

*М.В. ХАЙ, Б.М. ХАРЧИШИН***ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПУСКОВОЇ ОБМОТКИ НА ПУСКОВІ ВЛАСТИВОСТІ ЯВНОПОЛЮСНОГО СИНХРОННОГО ДВИГУНА**

Проаналізовано асинхронний спосіб пуску явнопольосного синхронного двигуна (ЯСД), його пускові властивості та характеристики, під якими розуміють залежності струму I статора та електромагнітного моменту M від ковзання s при незмінних напрузі U живлення обмотки статора та її частоті f . Для їх розрахунку створено математичну модель, яка враховує магнітну та електричну несиметрію. Магнітна несиметрія ЯСД зумовлена явнопольосною конструкцією ротора, а електрична – неоднаковою кількістю обмоток по поздовжній та поперечній осях. Для врахування магнітної та електричної несиметрії ЯСД здійснюють такі перетворення: 1) трифазну обмотку статора замінюють двофазною, у якій магнітна вісь однієї з обмоток збігається з поздовжньою віссю d , а магнітна вісь другої обмотки – з поперечною віссю q нерухомої відносно ротора ортогональної системи координат dq (рис.1); 2) пускову короткозамкнену обмотку замінюють двома обмотками: поздовжньою пусковою обмоткою, магнітна вісь якої збігається з віссю d , та поперечною пусковою обмоткою, магнітна вісь якої збігається з віссю q ; 3) рухомий ротор двигуна вважають нерухомим. Розроблена математична модель показала, що пускові властивості ЯСД та вигляд його пускових характеристик залежать як від параметрів обмотки статора, так і від параметрів обмоток ротора – пускової обмотки та обмотки збудження. У процесі проектування ЯСД заданих пускових властивостей досягають зміною параметрів пускової обмотки, які залежать від кількості стрижнів, розмірів і матеріалу стрижнів та короткозамквальних кілець, а також розмірів (ширини та висоти) шліца паза пускової обмотки. Для дослідження впливу цих величин на пускові властивості ЯСД за описаною математичною моделлю складено комп'ютерну програму розрахунку його пускових характеристик для заданої сукупності параметрів.

Ключові слова: явнопольосний синхронний двигун, пускові характеристики, математична модель, електромагнітний момент, магнітна несиметрія

*M. V. KHAI, B. M. KHARCHYSHYN***STARTING WINDING PARAMETERS INFLUENCE ON STARTING CHARACTERISTICS OF SALIENT-POLE SYNCHRONOUS MOTOR**

The asynchronous method of starting a salient-pole synchronous motor (SPSM), its starting characteristics, which are the dependence of the current I of the stator and the electromagnetic moment M to the slip s at constant stator winding feed voltage U and frequency f have been analyzed. A mathematical model that considers magnetic and electrical asymmetry was designed. The magnetic asymmetry of the SPSM is caused by the salient-pole structure of the rotor, and the electric - due to the different number of windings along the longitudinal and transverse axes. To consider the magnetic and electrical asymmetry of SPSM carry out the following transformations: 1) replacing of the three-phase stator winding with two-phase, where the magnetic axis of one of the windings coincides with the longitudinal axis d , and the magnetic axis of the second winding - with the transverse axis q of the fixed coordinate of the orthogonal system dq ; 2) the starting short-circuited winding is replaced by two windings: a longitudinal starting winding, the magnetic axis of which coincides with the d -axis, and a transverse starting winding, the magnetic axis of which coincides with the q -axis; 3) the movable rotor of the engine is considered stationary. The developed mathematical model showed that the starting properties of SPSM and the type of its starting characteristics depend on both: the parameters of the stator windings and the parameters of the rotor windings - the starting winding and the excitation windings. During the SPSM design process, the specified starting properties can be achieved by the variation of the starting winding parameters, which depend on the number of rods, sizes, and materials of rod and short-rings, as well as the size (width and height) of the slot groove. A computer program for calculating its starting characteristics with a given set of parameters for researching SPSM according to the described mathematical model was developed.

Keywords: Salient-pole synchronous motor, starting characteristics, mathematical model, electromagnetic moment, magnetic asymmetry.

Постановка задачі. Для оптимізації параметрів пускової обмотки ЯСД з метою досягнення заданих пускових властивостей необхідно дослідити впливу параметрів пускової обмотки на пускові властивості двигуна. Для цього необхідно створити математичну модель розрахунку пускових характеристик, алгоритм та комп'ютерну програму.

Актуальність дослідження. Постійне зростання можливостей комп'ютерної техніки відкриває все нові й ширші перспективи їх використання у різноманітних сферах суспільного виробництва, зокрема і в царині інтелектуальної діяльності інженера. При виконанні проектно-конструкторських робіт обчислювальна техніка використовується комплексно у складі систем автоматизованого проектування (САПР). Досвід експлуатації таких систем свідчить про їх високу ефективність, що досягається за рахунок поліпшення техніко-економічних показників спроектованих за їх допомогою об'єктів, значного скорочення термінів проектування, підвищення якості проектів.

Перехід від традиційних методів проектування до автоматизованих означає не тільки використання можливостей комп'ютера для прискорення виконання рутинних розрахункових і конструкторських робіт, але й перехід до нової технології проектування, основаної на розробці адекватних математичних моделей об'єкту проектування, програмного забезпечення, організації діалогу комп'ютер – людина [1, 2].

Розроблена у статті математична модель розрахунку пускових характеристик явнопольосного синхронного двигуна та її реалізація на комп'ютері дозволяють досліджувати вплив параметрів пускової обмотки на пускові властивості двигуна та оптимізувати ці параметри з метою досягнення заданих пускових властивостей.

Метою статті є: 1) створення математичної моделі розрахунку пускових характеристик явнопольосного синхронного двигуна та її реалізація на комп'ютері; 2) дослідження впливу параметрів пускової обмотки на пускові властивості двигуна; 3) оптимізація параметрів

пускової обмотки з метою досягнення заданих пускових властивостей.

Об'єктом дослідження є явнополюсні синхронні двигуни.

Предметом дослідження є технічні параметри пускової обмотки явнополюсних синхронних двигунів та їх пускові характеристики.

Математична модель розрахунку пускових характеристик ЯСД. Основним способом пуску явнополюсного синхронного двигуна є асинхронний пуск, який здійснюється таким чином: обмотку збудження замикають на розрядний опір, який приблизно у 10 разів перевищує опір обмотки збудження, а до обмотки статора подають симетричну трифазну систему напруг. По обмотці статора починає протікати струм, який створює обертове магнітне поле статора. Це поле обертається відносно статора зі швидкістю $n_1 = 60f / p$, а відносно ротора – із швидкістю $n_2 = n_1 s$, де f – частота напруги живлення, p – кількість пар полюсів обмотки статора, s – ковзання. Обертове магнітне поле пронизує закладені у пазах полюсного наконечника стрижні короткозамкненої пускової обмотки і наводить у них електрорушійну силу частоти $f_2 = sf$, внаслідок чого у пусковій обмотці починають протікати струми. У результаті взаємодії обертового магнітного поля статора зі струмами пускової обмотки виникає асинхронний електромагнітний момент, під дією якого ротор ЯСД починає розганятися і досягає швидкості $n \approx n_1$, причому $n < n_1$. Після цього обмотку збудження відмикають від розрядного опору і подають до неї постійну напругу. Двигун втягується у синхронізм і його ротор починає обертатися зі швидкістю $n = n_1$.

Пускові властивості ЯСД оцінюють за пусковими характеристиками, під якими розуміють залежності струму I статора та електромагнітного моменту M від ковзання s при незмінних напрузі U живлення обмотки статора та її частоті f , тобто

$$I = I(s); M = M(s) \text{ при } U = \text{const}; f = \text{const}. \quad (1)$$

Із цих характеристик практичне значення мають величини пускового струму I_n та пускового моменту M_n у моменті вмикання двигуна до мережі ($s=1$), а також вхідного моменту M_{ex} , тобто моменту при ковзанні $s = 0,05$.

Значення пускового струму I_n^* , пускового моменту M_n^* та вхідного моменту M_{ex}^* у відносних одиницях регламентуються технічними умовами і залежать від призначення двигуна. У ЯСД загальнопромислового призначення ці величини перебувають у межах

$$I_n^* = I_n / I_n = 4,5 \dots 6,5; M_n^* = M_n / M_n = 0,8 \dots 1,3;$$

$$M_{ex}^* = M_{ex} / M_n = 0,9 \dots 1,9,$$

де I_n – номінальний струм обмотки статора ЯСД; M_n – номінальний електромагнітний момент ЯСД.

При розрахунку пускових характеристик вважають, що пуск двигуна складається з ряду усталених режимів, кожен із яких відповідає певному значенню ковзання s ($s = 1 \dots 0$). Аналогічним чином здійснюють розрахунок пускових характеристик асинхронного дви-

гуна, але внаслідок магнітної та електричної несиметрії ЯСД неможливо застосувати методикку розрахунку пускових характеристик асинхронного двигуна до розрахунку пускових характеристик ЯСД.

Магнітна несиметрія ЯСД зумовлена явнополюсною конструкцією ротора, а електрична – неоднаковою кількістю обмоток по поздовжній та поперечній осях.

Для врахування магнітної та електричної несиметрії ЯСД здійснюють такі перетворення [1 – 4].

1) трифазну обмотку статора замінюють двофазною, у якій магнітна вісь однієї з обмоток збігається з поздовжньою віссю d , а магнітна вісь другої обмотки – з поперечною віссю q нерухомої відносно ротора ортогональної системи координат dq (рис. 1);

2) пускову короткозамкнену обмотку замінюють двома обмотками: поздовжньою пусковою обмоткою, магнітна вісь якої збігається з віссю d , та поперечною пусковою обмоткою, магнітна вісь якої збігається з віссю q ;

3) рухомий ротор двигуна вважають нерухомим.

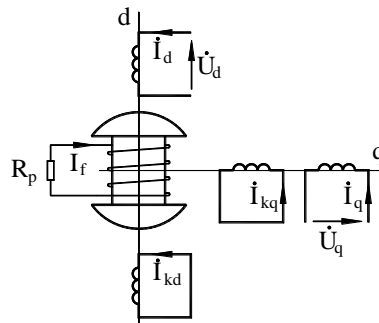


Рис.1 – Схема еквівалентування трифазного ЯСД двофазним із загальмованим ротором

При живленні двофазної системи обмоток d і q статора системою змінних напруг $\dot{U}_d = \dot{U}$ й $\dot{U}_q = -j\dot{U}$ по обмотках протікають струми \dot{I}_d та \dot{I}_q відповідно і створюють магнітні поля, які пульсують з частотою f . У такій двофазній системі при відсутності насичення електромагнітний зв'язок між ортогональними контурами відсутній, тому процеси в поздовжній та поперечній обмотках можна розглядати незалежно. У результаті для розрахунку пускових характеристик ЯСД замість однієї заступної схеми (як це є при розрахунку пускових характеристик асинхронного двигуна) отримуємо дві (рис. 2). Ці схеми наведені для машини, у якій обмотки ротора зведені до обмотки статора.

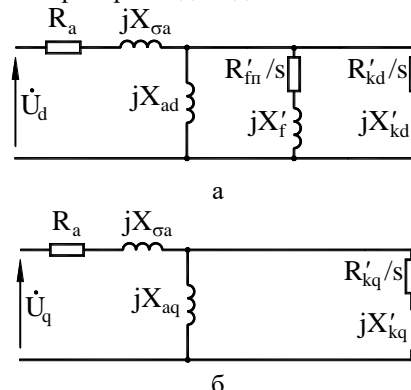


Рис.2 – Заступні схеми явнополюсного синхронного двигуна: а – по поздовжній осі; б – по поперечній осі

Позначення параметрів заступних схем:

$R_a, X_{\sigma a}$ – активний опір та індуктивний опір розсіяння обмотки статора відповідно;

X_{ad}, X_{aq} – індуктивний опір реакції якоря по поздовжній та поперечній осях відповідно;

X'_f – зведений індуктивний опір розсіяння обмотки збудження;

$R'_{fn} = k_r R'_f$ – зведений активний опір кола обмотки збудження, де k_r – коефіцієнт збільшення активного опору кола збудження при замиканні обмотки збудження на розрядний опір R'_p ;

R'_f – зведений активний опір обмотки збудження;

R'_{kd}, R'_{kq} – зведений активний опір поздовжньої та поперечної пускової обмотки відповідно;

X'_{kd}, X'_{kq} – зведений індуктивний опір розсіяння поздовжньої та поперечної пускової обмотки відповідно.

Розрахунок цих параметрів та їх зв'язок із розмірами та обмотковими даними ЯСД наводиться в [2].

Для заданого значення s поздовжній \dot{I}_d і поперечний \dot{I}_q струми обмоток статора обчислюють за формулами [2, 3]

$$\begin{aligned} \dot{I}_d &= \frac{\dot{U} \left(\frac{R_a}{2s-1} + jZ_d \right)}{jZ_d \cdot jZ_q + \frac{R_a}{2s-1} (R_a + js(Z_d + Z_q))}; \\ \dot{I}_q &= \frac{-j\dot{U} \left(\frac{R_a}{2s-1} + jZ_d \right)}{jZ_d \cdot jZ_q + \frac{R_a}{2s-1} (R_a + js(Z_d + Z_q))}, \end{aligned} \quad (2)$$

де

$$Z_d = jX_{\sigma a} + \frac{I}{\frac{1}{jX_{ad}} + \frac{1}{\frac{R'_{fn}}{s} + jX'_f} + \frac{1}{\frac{R'_{kd}}{s} + jX'_{kd}}}}$$

– повний опір ЯСД по поздовжній осі;

$$Z_q = jX_{\sigma a} + \frac{I}{\frac{1}{jX_{aq}} + \frac{1}{\frac{R'_{kq}}{s} + jX'_{kq}}}}$$

– повний опір ЯСД по поперечній осі.

Оскільки $Z_d \neq Z_q$, то струми \dot{I}_d, \dot{I}_q утворюють несиметричну двофазну систему. Для обчислення електромагнітного моменту, створеного такою системою струмів, розкладемо її на пряму та зворотну послідовності.

Струм I_1 прямої послідовності створює поле прямої послідовності, яке обертається відносно статора зі швидкістю $n_{1c} = n + sn_1 = (1-s)n_1 + sn_1 = n_1$, а відносно ротора – зі швидкістю $n_{1p} = sn_1$.

Струм I_2 зворотної послідовності створює поле зворотної послідовності, яке обертається відносно статора зі швидкістю $n_{2c} = n - sn_1 = (1-s)n_1 - sn_1 = (1-2s)n_1$, а відносно ротора – зі швидкістю $n_{2p} = -sn_1$.

Частота струму I_1 становить

$$f_1 = \frac{pn_{1c}}{60} = \frac{pn_1}{60} = f, \quad (3)$$

а струму I_2

$$f_2 = \frac{pn_{2c}}{60} = \frac{pn_1}{60} (1-2s) = f(1-2s). \quad (4)$$

Струми \dot{I}_1 та \dot{I}_2 обчислюють за формулами

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{I}_d + j\dot{I}_q}{2}; \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{I}_d - j\dot{I}_q}{2}. \quad (5)$$

Рівняння (5) з урахуванням (2) у відносних одиницях набувають вигляду

$$\begin{aligned} \dot{I}_1^* &= \frac{\dot{U}^* \left(\frac{2R_a^*}{2s-1} + Z_d^* + Z_q^* \right)}{(R_a^* + Z_d^*) \left(\frac{R_a^*}{2s-1} + Z_q^* \right) + (R_a^* + Z_q^*) \left(\frac{R_a^*}{2s-1} + Z_d^* \right)}; \\ \dot{I}_2^* &= \frac{\dot{U}^* (Z_d^* - Z_q^*)}{(R_a^* + Z_d^*) \left(\frac{R_a^*}{2s-1} + Z_q^* \right) + (R_a^* + Z_q^*) \left(\frac{R_a^*}{2s-1} + Z_d^* \right)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Оскільки струм I_1 має частоту f_1 , яка дорівнює частоті прикладеної до обмотки статора напруги, то він створює асинхронний електромагнітний момент M_1 . Величину цього моменту у відносних одиницях обчислюють за формулою

$$\begin{aligned} M_1^* &= \frac{M_1}{M_n} = \frac{P_{em} \omega_n}{P_n \omega_n} = \\ &= \frac{mUI_{1a} - mI_1^2 R_a}{mU_n I_n \cos \varphi_n} = \frac{U^* I_{1a}^* - I_1^{*2} R_a^*}{\cos \varphi_n}, \end{aligned} \quad (7)$$

де I_{1a}^* – активна складова струму \dot{I}_1^* ; I_1^* – діюче значення струму \dot{I}_1^* ; $\cos \varphi_n$ – коефіцієнт потужності двигуна у номінальному режимі.

Момент M_2^* у відносних одиницях, створений струмом I_2 , обчислюють за формулою

$$\begin{aligned} M_2^* &= \frac{M_2}{M_n} = \frac{P_{em2} \omega_n}{P_n \omega_n} = \\ &= \frac{mI_2^2 R_a / (2s-1)}{mU_n I_n \cos \varphi_n} = I_2^{*2} \frac{R_a^*}{2s-1} \frac{1}{\cos \varphi_n}, \end{aligned} \quad (8)$$

де I_2^* – діюче значення струму \dot{I}_2^* .

Діюче значення струму фази статора у відносних одиницях обчислюють за формулою

$$I^* = \sqrt{I_1^{*2} + I_2^{*2}}. \quad (9)$$

Струм I має складові різних частот, тобто він несинусоїдний. Пояснюється це тим, що при обертанні несиметричного ротора відносно статора еквівалентні

опори фаз обмотки статора змінюються, а тому при синусоїдній напрузі струм буде несинусоїдний.

Результуючий момент ЯСД у відносних одиницях при пуску

$$M^* = M_1^* + M_2^* = \frac{U^* I_{1a}^* - I_1^{*2} R_a^* + I_2^{*2} R_a^*}{(2s-1)\cos\varphi_n} \quad (10)$$

Залежності $I^* = I^*(s)$, $M^* = M^*(s)$ показані на рис.3.

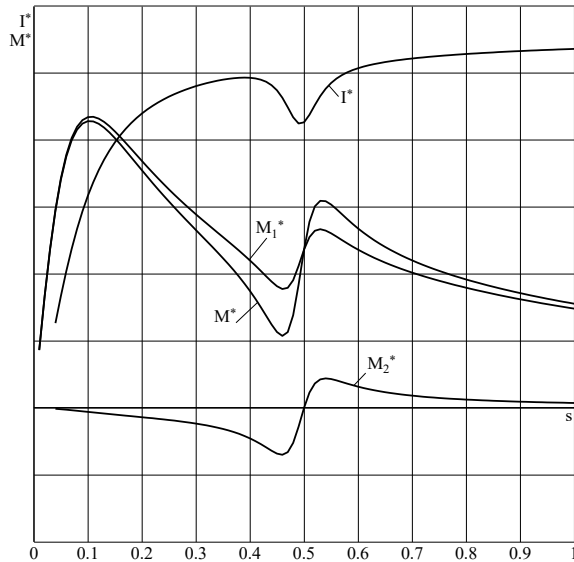


Рис.3 – Пускові характеристики ЯСД

З рис.3 видно, що внаслідок наявності зворотного моменту M_2 результуючий момент M при ковзанні $s=0,5$ має провал. Якщо пуск ЯСД відбувається при навантаженні, то можливе застрягання ротора при $s=0,5$. З формули (6) для обчислення струму I_2 та з формули (8) видно, що чим більшою є різниця опорів Z_d та Z_q , тим більшою буде величина провалу електромагнітного моменту. Для зменшення різниці опорів і, отже, величини провалу електромагнітного моменту, у коло обмотки збудження вмикають розрядний опір, який у 10 – 12 разів перевищує опір обмотки збудження [8 – 10].

Моделювання пускових характеристик на комп'ютері. Із рівнянь (6) – (10) видно, що пускові властивості ЯСД та вигляд його пускових характеристик залежать як від параметрів обмотки статора, так і від параметрів обмоток ротора – пускової обмотки та обмотки збудження. У процесі проектування ЯСД заданих пускових властивостей досягають зміною параметрів пускової обмотки, які залежать від кількості стрижнів, розмірів і матеріалу стрижнів та короткозамикальних кілець, а також розмірів (ширини b_{u2} та висоти h_{u2}) шліца паза пускової обмотки [10, 13]. Для дослідження впливу цих величин на пускові властивості ЯСД за описаною математичною моделлю складено комп'ютерну програму розрахунку його пускових характеристик для заданої сукупності параметрів. Алгоритм програми зображено на рис.4.

Необхідні для розрахунку пускових характеристик значення параметрів двигуна (табл. 1) [6, 7] вводять до файлу вхідних даних. Результати розрахунку (залеж-

ності $I^* = I^*(s)$ та $M^* = M^*(s)$) виводяться на монітор у табличному і графічному видах; на монітор виводяться також значення I_n^* , M_n^* , M_{ex}^* та параметри (R_{kd}^* , R_{kq}^* , X_{kd}^* , X_{kq}^*) пускової обмотки. Якщо для заданих значень параметрів пускової обмотки не забезпечуються необхідні значення I_n^* , M_n^* , M_{ex}^* , то у програмі передбачена зміна одного чи декількох параметрів пускової обмотки і повторний розрахунок пускових характеристик.



Рис.4 – Схема алгоритму програми

Змінювати можна такі параметри:

- 1) матеріал декількох чи усіх стрижнів, а також короткозамикальних кілець;
- 2) ширину b_{u2} та висоту h_{u2} шліца паза пускової обмотки;
- 3) площу поперечного перерізу стрижнів і короткозамикальних кілець.

Для реалізації 1-го шляху всі стрижні пускової обмотки розділені на дві групи, матеріалом для кожної з груп може бути мідь, латунь чи бронза.

Для дослідження впливу значення розрядного опору в колі обмотки збудження на пускові характеристики передбачена також можливість зміни коефіцієнта k_r при незмінних значеннях усіх інших параметрів.

Для дослідження впливу параметрів пускової обмотки на пускові властивості двигуна та оптимізації параметрів пускової обмотки з метою досягнення заданих пускових властивостей були розроблені наступні

завдання:

1) для заданого ЯСД розрахувати та дослідити залежність I_n^* , M_n^* , M_{ex}^* від ширини $b_{ш2}$ шліца паза пускової обмотки;

2) для заданого ЯСД розрахувати та дослідити залежність I_n^* , M_n^* , M_{ex}^* від висоти $h_{ш2}$ шліца паза пускової обмотки;

3) для заданого ЯСД розрахувати та дослідити залежність I_n^* , M_n^* , M_{ex}^* від діаметра стрижнів пускової обмотки;

4) для заданого ЯСД розрахувати та дослідити залежність I_n^* , M_n^* , M_{ex}^* від активного опору пускової обмотки;

Таблиця 1 – Розміри і параметри досліджуваних явнопольосних синхронних двигунів

Розміри та параметри двигунів	Номер двигуна		
	1	2	3
Розміри:			
Полюсна поділка, м	0,236	0,236	0,346
Довжина полюса, м	0,472	0,370	0,290
Довжина стрижня, м	0,543	0,430	0,340
Зубцевий крок пускової обмотки, м	0,0263	0,0265	0,0242
Діаметр стрижня, м	0,012	0,012	0,011
Ширина шліца паза пускової обмотки, м	0,004	0,004	0,003
Висота шліца паза пускової обмотки, м	0,002	0,002	0,003
Ширина к.з. сегмента пускової обмотки, м	0,045	0,04	0,025
Товщина к.з. сегмента пускової обмотки, м	0,008	0,01	0,018
Довжина повітряного проміжку під серединою полюса, м	0,0026	0,0027	0,007
Електричні й обмоткові дані:			
Номінальна фазна напруга, В	3470	3470	3470
Номінальний фазний струм, А	57,0	57,1	72,2
Частота напруги живлення, Гц	50	50	50
Номінальний коефіцієнт потужності	0,9	0,9	0,8
Кількість витків фази статора	312	360	324
Обмотковий коефіцієнт статора	0,923	0,915	0,895
Параметри:			
Кількість пар полюсів	5	6	5
Коефіцієнт збільшення опору обмотки збудження при пуску	10	10	10
Коефіцієнт Картера	1,24	1,35	1,16
Активний опір фази статора, в. о.	0,0173	0,017	0,013
Індуктивний опір реакції якоря по осі d, в. о.	1,454	1,18	0,905
Індуктивний опір реакції якоря по осі q, в. о.	0,92	0,69	0,44
Зведений активний опір обмотки збудження, в. о.	0,0037	0,004	0,0022
Зведений індуктивний опір розсіювання обмотки збудження, в. о.	0,281	0,31	0,25
Індуктивний опір розсіювання фази статора, в. о.	0,132	0,135	0,113
Кількість стрижнів і матеріали:			
Кількість стрижнів полюса у 1-ій групі (матеріал – мідь)	6	2	0
Кількість стрижнів полюса у 2-ій групі (матеріал – латунь)	0	4	9
Матеріал к.з. сегментів	мідь	мідь	мідь
Пускові властивості:			
Пусковий момент (не менше), в. о.	0,9	0,85	1,9
Вхідний момент (не менше), в. о.	1,0	1,1	1,0
Пусковий струм (не більше), в. о.	5,5	5,0	5,5

Примітка: При виконанні цього завдання змінювати співвідношення між кількістю стрижнів першої та другої груп.

5) для заданого ЯСД дослідити вплив розрядного опору на пускові характеристики двигуна;

6) для заданого ЯСД досягнути збільшення на 10% вхідного моменту зміною параметрів і розмірів пускової обмотки;

7) для заданого ЯСД досягнути збільшення на 15% пускового моменту зміною параметрів і розмірів пускової обмотки.

Необхідні для проведення досліджень розміри і параметри явнопольосних синхронних двигунів вибрані з каталогів й довідників [4, 5] та наведені у табл.1.

Результати розрахунку пускових характеристик I^* , M^* та I_n^* , M_n^* , M_{ex}^* від висоти $h_{ш2}$ шліца паза пускової обмотки, від ширини $b_{ш2}$ шліца паза пускової обмотки та від діаметра стрижнів пускової обмотки для ЯСД №2 наведені у табл. 2, 3 та показані на рис. 5 – 7.

Таблиця 2 – Пускові характеристики при зміні висоти шліца паза пускової обмотки

$h_{ш2}=2$ мм		$h_{ш2}=1$ мм		$h_{ш2}=3$ мм		
s , в.о.	M^* , в.о.	I^* , в.о.	M^* , в.о.	I^* , в.о.	M^* , в.о.	I^* , в.о.
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,050	1,103	1,694	1,106	1,691	1,099	1,697
0,1	1,602	2,470	1,618	2,468	1,585	2,472
0,15	1,785	3,012	1,821	3,018	1,749	3,006
0,2	1,825	3,404	1,882	3,422	1,770	3,385
0,25	1,793	3,695	1,866	3,727	1,722	3,662
0,3	1,723	3,914	1,808	3,961	1,642	3,868
0,35	1,635	4,083	1,728	4,142	1,548	4,024
0,4	1,536	4,213	1,632	4,284	1,447	4,145
0,45	1,420	4,305	1,514	4,383	1,334	4,230
0,500	1,373	4,326	1,477	4,404	1,279	4,250
0,550	1,347	4,425	1,458	4,518	1,248	4,337
0,600	1,274	4,496	1,385	4,598	1,177	4,399
0,650	1,205	4,548	1,314	4,658	1,110	4,446
0,700	1,142	4,591	1,249	4,706	1,050	4,483
0,750	1,085	4,626	1,189	4,746	0,995	4,514
0,800	1,033	4,655	1,134	4,780	0,945	4,539
0,850	0,984	4,681	1,083	4,810	0,900	4,561
0,900	0,940	4,703	1,036	4,835	0,850	4,580
0,950	0,900	4,722	0,993	4,857	0,820	4,597
1,000	0,862	4,738	0,953	4,877	0,785	4,611

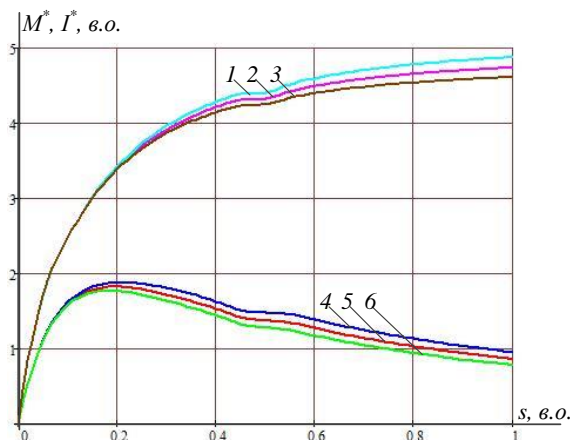


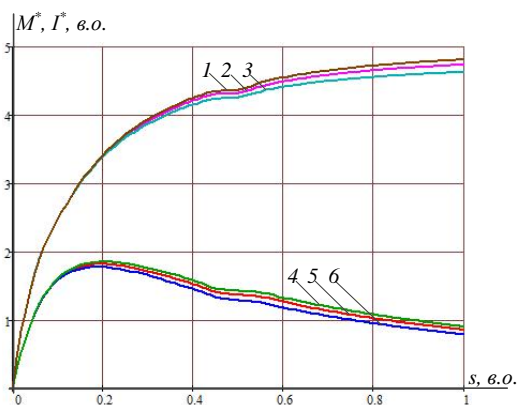
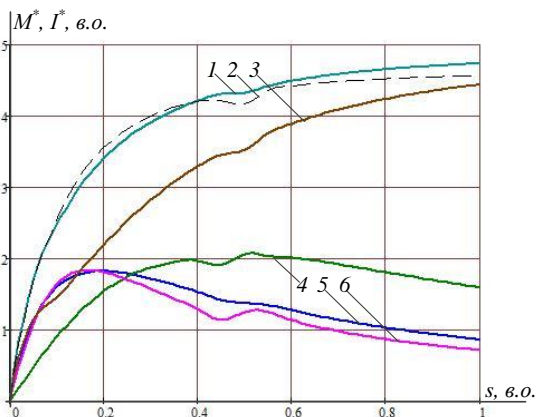
Рис.5 – Пускові характеристики I^* (1,2,3), M^* (4,5,6) = f(s)

при зміні висоти $h_{ш2}$ шліца паза пускової обмотки:

1, 4 – $h_{ш2} = 1$ мм; 2, 5 – $h_{ш2} = 2$ мм; 3, 6 – $h_{ш2} = 3$ мм

Таблиця 3 – Пускові характеристики при зміні ширини шліца паза пускової обмотки

s, в.о.	$b_{ш2}=4$ мм		$b_{ш2}=3$ мм		$b_{ш2}=5$ мм	
	M^* , в.о.	I^* , в.о.	M^* , в.о.	I^* , в.о.	M^* , в.о.	I^* , в.о.
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,050	1,103	1,694	1,100	1,697	1,104	1,693
0,1	1,602	2,470	1,588	2,471	1,611	2,469
0,15	1,785	3,012	1,755	3,007	1,805	3,015
0,2	1,825	3,404	1,779	3,388	1,857	3,414
0,25	1,793	3,695	1,734	3,668	1,834	3,713
0,3	1,723	3,914	1,665	3,874	1,771	3,941
0,35	1,635	4,083	1,562	4,034	1,687	4,116
0,4	1,536	4,213	1,462	4,156	1,589	4,253
0,45	1,420	4,305	1,348	4,242	1,472	4,349
0,500	1,373	4,326	1,294	4,262	1,430	4,370
0,550	1,347	4,425	1,263	4,351	1,408	4,477
0,600	1,274	4,496	1,192	4,415	1,335	4,553
0,650	1,205	4,548	1,125	4,462	1,265	4,609
0,700	1,142	4,591	1,064	4,500	1,201	4,655
0,750	1,085	4,626	1,009	4,532	1,142	4,693
0,800	1,033	4,655	0,959	4,558	1,088	4,725
0,850	0,984	4,681	0,913	4,581	1,038	4,752
0,900	0,940	4,703	0,871	4,600	0,993	4,776
0,950	0,900	4,722	0,832	4,617	0,951	4,797
1,000	0,862	4,738	0,797	4,632	0,911	4,815

Рис.6 – Пускові характеристики I^* (1,2,3), M^* (4,5,6)=f(s)при зміні ширини $b_{ш2}$ шліца паза пускової обмотки:1, 4 – $b_{ш2} = 5$ мм; 2, 5 – $b_{ш2} = 4$ мм; 3, 6 – $b_{ш2} = 3$ ммРис.7 – Пускові характеристики I^* (1, 2, 3), M^* (4, 5, 6)=f(s)при зміні діаметра $d_{смп}$ стрижнів пускової обмотки:1, 5 – $d_{смп} = 12$ мм; 2, 6 – $d_{смп} = 15$ мм; 3, 4 – $d_{смп} = 9$ мм

Висновки. Розроблена у роботі математична модель розрахунку пускових характеристик явнопольного синхронного двигуна та її реалізація на комп'ютері дозволяють досліджувати вплив параметрів пускової обмотки на пускові властивості двигуна та оптимізувати ці параметри з метою досягнення заданих пускових властивостей.

Проведені дослідження за допомогою комп'ютерної програми та з використанням завдань, які були розроблені за допомогою сучасних відомостей про явнопольні синхронні двигуни з каталогів й довідників, показали високу адекватність математичної моделі.

Матеріал викладений логічно, зрозуміло, на належному науковому рівні і може бути використаний як науковцями, які займаються дослідженням електричних машин так і спеціалістами, які займаються проектуванням електричних машин.

Список літератури:

1. Фильц Р.В., Лябук Н.Н. Математическое моделирование явнопольных синхронных машин. – Львов: Світ, 1991. – 176 с.
2. Постников И. М. Обобщенная теория и переходные процессы электрических машин. – М.: Высшая школа, 1975.
3. Копылов И. П. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов, Ф. А. Горяинов, Б. К. Клоков и др. Под ред. И. П. Копылова. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767 с.
4. Частотно-керовані асинхронні та синхронні електроприводи: навч. посіб. для студ. електромехан. спец. вищ. навч. закл. / О. Г. Плахтина, С. С. Мазепа, А. С. Куцик. – Львів: Львівська політехніка, 2002. – 227 с.
5. Бурштинський М. В. / Непряме визначення обертового моменту досліджуваного електродвигуна / М. В. Бурштинський, М. В. Хай, Б. М. Харчишин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х.: НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 75–78. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2409-9295.
6. Справочник по электрическим машинам. В двух томах. Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Том 1. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
7. Технічний каталог на електродвигуни СДНЗ і СДЗ. – <http://www.ao-electromash.ru>.
8. Маляр, В. С. Дослідження впливу додаткового активного опору в колі обмотки збудження на пускові характеристики явнопольних синхронних двигунів / В. С. Маляр, А. В. Маляр // Електротехніка і Електромеханіка. – 2018. – № 2. – С. 18-23.
9. Пивняк Г.Г., Кириченко В.И., Бородай В.А. О новом направлении усовершенствования крупных синхронных электродвигателей // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2002. – ч.2. – С. 62-65.
10. Кириченко В.И., Бородай В.А., Яланский А.А. Улучшение пусковых свойств крупных синхронных машин // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2003. – №6(64). – С. 38-40
11. Charles A. Gross. Electric machines / Charles A. Gross. – Taylor & Francis, 2006 – 450 p. – ISBN 0-8493-8581-4.
12. Bakshi U. A. Synchronous Machines / U. A. Bakshi, M. V. Bakshi. – Technical publications pune, 2009 – 308 p. – ISBN 9788184315578.
13. Черный А.П., Гладырь А.И., Осадчук Ю.Г., Курбанов И.Р., Вошун А.Н. Пусковые системы регулируемых электроприводов: Монография. – Кременчуг: «ЧП Щербатых А.В.», 2006. – 280 с.
14. J. C. Das and J. Casey, "Characteristics and analysis of starting of large synchronous motors," 1999 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (Cat. No.99CH36371), 1999, pp. 10 pp.-, doi: 10.1109/ICPS.1999.787222

References (transliterated):

1. Fylts R.V., Lyabuk N.N. Matematycheskoe modelyrovanye yavnopolyusnykh synkhronnykh mashyn. – Lvov: Svit, 1991. – 176 p.

2. Postnykov Y. M. Obobshchennaya teoriya y perekhodnye protsessy élektrycheskykh mashyn. – Moscow: Vysshaya shkola, 1975.
3. Kopylov I. P., Goryainov F. A., Klokov B. K. Proektirovanie elektrycheskikh mashin [Design of electrical machines]. Moscow, Yurait Publ, 2011, 767 p.
4. Plakhtyna O. H., Mazepa S. S., Kutsyk A. S. Chastotno-kerovani asynkhronni elektropyvody : navch. posib. dlya stud. elektromekhan. spets. vyshch. navch. zakl. - Lviv : Lvivska politehnika, 2002. – 227 p. – ISBN 966-553-260-KH.
5. Burshtynskyy M. V., Khai M. V., Kharchyshyn B. M. Nepryame vyznachennya obertalnoho momentu doslidzhuvanoho elektrodvyhuna. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KHPi». Seriya: "Elektrychni mashyny ta elektromekhanichne peretvorenniya enerhiyi". – Kharkiv : NTU «KHPi», 2018. – No 5 (1281). – Pp. 75–78. – Bibliohr.: 9 nazv. – ISSN 2409-9295.
6. Spravochnyk po élektrycheskym mashynam. V dvukh tomakh. Pod obshch. red. Y.P. Kopylova y B.K. Klokova. Tom 1. Moscow: Énerhoatomyzdat, 1988. – 456 p.
7. Tekhnichnyy katalog na elektrodvyhuny SDNZ y SDZ. – <http://www.ao-electromash.ru>.
8. Malyar V. S., Malyar A. V. Doslidzhennya vplyvu dodatkovoho aktyvnoho oporu v koli obmotky zbudzhennya na puskovi kharakterystyky yavopolusnykh synkhronnykh dvyhuniv. Elektrotehnika i Elektromekhanika. – 2018. – No 2. – Pp. 18-23.
9. Pyvnyak H.H., Kyrychenko V.Y., Boroday V.A. O novom napravlenyy usovershenstvovanyya krupnykh synkhronnykh élektrodvyhateley. Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyy vypusk «Problemy suchasnoyi elektrotekhniki». – 2002. – ch.2. – S. 62-65.
10. Kyrychenko V.Y., Boroday V.A., Yalansky A.A. Uluchshenye puskovykh svoystv krupnykh synkhronnykh mashyn // Visnyk Skhidnoukrayins'koho natsional'noho universytetu im. V. Dalya. – 2003. – No 6 (64). – S. 38-40
11. Charles A. Gross. Electric machines. Charles A. Gross. – Taylor & Francis, 2006 – 450 p. – ISBN 0-8493-8581-4.
12. Bakshi U. A., Bakshi M. V. Synchronous Machines. – Technical publications pune, 2009 – 308 p. – ISBN 9788184315578.
13. Chernyy A.P., Gladyr' A.I., Osadchuk YU.G., Kurbanov I.R., Voshun A.N. Puskovyie sistemy nereguliruyemykh elektroprivodov: Monografiya. – Kremenchug: «CHP Shcherbatiykh A.V.», 2006. – 280 p.
14. J. C. Das and J. Casey, "Characteristics and analysis of starting of large synchronous motors," 1999 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (Cat. No.99CH36371), 1999, pp. 10 pp.-, doi: 10.1109/ICPS.1999.787222.

Надійшла (received) 15.02.22

Відомості про авторів / About the Authors

Хай Михайло Васильович (Khai Mykhailo Vasulovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем, тел. 093-346-00-32; mykhailo.v.khai@lpnu.ua.

Харчишин Богдан Михайлович (Kharchyshyn Bohdan) – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», доцент кафедри електромехатроніки та комп'ютеризованих електромеханічних систем, тел. 095-105-14-71; bohdan.m.kharchyshyn@lpnu.ua.