

О. М. ПОПОВИЧ, О. В. БІБІК

ПОШУК І ОЦІНКА ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ МОНОБЛОЧНОГО НАСОСУ ЗА ЗАСТОСУВАННЯ КОМПЛЕКСНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

Для цілей комплексного проектування асинхронних двофазних двигунів обґрунтовано застосування структурної математичної моделі двигуна із інтеграцією її до імітаційної моделі електромеханічної системи, яка враховує при розрахунках квазістатичних режимів роботи нелінійні залежності параметрів заступної схеми, спектр просторових гармонік магнітного поля, складну структуру обмотки статора. Із використанням у якості критерію ефективності виразу для визначення ККД у квазістатичному режимі при еліптичності поля досліджено можливості підвищення енергоефективності при варіюванні кількістю витків фаз серійної і синусної обмотки статора.

Ключові слова: двофазний асинхронний двигун, комплексне проектування, математична модель, квазістатичний режим, просторова несинусоїдальність.

Для задач комплексного проектирования асинхронных двухфазных двигателей обосновано применение структурной математической модели двигателя, интегрированной в имитационную модель электромеханической системы, которая учитывает при расчетах квазистатических режимов работы нелинейные зависимости параметров схемы замещения, спектр пространственных гармоник магнитного поля, сложную структуру обмотки статора. При использовании в качестве критерия эффективности выражения для определения КПД в квазистатическом режиме при эллиптичности поля, исследованы возможности повышения энергоэффективности при варьировании количеством витков фаз серийной и синусной обмотки статора.

Ключевые слова: двухфазный асинхронный двигатель, комплексное проектирование, математическая модель, квазистатический режим, пространственная несинусоидальность.

Purpose. The study of the possibility of applying energy efficiency measures to a two-phase asynchronous pump engine, provided that the efficiency criteria of the complex energy coefficients are used as criteria of efficiency. **Methodology.** Application of the structural mathematical model of the engine integrated into the simulation model of the electromechanical system that takes into account the nonlinear dependencies of the parameters of the replacement circuit, the spectrum of the spatial harmonics of the magnetic field, and the complex structure of the stator winding in calculating quasistatic operating modes. **Results. Originality.** Use as an efficiency criterion of an expression for determining the efficiency in a quasistatic regime with ellipticity of the field. **Practical value.** The possibilities of increasing the energy efficiency are investigated with varying the number of turns of the phases of the serial and sine winding of the stator.

Keywords: two-phase asynchronous motor, complex design, mathematical model, quasi-static mode, spatial non-sinusoidal.

Вступ. Моноблочний насос БЦ1,1-20-У1 оснащено двофазним двополосним конденсаторним асинхронним двигуном (АД) із потужністю 550 Вт на валу якого розміщено робоче колесо відцентрового насосу. Насос призначено для роботи в умовах невеликих статичних напорів. Особливості робочих режимів АД насосу пов'язані: із зміною ступеня еліптичності поля статора із зміною ковзання; із участю у процесі електромеханічного перетворення енергії третьої просторової гармоніки статора; із підвищеним опором обмотки ротора для забезпечення потрібних пускових властивостей АД.

Пошук співвідношення величин конструктивних параметрів АД для забезпечення максимальної енергоефективності здійснюють у процесі чисельного дослідження параметрів робочих режимів. Найбільш проста технічна реалізація зміни величини конструктивних параметрів має місце при варіюванні кількістю витків фаз і ємністю конденсатора.

До трьох параметрів, які варіюються (витки та ємність) при формуванні енергоефективних режимів АД додається ще величина ковзання. Цього нема при проектування АД у складі електромеханічної системи (ЕМС), яке має певні переваги:

1. Використання у якості критерію ефективності комплексних енергетичних показників системи сприяє створенню умов для забезпечення максимальної ефективності за кінцевим результатом. При цьому враховується взаємний вплив складових системи.

2. Проектування АД за моделлю ЕМС з урахуванням наявного квазістатичного режиму, який має

місце внаслідок еліптичності поля статора, забезпечує аналіз при урахуванні коливань швидкості ротора.

3. При проектуванні АД у складі ЕМС із заданням на його валу величини моменту опору спрощуються алгоритми пошуку оптимуму завдяки вилучення ковзання із параметрів, що варіюються.

4. Використання математичної моделі динамічних режимів ЕМС з АД забезпечує ефективний проектний синтез із урахуванням нелінійності електромагнітних параметрів завдяки відсутності проблем збіжності ітераційних циклів, що має місце під час розрахунку статичних режимів. Адекватність динамічної моделі із нелінійними параметрами забезпечується урахуванням диференціальних параметрів.

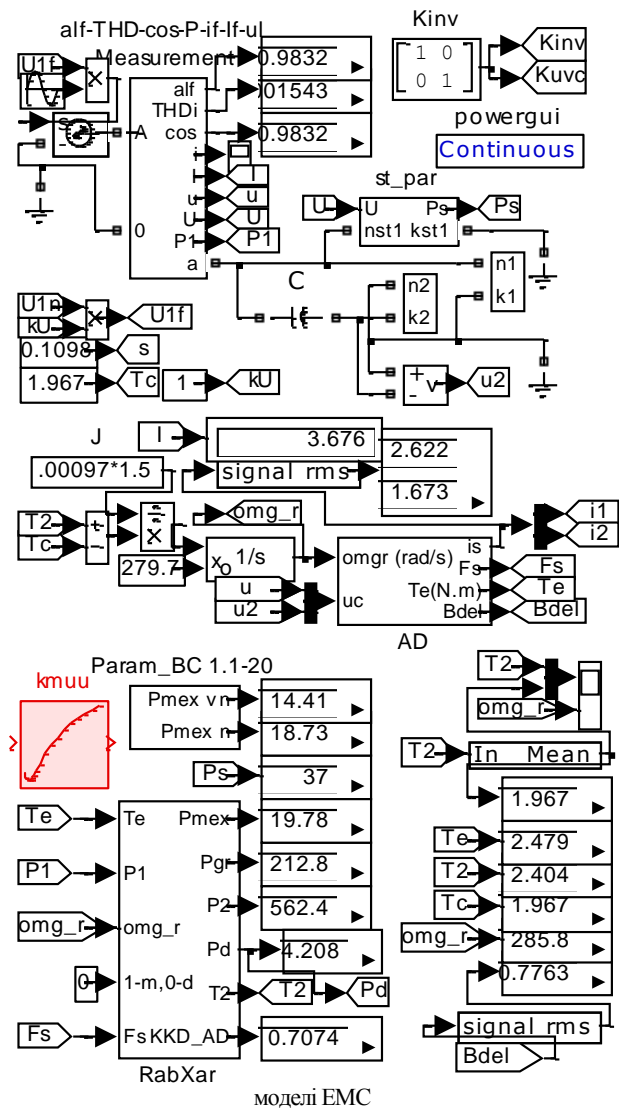
Постановка задачі. Метою даної роботи є дослідження можливості застосування заходів підвищення енергоефективності ЕМС насоса БЦ1,1-20-У1 за умови використання у якості критеріїв ефективності комплексних енергетичних коефіцієнтів.

Математична модель ЕМС. Імітаційну модель ЕМС насоса [2, 4] наведено на рис. 1. Модель складається з блоків системи живлення та вимірювача її параметрів, імітаційних блоків вивідних кінців фаз АД ($n1-k1$, $n2-k2$) та підключеного паралельно до його входу блоку урахування втрат потужності у сталі та додаткових (st_par), а також конденсаторів. Для розрахунку величин електромагнітних параметрів, струмів та моментів двигуна, його робочих характеристик використовуються блоки структурного моделювання, відповідно: Param, AD, RabXar.

На дисплеях рис. 1 наведено деякі результати розрахунку. У нижній частині рисунку, лівий стовпчик,

відповідно: вентиляційні і повні механічні втрати [6], втрати у сталі, механічні втрати [2], гріючі втрати, корисна потужність, додаткові втрати, ККД АД.

Рис. 1 – Імітаційна та структурна математичні



Правий стовпчик, відповідно: середнє значення корисного моменту АД, електромагнітний момент, корисний момент, момент опору на валу, миттєве значення частоти обертання ротора, середньоквадратичне значення індукції у повітряному проміжку. У верхній частині рисунку: коефіцієнт потужності, THDi, косинус за першою гармонікою. Результат розрахунку статичної механічної характеристики наведено на рис. 2.

Математична модель АД за величинами напруги і частоти джерела живлення, а також частоти обертання дозволяє визначити величини електромагнітного моменту, корисної потужності і втрат АД. В залежності від співвідношення електромагнітного моменту АД і моментів опору на валу і механічних втрат у АД, розраховується залежність зміни швидкості, яка впливає на характеристики двигуна. Перехідний процес закінчується із визначенням усталеного режиму, коли моменти рухомий та опору на

валу стають рівними. У процесі розрахунку за величинами моментів (електромагнітного та власного опору АД) коригуються корисна потужність АД і втрати у його підшипниках. За результатами розрахунку режиму роботи визначається величина індукції у повітряному проміжку АД, яка є вхідною величиною для визначення втрат у сталі. Також, визначається величина сумарної МРС машини для визначення коефіцієнта насичення магнітного кола за основним полем (за заздалегідь розрахованими залежностями), що дозволяє розрахувати величину відповідних індуктивних параметрів.

Математична модель асинхронного двигуна.

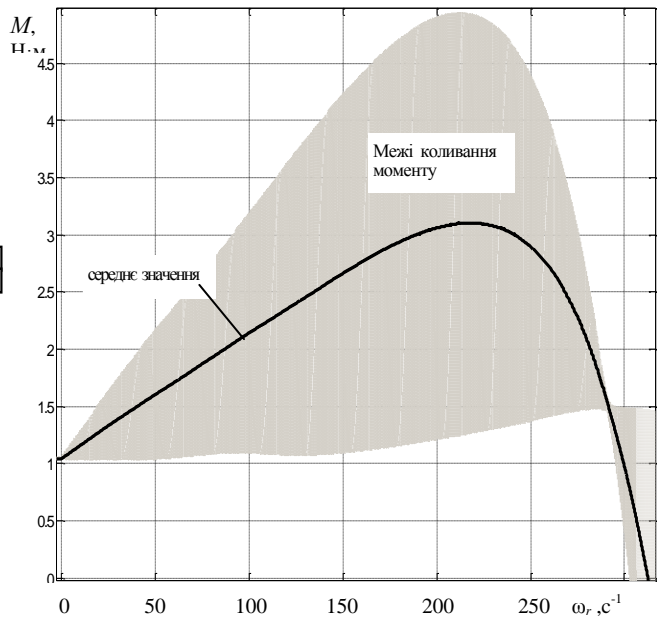


Рис. 2 – Розрахункова механічна характеристика двигуна насос

Режими дослідження ЕМС обумовлюють вимоги до математичної моделі АД: щодо її інтеграції до моделі ЕМС, врахування зміни втрат і електромагнітних параметрів АД. Цим вимогам задовольняє математична модель асинхронного двигуна електромеханотронної системи при імітаційному та структурному моделюванні [3–5], яку застосовано у роботі.

Для врахування втрат у сталі при моделюванні режиму роботи паралельно АД до його вхідних клем приєднана система опорів, втрати у якій імітують величину втрат у сталі, що визначається за масою магнітопроводу і величиною питомих втрат у ньому відповідно до відомого виразу: $p_{cm} = p_{1,50} (f/50)^\alpha B_m^2$, де $p_{1,50}$ – питомі втрати у сталі шихтованого магнітопроводу із стандартною товщиною листів при індукції 1 Тл і частоті 50 Гц; f – частота живлення; α – коефіцієнт, що залежить від марки сталі, величина якого обумовлена співвідношенням втрат на гістерезис і вихрові струми; B_m – амплітуда магнітної індукції в магнітопроводі, яка визначається при розрахунку магнітного кола за величиною сумарної МРС машини у даному режимі. Розрахунок виконано при $p_{1,50} = 5,0$ Вт/кг; $\alpha = 1,3$; коефіцієнти збільшення втрат у сталі 2,0. Разом з втратами у сталі враховано додаткові втрати у АД, які прийнято як 0,5 % від

номінальної спожитої потужності із коригуванням пропорційно співвідношенню квадратів модуля МРС статора досліджуваного режиму і номінального. Урахування співвідношення МРС замість струмів забезпечує дослідження із зміною схем обмотки статора.

Механічні втрати визначено з урахуванням впливу зміни частоти обертання ротора і моменту навантаження за трьома складовими: тертям у підшипниках, втратами у вентиляційному вузлі зовнішнього обдування та аеродинамічними втратами всередині машини. У формулах визначення втрат на вентиляцію використана функціональна залежність від розмірів вентилятора та частоти обертання у третьому ступені [1, 2]. Втрати у підшипниках визначено в залежності від ваги ротора.

Чисельний експеримент. Розрахунок здійснювався у двох варіантах: урахування тільки основної гармоніки МРС; урахування гармонік з номерами 1, 3, 5, 7. Величину моменту опору задано 1,967 Н·м, ємність конденсатора: $C = 16$ мкФ. Параметри заступної схеми визначено у відповідності з [6] для номінального режиму роботи. Враховано взаємну індуктивність фаз за шляхами потоку пазового і лобового розсіювання. Для врахування нелінійності параметрів за основним полем враховано залежності зміни коефіцієнтів насичення у функції МРС, які розраховано відповідно до [6].

Результати розрахунків зведено до табл. 1, де наведено значення: корисної потужності, частоти обертання ротора, ККД, коефіцієнту потужності, середньоквадратичної індукції у повітряному проміжку, нагрівальних втрат, струмів фаз та мережі (номінальний та пусковий), пускового моменту АД.

Конструктивні параметри схем обмотки для трьох варіантів аналізу також зведено до табл., де вказано на номери за пазами перших n_1 та других n_2 сторін секцій обмотки, з яких складаються фази статора (знак вказує на напрямок обходу секції,), на кількість витків секції W і діаметр її проводу без ізоляції d_c . Перший стовпчик таблиці відповідає базовому варіанту, другий і третій – показують можливість вдосконалення при варіюванні кількістю витків для базової і синусної обмоток відповідно.

Значення циклового ККД, яке наведено у таблиці, є екстремальною величиною при варіюванні кількості витків. Вираз для визначення ККД у квазі-сталому режимі при еліптичності поля є:

$$\eta = \frac{\int_0^T \omega_r \left(M_{em} - M_{ad} - 3,75 \cdot 10^{-4} G_r - \frac{P_{vennom}}{\omega_{rnom}} \left(\frac{\omega_r}{\omega_{rnom}} \right)^2 \right) dt}{\int_0^T u_i i dt}$$

де ω_r – частота обертання ротора, c^{-1} ; G_r – вага ротора, Н; u, i_l – величини напруги і струму мережі; M_{em} – електромагнітний момент двигуна; M_{ad} – додаткові моменти, які пов'язані із величиною додаткових втрат і коефіцієнтом перетворення їх у меха-

нічну потужність, який прийнято рівним 0,5, Н·м; $P_{vennom} = P_{mecnom} - P_{beanom}$ – номінальні вентиляційні втрати; $P_{mecnom}, P_{beanom}, \omega_{rnom}$ – номінальні значення механічних втрат [6], втрат у підшипниках [2], частоти обертання.

Таблиця 1 – Результати розрахунків

конструкт. параметр схеми	Варіант обмотки					
	W = 51; 105		W = 50; 94		синус. обмотка	
фаза А	n_1	5,6,7,8,-17,-18,-19,20		5,6,7,8,-17,-18,-19,-20		4,3,2,1,-16,-15,-14,-13
	n_2	-16,-15,-14,-13,4,3,2,1		-16,-15,-14,-13,4,3,2,1		-9,-10,-11,-12,21,22,23,24
	W	51,51,51,51,51,51		50,50,50,50,50,50		41,43,50,52,41,43,50,52
	d_c , мм	0,71,0,71,0,71,0,71,0,71,0,71,0,71		0,71,0,71,0,71,0,71,0,71,0,71,0,71		0,56,0,56,0,71,0,71,0,56,0,56,0,71,0,71
фаза В	n_1	12,11,-23,-24		12,11,-23,-24		10,9,8,7,-22,-21,-20,-19
	n_2	-21,-22,10,9		-21,-22,10,9		-15,-16,-17,-18,3,4,5,6
	W	105,105,105,105		94,94,94,94		56,59,68,73,56,59,68,73
	d_c , мм	0,5,0,5,0,5,0,5		0,53,0,53,0,53,0,53		0,45,0,45,0,6,0,6,0,45,0,45,0,6,0,6
параметр робочого режиму	просторові гармоніки					
	1	1,3,5,7	1	1,3,5,7	1	1,3,5,7
P_{out} , Вт	556.7	554.5	556.6	554.9	564.2	564.3
ω_r , c^{-1}	283.3	281.9	282.5	281.4	287	286.3
η	0.7235	0.705	0.7235	0.7082	0.713	0.711
$\cos\phi$ АД	0.996	0.997	0.987	0.988	0.979	0.979
$B_{\delta 1}$, Тл	0.737	0.735	0.738	0.735	0.787	0.786
$P_{нгр}$, Вт	193.5	215.2	193.4	209.5	206.8	208.8
I_{s1} , А	2.40	2.45	2.72	2.75	2.66	2.66
I_{s2} , А	1.65	1.66	1.56	1.57	1.7	1.69
I_l , А	3.51	3.59	3.54	3.60	3.67	3.68
I_1 , А	9.91	9.81	10.3	10.2	10.65	10.55
M_l , Н·м	1.06	1.04	0.942	0.924	1.06	1.06

Висновки. Дослідження АД у складі ЕМС забезпечує застосування комплексних критеріїв ефективності і визначення, відповідно до них, оптимального співвідношення конструктивних параметрів.

1. Застосування комплексних математичних моделей ЕМС з АД підвищує ефективність процесу пошуку оптимального варіанту завдяки вилученню ковзання з числа варійованих параметрів.

2. Комплексний чисельний експеримент при варіюванні кількістю витків базового варіанту обмотки статора АД насосу БЦ1,1-20-У1 показав можливість збільшення ККД на третину відсотка.

3. При виконанні обмотки чотирма діаметрами проводу із наближенням розподілу МРС до синусного, ККД АД можна збільшити на 1 відсоток, порівняно із базовим варіантом, без погіршення пускових властивостей.

Список літератури

1. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока: Учеб.пособие для студентов вузов / Балагуров В.А. – М.: Высш.школа, 1982. – 272 с.

2. Бібік О.В. Енергоефективні режими електромеханічної системи насосної установки багатоповерхового будинку / О.В. Бібік, О.М. Попович, С.П. Шевчук // Техн. електродинаміка. – 2016. – № 5. – С. 38-45.
 3. Попович О.М. Математична модель для дослідження режимів асинхронних машин електромеханотронних систем// Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. праць. – 2010. – Вип.25. – С. 89 – 97.
 4. Попович О.М. Математична модель асинхронної машини електромеханотронної системи для імітаційного та структурного моделювання// Техн. електродинаміка. – 2010. – № 4. – С. 25 – 32.
 5. Попович О.М. Уточнення аналізу режимів роботи асинхронних двигунів у складі електромеханотронних систем еквівалентуванням їх польових моделей коловими / О.М. Попович, І.В. Головань // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 5. – С. 113-115.
 6. Радін В.И. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро / В.И. Радін, Й. Лондін, В.Д. Розенкноп и др.; под ред. В.И. Радина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.
 2. Bibik O.V., Popovych O.M., Shevchuk S.P. Yenergoefektivni rezhimi yelektromekhanichnoyi sistemi nasosnoi ustanovki bagatopoverkhovogo budinku [Energy efficient modes electromechanical system pumping unit multistory building] *Tekhnichna Elektrodinamika*. 2016, no. 5, pp. 38–45.
 3. Popovych O.M. Matematychna model' dlya doslidzhennya rezhymiv asynkronnykh mashyn elektromekhanotronnykh system [Mathematical model for the study of asynchronous machines electromechanotronnyh systems] *Pratsi IED NANU*, 2010, vol. 25, pp. 89 – 97.
 4. Popovych O. M. Matematychna model' asynkronnoyi mashyny elektromekhanotronnoyi systemy dlya imitatsiynoho ta strukturnoho modelyuvannya. [Mathematical model of asynchronous electric machine for mechatronic system simulation and structural modeling] *Tekhnichna elektrodynamika*. 2010, no. 4, pp. 25-32.
 5. Popovych O.M., Holovan I.V. Utochnennya analizu rezhymiv roboty asynkronnykh dyvuhuniv u skladi elektromekhanotronnykh system ekvivalentuvannya yikh pol'ovyykh modeley kolovymy [Clarifying analysis modes of asynchronous motors consisting of electromechanotronnyh equivalentiation field models of circular], *Tekhnichna Elektrodinamika*. 2014, no. 5, pp. 113–115.
 6. Radin V.I., Londin J., Rozenknop V.D. Unifitsirovannaya seriya asynkronnykh dyvigateley Interelektro [Unified series of induction motors Interelectro], Moscow: Energoatomizdat Publ, 1990, 416 p.
- References (transliterated)**
1. Balagurov V.A. *Proyektirovaniye spetsial'nykh elektricheskikh mashin peremennogo toka: Ucheb.posobiye dlya studentov vuzov* [Design of special electrical machines of alternating current: Ucheb.Posobiye for students of higher education institutions] Moscow: High school, 1982, 272 p.

Надійшла (received) 12.03.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Пошук і оцінка шляхів підвищення енергоефективності моноблочного насоса за застосування комплексного проектування / О. М. Попович, О. В. Бібік // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 79–82. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2409-9295.

Поиск и оценка путей повышения энергоэффективности моноблочного насоса при применении комплексного проектирования / А. Н. Попович, Е. В. Бибики // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2018. – № 5 (1281). – С. 79–82. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2409-9295.

Search and evaluation of ways to increase the energy efficiency of a monoblock pump in the application of complex design / O.M. Popovych, O.V. Bibik // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2018. – No. 5 (1281). – P. 79–82. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2409-9295.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Попович Олександр Миколайович, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, доцент, Інститут електродинаміки Національної академії наук України, провідний науковий співробітник, тел. (044)366-26-37; e-mail: popovich1955@ukr.net.

Попович Александр Николаевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, доцент, Институт электродинамики Национальной академии наук Украины, ведущий научный сотрудник, тел. (044)366-26-37; e-mail: popovich1955@ukr.net.

Popovych Oleksandr Mykolayovych, PhD, senior researcher, professor, Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, Senior Research Fellow, tel. +38 (044)366-26-37; e-mail: popovich1955@ukr.net.

Бібік Олена Василівна, кандидат технічних наук, Інститут електродинаміки Національної академії наук України, старший науковий співробітник, тел. (044)366-26-14; e-mail: bibik@ied.org.ua.

Бибики Елена Васильевна, кандидат технических наук, Институт электродинамики Национальной академии наук Украины, старший научный сотрудник, тел. (044)366-26-14; e-mail: bibik@ied.org.ua.

Bibik Olena Vasylivna, Ph.D., Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, Senior Fellow, tel. +38 (044)366-26-14; e-mail: bibik@ied.org.ua.