

О.М. ПОПОВИЧ, І.В. ГОЛОВАНЬ, В.О. ПОЛІЩУК

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ КІЛЕЦЬ КОРОТКОЗАМКНЕНОГО РОТОРА ПРИ КОМПЛЕКСНОМУ ПРОЕКТУВАННІ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ЗА КВАЗІТРИВИМІРНИМ ПОЛЬОВИМ АНАЛІЗОМ І ІМІТАЦІЙНИМ МОДЕЛЮВАННЯМ

Для цілей підвищення енергоефективності асинхронних двигунів у складі електромеханічних систем, на прикладі насосної установки, обґрунтовано застосування уточненої математичної моделі двигуна із інтеграцією її до імітаційної моделі електромеханічної системи, яка враховує нелінійні залежності параметрів заступної схеми, що визначено за результатами квазітривимірного польового аналізу. Досліджено вплив збільшення площі перетину короткозамикаючих кілець ротора на робочі і пускові характеристики двигуна. Обґрунтовано апроксимаційні залежності електромагнітних параметрів за зміни величини конструктивних параметрів.

Ключові слова: асинхронний двигун, комплексне проектування, математична модель, робочі та пускові характеристики.

Для задач повышения энергоэффективности асинхронных двигателей в составе электромеханических систем, на примере насосной установки, обосновано применение уточненной математической модели двигателя при интегрировании ее в имитационную модель электромеханической системы, которая учитывает нелинейные зависимости параметров схемы замещения, рассчитанных по результатам квазитрехмерного полевого анализа. Исследовано влияние увеличения площади сечения короткозамыкающих колец ротора на рабочие и пусковые характеристики двигателя. Обоснованы аппроксимационные зависимости электромагнитных параметров в функции величины конструктивных параметров.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, комплексное проектирование, математическая модель, рабочие и пусковые характеристики

Purpose. To justify and apply an improved mathematical model of induction motors for solving problems of increasing their energy efficiency as part of electromechanical systems. To investigate the effect of increasing the cross-sectional area of the short-circuited rotor rings on the efficiency in the operating mode of the electromechanical system of the engine-mechanism, the multiplicity of starting current and torque. **Methodology.** The use of a refined mathematical model of the engine when integrating it into a simulation model of an electromechanical system that takes into account the non-linear dependencies of the parameters of the equivalent circuit calculated from the results of a quasi-three-dimensional field analysis. **Results. Originality.** With reduced requirements for starting torque, it is reasonable to use an improved mathematical model of the engine when determining the parameters of the rings of a short-circuited rotor. **Practical value.** The effect of increasing the cross-sectional area of the short-circuited rotor rings on the engine operating and starting characteristics is investigated. The approximation dependences of the electromagnetic parameters as a function of the magnitude of the design parameters are substantiated.

Keywords: induction motor, complex design, mathematical model, performance and starting characteristics.

Вступ. Визначення величин оптимальних конструктивних параметрів асинхронних двигунів (АД) може здійснюватись за критерієм максимуму енергетичної ефективності з урахуванням у якості обмежень заданих величин кратності пускових струмів та моментів. Величини пускових моментів, які нормуються для АД загальнопромислового призначення є завищеними для приводу багатьох типів електромеханічного обладнання, наприклад насосів. Зниження вимог до величин пускових моментів дозволяє підвищити енергоефективність, наприклад за зменшення значення номінального ковзання, що забезпечується збільшенням величини електричної провідності обмотки ротора.

Можливість збільшення енергоефективності АД може бути реалізованою при його комплексному проектуванні, як складової електромеханічної системи (ЕМС), за критеріями її ефективності, з урахуванням вимог до експлуатаційних режимів конкретного електромеханічного обладнання. При цьому треба враховувати можливості технологічного процесу виготовлення АД із забезпечення гнучкості виробництва.

Технологічно простим засобом зменшення опору ротора є збільшення величини його короткозамикаючих кілець. Ефективність (за точністю і часом розрахунків) розв'язку задачі визначення допустимої величини збільшення площі перетину кілець, в умо-

вах заданих пускових обмежень, залежить від властивостей математичних моделей. Вони повинні забезпечувати визначення: електромагнітних параметрів ротора за зміни конструктивних параметрів короткозамикаючих кілець; параметрів пускових і робочих режимів АД приводу механізму навантаження. Даним вимогам відповідає математична модель АД електромеханотронної системи [3-5], яка забезпечує: визначення двовимірних у просторі струмів та ковзання електромагнітних параметрів колової математичної моделі АД (яка є еквівалентною до квазітривимірної польової моделі [1, 5]); імітаційне моделювання режимів ЕМС двигун-механізм [2] з використанням даних параметрів.

Постановка задачі. Мета даної роботи – обґрунтувати застосування математичної моделі АД (із інтеграцією її до імітаційної моделі електромеханічної системи), яка враховує нелінійні залежності параметрів заступної схеми, що визначено за результатами квазітривимірного польового аналізу і дослідити вплив збільшення площі перетину короткозамикаючих кілець ротора на ККД у робочому режимі ЕМС двигун-механізм, кратності пускових струму і моменту.

Адекватність математичної моделі АД в пускових режимах визначається із співставлення результатів розрахунку струмів і моменту з даними експериментального дослідження даного АД. Найбільш точний результат забезпечують польові методи розрахунку. В роботі [6], зокрема, на прикладі АД 4А80А2У3 показа-

но, що завдяки використанню польового аналізу, похибка розрахунків усіх показників робочих і пускових режимів не перевищує 1%. При цьому, точність аналізу пускових режимів досягається завдяки врахуванню зміни шляху потоку взаємної індуктивності при великих ковзаннях, що враховано залежністю коефіцієнта Картера (як коефіцієнта збільшення рівномірного повітряного проміжку внаслідок наявності немагнітних ділянок магнітного кола на шляху потоку взаємної індуктивності) від ковзання.

Використання двигунів серії 4А у якості бази для тестування математичних моделей обумовлено доступністю інформації про їх конструктивні і режимні параметри. Це дає можливість широкому загалу дослідників реалізувати принцип повторюваності нових наукових результатів (що є необхідною умовою оцінки їх достовірності), у даному разі – на прикладі усередненого АД серії 4А.

Ефективність математичних моделей параметрів АД. У загальному випадку польові, або колопольові методи забезпечують більшу точність ніж колові, але їх застосування супроводжується значними обсягами споживання обчислювальних ресурсів (за часом та пам'яттю), що значно ускладнює дослідження режимів АД, особливо у складі ЕМС, а також при варіюванні величиною конструктивних параметрів. Значне зменшення трудомісткості моделювання при збереженні точності польових підходів дає застосування колових моделей із нелінійними параметрами, які забезпечують збіжність результатів колової і польового аналізів. Даний ефект досягається завдяки зменшенню потрібної кількості польових розрахунків: в заданому діапазоні зміни струмів та ковзання виконується їх обмежена кількість із визначенням залежностей еквівалентних параметрів колової моделі [5], які у подальшому використовуються при дослідженнях всього розмаїття режимних варіацій.

Стосовно задачі із варіюванням конструктивних параметрів кілець ротора, яка розв'язується у даній роботі, переваги підходів еквівалентування квазі-3D польової моделі збільшуються: польовий аналіз у поперечній площині АД здійснюється одночасно із визначенням відповідних електромагнітних параметрів [5], а конструктивні варіації враховуються при польовому аналізі (у ортогональній площині) процесів тільки у кільцях. Зшивання двох груп електромагнітних параметрів здійснюється при коловому аналізі.

Ефективність визначення параметрів режимів роботи АД залежить від ступеня нелінійності електромагнітних параметрів у рівняннях електричної рівноваги, типу рівнянь, методу їх розв'язку і від урахування процесів у зовнішніх колах двигуна. За лінійності електромагнітних параметрів алгебраїчні рівняння відносно часових комплексів електричних змінних забезпечують максимальну простоту розв'язку задачі. За нелінійності параметрів існують складнощі розв'язку алгебраїчних рівнянь внаслідок наявності ітераційних циклів і проблем їх збіжності.

В останньому випадку використання динамічної моделі АД у вигляді диференціальних рівнянь сприяє стійкому знаходженню рішення. В даній роботі використано динамічну модель АД [3, 4], яка, завдяки інтегрованості до системи імітаційного моделювання, забезпечує ефективне дослідження режимів АД у складі ЕМС. В рівняннях [4] враховано наявність ЕРС, пропорційних швидкості зміни індуктивностей – диференціальних параметрів.

Математична модель ЕМС із АД для системи імітаційного моделювання має структуру, яка в основних рисах наведена у [2]. В даній роботі дослідження виконано на прикладі трифазного АД 4А80А2У3 із варіаціями розмірів короткозамикаючих кілець ротора. В системі імітаційного моделювання кожна фаза АД представлена окремим блоком. Електрична схема статора АД імітується потрібним з'єднанням входів і виходів блоків фаз між собою і із зовнішньою мережею.

Кутова швидкість обертання ротора визначається за розв'язком диференційного рівняння механічної рівноваги із величиною моменту опору на валу АД, яка визначається властивостями і режимом роботи робочого механізму. В даному дослідженні момент опору прийнято сталим, із величиною номінального моменту АД.

Динамічна модель ЕМС з АД із нелінійними параметрами забезпечує ефективне знаходження залежностей параметрів робочих режимів за зміни конструктивних параметрів. За зміни площі кільця ротора виконано серію розрахунків характеристик поля у кільці і сформовано залежності активного опору і індуктивності ділянки кільця між двома стрижнями [5]. Дані залежності реалізовані у структурній моделі АД. Вони забезпечують при імітаційному моделюванні ЕМС дослідження зміни параметрів робочих режимів за зміни площі кільця. Алгоритм аналізу: виконується розрахунок динамічного режиму ЕМС до усталеного стану із електромагнітними параметрами базового (серійного) АД; починаючи з початку усталеного режиму площа кільця змінюється пропорційно часу, змінюється величина параметрів кілець і будується шукана залежність параметрів режимів роботи.

Табличні залежності опору і індуктивності кільця за результатами польового аналізу апроксимовані поліномами для підвищення стійкості роботи динамічної моделі. Обрано степеневу поліноміальну залежність, відповідно до виразу:

$$r(s) = r_1 + a(s - s_1) + b(s - s_1)^c,$$

де $a = r_1'$; $c = (r_2' - a) / (\Delta_r / \Delta_s - a)$; $b = (\Delta_r - a\Delta_s) / \Delta_s^c$ – коефіцієнти поліному; $\Delta_r = r_2 - r_1$; $\Delta_s = s_2 - s_1$; r_1, s_1, r_2, s_2 – значення параметру та площі кільця на початку та кінці діапазону; r_1', r_2' – значення похідної від залежності параметру на початку та кінці діапазону.

Вихідною інформацією для розрахунку величини коефіцієнтів поліному є значення параметру та площі на початку та кінці діапазону дослідження і відповідні значення похідних.

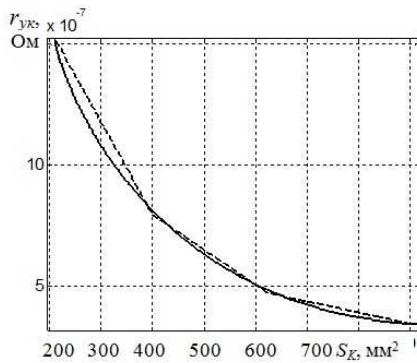


Рис.1 – Апроксимація залежності опору кільця ротору від площі його перерізу

Останні визначено за допомогою критерію мінімуму середньоквадратичного відхилення значення поліному від заданих табличних значень параметру всередині діапазону варіювання. Даний степеневий поліном забезпечує менше відхилення ніж кубічний поліном, що і обумовило його вибір.

У якості прикладу, на рис.1 наведено результат апроксимації залежності активного опору ділянки кільця ротора від його площі перетину. Пунктирна лінія є кусково-лінійною апроксимацією вихідної табличної залежності, суцільна лінія – результат апроксимації степеневим поліномом.

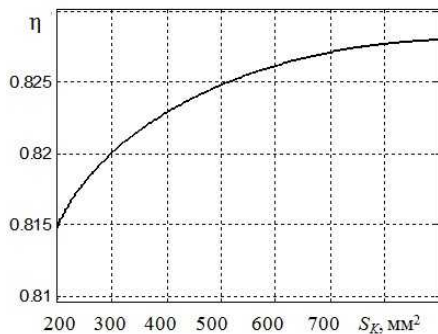


Рис.2 – Вплив площі перерізу кільця ротора на ККД двигуна

Чисельний експеримент дослідження робочих характеристик АД (як складової частини ЕМС) на базі АД 4А80А2У3 за зміни площі перетину кільця ротора виконано при сталості моменту опору. Залежність

ККД показано на рис.2. За розрахунками, із зменшенням опору ротору збільшувалась кутова швидкість у межах 1 % від номінальної.

Зміна пускових властивостей (рис. 3) за зміни площі кільця показана для характеристик у відносних одиницях. У якості бази прийнято величини пускового струму і моменту пускового початкового серійного АД ($S_K = 210 \text{ мм}^2$; $I_{II} = 21,4 \text{ А}$; $M_{II} = 10,4 \text{ Н}\cdot\text{м}$).

Висновки. Для підвищення енергоефективності АД, як складової частини ЕМС, зокрема при виборі параметрів ротора, дорцільно застосування засобів комплексного математичного моделювання із високою точністю аналізу як робочих, так і пускових режимів АД з урахуванням взаємного впливу всіх складових ЕМС.

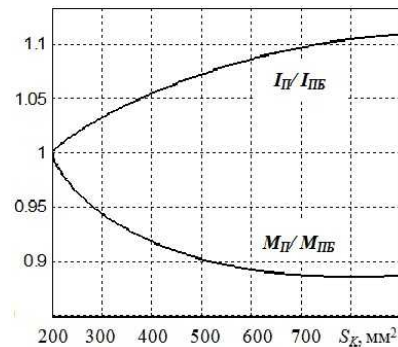


Рис.3 – Вплив площі перерізу кільця ротора на пускові властивості двигуна

Застосування математичної моделі АД електромеханотронної системи при обґрунтуванні параметрів кільця короткозамкненого ротора для ЕМС із зниженими вимогами до величини пускового моменту забезпечило:

1. Ефективний розрахунок параметрів робочих режимів АД при врахуванні їх нелінійних властивостей завдяки застосуванню нелінійних параметрів колової моделі, яка є еквівалентною до польової моделі; інтеграції даної моделі АД до імітаційної динамічної моделі ЕМС.

2. Мінімізацію обсягу польових розрахунків, при варіюванні параметрами кільця ротора, завдяки польовому аналізу лише області кільця і врахуванні його результатів при «зшиванні» параметрів колової моделі за результатами квазі-3D польового аналізу.

3. На прикладі АД 4А80А2У3 показано, що отримані залежності зміни ККД і пускових властивостей АД за зміни площі кільця ротора дозволяють оцінити ступінь підвищення енергоефективності в залежності від зниження вимог до величини пускового моменту і визначити потрібну для цього зміну площі кільця. Наприклад, підвищення ККД на 1 % потребує збільшення площі кільця у 2,5 рази, а при цьому пусковий момент знизиться на 10 %, пусковий струм збільшиться на 7,5 %.

Список літератури

1. Попович О.М. Врахування просторової несинусоїдності магніторухільних сил при проектуванні асинхронних двигунів за еквівалентною квазітривимірною польовою моделлю / О.М.Попович, І.В.Головань // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії» – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. - № 1(1223). – С. 140 – 144.
2. Попович О.М. 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.
3. Попович О.М. Математична модель для дослідження режимів асинхронних машин електромеханотронних систем // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: 36. 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. – N 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. Popovych O.M., Golovan I.V. Study of changed main flux reactance of squirrel-cage induction motors using field analysis of their starting characteristics // Техн. електродинаміка. – 2018. – № 5. – С.69-72.

References (transliterated)

1. Popovych O.M. Uchet prostranstvennoy nesinusoidal'nosti magnitorushil'nikh sil pri proyektirovani asinkhronnykh dvigateley s ekvivalentnoy kvazitrimirnoy polevoy model'yu [Considering spatial nonsine mahntorushilnyh forces in projecting induction motor by equivalent quasi-three-dimensional field model] *Visnik NTU «HPI». Harkiv: NTU «HPI» – Bulletin of NTU "KhPI". Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, no. 1, pp. 140-144.*
2. Popovych O.M. Poisk i otsenka putey povysheniya energoeffektivnosti monoblochnogo nasosa pri primenenii kompleksnogo proyektirovaniya [Search and evaluation of ways to increase the energy efficiency of a monoblock pump in the application of complex design] *Visnik NTU «HPI». Harkiv: NTU «HPI» – Bulletin of NTU "KhPI". Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, no. 5, pp. 79 – 82.*
3. Popovych O.M. Matematychna model' dlya doslidzhennya rezhymiv asinkhronnykh mashyn elektromekhanotronnykh system [Mathematical model for the study of asynchronous machines elektromekhanotronnykh systems] *Pratsi IED NANU, 2010. - Vol. 25. □ P. 89 – 97.*
4. Popovych O. M. Matematychna model' asinkhronnoyi mashyny elektromekhanotronnoyi systemy dlya imitatsiynoho ta strukturnoho modelyuvannya. [Mathematical model of asynchronous electric machine for mechatronic system simulation and structural modeling / O.M.Popovych] *Tekhnichna elektrodynamika. 2010, no. 4, pp. 25-32.*
5. Popovych O.M., Holovan I.V. Utochnnennya analizu rezhymiv roboty asinkhronnykh dvyhuniv u skladi elektromekhanotronnykh system ekvivalentuvannya yikh pol'ovykh modeley kolovymy [Clarifying analysis modes of asynchronous motors consisting of elektromekhanotronnykh equivalentiation field models of circular], *Tekhnichna Elektrodynamika. 2014, no. 5, pp. 113–115.*
6. Popovych O.M., Golovan I.V. Study of changed main flux reactance of squirrel-cage induction motors using field analysis of their starting characteristics. – *Tekhnichna Elektrodynamika. – 2018. – No 5. – Pp. 69-72.*

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Обґрунтування параметрів кілець короткозамкненого ротора при комплексному проектуванні асинхронного двигуна за квазітривимірним польовим аналізом і імітаційним моделюванням / О. М. Попович, І. В. Головань, В. О. Поліщук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – X. : НТУ «ХПІ», 2019. – № 4 (1329). – С. 90-93. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2409-9295.

Обоснование параметров колец короткозамкнутого ротора при комплексном проектировании асинхронного двигателя с помощью квазитрёхмерного полевого анализа и имитационного моделирования / А. Н. Попович, И. В. Головань, В. Е. Полищук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – X. : НТУ «ХПІ», 2019. – № 4 (1329). – С. 90-93. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2409-9295.

Substantiation of the parameters of short-circuited rings for integrated design of an asynchronous motor using quasi-three-dimensional field analysis and modeling / O. M. Popovych, I. V. Golovan, V. O. Polishchuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2019. – No. 4 (1329). – P. 90-93. – 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 Олександр 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 Oлександр 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.

Головань Іван Васильович, кандидат технічних наук, Інститут електродинаміки Національної академії наук України, старший науковий співробітник, тел. (044)366-26-37; e-mail: giv_6@ied.org.ua.

Головань Иван Васильевич, кандидат технических наук, Институт электродинамики Национальной академии наук Украины, старший научный сотрудник, тел. (044)366-26-37; e-mail: giv_6@ied.org.ua.

Golovan Ivan Vasylovych, Ph.D., Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, Senior Fellow, tel. +38 (044)366-26-37; e-mail: giv_6@ied.org.ua.

Поліщук Валентина Омелянівна, старший викладач, кафедра електромеханічного обладнання енергоємних виробництв, КПІ ім. Ігоря Сікорського, тел. (044)204-82-27; e-mail: valemp@ukr.net.

Полищук Валентина Емельяновна, старший преподаватель, кафедра электромеханического оборудования энергоёмких производств, КПИ им. Игоря Сикорского, тел. (044)204-82-27; e-mail: valemp@ukr.net.

Polishchuk Valentyna Omelianivna, senior lecturer, Department of Electromechanical Equipment for Energy-Consumption Industries, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, тел. (044)204-82-27; e-mail: valemp@ukr.net.