

УДК 621.313

О. М. ПОПОВИЧ, І. В. ГОЛОВАНЬ

ВРАХУВАННЯ ПРОСТОРОВОЇ НЕСИНУСОЇДНОСТІ МАГНІТОРУШІЛЬНИХ СИЛ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ЗА ЕКВІВАЛЕНТНОЮ КВАЗІТРИВИМІРНОЮ ПОЛЬОВОЮ МОДЕЛЛЮ

Для цілей проектування асинхронних двигунів з розширеним колом конструктивних новацій обґрунтовано застосування колової математичної моделі, яка є еквівалентною до квазітривимірної польової моделі завдяки визначенню за результатами польового аналізу і застосуванню при розрахунках статичних і динамічних режимів роботи двовимірних нелінійних залежностей параметрів заступної схеми, що забезпечує точність польових і швидкодію колових методів. Досліджено умови доцільності та вплив урахування просторових гармонік магніторухильних сил при математичному моделюванні за еквівалентною польовою моделлю.

Ключові слова: асинхронний двигун, проектування, математична модель, польовий аналіз, еквівалентування, заступна схема, просторова несинусоїдність.

Для задач проектирования асинхронных двигателей с широкой областью конструктивных изменений обосновано применение цепной математической модели, эквивалентной к квазитрехмерной полевой модели благодаря определению по результатам полевого анализа и применению при расчетах статических и динамических режимов работы двумерных нелинейных зависимостей параметров схемы замещения, что обеспечивает точность полевых и быстродействие цепных методов. Исследованы условия целесообразности и влияние учета пространственных гармоник магнитодвижущих сил при математическом моделировании с помощью эквивалентной полевой модели.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, проектирование, математическая модель, полевой анализ, эквивалентирование, схема замещения, пространственная несинусоидальность.

Purpose. Justification of the application, for the design problems of asynchronous motors using electrical circuit methods, a mathematical model that is equivalent to a quasi-three-dimensional field model. Investigation of the influence of taking into account the spatial harmonic components of the magnetic field on the simulation results using an equivalent field model. **Methodology.** Calculations of magnetic fields are carried out with the finite elements method. The parameters of the substitution circuit are determined using the energy balance equations based on the results of the field analysis. **Originality.** For the design of asynchronous motors with a wide range of design changes, the advantages of algorithms and expressions for calculating the parameters of the replacement circuit based on the results of field analysis are justified. An estimation of modeling error with consideration of spatial harmonics for engines with different number of poles is given. **Practical value.** When designing asynchronous motors, the application of an equivalent field model provides analysis with accuracy of field methods and speed of chain methods. Modeling with allowance for spatial harmonics in the study of engines with a small number of slots per pole and phase reduces the error in calculating the starting regimes by three times.

Keywords: Asynchronous motor, design, mathematical model, field analysis, equivalence, substitution scheme, spatial non-sinusoidal.

Вступ. Асинхронні двигуни (АД) є найбільш поширеними електромеханічними перетворювачами, які споживають приблизно половину виробленої електроенергії. Від ефективності їх роботи суттєво залежать економічні показники виробництва, якість та конкурентоспроможність продукції. Вдосконалення АД досягають за рахунок впровадження нових конструктивних рішень, електротехнічних і конструктивних матеріалів та технологій виготовлення. Максимальну ефективність нової машини отримують за застосування оптимального проектування АД, у тому числі у комплексі із іншими складовими електромеханічної системи [1] і з урахуванням особливостей робочих режимів.

Рівень адекватності математичної моделі оптимального проектування АД значною мірою обумовлює ступінь ефективності машини, яку виготовлено за отриманими оптимальними співвідношеннями конструктивних параметрів. Адекватність математичних моделей проектування серійних АД достатньо висока завдяки їх уточненню за результатами фізичного експерименту. Але це має місце у межах варіювання режимами, конструктивними схемами, властивостями матеріалів, які досліджено експериментально. Проектування із розширенням кола варіювання вихідними даними потребує або великого обсягу експериментальних досліджень, або застосування уточнених математичних моделей. Максимальну адекватність

забезпечують моделі за польовими методами аналізу електромагнітних процесів у АД. Але їх застосування у практиці проектного синтезу стримується потребою у надто великих витратах ресурсів обчислювальної техніки за обсягами пам'яті і часу розрахунку, навіть при аналізі усталених режимів роботи АД.

Підвищення ефективності АД завдяки проектуванню із застосуванням широкого кола конструктивних новацій, а також проектного синтезу із врахуванням особливостей режимів експлуатації, потребує залучення математичних і програмних засобів дослідження і проектування АД, яким притаманна точність польових і швидкодія колових методів аналізу. Таким вимогам задовольняє розроблена еквівалентна квазітривимірна польова математична модель АД [2, 3] яка, завдяки застосуванню польового аналізу у двох ортогональних площинах із урахуванням впливу вищих просторових гармонік МРС, забезпечує визначення нелінійних електромагнітних параметрів заступної схеми колової моделі АД, зокрема із урахуванням скосу пазів ротора і взаємної індуктивності фаз за шляхами потоків розсіювання.

Постановка задачі. Метою даної роботи є обґрунтування переваг, аналіз етапів і особливостей застосування для цілей проектування розробленої математичної моделі, яка є еквівалентною до квазітривимірної польової моделі. Розглянемо і дамо оцінку цим корисним властивостям математичної

© О.М.Попович, І.В. Головань, 2017

моделі за її складовими.

Двовимірний польовий аналіз у ортогональній до осі ротора площині [3] здійснюється, із урахуванням нелінійних властивостей матеріалу магнітопроводу, за заданими струмами статора і із визначенням наведених струмів ротора. Представлення результатів польового аналізу у вигляді двовимірних масивів у функції струмів та ковзання із наступною двовимірною апроксимацією цих результатів забезпечує високу точність аналізу у всьому заданому діапазоні варіювання вихідними даними, мінімізує кількість польових розрахунків і витрати машинного часу.

У результаті розрахунку, без впливу процесів у лобових частинах і ізоляційних прошарках між листами магнітопроводу, визначаємо для асинхронної машини з однаковою довжиною осердя статора і ротора амплітудні значення часових комплексів повних потокосцеплень фаз статора $\underline{\Psi}_i$ ($i = A, B, C$), потужність електричних втрат в стрижнях ротора за результатами польового аналізу P_{ec} , діючі значення часових комплексів струмів стрижнів ротора \underline{I}_{ci} ($i = 1, \dots, z_2$):

$$\underline{\Psi}_i = \frac{2l_1 k_{cm} W_s}{S_i} \int_{S_i} \underline{A} ds; \quad \underline{I}_{ci} = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{S_{ci}} \underline{J}_{mi} ds; \\ P_{ec} = l_1 k_{cm} \sum_{i=1}^{z_2} \left(\int_{S_{ci}} \frac{J_{mi}^2}{2\gamma_{c2}} ds \right), \quad (1)$$

де \underline{A} – часовий комплекс z -складової векторного магнітного потенціалу; W_s – кількість витків фази статора; l_1 – довжина магнітопроводу статора машини; k_{cm} – коефіцієнт заповнення шихтованого пакета магнітопроводу сталлю; S_i – сумарна площа областей пазів з обмоткою для однієї сторони усіх котушок фази статора; γ_{c2} – питома провідність матеріалу пазу ротора; \underline{J}_{mi} – поточне значення часового комплексу максимуму густини струму в межах області перетину i -го стрижня S_{ci} . Кутова координата його осі визначається виразом: $\delta_{ci} = \delta_1 + (i-1)\delta_k$, де δ_1 – кутова координата осі першого стрижня; $\delta_k = 2\pi/z_2$.

Комплекс струму ротора, зведеного до статора, \underline{I}'_r , визначено спираючись на усереднену величину часового комплексу струму стрижня ротора у координатах робочої гармоніки ($v=p$) за результатами польового аналізу:

$$\underline{I}'_r = \frac{1}{6W_s K_{ob}} e^{j\varepsilon p \delta_1} \sum_{i=1}^{z_2} \underline{I}_{ci} e^{j\varepsilon(i-1)p\delta_k}, \quad (2)$$

де K_{ob} – обмотковий коефіцієнт фазної обмотки статора за робочою гармонікою; $\varepsilon = \sin(\delta_{Bv} - \delta_{Av}) / \sin(\xi_A - \xi_B)$ – враховує напрям обертання магнітного поля; δ_{Bv}, δ_{Av} – кутове положення осей фаз статора в координатах гармоніки v ; ξ_A ; ξ_B – фази струмів статору.

Двовимірний польовий аналіз процесів у торцевих частинах ротора у поздовжній з його віссю площині, яка співпадає із серединою зубця, здійснюється із заданням у якості вихідних даних для польового розрахунку величини z -складової градієнту електричного потенціалу $\text{grad}\phi$, підбираючи таке його значення, щоб модуль повного розрахункового струму у кільці дорівнював модулю струму контуру ротора за результатами польового аналізу для кожної розрахункової точки за попереднім етапом. Це забезпечує узгодження польових розрахунків у ортогональних площинах і отримання ефекту квазітривимірності. Задання градієнту електричного потенціалу забезпечує аналіз із урахуванням перерозподілу струмів у короткозамикаючих кільцях з урахуванням ефекту їх витіснення до поверхні із збільшенням частоти, що особливо важливо для конструкцій АД із частотозалежними параметрами ротора при застосуванні масивних елементів магнітопроводу.

В результаті польового розрахунку визначаємо потужність електричних втрат ділянки кільця між двома стрижнями P_k , її активний опір (спираючись на визначену при польовому аналізі величину діючого значення комплексу повного струму ділянки кільця $\underline{I}_{yk} = 0.5\sqrt{2} \int_{S_k} \underline{J}_{mk} ds$), а також її індуктивність:

$$P_k = \frac{\pi(2R_r - b_k)}{z_2} \int_{S_k} \frac{J_{mk}^2}{2\gamma_{c2}} ds;$$

$$r_{yk} = P_k / \left((I_{yk}^R)^2 + (I_{yk}^I)^2 \right); \quad m_L = \frac{r_{yk} \text{tg}\varphi_k}{\omega_0 s}, \quad (3)$$

де S_k – площа ділянки кільця; J_{mk} – поточне розрахункове значення модуля часового комплексу максимуму густини повного струму кільця; $R_r = R - \delta$ – зовнішній радіус кільця; a_k, b_k – розміри короткозамикаючого кільця в аксіальному та радіальному напрямках; $I_{yk}^R = \text{Re}(\underline{I}_{yk})$, $I_{yk}^I = \text{Im}(\underline{I}_{yk})$ – дійсна та уявна частини комплексу повного струму ділянки кільця; $\text{tg}\varphi_k = |I_{yk}^I| / I_{yk}^R$ – тангенс кута відставання струму кільця ротора, порівняно із напругою у кільці, за результатами польового аналізу.

Еквівалентування квазітривимірної польової моделі здійснюється за отриманими виразами визначення параметрів заступної схеми із формуванням двовимірних залежностей їх зміни у функції струмів та ковзання. При цьому, завдяки еквівалентуванню польової моделі коловою із визначенням параметрів заступної схеми, забезпечується врахування скошу пазів ротора, лобових параметрів, немагнітних прошарків між листами магнітопроводів, неоднакової довжини магнітопроводів статора і ротора. Застосування нелінійних двовимірних параметрів заступної схеми, еквівалентних польовій моделі, забезпечує високу адекватність моделі і її високу швидкодію при аналізі статичних і динамічних режимів роботи і, що

особливо важливо, при розв'язанні задач проектування, пов'язаних із великою кількістю ітерацій.

Для розрахунку величини параметрів заступної схеми, з урахуванням рівнянь балансу потужностей фази статора і ротора і у результаті зведення параметрів до статора, враховуючи, що до контуру ротора входить дві ділянки кільця, отримано вирази:

$$r'_2 = \frac{P_{ec}}{3|I'_r|^2} \cdot \frac{l_2^2 + h_{sk}^2}{l_1 l_2 k_{cm}} + \frac{2z_2 P_k}{3|I'_r|^2}; \quad x_m = \frac{-P_{ec}}{3s I_s I_r^I}; \quad (4)$$

$$x'_2 = \frac{2z_2 P_k \operatorname{tg} \varphi_k}{3s|I'_r|^2} + x_m \left(\frac{1 - k_{sk}^2}{k_{sk}^2} - \frac{I_r^R I_s + |I'_r|^2}{|I'_r|^2} \cdot \frac{l_2^2 + h_{sk}^2}{l_1 l_2} \right)$$

де I_s – діюче значення часового комплексу струму фази статора; s – ковзання; l_2, h_{sk} – довжина магнітопроводу ротора та величина скосу його пазів; k_{sk} – коефіцієнт скосу пазів ротора.

Врахування впливу просторових гармонік МРС за результатами польового аналізу забезпечується розробленою технологією еквівалентування польової моделі коловою. При цьому враховується, що, як показано в [4], вагові частки гармоніки магнітного поля і МРС суттєво різняться. Тому, вагомість гармоніки обумовлюється результатами польового аналізу із визначенням еквівалентних параметрів колової моделі.

Врахування гармонік МРС є принципово важливим при аналізі пускових режимів АД, особливо при невеликому числі пазів на полюс і фазу обмотки статора. Це пов'язано із особливостями польового аналізу у площині, ортогональній до осі ротора. На цьому етапі для мінімізації часу розрахунку польовий аналіз проводиться із нерухомим ротором [5]. Для дослідження процесів із заданою величиною ковзання, частота зміни струмів статора задається відповідно до частоти ковзання. Врахування зміни взаємного положення зубців магнітопроводів статора і ротора здійснюється завдяки усередненню результатів кількох розрахунків [6] із поворотом осердя ротора на певний кут.

Умови нерухомості ротора і зміни струмів статора із частотою ковзання забезпечують потрібну частоту процесів у роторі лише за робочою гармонікою МРС. Для інших гармонік частоти при робочих ковзаннях повинні бути значно більшими, що вплине на величину відповідних електромагнітних параметрів. Крім того, при нерухомому роторі всі гармоніки МРС наводять у ньому струми однакової частоти і разом визначають величину втрат і, відповідно, параметрів за робочою гармонікою (1). Ці обставини обумовили потребу корекції алгоритмів попередніх етапів розрахунків.

Розроблені рівняння електричної рівноваги колової моделі [7] враховують наявність кількох просторових гармонік МРС. За результатами аналізу просторового розподілу МРС, обираються для подальшого урахування гармоніки із найбільшим

впливом на процеси у АД, який досліджується. Визначення електромагнітних параметрів за кожною із гармонік здійснюється відповідно до алгоритмів трьох перших етапів (1)–(4) із задаванням просторового розподілу струмів статора із кількістю полюсів даної гармоніки. При цьому, аналіз виконується із задаванням розподілу струмів за пазами, як для синусної обмотки, або із задаванням потрібної кількості полюсів синусоїдної хвилі струмів у повітряному проміжку. Вирази (1)–(4) забезпечують визначення параметрів ротора і взаємної індуктивності за полем кожної гармоніки і формування для них двовимірних нелінійних залежностей. За цими залежностями, за поточними значеннями ковзань і струмів ротора за гармоніками, при польовому аналізі із просторовим розподілом струмів обмотки статора, яка досліджується, визначаються значення параметрів взаємних індуктивностей. Їх величини враховуються при формуванні двовимірних залежностей індуктивного опору пазового та диференційного розсіювання статора:

$$x_{1\sigma 0} = \frac{\omega_0 \sqrt{2} \operatorname{Re}(\Psi_s)}{2I_s} - \sum_{v=v_1}^{v_N} x_{mv} \left[1 + \frac{z_2 f_{rv}}{3I_s f_{sv}} (I_{kvn}^R + I_{kvo}^R) \right]$$

де $\Psi_s = (\Psi_A + \Psi_B e^{j(\xi_A - \xi_B)} + \Psi_C e^{j(\xi_A - \xi_C)}) / 3$ – повне потокозчеплення фази статора, яке визначено за розрахунковою моделлю із серійною обмоткою статора, (1); x_{mv} – параметр за основним полем гармоніки v ; $I_r' = I_k z_2 f_{rp} / (3f_{sp})$; I_k – струм контуру ротора; $f_{sp} = 2K_{obv} W_s / v\pi$, $f_{rv} = 2k_{yrv} k_{skv} / v\pi$ – модулі одиничних МРС фаз статора і контуру ротора за гармонікою v ; k_{yrv} – коефіцієнт скорочення контуру ротора за гармонікою v ; I_{kvn}^R , I_{kvo}^R – дійсні частини комплексів струмів контурів ротора за гармонікою v із прямим та зворотнім напрямками обертання, визначаються подібно до (2):

$$I_{kvn}^R = \operatorname{Re} \left(\frac{e^{jv\delta_1}}{2z_2 k_{yrv}} \sum_{i=1}^{z_2} I_{ci} e^{j(i-1)v\delta_k} \right);$$

$$I_{kvo}^R = \operatorname{Re} \left(\frac{e^{-jv\delta_1}}{2z_2 k_{yrv}} \sum_{i=1}^{z_2} I_{ci} e^{-j(i-1)v\delta_k} \right).$$

Оцінка впливу врахування гармонік МРС на результати дослідження режимів роботи АД, які виконано за допомогою розробленої, еквівалентної до польової, моделі здійснена у порівнянні з каталоговими даними двигунів серії 4А. Завдяки доступній інформації про конструктивні і режимні параметри цих АД [8], таке порівняння дає можливість широкому колу дослідників реалізувати принцип повторюваності нових наукових результатів, що є необхідною умовою оцінки їх достовірності. Фактично, каталогові дані відповідають деякій усередненій серійній машині. Співставлення з ними результатів розрахунків забезпечує визначення ступеня адекватності математичної моделі АД на

прикладі дослідження саме такої усередненої серійної машини. Властивості реальних АД можуть відрізнятися від каталогових внаслідок варіації конструктивних параметрів, які повинні бути врахованими при математичному моделюванні для узгодження математичної моделі із конкретикою об'єкту, що досліджується.

Вплив врахування просторових гармонік МРС за розробленою моделлю на її адекватність видно з табл. 1 порівняння розрахункових даних АД 4А80А4У3 і 4А132М8У3 з каталоговими. При цьому, врахування втрат у сталі і міді, механічних та додаткових здійснено за [9] з урахуванням поточного розрахункового значення індукції повітряного проміжку.

Таблиця 1 – Порівняння розрахункових даних АД 4А80А4У3 і 4А132М8У3 з каталоговими

Параметри режиму		Характеристики АД 4А80А4У3/4А132М8У3		
		Дані за каталогом	Розрахунок	
			Абсолютне значення	Δ , %
Номінальний	Корисна потужність, Вт	$\frac{1100}{5500}$	$\frac{1094}{5514}$	$\frac{0.55}{0.25}$
	Струм статора, А	$\frac{2.74}{13.57}$	$\frac{2.766}{13.5}$	$\frac{0.95}{0.52}$
	ККД	$\frac{0.75}{0.83}$	$\frac{0.764}{0.85}$	$\frac{1.87}{2.41}$
	Коефіцієнт потужності	$\frac{0.81}{0.74}$	$\frac{0.784}{0.726}$	$\frac{3.2}{1.89}$
	ковзання, %	$\frac{0.054}{0.041}$	$\frac{0.054}{0.041}$	$\frac{=}{=}$
	момент, Нм	$\frac{7.4}{73.02}$	$\frac{7.36}{73.21}$	$\frac{0.54}{0.25}$
Пусковий	$v = v_p$	момент, Н·м	$\frac{14.8}{138.7}$	$\frac{15.02}{111}$
		струм, А	$\frac{13.7}{74.64}$	$\frac{13.76}{67.39}$
	$v = v_p \times (1,5,7)$	момент, Н·м	$\frac{14.8}{138.7}$	$\frac{14.69}{132}$
		струм, А	$\frac{13.7}{74.64}$	$\frac{13.77}{71.76}$

Врахування гармонік МРС практично не вплинуло на адекватність математичної моделі у номінальних режимах внаслідок демпфуючої дії струмів ротора при високих частотах. У пускових режимах цей вплив, як видно з табл. 1, залежить від типу обмотки. Для чотириполюсної обмотки, з великим числом пазів на полюс і фазу, врахування крім робочої гармоніки ще п'ятої та сьомої, не призвело до суттєвої зміни адекватності моделі. В той же час, у восьмиполюсної обмотки гармонічний склад МРС гірший і корегування моделі відповідно до нього дозволило зменшити похибку розрахунків пускових режимів у 3 ... 4 рази.

Висновки.

Розроблена математична модель, яка є еквівалентною до квазітривимірної польової моделі АД і забезпечує моделювання із точністю польових і

швидкодією колових методів, задовольняє потребам проектного синтезу АД із широким колом конструктивних новацій, а також при комплексному моделюванні разом із іншими складовими електромеханічної системи і з урахуванням особливостей робочих режимів.

Побудова еквівалентної квазітривимірної польової моделі проектування АД з великою часткою вищих просторових гармонік МРС, зокрема при малому числі пазів на полюс і фазу, повинна виконуватись із урахуванням цих гармонік, що може зменшувати похибку розрахунків пускових режимів у 3 ... 4 рази.

Список літератури

1. Бібік О.В. Энергоефективні режими електромеханічної системи насосної установки багатопверхового будинку / О.В.Бібік, О.М.Попович, С.П.Шевчук // Технічна електродинаміка. – 2016. – № 5. – С. 38-45.
2. Попович О.М. Визначення параметрів заступної схеми асинхронного двигуна та їх нелінійних залежностей за результатами польового аналізу / О.М.Попович, І.В.Головань // Праці ІЕД НАНУ. – 2012. – Вип. 31. – С. 38-48.
3. 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.
4. Мильх В. И. Гармонический анализ электромагнитных величин трехфазной обмотки статора турбогенератора на основе классических и численно-полевых методов / В. И. Мильх, Н. В. Полякова // Технічна електродинаміка. – 2013. – №3. – С. 40-49.
5. Васильковский Ю.М. Польовий аналіз електричних машин / Ю.М. Васильковский – К.: НТУУ “КПІ”, 2007. – 192 с.
6. Попович О.М. Визначення пазового розсіювання статора асинхронного двигуна з урахуванням насичення, зігзаг-розсіювання, взаємної індуктивності фаз / О.М.Попович, І.В.Головань // Електротехніка і електромеханіка. – 2011. – №3. – С. 40-42.
7. Попович О.М. Математична модель для дослідження режимів асинхронних машин електромеханотронних систем / О.М. Попович // Праці ІЕД НАНУ. – 2010. – Вип.25. – С.89-97.
8. А.Э. Кравчик. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
9. Радін В.И. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро / Радін В.И., Лондин Й., Розенкноп В.Д. и др.; Под ред. В.И. Радина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416 с.

References (transliterated)

1. Bibik O.V., Popovych O.M., Shevchuk S.P. Yenergoefektivni rezhimi yelektromekhanichnoi sistemi nasosnoi ustanovki bagatopoverkhovogo budinku. [Energy efficient modes electromechanical system pumping unit multistorey building] *Tekhnichna Elektrodinamika*. 2016, no. 5, pp. 38-45.
2. Popovych O.M., Holovan I.V. Vyznachennya parametriv zastupnoyi skhemy asynkronnoho dyvuhuna ta yikh nelineynykh zalezhnostey za rezul'tatamy pol'ovoho analizu [Defining equivalent circuit of the induction motor and its nonlinear dependence on the results of field analysis]. *Pratsi IED NANU*. 2012, Vol. 31. P. 38-48.
3. Popovych O.M., Holovan I.V. Utochnennya analizu rezhymiv roboty asynkronnykh dyvuhuniv u skladi elektromekhanotronnykh system ekvivalentuvannya yikh pol'ovykh modeley kolovymy [Clarifying analysis modes of asynchronous motors consisting of electromechanotronic equivalent field models of circular]. *Tekhnichna Elektrodinamika*. 2014, no. 5, pp. 113-115.
4. Milykh V. I., Polyakova N. V. Garmonicheskii analiz elektromagnitnykh velichin trekhfaznoy obmotki statora turbogeneratora na osnove klassicheskikh i chislennopolevykh metodov [Harmonic analysis of electromagnetic quantities of a three-phase winding of a stator of a turbogenerator on the basis of classical and numerical-field methods]. *Tekhnichna Elektrodinamika*. 2013, no. 3, pp. 40-49.

5. Vaskovskyy Y.M. *Pol'ovyy analiz elektrychnykh mashyn* [Field analysis of electric machines]. Kiev, "KPI", 2007, 192 p.
6. Popovich O. M., Golovan I. V. Vy'znachennya pazovogo ozsiyuvannya statora asynkronnogo dvy'guna z uraxuvannyam nasichennya, zigzag-rozsiyuvannya, vzayemnoyi indukty'vnosti faz [Determining of stator slot leakage taking into account the saturation, zigzag leakage, mutual inductance of phases]. *Electrotekhnika i Electromekhanika*. 2011, no. 3, pp. 40-42.
7. Popovych O.M. Matematychna model' dlya doslidzhennya rezhymiv asynkronnykh mashyn elektromekhanotronnykh system [Mathematical model for the study of asynchronous machines elektromekhanotronnykh systems] *Pratsi IED NANU*. 2010, Vol. 25, pp. 89-97.
8. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I. *Asinkhronnyye dvigateli serii 4A: Spravochnik* [Asynchronous motors of 4A series: Reference book], Moscow, Energoizdat Publ, 1982, 504 p.
9. Radin V.I., Londin J., Rozenknop V.D. *Unifitsirovannaya seriya asinkhronnykh dvigateley Interelektro* [Unified series of induction motors Interelektro]. Moscow, Energoatomizdat Publ, 1990, 416p.

Надійшла (received) 04.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Врахування просторової несинусоїдності магніторушільних 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. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2409-9295.

Учет пространственной несинусоидальности магнитодвижущих сил при проектировании асинхронных двигателей с применением эквивалентной квазитрехмерной полевой модели / А. Н. Попович, И. В. Головань // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 1 (1223). – С. 140–144. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2409-9295.

Considering spatial nonsine mahnitorushilnyh forces in projecting induction motor by equivalent quasi-three-dimensional field model / O.M. Popovych, I.V. Golovan // Bulletin of NTU "KhPI". Series: "Electric machines and electromechanical energy conversion." – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 1 (1223). – P. 140–144. – Bibliogr.: 9. – 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 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.

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.