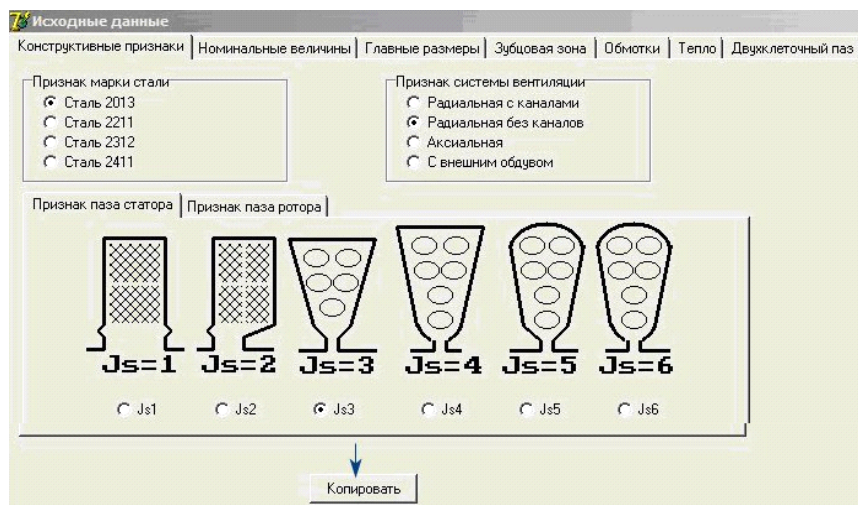
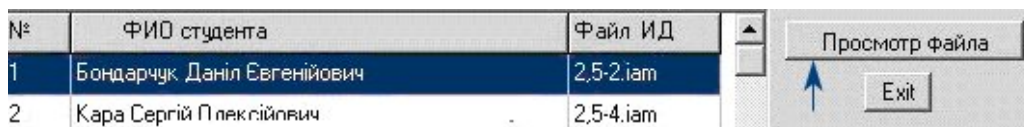
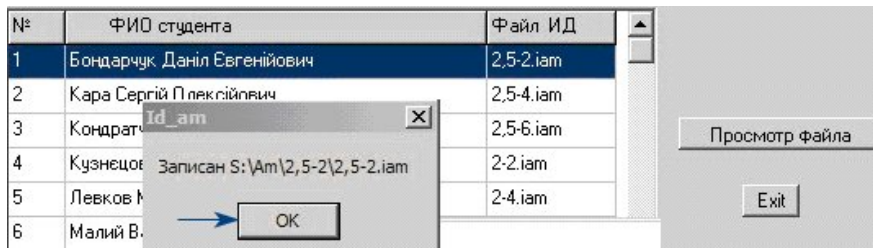
1. ВХІДНІ ДАНІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

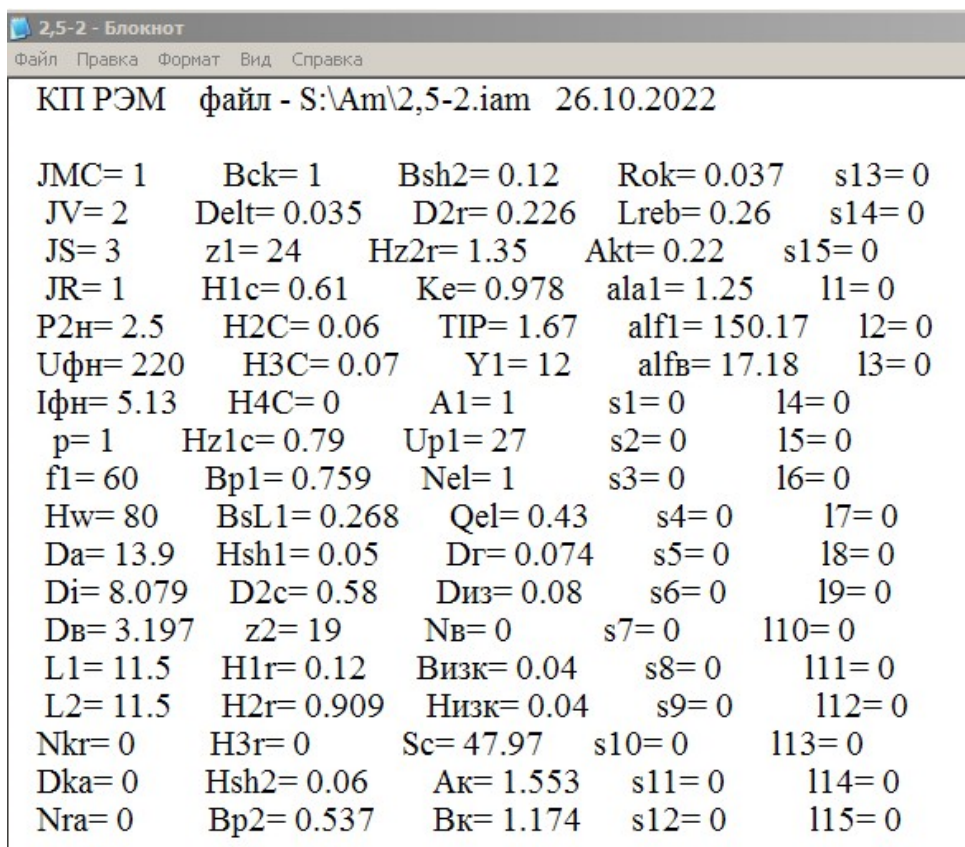
1.1. Отримання вхідних даних

Для отримання вхідних даних необхідно увійти в програму розрахунку за допомогою файлу `Kr_Am\Input_Kr_Am.exe`.



Ввести ім'я робочого диску, на якому буде створений каталог «АМ» та папка з ім'ям файлу





1.2 Розшифрування ідентифікаторів файлу вхідних даних

JMC = - ознака марки стали

JV = - ознака системи вентиляції

JS = - ознака форми паза статора

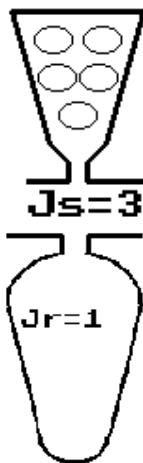


Рис.1.1 – Паз статора

JR = - ознака форми паза ротора

Рис.1.2 – Паз ротора

P2н = - номінальна потужність, кВт

Uфн = - номінальна фазна напруга, В

Іфн = - номінальний фазний струм, А

p = - число пар полюсів

f1 = - частота мережі живлення, Гц

Нw = - висота осі обертання, мм

Da = - зовнішній діаметр статора, см

Di = - діаметр розточення статора, см

D в = - діаметр вала, см

L1 = - розрахункова довжина статора, см

L2 = - довжина ротора з радіальними каналами, см

$N_{kr} = 0$ – число радіальних каналів
 $D_{ka} = 0$ – діаметр аксіальних каналів, см
 $N_{ra} = 0$ – число рядів аксіальних каналів
 B_{sh2} = - скіс пазів ротора в зубцевих розподілах статора
 Δ = - величина повітряного зазору

z_1 = - число пазів статора
 H_{1c} =
 H_{2c} =
 H_{3c} =
 H_{4c} =
 B_{p1} =
 B_{sl1} =
 H_{sh1} =
 D_{2c} =

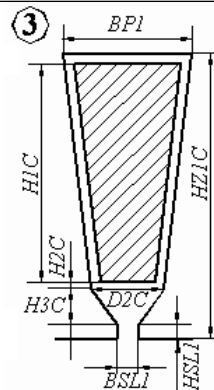


Рис.1.3 – Розміри паза статора

z_2 = - число пазів ротора
 H_{1r} =
 H_{2r} =
 $H_{3r} = 0$
 H_{sh2} =
 B_{p2} =
 B_{sh2} =
 D_{2r} =
 H_{z2r} =

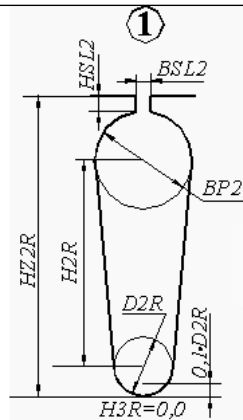


Рис.1.4 – Розміри паза ротора

Обмотка статора:

K_e = - коефіцієнт $K_e = E_{PC} / \text{напряга}$
 ТПР = - тип обмотки статора
 Y_1 = - крок обмотки в пазових розподілах
 A_1 = - число паралельних гілок
 $U_{p1} = 1$ – число ефективних провідників у пазу
 N_{el} = - число елементарних провідників в одному ефективному
 Q_{el} = - перетин елементарного провідника, \square е. мм
 D_r = - діаметр голого провідника, см
 $D_{из}$ = - діаметр ізолюваного провідника, см
 $N_{ин} = 0$ – число ефективних провідників по висоті паза
 $B_{изк}$ = - двостороння корпусна ізоляція по ширині паза, см
 $B_{низк}$ = - сумарна корпусна ізоляція по висоті паза, см
 Обмотка ротора
 S_c = - перетин стрижня обмотки ротора, \square е. мм
 A_k = - радіальний розмір к.з. кільця, см
 B_k = - товщина к.з. кільця, см
 $R_{ок}$ = - питомий електричний опір матеріалу обмотки ротора при робочій температурі,
 $\Omega \cdot \square$ е.мм / м

Вхідні дані для теплового розрахунків:

L_{reb} = - периметр перетину ребер корпусу, м
 A_{kt} = - коефіцієнт теплового розрахунків
 al_{a1} = - коефіцієнт теплопровідності й ізоляції обмотки
 al_{f1} = - коефіцієнт \square тепло розсіяння з поверхні статора
 al_{fv} = - коефіцієнт підігріву повітря

[стор 1](#)

При всіх розрахунках **необхідно ввести файл вхідних даних базового варіанту АД.**
Ідентифікатор розрахунку (Дод. А) визначає особливості розрахунку.

2. АНАЛІЗ ВЛАСТИВОСТЕЙ АД ПРИ НОМІНАЛЬНІЙ НАПРУЗІ

2.1 Лістинг показників двигуна при номінальній напрузі [2]

За програмою «Кг_Ам» виконується електромагнітних розрахунок базового варіанту АД.
Текстовий файл результатів розрахунку (S:\Am\2,5-2\2,5-2.r1) копіюється у пояснювальну записку.

КП_АМ файл - S:\Am\2,5-2\2,5-2.iam 29.10.2022
 $P_{2H} = 2.500$ $U_{H1} = 220.000$ $I_{H-} = 5.130$ $p = 1.000$ $f_1 = 60.000$
 $H_w = 80.000$ $D_a = 13.900$ $D_i = 8.079$ $D_v = 3.197$ $L_d = 11.500$
 $L_2 = 11.500$ $N_{kr} = 0.000$ $D_{ka} = 0.000$ $N_{ka} = 0.000$ $B_{ck} = 1.000$
 $delt = 0.035$ $z_1 = 24.000$ $H_{1c} = 0.610$ $H_{2c} = 0.060$ $H_{3c} = 0.070$
 $H_{4c} = 0.000$ $H_{z1c} = 0.790$ $B_{p1} = 0.759$ $B_{sh1} = 0.268$ $H_{sh1} = 0.050$
 $D_{2c} = 0.580$ $z_2 = 19.000$ $H_{1r} = 0.120$ $H_{2r} = 0.909$ $H_{3r} = 0.000$
 $H_{sh2} = 0.060$ $B_{p2} = 0.537$ $B_{sh2} = 0.120$ $D_{2r} = 0.226$ $H_{z2r} = 1.350$
 $K_e = 0.978$ $T_{ip} = 1.670$ $Y_1 = 12.000$ $A_1 = 1.000$ $U_{п1} = 27.000$
 $N_{e1} = 1.000$ $Q_{e1} = 0.430$ $DJ = 0.074$ $d_{из} = 0.080$ $U_v = 0.000$
 $B_{изк} = 0.040$ $B_{низк} = 0.040$ $S_c = 47.970$ $A_k = 1.553$ $B_k = 1.174$
 $R_{ок} = 0.037$ $L_{reb} = 0.260$ $A_{kt} = 0.220$ $Al_{a1} = 1.250$ $Al_{f1} = 150.170$
 $Al_{fv} = 17.180$

сталь -1 вентиляція -2 паз статора -3 паз ротора -1

Електромагнітні навантаження, Тл:

$\Phi_d, B\delta$ B_d B_{z1m} B_{z2m} B_{a1} B_{a2} kmj Imj^* w_1
0.0078 0.84 1.81 1.70 1.66 1.41 1.46 0.59 108.00

Параметри:

r	L_p	L_l	L_d	$L_{ск}$	X	Км/Кзап
3.57	0.83	3.05	2.31	1.11	2.18	0.24
0.90	1.41	0.56	2.54	1.11	1.85	0.42

Робочі характеристики:

$P_{2, лВт}$	n_2	s	КПД, %	$\cos\Phi$	II, А	$P_1, Вт$	ЭнКПД
0.13	3595.3	0.001	32.2	0.194	3.09	0.40	0.06
0.47	3586.0	0.004	62.6	0.353	3.25	0.76	0.22
0.81	3576.7	0.006	72.4	0.482	3.50	1.11	0.35
1.12	3567.4	0.009	76.9	0.581	3.81	1.46	0.45
1.42	3558.1	0.012	79.1	0.655	4.16	1.80	0.52
1.71	3548.8	0.014	80.2	0.711	4.55	2.13	0.57
1.98	3539.5	0.017	80.7	0.753	4.95	2.46	0.61
2.25	3530.2	0.019	80.8	0.784	5.37	2.78	0.63
2.49	3520.9	0.022	80.7	0.808	5.79	3.09	0.65
2.73	3511.6	0.025	80.4	0.827	6.22	3.40	0.66
2.95	3502.3	0.027	79.9	0.842	6.65	3.69	0.67

Номінальний режим:

2.10	3535.5	0.0179	80.8	0.767	5.13	2.60	0.62
------	--------	--------	------	-------	------	------	------

Пускові характеристики:

$m_5^* = 0.492$ $K_{o5} = 0.205$ $m_7^* = 0.164$ $K_{o7} = -0.158$

s	ki	M1	Ms	M5	M7	x1	x2"	r2"	I2"*
0.00	0.59	0.000	0.000	0.000	0.000	2.18	1.85	0.90	1.00
0.10	3.27	3.484	3.442	-0.031	-0.011	2.11	1.70	0.90	3.22
0.20	4.86	3.856	3.809	-0.034	-0.012	2.04	1.58	0.90	4.79
0.30	5.77	3.632	3.580	-0.038	-0.015	1.99	1.52	0.90	5.68
0.40	6.35	3.311	3.251	-0.043	-0.018	1.97	1.48	0.90	6.26
0.50	6.77	3.021	2.949	-0.049	-0.023	1.94	1.44	0.91	6.67
0.60	7.07	2.758	2.669	-0.057	-0.032	1.92	1.42	0.91	6.97
0.70	7.30	2.532	2.413	-0.069	-0.051	1.91	1.40	0.91	7.20
0.80	7.48	2.340	2.134	-0.085	-0.120	1.90	1.39	0.92	7.38
0.90	7.62	2.175	2.204	-0.113	0.142	1.89	1.38	0.92	7.52
1.00	7.74	2.034	1.922	-0.167	0.056	1.89	1.37	0.93	7.64

Критичне ковзання

0.175 4.55 3.86

Перегриви статора, град:

Lв	0a	0i1	0l	0il	0s	0ai	0c
5.40	16.74	5.21	5.61	0.63	16.85	171.67	188.53

Копіюються пускові та робочі характеристики базового варіанту при номінальній напрузі живлення.

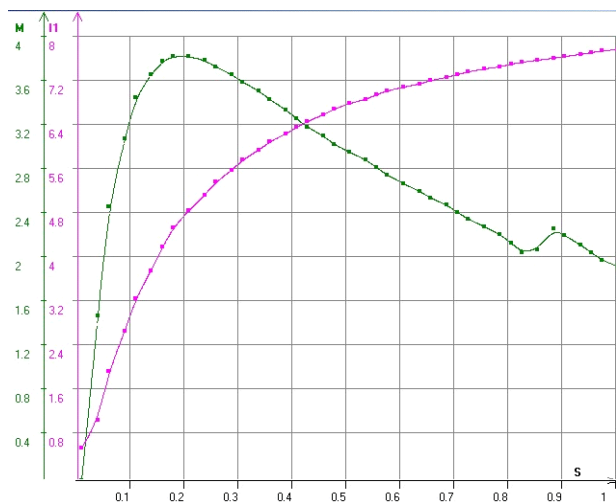


Рис.2.1 – Пускові характеристики

при $U_H = 220 B$

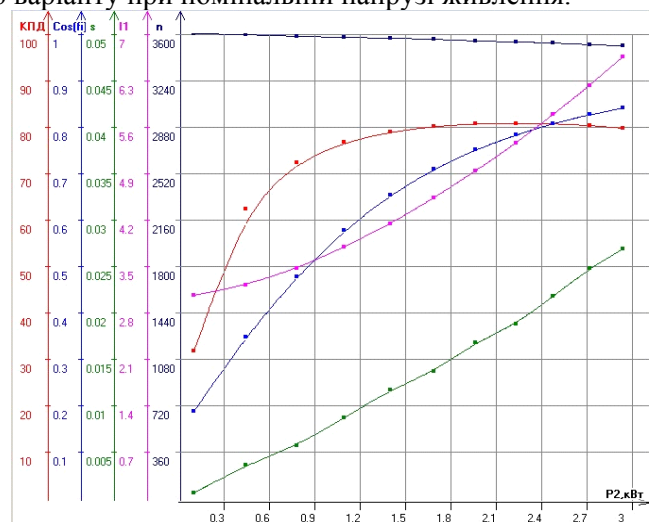


Рис.2.2 – Робочі характеристики при

$U_H = 220 B$

2.2 Аналітичний розрахунок показників роботи АД при U_H

За даними повного електромагнітного розрахунку (п. 2.1 лістинг показників двигуна при номінальній напрузі) приймаються параметри обмоток статора та ротора. Параметри ($R'_{2\sigma}$, $X_{1\sigma}$, $X'_{2\sigma}$) (табл.2.1) приймаються за даними розрахунку пускових характеристик: для номінального режиму при ковзанні $s = 0$, параметри пускового режиму при ковзанні $s = 1$.

Активний опір обмотки статора (R_1) приймається за даними розрахунку параметрів.

Таблиця 2.1.-Параметри пускового та номінального режимів **базового** АД при $U_H = B$

Режим	$R_1, Ом$	$R'_{2\sigma}, Ом$	$R_K, Ом$	$X_{1\sigma}, Ом$	$X'_{2\sigma}, Ом$	$X_K, Ом$
пусковий						
номінальний						

При розрахунку показників номінального режиму (максимальний момент та перевантажувальна здатність; критичне ковзання; номінальне ковзання) використовуються параметри номінального режиму

- максимальний момент, $H \cdot м$
$$M_M = \frac{p \cdot m \cdot U_H^2}{4\pi \cdot f_1 \cdot \left[r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_K^2} \right]}, \quad (2.1)$$

- перевантажувальна здатність
$$k_M = M_M / M_H, \quad (2.2)$$

- критичне ковзання
$$s_K = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_K^2}}, \quad (2.3)$$

- номінальне ковзання
$$s_H \approx \frac{s_K}{\left(k_M + \sqrt{k_M^2 - 1} \right)}, \quad (2.4)$$

- номінальна частота обертання, $об/хв$
$$n_2 = \frac{60 \cdot f_H}{p} (1 - s_H), \quad (2.5)$$

- номінальний момент, $H \cdot м$
$$M_H = \frac{P_H}{\Omega_H} = \frac{P_H \cdot 10^3}{0,105 \cdot n_H}, \quad (2.6)$$

- синхронна кутова швидкість, $рад/с$
$$\omega_1 = \frac{2\pi \cdot f_H}{p}, \quad (2.7)$$

- номінальна частота обертання, $об/хв$
$$n_2 = \frac{60 \cdot f_1}{p} (1 - s_{H1}). \quad (2.8)$$

При розрахунку показників пускового режиму (пусковий струм та кратність пускового струму; пусковий момент та кратність пускового моменту) використовуються параметри пускового режиму.

- пусковий струм, A
$$I_{II} = \frac{U_H}{\sqrt{r_K^2 + x_K^2}}, \quad (2.9)$$

- кратність пускового струму
$$k_i = I_{II} / I_H, \quad (2.10)$$

- пусковий момент, $H \cdot м$
$$M_{II} = \frac{p \cdot m \cdot U_H^2 \cdot r_2'}{2\pi \cdot f_1 \cdot (r_K^2 + x_K^2)}, \quad (2.11)$$

- кратність пускового моменту
$$k_{II} = M_{II} / M_H. \quad (2.12)$$

Задавши ковзання $s = 0.1, 0.2, \dots, 0.9, 1$ розрахувати та побудувати пускові характеристики $k_{eM} = \varphi(s)$, розраховану за формулою Клосса

$$k_{eM} = \frac{2k_M}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s}}, \quad (2.13)$$

та з урахуванням зміни параметрів обмоток АД

$$k_{eM} = k_M \cdot \frac{(2 + \beta \cdot s_K)}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s} + \beta \cdot s_K}, \quad (2.14)$$

де
$$\beta \approx \frac{U_H}{U_H - 0,5I_0 \cdot X_K} \approx (1,02...1,05). \quad (2.14)$$

Висновки: порівняти результати ручного та машинного розрахунку показників АД.

[стор 1](#)

3. АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ АД ПРИ РІЗНИХ ЗНАЧЕННЯХ НАПРУГИ

3.1. Аналітичний розрахунки показників роботи АД при $U_{\min} = 0,9 U_H = B$

За умову незмінності струму статора $I_H = A$

– кратність пускового струму
$$k_{i1} \approx \left(\frac{U_{\min}}{U_H} \right) \cdot k_{i\delta}, \quad (3.1)$$

– кратність пускового моменту
$$k_{\Pi 1} \approx \left(\frac{U_{\min}}{U_H} \right)^2 \cdot k_{\Pi \delta}, \quad (3.2)$$

– перевантажувальна здатність
$$k_{M1} \approx \left(\frac{U_{\min}}{U_H} \right)^2 \cdot k_{M\delta}, \quad (3.3)$$

– критичне ковзання
$$s_{K1} \approx s_{K\delta}, \quad (3.4)$$

– номінальне ковзання
$$s_{H1} \approx \frac{s_{K1}}{\left(k_{M1} + \sqrt{k_{M1}^2 - 1} \right)}, \quad (3.5)$$

– номінальна частота обертання, об/хв
$$n_2 = \frac{60 \cdot f_1}{p} (1 - s_{H1}). \quad (3.6)$$

3.2 Порівняння результатів розрахунків трьох варіантів розрахунку при $U_H, 1,1U_H, 0,9U_H$

Виконати на ПК розрахунки АД при $U_{\max} = 1,1U_H, U_{\min} = 0,9U_H$, сформувати текстовий та графічні файли порівняння.

3.2.1. Текстовий файл порівняння розрахунків при $U_H, 1,1U_H, 0,9U_H$

Порівняння результатів розрахунку

1=> File 2,5-6.r1 $U_{H1} = 127.0$ $f_1 = 60.0 \leftarrow U_H$
 2=> File 2,5-6_140.r1 $U_{H1} = 140.0$ $f_1 = 60.0 \leftarrow 1,1U_H$
 3=> File 2,5-6_114.r1 $U_{H1} = 114.0$ $f_1 = 60.0 \leftarrow 0,9U_H$

Електромагнітні навантаження, Тл:

	Фd,Вб	Vd	Vz1m	Vz2m	Va1	Va2	kmj	Imj*	w1
1=>	0.0038	0.88	1.83	1.72	1.53	1.00	1.28	0.57	126.00
2=>	0.0042	0.96	2.02	1.90	1.68	1.10	1.46	0.71	126.00
3=>	0.0034	0.79	1.65	1.55	1.37	0.89	1.20	0.48	126.00

в.о.

1=>	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2=>	1.105	1.091	1.104	1.105	1.098	1.100	1.141	1.246	1.000
3=>	0.895	0.898	0.902	0.901	0.895	0.890	0.937	0.842	1.000

Параметри статора

	r1	Lп	Lл	Lд	Lск	X1	Kм
1=>	0.89	1.16	1.26	2.09	1.19	1.42	0.35
2=>	0.89	1.16	1.26	2.09	1.17	1.39	0.35
3=>	0.89	1.16	1.26	2.09	1.21	1.43	0.35

в.о.

1=>	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

2=>1.000 1.000 1.000 1.000 0.983 0.979 1.000
 3=>1.000 1.000 1.000 1.000 1.017 1.007 1.000

Параметри ротора

	r2	Lп	Lл	Lд	Lск	X2
1=>	0.40	1.82	0.19	3.32	1.19	2.06
2=>	0.40	1.82	0.19	3.32	1.17	2.02
3=>	0.40	1.82	0.19	3.32	1.21	2.08

в.о.

1=>	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2=>	1.000	1.000	1.000	1.000	0.983	0.981
3=>	1.000	1.000	1.000	1.000	1.017	1.010

Номинальний режим:

	P2,лВт	n2	s	КПД,%	cosФ	I1,А	P1,Вт	ЭнКПД
1=>	2.36	1159.4	0.0338	80.9	0.693	11.04	2.92	0.56
2=>	2.20	1169.7	0.0252	79.9	0.595	11.04	2.76	0.48
3=>	2.22	1150.2	0.0415	80.2	0.734	11.04	2.77	0.59

в.о.

1=>	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2=>	0.932	1.009	0.746	0.988	0.859	1.000	0.945
3=>	0.941	0.992	1.228	0.991	1.059	1.000	0.949

Пускові характеристики:

	s	ki	M1	Ms	M5	M7	x1	x2"	r2"	I2"
1=>	1.00	4.00	1.206	1.178	-0.034	0.006	1.17	1.40	0.51	3.79
2=>	1.00	4.70	1.844	1.811	-0.041	0.008	1.09	1.27	0.51	4.47
3=>	1.00	3.42	0.909	0.888	-0.026	0.005	1.23	1.52	0.51	3.22

в.о.

1=>	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2=>	1.000	1.175	1.529	1.537	1.206	1.333	0.932	0.907	1.000	1.179
3=>	1.000	0.855	0.754	0.754	0.765	0.833	1.051	1.086	1.000	0.850

Критичне ковзання

	s	ki	M1
1=>	0.150	2.47	2.37
2=>	0.150	2.77	3.30
3=>	0.150	2.18	1.92

в.о.

1=>	1.000	1.000	1.000
2=>	1.000	1.121	1.392
3=>	1.000	0.883	0.810

3.2.2. Порівняння пускових та робочих характеристик

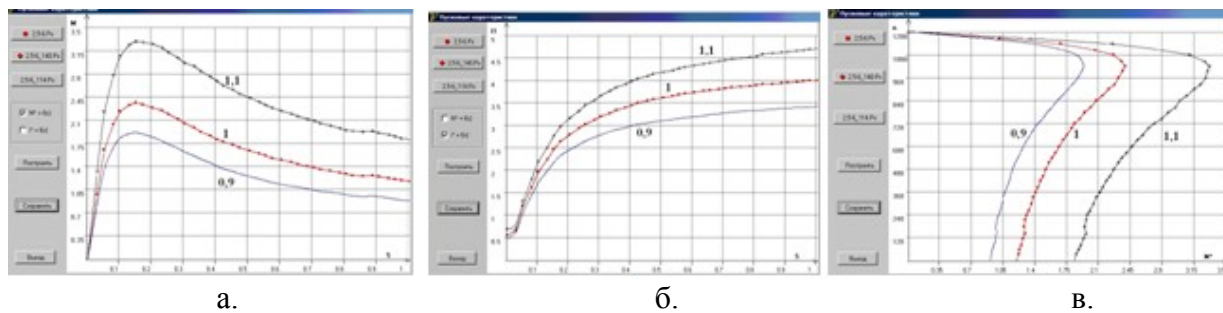


Рис. 3.1.- Пускові та механічна характеристики при наругах живлення $U_1 = (0.9, 1, 1.1)U_H$:
 а – $M = \varphi(s)$, б – $I = \varphi(s)$, в – $n = \varphi(M)$

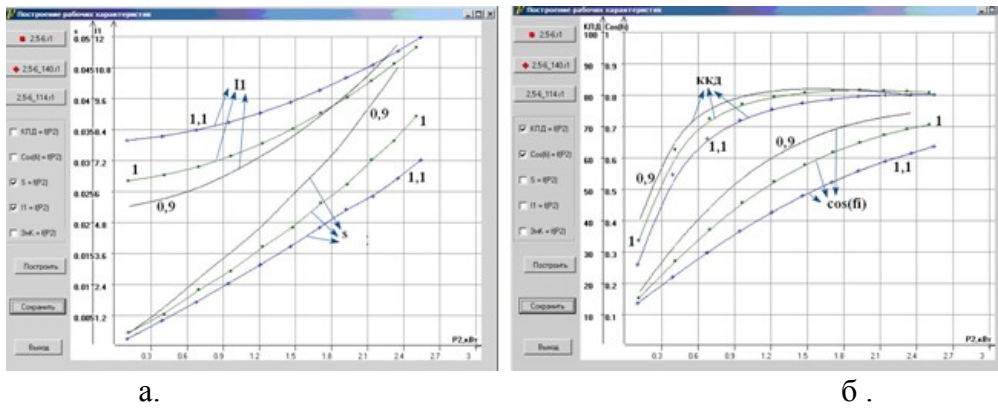


Рис. 3.2.- Робочі характеристики при наругах живлення $U_1 = (0.9, 1, 1.1)U_H$:
 а – $I_1 = \varphi(P_2)$, $s = \varphi(P_2)$; б – $\cos \varphi = \varphi(P_2)$, $\eta = \varphi(P_2)$

Висновки: У висновках треба проаналізувати причини зміни показників АД, представлених на графіках пускових та робочих характеристик.

[стор 1](#)

4. НАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ АД ПРИ РІЗНИХ ЗНАЧЕННЯХ ОПОРУ ОБМОТКИ РОТОРА

4.1. Аналітичний розрахунки показників роботи АД при $R_{2\max} > R_{2H}$

Таблиця 4.1.-Параметри пускового та номінального режимів **базового** АД при R_{2H}

Режим	$R_1, Ом$	$R'_{2\sigma}, Ом$	$R_K, Ом$	$X_{1\sigma}, Ом$	$X'_{2\sigma}, Ом$	$X_K, Ом$
пусковий						
номінальний						

При аналітичних розрахунках задати значення опору обмотки ротору на 50% більше базового АД.
 - коефіцієнт зміни активного опору обмотки ротору

$$k_r = \frac{R'_{2(\text{НОВ})}}{R'_{2\sigma}} = 1,5, \quad (4.1)$$

- активний опір обмотки ротору

$$R'_2 = R'_{2\sigma} \cdot k_r. \quad (4.2)$$

Таблиця 4.2.-Параметри пускового та номінального режимів при $R_2 = 1.5R_{2H}$

Режим	$R_1, Ом$	$R'_2, Ом$	$R_K, Ом$	$X_{1\sigma}, Ом$	$X'_{2\sigma}, Ом$	$X_K, Ом$
пусковий						
номінальний						

При розрахунку показників номінального режиму (максимальний момент та перевантажувальна здатність; критичне ковзання; номінальне ковзання) використовуються параметри номінального режиму.

– максимальний момент, $H \cdot м$

$$M_M = M_{M\sigma}, \quad (4.1)$$

– перевантажувальна здатність

$$k_M = M_M / M_{H\sigma} = k_{M\sigma}, \quad (4.2)$$

- критичне ковзання

$$s_K = \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + x_K^2}}, \quad (4.3)$$

$$- \text{ номінальне ковзання} \quad s_H \approx \frac{s_K}{\left(k_M + \sqrt{k_M^2 - 1} \right)} \quad (4.4)$$

$$- \text{ номінальна частота обертання} \quad n_H = \frac{60 \cdot f_H}{p} (1 - s_H), \quad (4.5)$$

При розрахунку показників пускового режиму (пусковий струм та кратність пускового струму; пусковий момент та кратність пускового моменту) використовуються параметри пускового режиму.

$$- \text{ пусковий струм, } A \quad I_{\Pi} = \frac{U_H}{\sqrt{r_K^2 + x_K^2}}, \quad (4.6)$$

$$- \text{ кратність пускового струму} \quad k_i = I_{\Pi} / I_H, \quad (4.7)$$

$$- \text{ пусковий момент, } H \cdot m \quad M_{\Pi} = \frac{p \cdot m \cdot U_H^2 \cdot r_2'}{2\pi \cdot f_1 \cdot (r_K^2 + x_K^2)}, \quad (4.8)$$

$$- \text{ кратність пускового моменту} \quad k_{\Pi} = M_{\Pi} / M_{H\delta}. \quad (4.9)$$

4.2 Порівняння результатів трьох варіантів розрахунку при R_{2H} , $1.5R_{2H}$, $2R_{2H}$

Виконати на ПК розрахунки АД при $1.5R_{2H}$, $2R_{2H}$, сформувані текстовий та графічні файли порівняння. При виконанні розрахунків змінюється значення питомого електричного опору матеріалу обмотки ротора при робочій температурі (R_{ok}).

4.2.1. Текстовий файл порівняння розрахунків при R_{2H} , $1.5R_{2H}$, $2R_{2H}$

4.2.2. Порівняння пускових та робочих характеристик при R_{2H} , $1.5R_{2H}$, $2R_{2H}$:

– пускові характеристики: $1 - M = \varphi(s)$; $2 - I = \varphi(s)$; $3 - n = \varphi(M)$;

– робочі характеристики: $1 - I_1 = \varphi(P_2)$, $s = \varphi(P_2)$; $2 - \cos \varphi = \varphi(P_2)$, $\eta = \varphi(P_2)$

Висновки: обґрунтувати зміну показників АД.

[стор 1](#)

5. АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ АД ПРИ РІЗНИХ ЗНАЧЕННЯХ ЧАСТОТИ МЕРЕЖІ

5.1. Аналітичний розрахунки показників роботи АД при $f_{\max} = 1,2 f_H$

$$- \text{ коефіцієнт зміни частоти} \quad k_f = \frac{f_{\max}}{f_H}, \quad (5.1)$$

$$- \text{ індуктивний опір статора} \quad x_1 = x_{1\delta} \cdot k_f, \quad (5.2)$$

$$- \text{ індуктивний опір ротора} \quad x_2' = x_{2\delta}' \cdot k_f. \quad (5.3)$$

Таблиця 5.1.-Параметри пускового та номінального режимів при $f_{\max} = 1,2 f_H$

Режим	$R_1, Ом$	$R'_{2\sigma}, Ом$	$R_K, Ом$	$X_1, Ом$	$X'_2, Ом$	$X_K, Ом$
пусковий						
номінальний						

При розрахунку показників пускового режиму (пусковий струм та кратність пускового струму; пусковий момент та кратність пускового моменту) використовуються параметри пускового режиму.

- коефіцієнт пускового моменту $\beta_n = 1 + \sqrt{\left(1 - \frac{r_K}{x_K}\right)},$ (5.4)

- кратність пускового момент $k_{\Pi 1} \approx \frac{k_{\Pi \sigma}}{k_f \beta_{\Pi}},$ (5.5)

- коефіцієнт пускового струму $\beta_i = 1 + \left(1 - \frac{r_K}{x_K}\right),$ (5.6)

- кратність пускового струму $k_{\Pi 1} \approx \frac{k_{\Pi \sigma}}{k_f \beta_i},$ (5.7)

При розрахунку показників номінального режиму (максимальний момент та перевантажувальна здатність; критичне ковзання; номінальне ковзання) використовуються параметри номінального режиму

- синхронна кутова швидкість $\omega_1 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p},$ (5.8)

- номінальний момент $M_H = \frac{P_H}{\Omega_H} = \frac{P_H \cdot 10^3}{0,105 \cdot n_H},$ (5.9)

- коефіцієнт ковзання $\beta_s = 1 - \frac{r_1}{x_K},$ (5.10)

- коефіцієнт максимального моменту $\beta_m = 1 + \left(1 - \frac{r_1}{x_K}\right),$ (5.11)

- критичне ковзання $s_{K1} \approx \frac{S_{K\sigma}}{k_f \beta_s},$ (5.12)

- максимальний момент $k_{M1} \approx \frac{k_{M\sigma}}{k_f \beta_m},$ (5.13)

- номінальне ковзання $s_{H1} \approx \frac{s_{K1}}{\left(k_{M1} + \sqrt{k_{M1}^2 - 1}\right)},$ (5.14)

- номінальна частота обертання, *об \ xв* $n_2 = \frac{60 \cdot f_1}{p} (1 - s_{H1}),$ (5.15)

5.2 Порівняння результатів трьох варіантів розрахунку при f_H, f_{max}, f_{min}

Виконати на ПК розрахунки АД при f_{\max} , f_{\min} , змінюючи значення частоти мережі сформувати текстовий та графічні файли порівняння. Для розрахунків при f_{\min} у вхідних даних змінюються частота мережі та фазна напруга двигуна у співвідношенні

$$U_1 = U_H \cdot \frac{f_{\min}}{f_H} \quad (5.1)$$

5.2.1. Текстовий файл порівняння розрахунку при f_H , f_{\max} , f_{\min}

5.2 Порівняння пускових та робочих характеристик розрахунку при f_H , f_{\max} , f_{\min} :

– пускові характеристики: $1 - M = \varphi(s)$; $2 - I = \varphi(s)$; $3 - n = \varphi(M)$;

– робочі характеристики: $1 - I_1 = \varphi(P_2)$, $s = \varphi(P_2)$; $2 - \cos \varphi = \varphi(P_2)$, $\eta = \varphi(P_2)$

Висновки: обґрунтувати зміну показників АД.

[стор 1](#)

6. АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ АД ПРИ РІЗНИХ ЗНАЧЕННЯХ ПОВІТРЯНОГО ЗАЗОРУ

Виконати на ПК розрахунок АД при $\delta_1 = \delta_H + 25\%(\delta_H)$ сформувати текстовий та графічні файли порівняння.

6.1. Текстовий файл порівняння двох варіантів при δ_H та $\delta_1 = \delta_H + 25\%(\delta_H)$

6.2 Порівняння пускових та робочих характеристик двох варіантів при δ_H та $\delta_1 = \delta_H + 25\%(\delta_H)$

– пускові характеристики: $1 - M = \varphi(s)$; $2 - I = \varphi(s)$; $3 - n = \varphi(M)$;

– робочі характеристики: $1 - I_1 = \varphi(P_2)$, $s = \varphi(P_2)$; $2 - \cos \varphi = \varphi(P_2)$, $\eta = \varphi(P_2)$

Висновки

[стор 1](#)

7. РОБОТА АД ЗА СХЕМАМИ З'ЄДНАННЯ ОБМОТКИ СТАТОРА У ТРИКУТНИК ТА ЗІРКУ

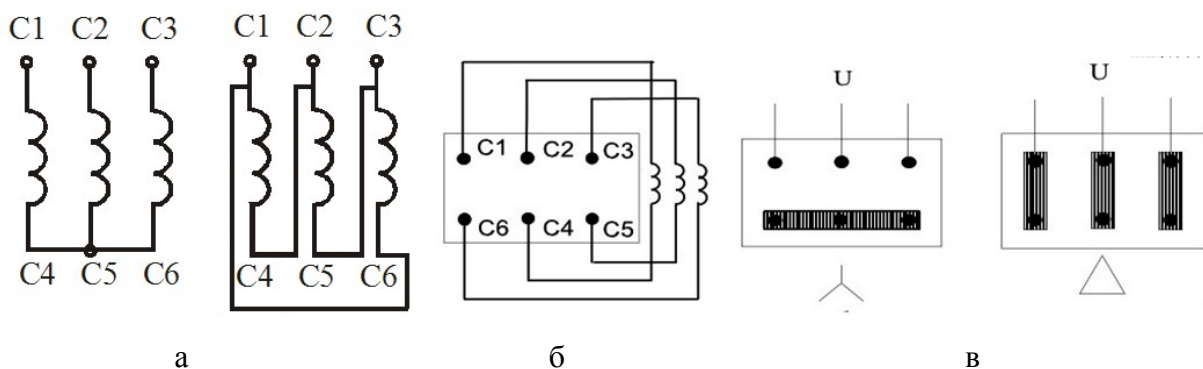


Рис. 7.1. Схеми з'єднання обмотки статора Y та Δ:

а - схеми комутації; б – підключення до клемної коробки; в – схеми підключення до мережі

Розрахунки виконуються у припущенні, що обмотка базового АД з'єднана у трикутник (Δ).

7.1. Аналітичний розрахунки показників при з'єднанні обмотки статора у зірку (Y)

За умову незмінності струму статора $I_H = , A$

$$- \text{ кратність пускового струму } k_{iY} \approx \left(\frac{U_{\phi Y}}{U_{\phi \Delta}} \right) \cdot k_{i\Delta}, \quad (7.1)$$

$$- \text{ кратність пускового моменту } k_{пY} \approx \left(\frac{U_{\phi Y}}{U_{\phi \Delta}} \right)^2 \cdot k_{п\Delta}, \quad (7.2)$$

$$- \text{ – перевантажувальна здатність } k_{мY} \approx \left(\frac{U_{\phi Y}}{U_{\phi \Delta}} \right)^2 \cdot k_{м\Delta}, \quad (7.3)$$

$$- \text{ критичне ковзання } s_{кY} \approx s_{к\Delta}, \quad (7.4)$$

$$- \text{ номінальне ковзання } s_{нY} \approx \frac{s_{кY}}{\left(k_{мY} + \sqrt{k_{мY}^2 - 1} \right)}, \quad (7.5)$$

$$- \text{ номінальна частота обертання, об/хв } n_{2Y} = \frac{60 \cdot f_1}{p} (1 - s_{нY}). \quad (7.6)$$

$$- \text{ потужність на валу двигуна, кВт } P_{2Y} \approx P_{2\Delta} \cdot \left(\frac{U_{\phi Y}}{U_{\phi \Delta}} \right) \cdot \left(\frac{n_{нY}}{n_{н\Delta}} \right), \quad (7.7)$$

7.2 Порівняння результатів двох варіантів розрахунку при з'єднанні обмотки статора у зірку

Виконати на ПК розрахунок АД при напрузі живлення $U = U_H / \sqrt{3}$, сформувати текстовий та графічні файли порівняння.

7.2.1. Текстовий файл порівняння розрахунків при $U = U_H, U = U_H / \sqrt{3}$

```

1=> File test0f_220.r1  Uн1= 220.0  f1= 50.0 - Δ
2=> File test0f_220_127.r1  Uн1= 127.0  f1= 50.0 - Y
    Електромагнітні навантаження, Тл:
    Фd,Вб  Bd  Vz1m  Vz2m  Va1  Va2  kmj  lmj*  w1
1=>0.0097  0.75  1.86  1.81  1.60  0.91  1.43  0.26  104.00
2=>0.0056  0.43  1.07  1.04  0.92  0.53  1.17  0.12  104.00
    в.о.
1=>1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000
2=>0.577  0.573  0.575  0.575  0.575  0.582  0.818  0.462  1.000
    Параметри статора
    r1    Lп  Lл  Lд  Lск  X1  Км
1=> 0.39  1.41  1.74  1.72  1.00  0.73  0.40
2=> 0.39  1.41  1.74  1.72  1.00  0.73  0.40
    о.е.
1=>1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000
2=>1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000  1.000
    Параметри ротора
    r2    Lп  Lл  Lд  Lск  X2
1=> 0.18  2.65  0.63  2.08  1.00  0.93
2=> 0.18  2.63  0.63  2.08  1.00  0.93

```

В.О.
1=>1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000
2=>1.000 0.992 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000

Номинальні дані:
P2,кВт n2 s кпд,% cosФ I1,A P1,кВт ЭнКпд
1=> 15.23 1462.1 0.0253 88.8 0.887 29.30 17.15 0.79
2=> 8.25 1427.4 0.0484 82.9 0.873 29.30 9.86 0.72

В.О.
1=>1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000
2=>0.542 0.976 1.913 0.934 0.984 1.000 0.575 0.911

Пускові характеристики:
s ki M1 Ms M5 M7 x1 x2" r2" I2"***
1=> 1.00 5.52 1.318 1.214 -0.156 0.052 0.59 0.61 0.26 5.44
2=> 1.00 2.81 0.598 0.553 -0.068 0.023 0.67 0.73 0.26 2.76

В.О.
1=>1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000 1.000
2=>1.000 0.509 0.454 0.456 0.436 0.442 1.136 1.197 1.000 0.507

Критичне ковзання
s ki M1
1=> 0.150 3.38 2.50
2=> 0.125 1.72 1.36

В.О.
1=>1.000 1.000 1.000
2=>0.833 0.509 0.544

7.2.2. Порівняння пускових та робочих характеристик двох варіантів розрахунку при з'єднанні обмотки у Δ ($U = U_H$) та Y ($U = U_H / \sqrt{3}$)

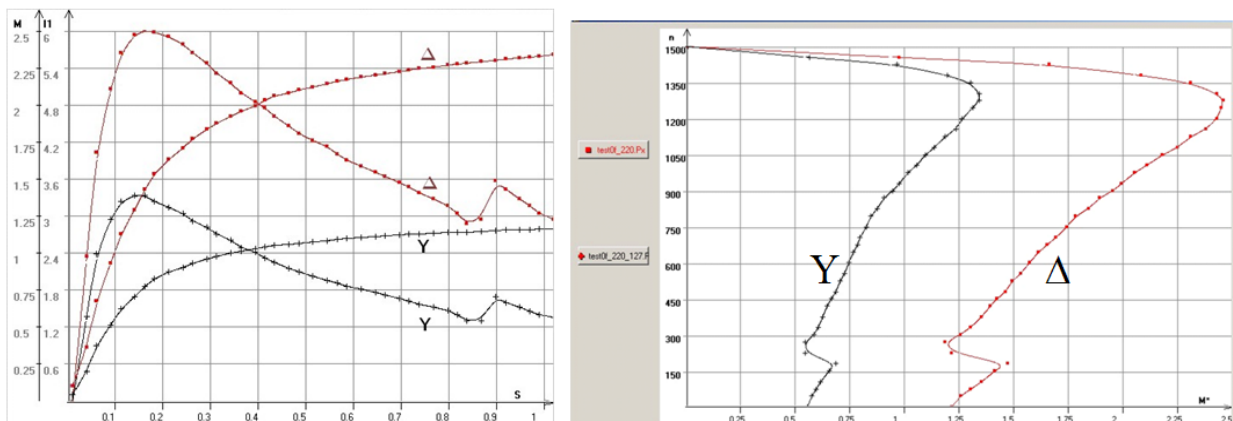


Рис. 7.2. Пускові та механічні характеристики при схемах обмотки статора Δ та Y

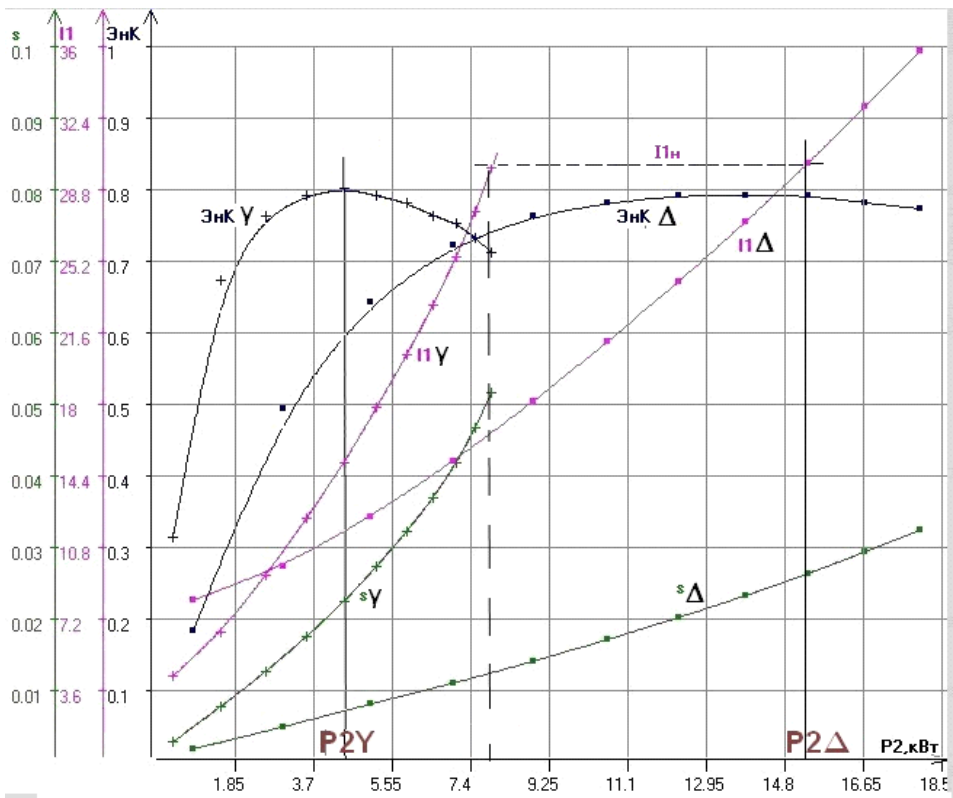


Рис. 7.3. Робочі характеристики при схемах обмотки статора Δ та Y

Висновки: Пояснити при якому моменті навантаження можна запустити АД?
 При якій потужності економічна доцільність використання АД?

[стор 1](#)

8. АНАЛІЗ ЗМІНИ АКТИВНИХ ТА ІНДУКТИВНИХ ОПОРІВ ОБМОТОК АД

Виконати аналіз зміни параметрів $X_1, X_2', R_2' = f(s)$ базового варіанту АД за [2].

Дані розрахунку параметрів приймаються за результатом розрахунку пускових характеристик базового АД (п. 2.1).

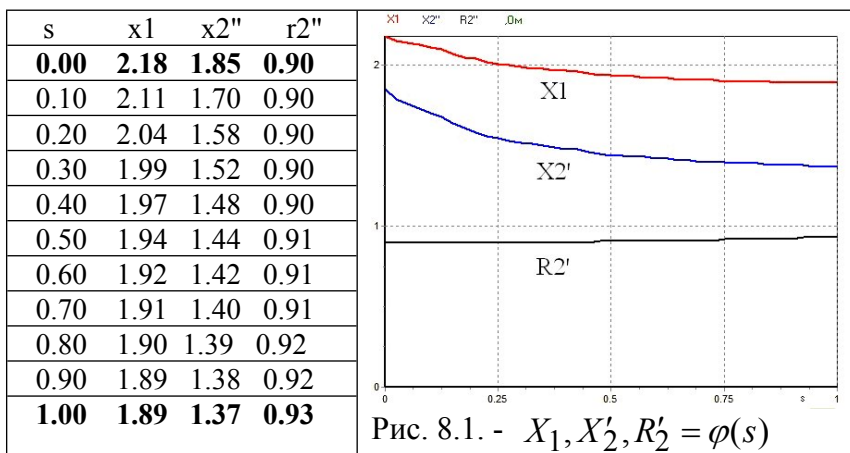


Рис. 8.1. - $X_1, X_2', R_2' = \varphi(s)$

Висновки: Пояснити причини зміни опорів обмоток при зміні ковзання від 0 до 1.

9. АНАЛІЗ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І МОМЕНТІВ ВИЩИХ ГАРМОНІК ВІД ВЕЛИЧИНИ НАПРУГИ

Для вищих гармонік порядку $\nu = -5$ та $\nu = 7$ виконати наступні розрахунки.

9.1. Розрахунок обмоткових коефіцієнтів та моментів вищих гармонік .

- кількість пазів на полюс та фазу обмотки статора

$$q = z / 2p \cdot m; \quad (9.1)$$

- коефіцієнт скорочення для двошарової обмотки

$$k_{y\nu} = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{y}{\tau} \cdot |\nu|\right) = \sin\left(90^\circ \cdot \frac{y}{\tau} \cdot |\nu|\right); \quad (9.2)$$

- коефіцієнт розподілу

$$k_{p\nu} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m} \cdot |\nu|\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2m \cdot q} \cdot |\nu|\right)} = \frac{1}{2q \cdot \sin\left(\frac{30^\circ}{q} \cdot |\nu|\right)}; \quad (9.3)$$

- коефіцієнт скосу

$$k_{ск\nu} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{b_{ск}}{\tau} \cdot |\nu|\right)}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{b_c}{\tau} \cdot |\nu|}, \quad (9.4)$$

де b_c, y, τ повинні бути однієї розмірності;

- обмотувальний коефіцієнт

$$k_{o\nu} = k_{y\nu} \cdot k_{p\nu} \cdot k_{ск\nu}; \quad (9.5)$$

- МРС першої гармоніки статора, A

$$F_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot m_1 \cdot \frac{w_1 \cdot k_{o1}}{p}; \quad (9.6)$$

- МРС вищих гармонік, A

$$F_\nu = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot m_1 \cdot \frac{w_1 \cdot k_{o\nu}}{p \cdot |\nu|} \cdot I_1; \quad (9.7)$$

- коефіцієнт диференціального розсіяння ротора (розсіяння вищих просторових гармонік)

$$\tau_{d2\nu} = \left[\left(\frac{\pi}{z_2} \cdot |\nu| \right)^2 / \sin^2 \left(\frac{\pi}{z_2} \cdot |\nu| \right) \right] - 1; \quad (9.8)$$

Асинхронний момент можна визначити, знаючи магнітний потік аналізованої гармоніки з урахуванням демпфірування його короткозамкненим ротором, обумовлений цим потоком струму в роторі й параметри ротора.

- Максимальний момент [2], $H \cdot M$

$$M_{k\nu} = \frac{3}{2} \cdot \frac{U_{1\phi}}{I_{\mu}} \cdot \frac{|\nu|}{\omega_1} \cdot \frac{I_K^2}{(1 + \tau_{d2\nu})} \cdot \left[\frac{k_{0\nu}}{|\nu| \cdot k_{01}} \right]^2, \quad (9.9)$$

де $\omega_1 = 2\pi f_1$ - кутова частота основної гармоніки,

I_K - струм короткого замикання, А; I_{μ} - струм намагнічування, А;

- Кратність моменту ν -ої гармоніки

$$k_{M\nu} = M_{\nu} / M_H. \quad (9.10)$$

9.2. Розрахувати ковзання двигуна (s) для просторових гармонік $\nu = -5$ та $\nu = 7$ при ковзаннях гармонік $s_5, s_7 = 0$ та $s_5, s_7 = 1$.

Ковзання ν -ї просторової гармоніки

$$s_{\nu} = 1 - (1 - s) \cdot \nu \quad (9.11)$$

- Значення ковзання двигуна (s), відносно поля вищої гармоніки (ν) визначається в такий спосіб

$$s = 1 + \left(\frac{s_{\nu}}{\nu} - \frac{1}{\nu} \right). \quad (9.12)$$

- Частота обертання магнітного поля ν -ї гармоніки в просторі, об/хв

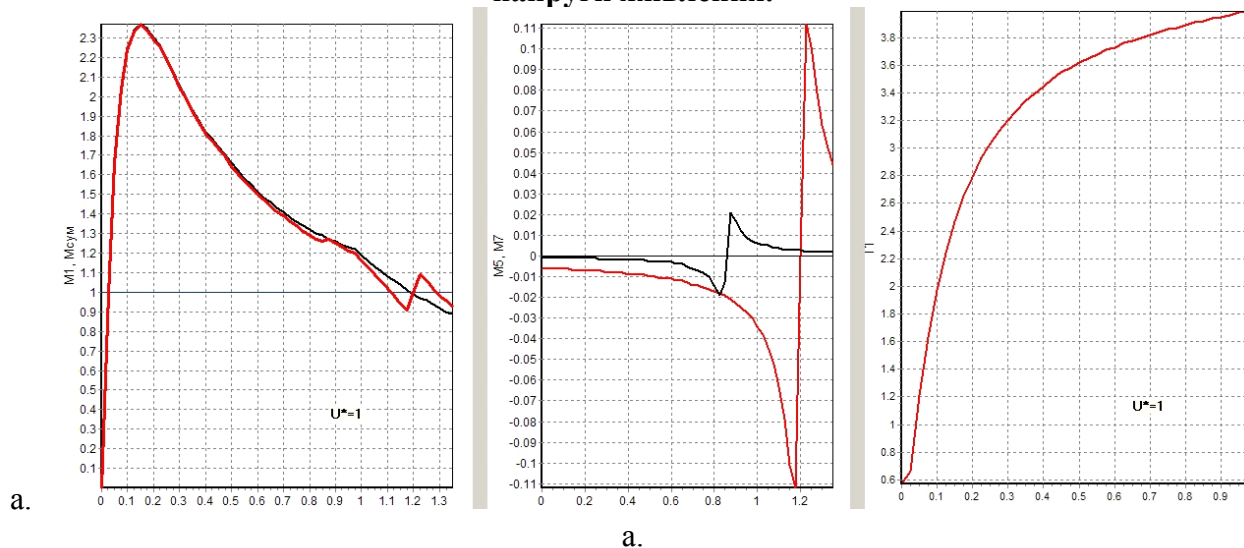
$$n_{\nu} = n_1 / \nu. \quad (9.13)$$

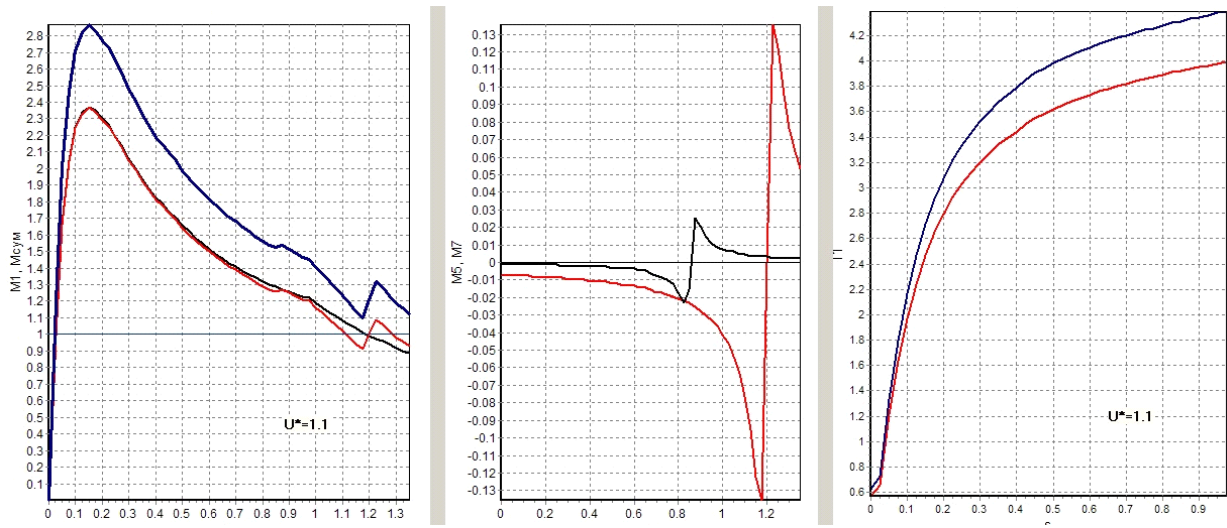
- Частота ЕРС, індукованої полем вищих гармонік в обмотці статора ($f_{1\nu}$) і ротора ($f_{2\nu}$) при номінальному ковзанні двигуна

$$f_{1\nu} = \frac{p \cdot n_{\nu}}{60}; \quad (9.14)$$

$$f_{2\nu} = \text{abs}(f_1 \cdot s_{\nu}) = \text{abs}(f_1 \cdot [1 - (1 - s_H) \cdot \nu]). \quad (9.15)$$

9.2. Розрахувати за [2] механічні характеристики $M, M_5, M_7 = f(s)$ для двох значень напруги живлення.





б.

Рис. 9.1. Залежність M , M_5 , M_7 , $I_1 = \varphi(s)$:

а – $U = U_H$; б – $U = 1,1U_H$

Висновки

Висновки по роботі

[стор 1](#)

Література

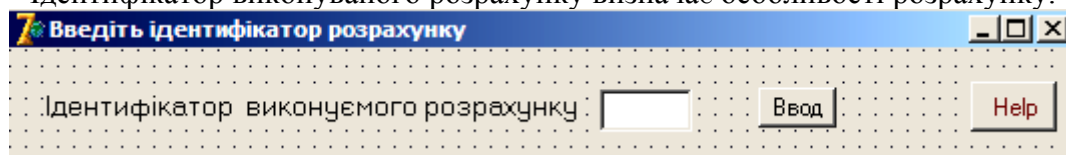
1. Белікова Л.Я. Електричні машини: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закладів / Л.Я. Белікова, В.П. Шевченко. - О.: Наука й техніка, 2012. - 480 с., – <https://www.twirpx.com/>
2. Навчальна підсистема розрахунку та аналізу на ПК асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором / Укл. В.П. Шевченко. - Одеса: ОНПУ, 2022.
3. Шевченко В.П. Загальні питання проектування електричних машин змінного струму: електронний навчальний посібник для студентів спеціальності 141 “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” – ОП, 2022. – 193 с., – <https://www.twirpx.com/>

[стор 1](#)

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКУ

А1. Формування ідентифікатора виконуваного розрахунку

Ідентифікатор виконуваного розрахунку визначає особливості розрахунку.



Приклад_1: Є файл вхідних даних базового АД - s:/AM/1/1.iam.

Необхідно розрахувати двигун при 3-х значеннях напруги - 220, 240, 200 В
При всіх розрахунках завантажується **базовий файл** вихідних даних - 1.iam.

При першому розрахунку **не змінюються вхідні дані** й задається ідентифікатор виконуваного розрахунку 220.

Створюється папка s:/AM/1_220, у яку записуються файл вихідних даних - s:/AM/1_220/1_220.iam і виконується повний розрахунок.

У папці s:/AM/1_220 зберігаються всі результати розрахунку **базового варіанту** АД при напрузі 220 В.

При другому розрахунку задається ідентифікатор виконуваного розрахунку 240 і виконуємо розрахунок. Створюється папка s:/AM/1_240, у яку записуються файл вихідних даних - s:/AM/1_240/1_240.iam і виконуємо розрахунок.

У папці s:/AM/1_240 зберігаються всі результати розрахунку при напрузі 240 В.

При третьому розрахунку задається ідентифікатор виконуваного розрахунку 200 і виконуємо розрахунок. Створюється папка s:/AM/1_200, у яку записуються файл вихідних даних - s:/AM/1_200/1_200.iam і виконуємо розрахунок.

У папці s:/AM/1_200 зберігаються всі результати розрахунку при напрузі 200 В.

Приклад_2: Є файл вхідних даних базового АД - s:/AM/1/1.iam.

Необхідно розрахувати двигун при 3-х значеннях опору обмотки ротора R23>R22>R21.
При всіх розрахунках завантажується **базовий файл** вихідних даних - 1.iam.

При першому розрахунку **не змінюються вхідні дані** й задається ідентифікатор виконуваного розрахунку R21 .

Створюється папка s:/AM/1_R21, у яку записуються файл вихідних даних - s:/AM/1_R21/1_R21.iam і виконується розрахунок.

У папці s:/AM/1_R21 зберігаються всі результати розрахунку **базового варіанту** АД при значенні питомого опору матеріалу обмотки ротора Rok1.

При другому розрахунку збільшується значення питомого опору матеріалу обмотки ротора (Rok2 > Rok1), задається ідентифікатор виконуваного розрахунку R22 і виконується розрахунок. Створюється папка s:/AM/1_R22, у яку записуються файл вихідних даних - s:/AM/1_R22/1_R22.iam й виконується розрахунок.

У папці s:/AM/1_R22 зберігаються всі результати розрахунку при значенні опору Rok2.

При третьому розрахунку змінюється значення питомого опору матеріалу обмотки ротора (Rok3 > Rok2), задається ідентифікатор виконуваного розрахунку R23 і виконується розрахунок. Створюється папка s:/AM/1_R23, у яку записуються файл вихідних даних - s:/AM/1_R23/1_R23 і виконується розрахунок.

У папці s:/AM/1_R23 зберігаються всі результати розрахунку при значенні опору Rok3.

Виконання ряду розрахунків дає можливість надалі створювати текстовий файл порівняння результатів розрахунку й файл порівняння пускових та робочих характеристик.

A2. Формування файлу порівняння результатів розрахунку «Compare.txt»

Файл порівняння дозволяє аналізувати зміну основних показників виконаних розрахунків як у абсолютних, так й у відносних величинах.

Порівняння результатів розрахунку

1=> File 2,5-2.r1 U_{n1}= **220.0** f_l= 60.0

2=> File 2,5-6.r1 U_{n1}= **127.0** f_l= 60.0

Електромагнітні навантаження, Тл:

Фd,Вб	Bd	Bz1m	Bz2m	Ba1	Ba2	kmj	Imj*	w1	ko1
1=>0.0078	0.84	1.81	1.70	1.66	1.41	1.46	0.59	108.00	0.958
2=>0.0038	0.88	1.83	1.72	1.53	1.00	1.28	0.57	126.00	0.966

в.о.

1=>1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2=>0.487	1.048	1.011	1.012	0.922	0.709	0.877	0.966	1.167	1.008	

Параметри статора

r1	Lп	Lл	Lд	Lск	X1	Kм
1=> 3.57	0.83	3.05	2.31	1.11	2.18	0.24
2=> 0.89	1.16	1.26	2.09	1.19	1.42	0.35

в.о.

1=>1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2=>0.249	1.398	0.413	0.905	1.072	0.651	1.458

Параметри ротора

r2	Lп	Lл	Lд	Lск	X2
1=> 0.90	1.41	0.56	2.54	1.11	1.85
2=> 0.40	1.82	0.19	3.32	1.19	2.06

в.о.

1=>1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2=>0.444	1.291	0.339	1.307	1.072	1.114	1.452

Номінальний режим:

P2,лВт	n2	s	КПД,%	cosΦ	I1,А	P1,Вт	ЭнКПД
1=> 2.10	3535.5	0.0179	80.8	0.767	5.13	2.60	0.62
2=> 2.50	1156.0	0.0367	80.5	0.704	11.57	3.10	0.57

в.о.

1=>1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2=>1.190	0.327	2.050	0.996	0.918	2.255	1.192	0.919

Пускові характеристики:

s	ki	M1	Ms	M5	M7	x1	x2"	r2"	I2"*
1=> 1.00	7.74	2.034	1.930	-0.155	0.051	1.89	1.37	0.93	7.64
2=> 1.00	3.82	1.133	1.107	-0.032	0.006	1.17	1.40	0.51	3.61

в.о.

1=>1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2=>1.000	0.494	0.557	0.574	0.206	0.118	0.619	1.022	0.548	0.473

Критичне ковзання

s	ki	M1
1=> 0.175	4.55	3.86
2=> 0.150	2.35	2.23

в.о.

1=>1.000	1.000	1.000
2=>0.857	0.516	0.578

[стор 1](#)

ПЕРЕЛІК ІДЕНТИФІКАТОРІВ ВХІДНИХ ДАНИХ ТА ЇХ РОЗШИФРУВАННЯ

Позначення

Jмс - марка сталі;
 Jv - система вентиляції;
 Js - форма паза статора;
 Jr - форма паза ротора.

Дані технічного завдання

P_{2н} - номінальна потужність, *кВт*;
 U_{фн} - номінальна фазна напруга, *В*;
 I_{фн} - номінальний фазний струм, *А*;
 p - число пар полюсів;
 f_л - частота мережі, *Гц*.

Головні розміри

Но - висота осі обертання, *мм*;
 Da - зовнішній діаметр статора, *см*;
 D - діаметр розточення статора, *см*;
 Dв - діаметр вала, *см*;
 L1 - розрахункова довжина статора, *см*;
 L2 - довжина ротора з радіальними каналами, *см*;
 Nkr - число радіальних каналів;
 Dка - діаметр аксіального каналу, *см*;
 Nга - число рядів аксіальних каналів;
 Bск - величина скосу пазів, *см*;
 Delt - величина повітряного зазору, *см*;
Зубцева зона статора (рис. Б.1)

Z1 - число пазів статора;
 Розміри пазів статора (рис. Б.1), *см*

H1C, H2C, H3C, H4C, HZ1C, BP1, BSL1, HSL1, D2C

Обмотка статора

Ke - коефіцієнт $Ke = EPC / \text{напруга}$;
 Тір - тип обмотки статора;
 у1 - крок обмотки в пазових поділках;
 a1 - число паралельних гілок;
 Nп - число ефективних провідників у пазі;
 Nэл - число елементарних провідників в одному ефективному;
 Qэл - перетин елементарного провідника, *мм²*;
 Dг - діаметр голого провідника (при прямокутних пазях - розмір неізолюваного ефективного провідника по ширині паза), *см*;
 Диз - діаметр ізолюваного провідника (при прямокутних пазях - двостороння товщина виткової ізоляції), *см*;
 Nв - число ефективних провідників по висоті паза (для овальних пазів прийняти Nв=0);
 Визк - двостороння корпусна ізоляція по ширині паза, *см*;
 Низк - сумарна корпусна ізоляція по висоті паза, *см*.

Зубцева зона ротора (рис.Б.2)

Z_2 - число пазів ротора;

Розміри пазів ротора (рис. Б.2), *см*

H1R, H2R, H3R, HSL2, BP2, BSL2, D2R, HZ2R

Обмотка ротора

S_c - перетин стрижня обмотки ротора, $мм^2$;

A_k - радіальний розмір короткозамкнутого кільця, *см*;

B_k - товщина короткозамкнутого кільця, *см*;

R_{ok} - питомий електричний опір матеріалу обмотки ротора при робочій температурі,

$Ом \cdot мм^2 / м$.

Вихідні дані для теплового розрахунку

$L_{греб}$ - периметр поперечного перерізу ребер корпуса, *м*;

A_{kt} - коефіцієнт теплового розрахунку, [3, с. 237, табл. 6-30];

al_{a1} - коефіцієнт теплопровідності ізоляції обмотки [3, с. 237, рис. 6-62];

al_{f1} - коефіцієнт теплорозсіяння з поверхні статора [3, с. 235];

al_{fv} - коефіцієнт підігріву повітря [3, с. 235-236].

При $J_r=4, 5, 6$ заносяться (рис. Б..3)

$S_Y[1...15]$ - Масив перетинів шарів стрижня ротора, $мм^2$;

$L_Y[1...15]$ - Масив коефіцієнтів магнітної провідності шарів стрижня ротора, *в.о.*

Розшифровка позначень

Позначення марки сталі		Форма пазів	
$J_{мс} = 1$	- сталь 2013	$J_{мс} = 3$	-сталь 2312
$J_{мс} = 2$	- сталь 2211	$J_{мс} = 4$	-сталь 2411
		$J_s=1...6$	рис. 8.2
		$J_r=1...6$	рис. 8.3

Позначення системи вентиляції

J_v	Система вентиляції
1	Радіальна з каналами
2	Радіальна без каналів

J_v	Система вентиляції
3	Аксіальна
4	Із зовнішнім обдуванням

Тип обмотки статора

$t_{ip} = 1.67$ - одношарова двоплоскінна і проста шаблонова;

$t_{ip} = 1.47$ - одношарова триплоскінна;

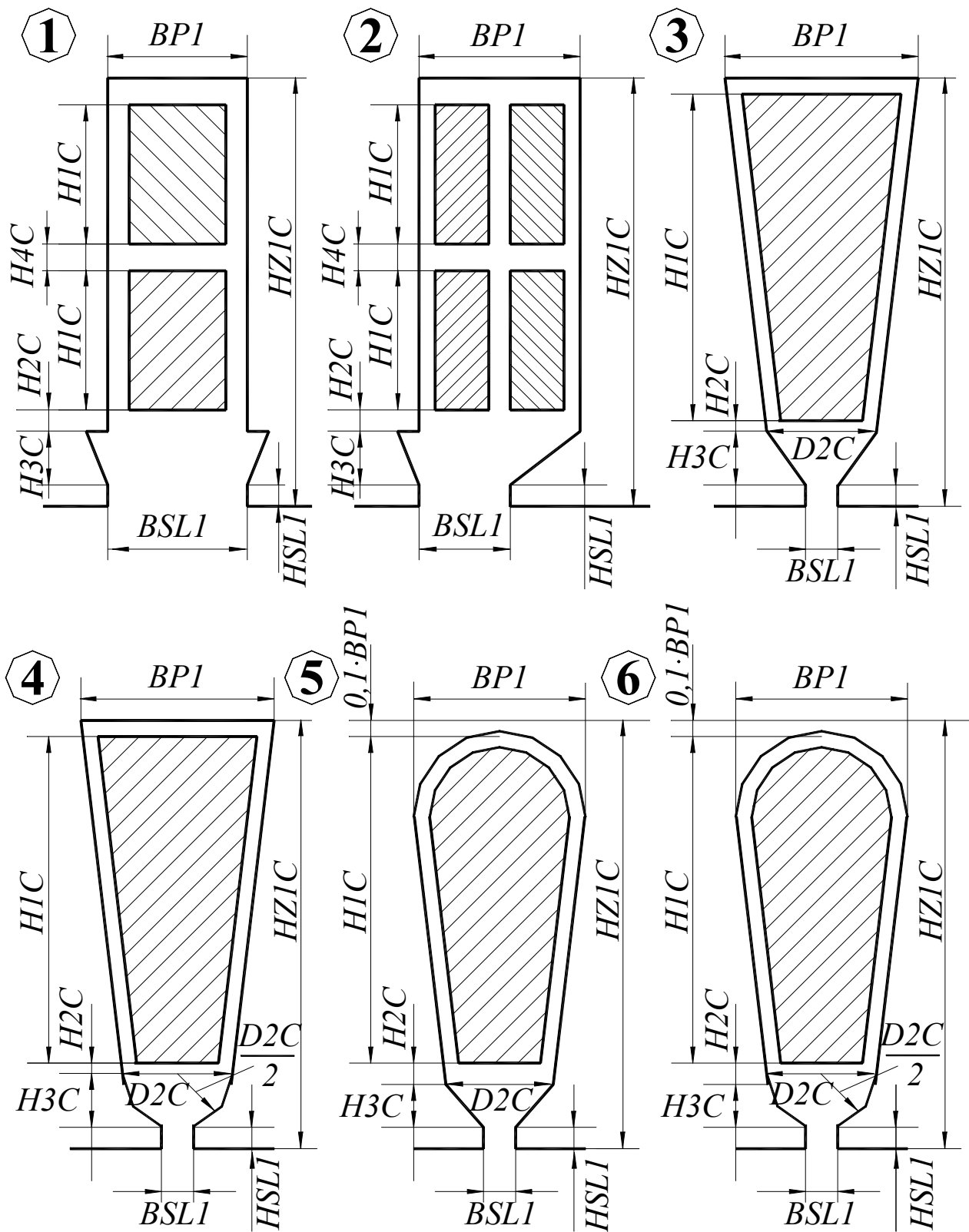
$t_{ip} = 1.34$ - одношарова ланцюгова і в розвал;

$t_{ip} = 0.34$ - двошарова.

Файл вхідних даних асинхронного двигуна

КП АМ файл - C:\Am\TONJA_Ун\TONJA_Ун.iam 04.11.2020

JMC = 1	Bck = 1	BSh2 = 0.2	Rok = 0.05	s13 = 0
JV = 4	Delt = 0.03	D2R = 0.252	Lreb = 0.22	s14 = 0
JS = 4	z1 = 36	HZ2R = 4.322	Akt = 0.2	s15 = 0
JR = 6	H1C = 1.023	Ke = 0.95	ala1 = 1	l1 = 0
P2H = 3	H2C = 0.035	Tip = 1.67	alf1 = 100	l2 = 0
UфH = 380	H3C = 0.304	Y1 = 9	alfB = 22.5	l3 = 0
IфH = 3.86	H4C = 0	A1 = 1	s1 = 0	l4 = 0
p = 2	HZ1C = 1.44	Up1 = 59	s2 = 0	l5 = 0
f1 = 50	BP1 = 0.8	Nel = 1	s3 = 0	l6 = 0
Hw = 112	BSL1 = 0.2	Qel = 0.503	s4 = 0	l7 = 0
Da = 19.1	HSL1 = 0.1	DГ = 0.08	s5 = 0	l8 = 0
Di = 12.4	D2C = 0.61	Dиз = 0.087	s6 = 0	l9 = 01
DВ = 4.4	z2 = 26	NВ = 0	s7 = 0	l10 = 0
L1 = 9.35	H1R = 0.687	Визк = 0.01	s8 = 0	l11 = 0
L2 = 9.35	H2R = 3.0	Низк = 0.01	s9 = 0	l12 = 0
Nkr = 0	H3R = 0.5	Sc = 166.6	s10 = 0	l13 = 0
Dka = 0	HSL2 = 0.1	Aк = 2.9	s11 = 0	l14 = 0
Nra = 0	BP2 = 0.687	Вк = 0.89	s12 = 0	l15 = 0



$$H3C = 0,5 \cdot D2C$$

Для паза 1 прийняти $D2C = BP1$;

Для пазів 3-5 прийняти $H4C = 0$

Рис.Б.1 Форми пазів статора
(У кружках вказані признаки пазів -JS)

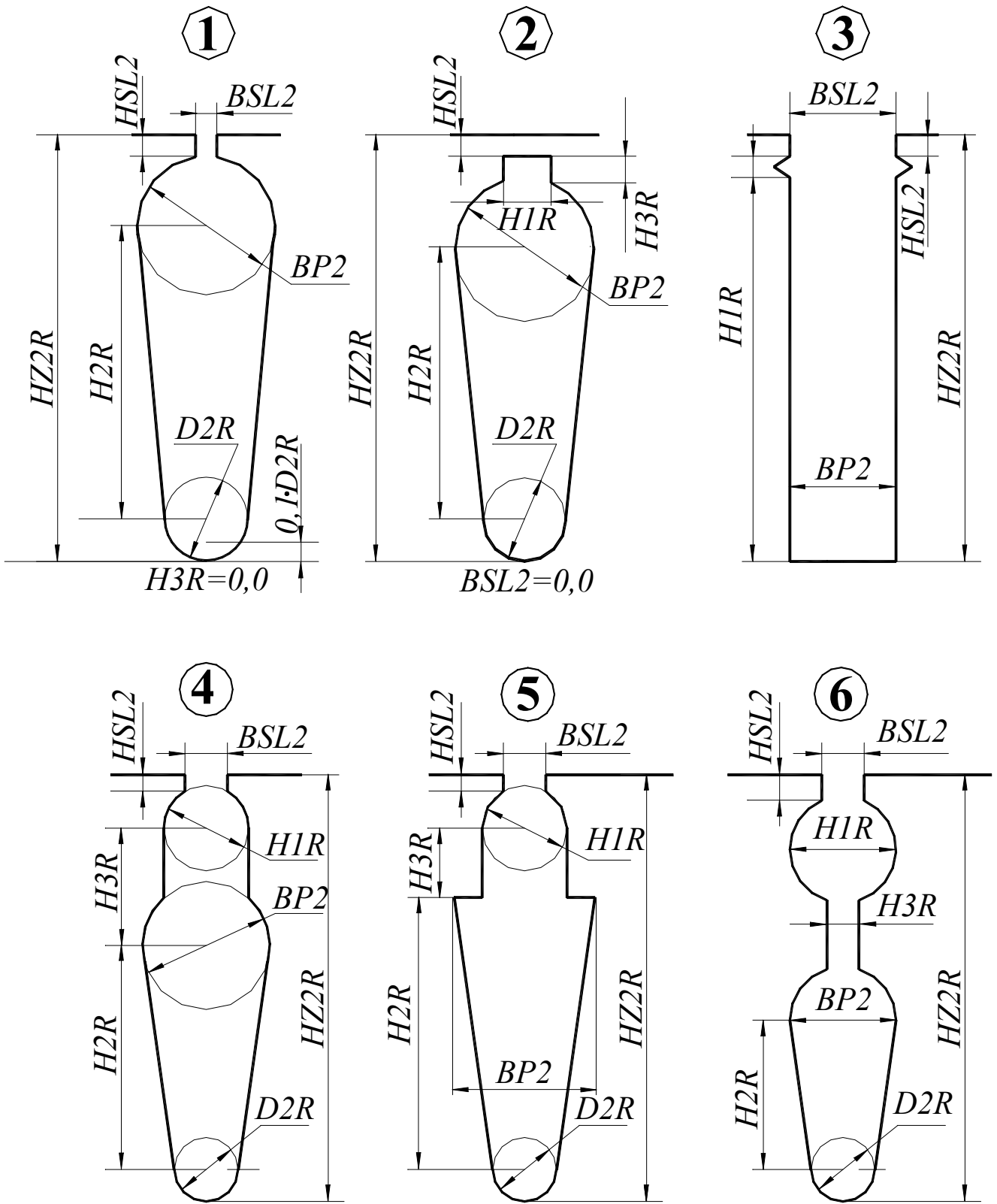
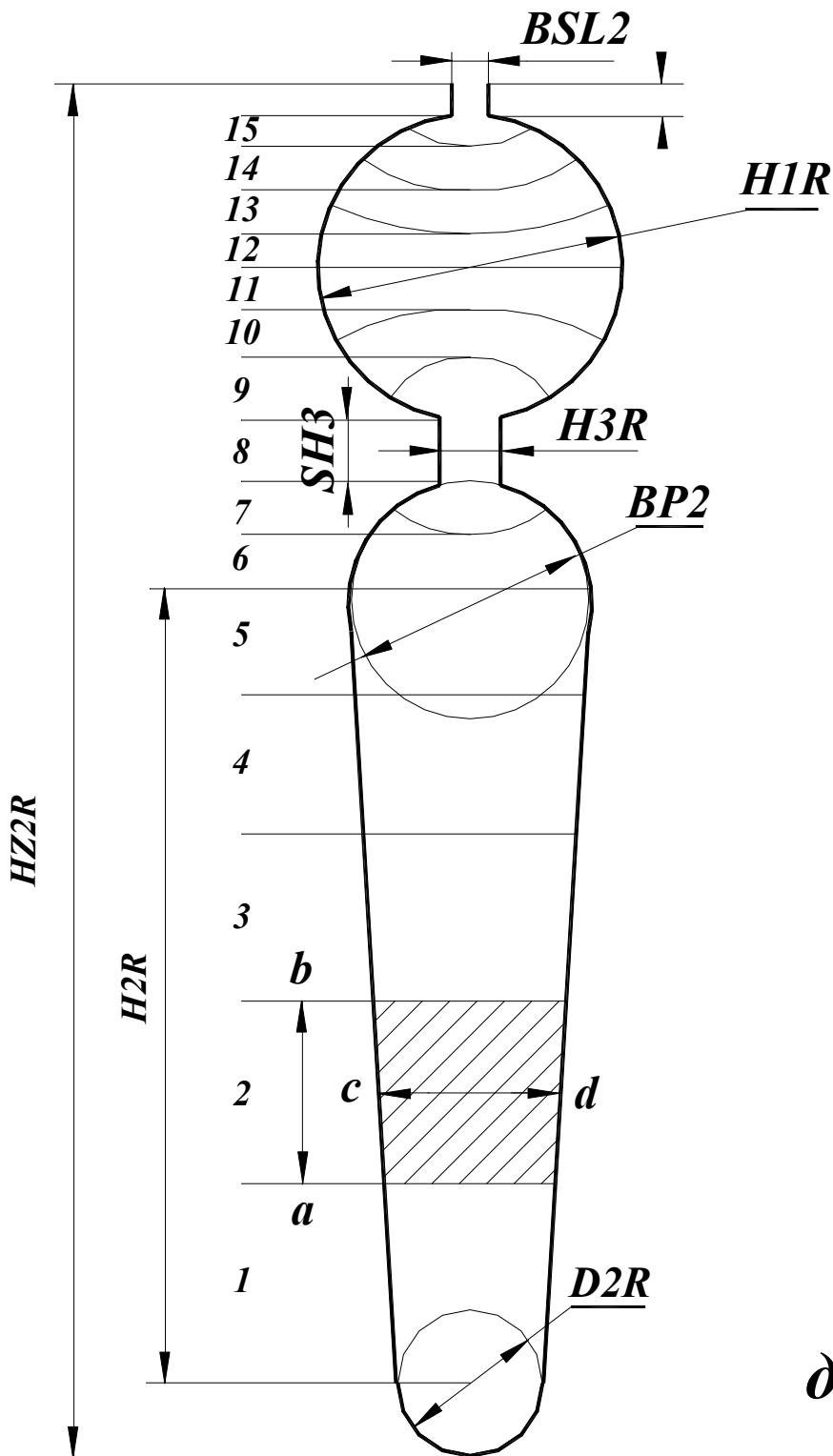


Рис.Б.2 Форми пазів ротора (У кружках вказані признаки пазів -JR)



Приклад

<i>N</i>	<i>SY(N)</i>	<i>LY(N)</i>
1	17,0	2,13
2	14,0	1,22
3	17,0	1,125
4	15,0	0,78
5	9,5	0,41
6	7,2	0,31
7	2,2	0,36
8	4,0	1,0
9	2,5	0,38
10	6,0	0,19
11	7,5	0,14
12	5,5	0,11
13	4,2	0,18
14	3,6	0,2
15	0,8	0,28
	116 мм	

$$de LY(N) = ab/cd$$

Рис. Б.3 Паз ротора з подвійною клітиною

ПЕРЕЛІК ІДЕНТИФІКАТОРІВ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКУ

У результаті виконання повного обсягу розрахунків формуються файли результатів – *.r1, *.r1s, *.r2, *.Pt, *.mag, *.gxp. Перегляд, аналіз, роздрук результатів виконується в опції головного меню "Результати розрахунку"

• Файл *.r1

Електромагнітні навантаження

Φ – основний магнітний потік, *Вб*; **\mathbf{Bd}** – магнітна індукція в повітряному зазорі, *Тл*; **$\mathbf{Bz1m}$** – індукція в мінімальному перетині зубця статора, *Тл*; **$\mathbf{Bz2m}$** – індукція в мінімальному перетині зубця ротора, *Тл*; **$\mathbf{Ba1}$** – індукція в спинці статора, *Тл*; **$\mathbf{Ba2}$** – індукція в спинці ротора, *Тл*; **$\mathbf{Km_j}$** – коефіцієнт насиченості магнітного кола; **$\mathbf{Im_j^*}$** – відносне значення струму намагнічування.

Параметри

Результати розрахунку параметрів представляються у вигляді таблиці з двох рядків, верхній рядок – це результати для обмотки статора, нижній рядок – для обмотки ротора.

\mathbf{r} – активний опір обмотки, *Ом*; **$\mathbf{R^*}$** – активний опір у відносних одиницях; **\mathbf{Lp}** – коефіцієнт магнітної провідності пазового розсіювання обмотки; **\mathbf{Ll}** – коефіцієнт магнітної провідності лобової частини обмотки; **\mathbf{Ld}** – коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання обмотки; **\mathbf{Lck}** – коефіцієнт магнітної провідності скошу пазів; **\mathbf{X}** – індуктивний опір розсіювання обмотки, *Ом*; **$\mathbf{X^*}$** – індуктивний опір у відносних одиницях.

Робочі характеристики

$\mathbf{P2}$ – корисна потужність на валу двигуна, *кВт*; **$\mathbf{n2}$** – частота обертання, *об/хв*; **\mathbf{s}** – ковзання, *в. о.*; **$\mathbf{ККД}$** – коефіцієнт корисної дії двигуна, *%*; **$\mathbf{\cos\phi}$** – коефіцієнт потужності; **\mathbf{I}** – фазний струм статора, *А*; **$\mathbf{P1}$** – потужність, споживана з мережі, *кВт*.

Пускові характеристики

Результати розрахунку пускових характеристик формуються у двох таблицях, на останньому рядку першої, вказуються параметри режиму критичного ковзання.

\mathbf{s} – ковзання, *в. о.*; **\mathbf{ki}** – кратність струму статора, *в. о.*; **\mathbf{km}** – кратність електромагнітного моменту, *в. о.*; **$\mathbf{x1}$** – індуктивний опір розсіювання обмотки статора, *Ом*; **$\mathbf{x2''}$** – приведений індуктивний опір розсіювання обмотки ротора з урахуванням насиченості магнітного кола і витискання струму, *Ом*; **$\mathbf{r2''}$** – приведений активний опір фази обмотки статора, *Ом*; **$\mathbf{I2''^*}$** – приведений струм ротора, *в. о.*; **$\mathbf{k_{si}}$** – приведена висота стрижня (коефіцієнт, яким користуються при розрахунку впливу витискання струму на параметри ротора); **\mathbf{kr}** – коефіцієнт збільшення активного опору стрижнів ротора завдяки витисканню струму; **\mathbf{fi}** – коефіцієнт, яким користуються при розрахунку впливу витискання струму на параметри ротора; **\mathbf{psi}** – коефіцієнт, яким користуються при розрахунку індуктивних опорів.

Перевищення температури статора

\mathbf{Lb} – середня довжина вильоту лобової частини обмотки статора, *см*; **\mathbf{Oa}** – перевищення температури внутрішньої поверхні сердечника статора над температурою повітря усередині двигуна, *град.*; **$\mathbf{O_{i1}}$** – перепад температури в ізоляції пазової частини обмотки статора, *град.*; **$\mathbf{O1}$** – перевищення температури зовнішньої поверхні лобової частини обмотки статора над температурою повітря усередині двигуна, *град.*; **$\mathbf{O_{il}}$** – перепад температури в ізоляції лобової частини обмотки статора, *град.*; **\mathbf{Os}** – середнє перевищення температури обмотки статора над температурою повітря у середині двигуна, *град.*; **$\mathbf{O_{ai}}$** – середнє перевищення температури повітря у середині двигуна над температурою навколишньої середовища, *град.*; **\mathbf{Oc}** – середнє перевищення температури обмотки статора над температурою навколишньої середовища, *град.*

Маса, *кг*

Алюміній – витрата алюмінію

мідь – витрата міді

• Файл *.r2

Сечения слоев - Si[1..15] / Удельные проводимости - Li[1..15]

14.00 25.00 30.00 32.00 30.00 35.00 25.00 3.00
 4.00 4.00 5.00 5.00 4.00 3.00 2.00
 1.00 1.60 1.55 1.50 1.40 1.30 1.20 1.00
 0.33 0.40 0.10 0.06 0.14 0.17 0.30

Данные расчета двухклеточного ротора

s	Kr	Kx	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10	J11	J12	J13	J14	J15
0.100	1.026	0.995	1.000	1.000	1.000	1.002	1.006	1.014	1.027	1.047	1.069	1.077	1.088	1.091	1.092	1.097	1.102
0.200	1.100	0.979	1.000	1.000	1.001	1.008	1.024	1.055	1.106	1.177	1.254	1.282	1.319	1.328	1.334	1.348	1.365
0.300	1.216	0.955	1.000	1.000	1.003	1.017	1.053	1.121	1.227	1.369	1.517	1.571	1.639	1.657	1.667	1.692	1.723
0.400	1.365	0.924	1.000	1.000	1.006	1.030	1.092	1.207	1.380	1.604	1.831	1.912	2.014	2.040	2.056	2.093	2.139
0.500	1.536	0.888	1.000	1.000	1.009	1.046	1.141	1.311	1.558	1.870	2.180	2.289	2.427	2.462	2.483	2.533	2.594
0.600	1.721	0.851	1.000	1.001	1.013	1.066	1.199	1.428	1.754	2.160	2.557	2.697	2.871	2.915	2.942	3.006	3.084
0.700	1.911	0.814	1.000	1.001	1.018	1.089	1.264	1.557	1.966	2.469	2.959	3.131	3.345	3.399	3.432	3.510	3.606
0.800	2.101	0.777	1.000	1.001	1.023	1.115	1.335	1.696	2.191	2.797	3.386	3.592	3.848	3.913	3.953	4.046	4.161
0.900	2.288	0.742	1.000	1.001	1.029	1.144	1.413	1.843	2.428	3.143	3.838	4.080	4.382	4.459	4.506	4.616	4.752
1.000	2.468	0.709	1.000	1.002	1.036	1.175	1.495	1.997	2.676	3.507	4.315	4.597	4.949	5.038	5.093	5.221	5.380

Файл формується тільки при розрахунку двигуна із двох клітинними пазами на роторі (при Jr= 4, 5, 6).

Масив перетинів елементів паза ротора - Si[1..15]

Масив провідностей елементів стрижня ротора - Li[1..15]

s – ковзання, в. о.; Kr – коефіцієнт збільшення активного опору стрижня через ефект витиснення струму в стрижні ротора; Kx – коефіцієнт зменшення пазового розсіювання обмотки ротора, обумовленого ефектом витискання струму в роторі; J1...J15 – відносне значення густини струму в заданих 15 перетинах стрижня обмотки ротора, в. о..

• Файл *.Pt – детальний розрахунок складових втрат

Втрати, Вт											
P2,кВт	s	Pсум	Pэ1	Pэ2	Pст	Pмех	Pд	кпд,%	cosΦ	ЭнКпд	
0.24	0.009	85	27	2	30	24	2	73.5	0.618	0.45	
0.66	0.028	169	91	20	30	24	4	79.5	0.866	0.69	
0.96	0.046	303	194	49	30	24	6	76.0	0.907	0.69	
1.17	0.065	468	321	85	30	24	8	71.4	0.914	0.65	
1.31	0.083	651	461	126	30	24	10	66.8	0.912	0.61	
1.39	0.102	840	607	168	30	24	11	62.3	0.906	0.56	
1.43	0.12	1030	754	210	30	24	12	58.2	0.898	0.52	
1.45	0.138	1216	897	252	30	24	13	54.3	0.890	0.48	
1.44	0.157	1396	1036	292	30	24	14	50.7	0.881	0.45	
1.41	0.176	1568	1169	330	30	24	15	47.4	0.872	0.41	
1.38	0.194	1731	1295	367	30	24	16	44.3	0.864	0.38	
Номінальні дані:											
1.10	0.058	468	273	72	30	24	8	73.1	0.913	0.67	

- Файл *.rpx – Урахування витиснення струму та насичення магнітного кола

s	Kr	Kx	Hi	x1	x2'	r2'
0.00	0.00	0.00	0.00	0.73	0.93	0.18
0.10	1.01	1.00	0.86	0.68	0.78	0.20
0.20	1.04	0.99	0.73	0.64	0.72	0.20
0.30	1.08	0.98	0.67	0.62	0.69	0.21
0.40	1.14	0.96	0.62	0.60	0.67	0.21
0.50	1.21	0.94	0.61	0.60	0.66	0.22
0.60	1.28	0.92	0.60	0.60	0.65	0.23
0.70	1.37	0.90	0.59	0.59	0.64	0.23
0.80	1.46	0.87	0.58	0.59	0.63	0.24
0.90	1.56	0.84	0.58	0.59	0.62	0.25
1.00	1.65	0.82	0.57	0.59	0.61	0.26

- Файл *.mag – Детальний розрахунок магнітної систе магнітного кола мы

Φ	Bdel	Ba1	Ba2
0.00970	0.749	1.602	0.910
Bzs1	Bzs2	Bzscp	
1.857	1.840	1.848	
Hzs1	Hzs2	Hzscp	
1670.	1576.	1620	
Bz2max	Bz2min	Bz2cp	
1.809	1.799	1.804	
Hzr1	Hzr2	Hzrcp	
1450	1515	1430	
Hz1	Hz2	Ha1	Ha2
1614	1441	756.64	155
Fdel	Fz1	Fz2	Fcym
721	69.	83	1033
Kz	Kmj	Io	Io*
1.21	1.43	7.68	0.26

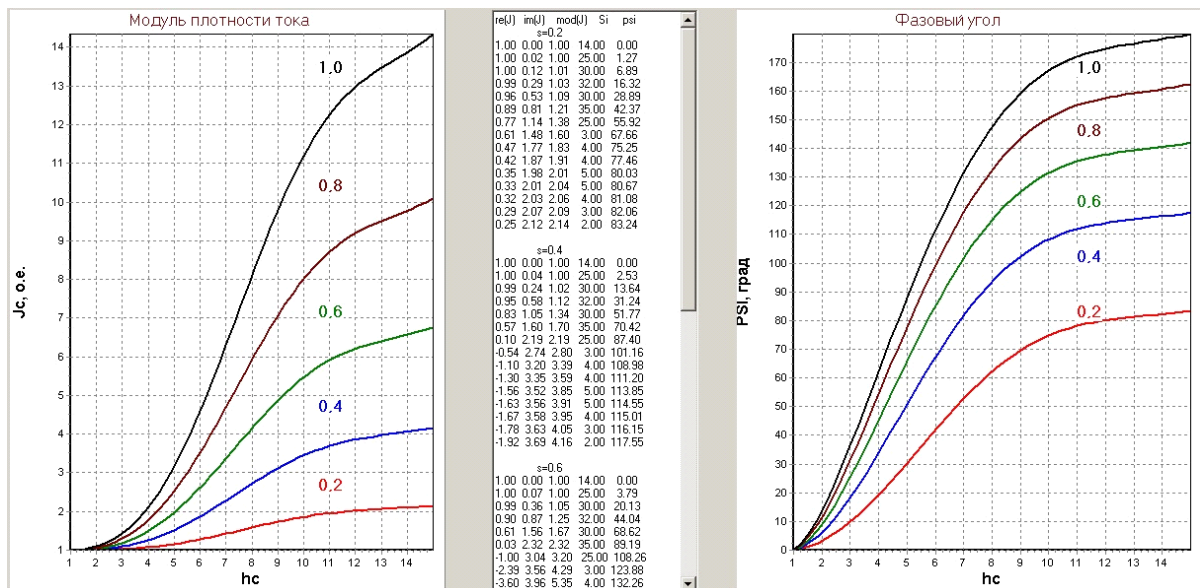


Рис. В.1. Зміна густини струму по висоті стрижня двоклітинного ротора

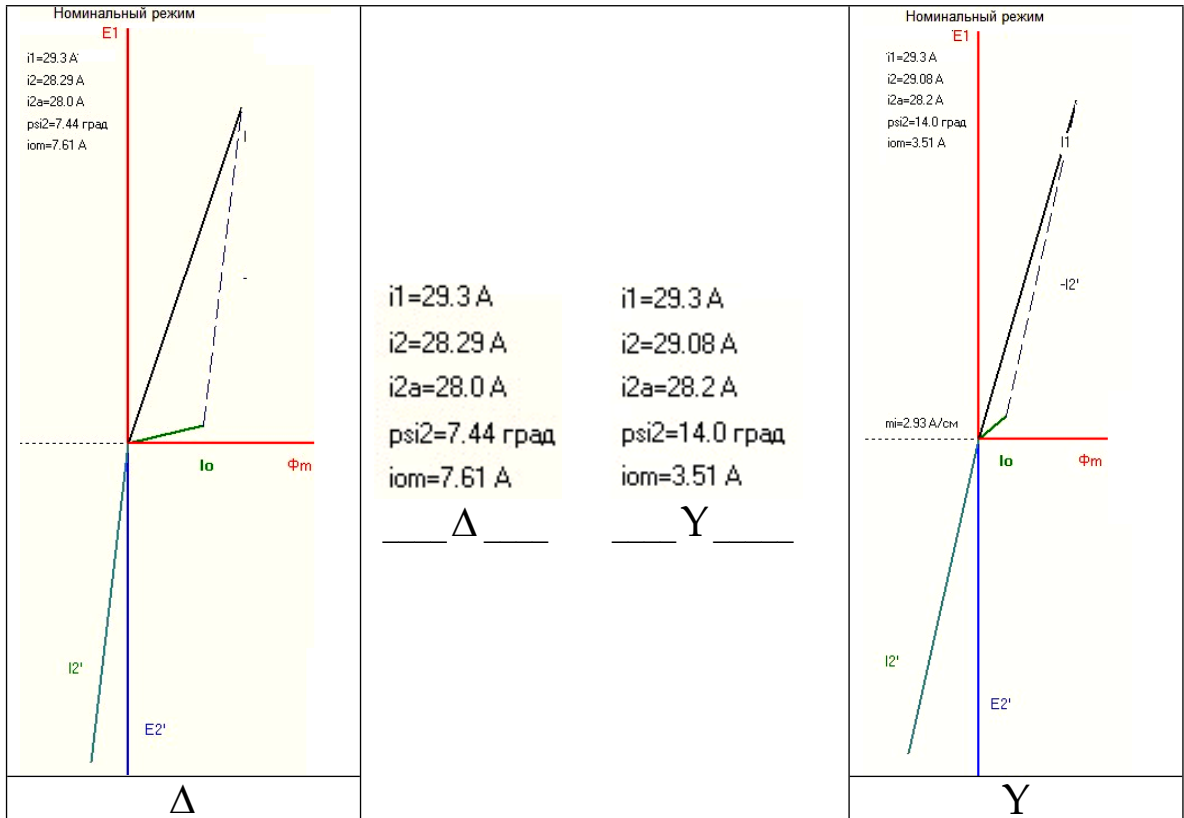


Рис. В.2. Диаграми струмів при з'єднанні обмоток статора у Δ та Y

[стор 1](#)