



РОЗРОБКА СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ОБМОТКИ СТАТОРА

Розроблено та апробовано математичні і програмні засоби дослідження і проектування системи діагностування пошкодження обмотки статора для забезпечення моделювання аварійних і передаварійних режимів із довільною зміною структури обмотки і розрахунку робочих характеристик. За результатами виконаного фізичного моделювання при ушкодженнях обмотки статора проведено тестування математичних засобів.

Ключові слова: діагностування, математична модель, фізичний експеримент, ушкодження, обмотка статора

Важливою умовою надійної роботи електростанцій є безперерйна робота електромеханічного обладнання, зокрема електричних машин змінного струму, як турбогенераторів, так і асинхронних двигунів (АД) власних потреб. В переважній більшості ці машини давно знаходяться в експлуатації і потребують частішої перевірки технічного стану для своєчасного виявлення дефектів, технічного обслуговування і ремонту. Це дозволяє зменшити аварійність та забезпечити безперерйну роботу підприємства.

Для швидкого і своєчасного отримання діагностичної інформації, у тому числі у оперативному режимі без припинення роботи обладнання, застосовують системи діагностики, які за допомогою сукупності датчиків отримують дані про стан діагностичних параметрів, обробляють їх і формують діагноз технічного стану для прогнозу допустимого терміну роботи обладнання.

Важливою задачею проектування системи діагностування є ув'язка даних про відхилення діагностичних параметрів (від нормованих) із технічним станом конкретних деталей і вузлів машини. За ступеню зміни технічного стану треба визначати ступінь зміни величини електромагнітних параметрів машини і розраховувати характеристики робочого режиму, за якими можна робити висновки про доцільність подальшої експлуатації обладнання.

У даній роботі побудована математична модель електричної машини змінного струму із пошкодженнями обмотки статора, розроблена її програмна реалізація для дослідження аварійних і передаварійних режимів роботи із розрахунком характеристик робочого режиму. Дане дослідження передбачає тестування результатів математичного моделювання шляхом порівняння із даними фізичного експерименту, який, на першому етапі, проводиться на базі чотирьохшвидкісного асинхронного двигуна. Для цього випадку побудовано математичну модель діагностування.

Крім загальних вимог до математичних моделей АД, модель діагностування повинна враховувати зміну структури і схеми з'єднання котушок обмотки внаслідок міжкотушкових та міжвиткових замикань, а також несиметрію параметрів. Основним з даних вимог задовольняє математична модель АД електромеханотронної системи (ЕМТС) для дослідження у середовищі імітаційного моделювання [1]. Розв'язання задач діагностування за допомогою моделі АД у складі електромеханічної системи (ЕМС) забезпечує відпрацьовування системи діагностування для роботи в умовах реальної експлуатації з урахуванням особливостей робочих режимів, які мають місце внаслідок наявності перетворювальних приладів у зовнішньому електричному колі і специфіки технологічного циклу робочого механізму АД.

Математична модель АД ЕМТС [1] ґрунтується на системі рівнянь електричної рівноваги АД з довільною структурою обмотки статора і короткозамкненим ротором у динамічних режимах роботи. Рівняння не мають періодичних коефіцієнтів, що залежать від кута повороту ротора завдяки тому, що магнітні зв'язки між контурами в рівняннях електричної рівноваги визначено за кожною гармонікою МРС за просторовими комплексами у комплексній площині, яка суміщена з площиною перпендикулярною осі двигуна. Рівняння записано відносно струмів гілки обмотки статора і проєкцій сумарних просторових комплексів струмів короткозамкнених контурів ротора за гармоніками МРС. Це враховує довільну структуру схеми з'єднання гілки обмотки статора, несиметрію і несинусоїдність процесів. Довільність структури виток обмотки статора враховується задаванням у якості вихідної інформації номерів пазів статора у яких розміщено сторони секцій даної гілки з позначенням напрямку обходу та кількості витків. Нумерація пазів – проти годинникової стрілки. При моделюванні враховується власна та взаємна індуктивності фаз статора за шляхами потоку розсіювання. Мінімальний вплив взаємної індуктивності фаз



за шляхами розсіювання на величину індуктивно-го опору розсіювання властивий одношаровим обмоткам (величина співвідношення власної і взаємної індуктивностей розсіювання фаз $k_{lm} \approx 10$), для двошарових збільшується (до $k_{lm} \approx 2,5$), а максимальний – для синусних обмоток ($k_{lm} \approx 2$).

Вирази для визначення величини параметрів рівнянь електричної рівноваги АД ЕМТС відносно гілок обмотки статора визначено спираючись на геометричні розміри магнітопроводів і величини одиничних МРС електричних контурів, які враховують розподіл провідників секцій гілок за пазами, спектр просторових гармонік МРС. Вирази для визначення модулів цих одиничних МРС гілки обмотки статора і та контуру ротора за гармонікою мають вигляд:

$$\bar{f}_{sv} = f_{sv} e^{j\delta_{sv}} = k_{onsv} \sum_{c=1}^{2K_{ci}} \frac{n_c W_c}{|n_c| \nu \pi} e^{j(\nu|n_c|\delta_s + \pi/2)},$$

$$f_{rv} = \frac{2}{\nu \pi} k_{yrv} k_{onrv} k_{skv}, \quad (1)$$

де n_c – номер паза статора в якому розміщується сторона секції. Якщо номер із знаком плюс – напрямком обходу сторони секції співпадає з обраним позитивним напрямком, якщо мінус – напрямком

протилегний; W_c – кількість гілок секції; $\delta_s = 2\pi/z_1$ – кут між осями зубців статора в координатах першої гармоніки; K_b – кількість секцій (катушок) з яких складається гілка i ; k_{onsv} , k_{onrv} , k_{yrv} , k_{skv} – коефіцієнти за гармонікою ν : відкриття пазів статора та ротора [2], скорочення та скосу контуру ротора.

Програмна реалізація математичної моделі діагностування АД здійснена для системи імітаційного моделювання (наприклад, MATLAB-Simulink), яка є ефективним сучасним засобом моделювання складних електромеханічних систем. Існуючі стандартні блоки не забезпечують потрібної адекватності математичних моделей АД при дослідженні їх в разі змін структури і схеми обмотки статора внаслідок пошкоджень. Розроблена математична модель для оформлення у вигляді блока підсистеми структурного моделювання Simulink і ув'язки його з блоками імітаційного моделювання трансформована до матричної форми із розв'язком рівнянь відносно похідної за часом.

Враховання особливостей схеми з'єднання гілок обмотки статора потрібно при відсутності інформації про величину напруги, яка безпосередньо прикладена до гілки і при можливості

визначення деяких струмів (залежні $[i_{s3}]$) через інші (незалежні $[i_{SH}]$) за першим законом Кірхгофа. Система рівнянь електричної рівноваги перетворена до виду відносно незалежних змінних при зменшенні до їх кількості порядку системи із використанням матриці визначення відомих напруг мережі $[u_c]$ через напруги гілок за другим законом Кірхгофа $[k_u]$:

$$[u_c] = [k_u] [u_s]. \quad (2)$$

Для отримання відповідності між кількістю рівнянь, змінних, а також для зв'язку між блоками імітаційного та структурного моделювання використано матрицю перетворення незалежних струмів в струми гілок $[k_{inv}]$:

$$[i_s] = [k_{inv}] [i_{SH}]. \quad (3)$$

Приклад програмної реалізації математичної моделі неушкодженого АД А62-12/8/6/4, для схеми з'єднання гілок обмотки статора "подвійна зірка" при $2p = 4$, наведено на Рис. 1. Математична мо-

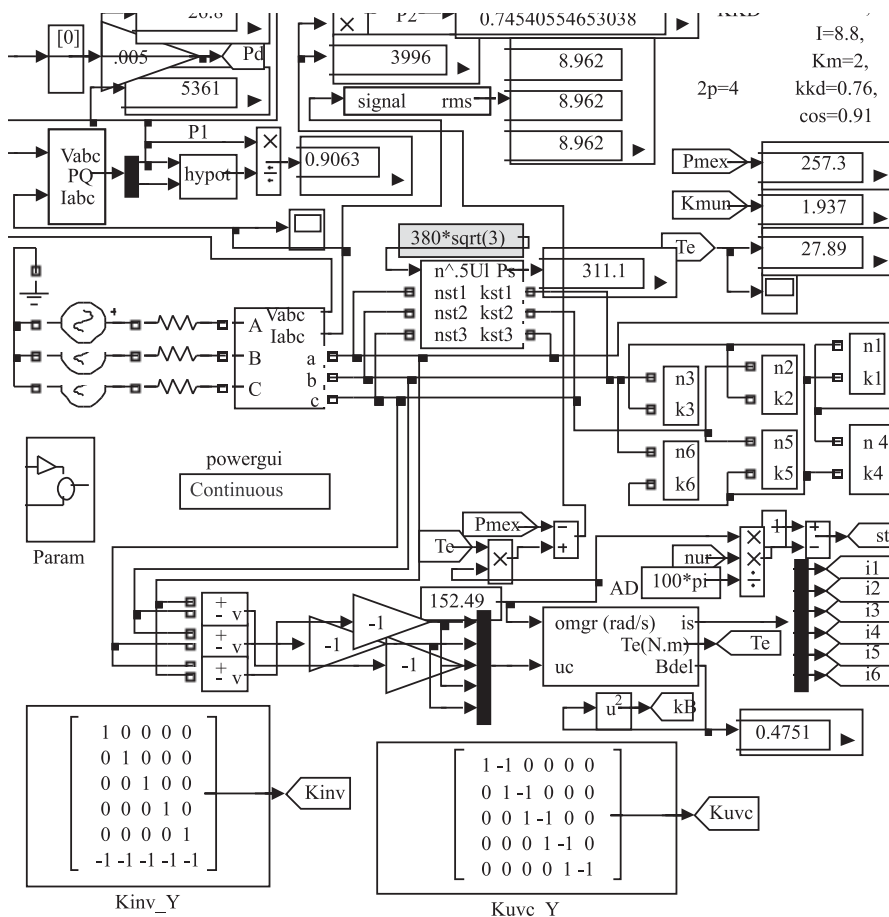


Рис. 1. Математична модель діагностування.



дель реалізована у системі імітаційного моделювання MATLAB (бібліотека SimPowerSystems). Вона складається з стандартних блоків джерел живлення та вимірювачів. Структурна математична модель АД [1], яка реалізує рівняння електричної рівноваги, представлена блоком АД. Зв'язок між нею та імітаційними моделями інших складових системи здійснюється із використанням шести блоків "Controlled Current Source" із реалізацією схеми з'єднання "подвійна зірка", у імітаційній моделі представляють гілки обмотки АД з позначенням їх початків та кінців. Обмотка статора має шість гілок, кількість незалежних струмів – п'ять. Матриці включення за законами Кирхгофа (2), (3) представлено на Рис. 1. Математична модель АД за величинами напруги і частоти джерела живлення, а також частоти обертання дозволяє визначити величини електромагнітного моменту, корисної потужності і втрат АД. За результатами розрахунку режиму роботи АД визначається величина індукції у повітряному проміжку, яка є вихідною величиною для визначення коефіцієнта насичення магнітного кола за основним полем, відповідних індуктивних параметрів АД і втрат у сталі. Дві–три ітерації у ручному режимі повторного розрахунку дозволяють визначити сталі значення індукції, що, враховуючи швидкодію моделі, не створює практичних складнощів.

Для врахування втрат у сталі при моделюванні режиму роботи паралельно АД до його вхідних клем приєднана система опорів [3], 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 – максимум індукції в магнітопроводі, який визначається при розрахунку магнітного кола за величиною сумарної МРС машини у даному режимі.

Потужність додаткових

втрат у АД прийнята як 0,5 % від номінальної спожитої потужності із коригуванням пропорційно співвідношенню квадратів струму досліджуваного режиму і номінального струму. Механічні втрати визначено з урахуванням впливу зміни частоти обертання ротора і моменту навантаження за трьома складовими: тертям у підшипниках, втратами у вентиляційному вузлі зовнішнього обдуву та аеродинамічними втратами всередині машини [3].

Достовірність результатів математичного моделювання за розробленою моделлю АД обумовлюється точністю визначення величини електромагнітних параметрів АД і адекватністю математичної моделі стосовно врахування особливостей робочих режимів у даних двигунах. Ці особливості пов'язані із складною структурою обмотки статора, збільшеними проявами вищих гармонічних складових, несиметрії та динамічними режимами.

Перевірку адекватності математичної моделі визначення величини електромагнітних параметрів АД в умовах варіювання ковзанням АД у широких межах здійснено співставлення результатів моделювання номінальних режимів двигуна А62-12/8/6/4 із даними каталогу [4]. Результати порівняння зведено до Табл. 1.

Досліджено чотири варіанти з'єднання гілок обмотки статора, відповідно до кількості варіантів пар полюсів обмотки. Для полюсності $2p = 4$, $2p = 6$ використовується схема з'єднання "подвійна зірка", а для $2p = 8$, $2p = 12$ – схема

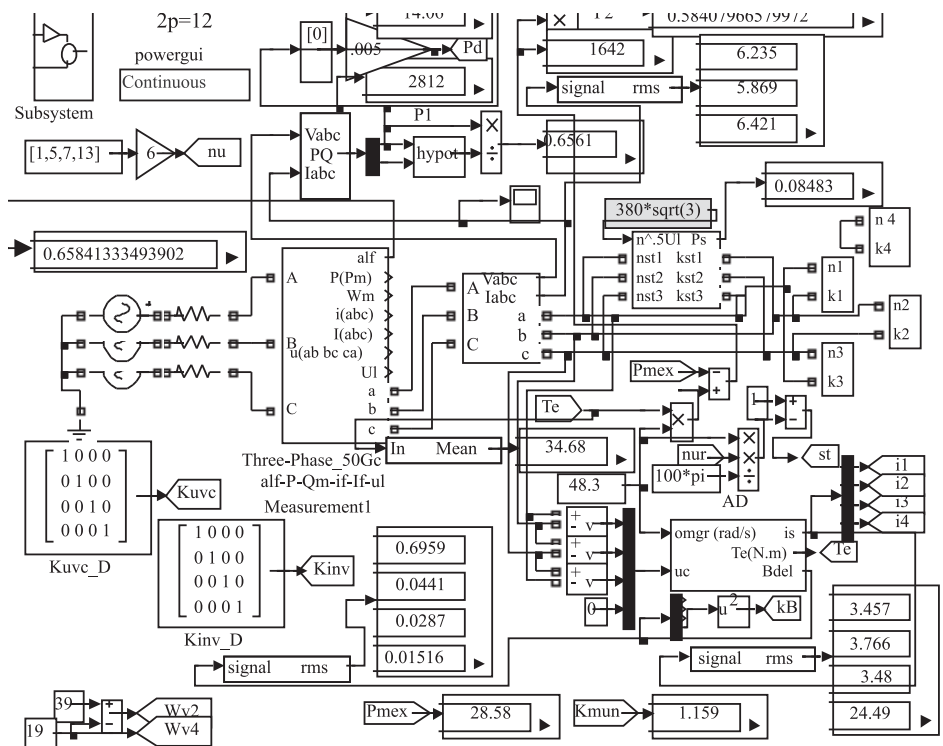


Рис. 2. Імітаційна математична модель АД із пошкодженнями обмотки статора



Таблиця 1. Характеристики АД А62-12/8/6/4

Параметри номінального режиму	Позначення, розмірність	Дані за каталогом				Розрахунок з врахуванням втрат у сталі, механічних та додаткових. Параметри за зміни k_{μ}			
		$2p=4$	$2p=6$	$2p=8$	$2p=12$	Абсолютне значення Δ , %			
Корисна потужність	P_{2H} , Вт	4000	3200	2400	1700	<u>3937</u> 1.58	<u>3158</u> 0.93	<u>2413</u> 0.54	<u>1686</u> 0.82
Струм статора	I_{1H} , А	8.8	7.2	7	6.2	<u>8.92</u> 1.36	<u>7.18</u> 0.28	<u>6.86</u> 2.0	<u>6.08</u> 1.94
ККД	η_H	0.76	0.745	0.71	0.63	<u>0.733</u> 3.42	<u>0.74</u> 0.67	<u>0.704</u> 0.85	<u>0.648</u> 2.86
Коефіцієнт потужності	$\cos \phi_H$	0.91	0.9	0.74	0.66	<u>0.912</u> 0.44	<u>0.903</u> 1	<u>0.757</u> 2.7	<u>0.648</u> 1.06
Частота обертання	ω_r , c^{-1}	147.7	95.29	73.83	48.17	147.7	95.29	73.83	48.17

"трикутник". Вихідні дані для моделювання відповідають [4]. Результати моделювання наведено у абсолютних значеннях і як відсоток відхилення від даних каталогу. Видно, що точність моделювання достатня для розв'язання задач діагностування і не має необхідності у використанні уточнених алгоритмів визначення параметрів заступної схеми за результатами польового аналізу [5].

Математичне моделювання аварійних режимів із пошкодженнями обмотки статора. Розроблені математичні і програмні засоби забезпечують моделювання режимів АД із довільною зміною структури обмотки статора: виникнення короткозамкнених контурів внаслідок замикань

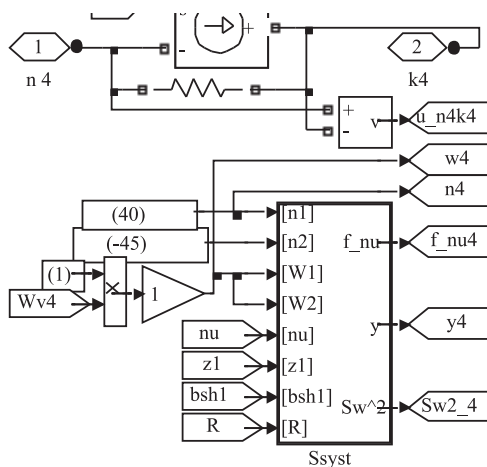


Рис. 3. Імітаційний блок короткозамкнених секцій.

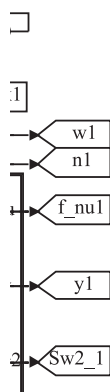


Рис. 4. Імітаційний блок неушкодженої першої гілки.

всередині секцій або між ними, гілкової несиметрії за гілками обмотки, обривів проводу та ін. На Рис. 2 наведено приклад імітаційної моделі із розробленими блоками для дослідження процесів у АД А62-12/8/6/4

при $2p = 12$ у випадку короткого замикання у секції фази 2. Для даного двигуна, при дванадцятиполюсній схемі, гілки обмотки з'єднані за схемою "трикутник". Це відображено на імітаційній моделі відповідною комутацією блоків виводів гілок обмотки з номерами 1, 2, 3. Така ж схема відповідає і неушкодженому АД. При закорочуванні частини гілок секції утворюється четверта гілка обмотки (імітується четвертим блоком вивідних кінців на імітаційній моделі Рис. 2), а кількість витків другої гілки зменшується.

Блоки вивідних кінців гілок наведено на: Рис. 3 – короткозамкнені гілки секції, які утворюють четверту гілку; Рис. 4 – неушкоджена перша фаза; Рис. 5 – ушкоджена друга гілка. На даних рисунках зображено стандартні блоки керованих джерел струмів "Controlled Current Source" бібліотеки SimPowerSystems системи MATLAB для інтегрування структурної моделі АД до імітаційної моделі системи. Також зображено розроблені блоки структурних підпрограм визначення параметрів гілок: MPC, кроку. Вихідною інформацією до них, зокрема, є матриці номерів та кількості витків перших та других сторін секції – матриці $[n1]$, $[W1]$ та $[n2]$, $[W2]$ відповідно.

Як видно з Рис. 3 – 5, перші три гілки складаються з 18 секцій. Секції неушкоджених першої та третьої гілки обмотки статора (фази А, С) мають по 39 витків. Секція другої гілки, яка знаходиться у пазах з номерами 40 та 45, має кількість витків $Wv2$, що менше, ніж 39 на величину витків $Wv4$, які утворили четвертий короткозамкнену гілку. На дисплеях Рис. 2 наведено результати розрахунку робочого режиму пошкодженого АД з номінальною швидкістю ротора. Струми гілок становлять 3.46, 6.77, 3.48, 24.49 А, струми мережі – 6.235, 5.869, 6.421 А. Для неушкодженого АД відповідно до Табл. 1 номінальний струм становить 6.08 А. Внаслідок несиметрії режиму, що досліджується миттєві значення коефіцієнтів корисної дії та потужності змінюються протягом періоду і потребують відповідного усереднення.



Для цього, послідовно із стандартним блоком вимірювання, встановлено додатковий блок із визначенням коефіцієнта потужності системи в умовах несинусоїдності, несиметрії та динамічних режимів роботи [6].

Експериментальні дослідження проводились на фізичному стенді, створеному на базі АД типу А62-12/8/6/4 з паспортними даними: $P_n = 1,7$ кВт; $f = 50$ Гц; $U_H = 380$ В; $2p = 12$; $I_n = 6,2$ А; $\eta = 63\%$, $n = 460$ об/хв; $\cos\phi = 0,66$; $M_n = 35$ Н*м; $m = 3$.

В якості навантаження електродвигуна застосовувалося механічне гальмо прикріплене на валу двигуна. Величина статичного моменту визначалася за допомогою динамометра. Щоб уникнути додаткових похибок у процесі роботи, динамометром контролювався статичний момент. Це пов'язано з тим, що при нагріванні муфти гальма відбувається температурне розширення матеріалів, що призводить до зміни статичного моменту. При необхідності вносилися відповідні корективи.

Виткові замикання обмотки статора АД здійснювались в лобових частинах. При цьому вимірювались і розраховувались такі величини: U_z – напруга в замкненій частині фази обмотки, n_z – кількість замкнених витків.

За допомогою комп'ютера і цифрового осцилографа вимірювались миттєві значення струмів і напруг в обмотці статора та магнітна індукція в повітряному проміжку машини. Вимірювались діючі значення напруг, струмів, та швидкість обертання ротора. АД досліджувались при відсутніх дефектах та із замиканнями обмотки статора. Кількість замкнених витків обмотки визначалась в режимі неробочого ходу за напругою U_z , яку вимірювали між відпайками для імітації короткого замикання у лобовій частині. Для $U_n = 380$ В величина U_z становила 10,2 В, що відповідає 19 виткам.

При проведенні фізичного експерименту значення фазних напруг несуттєво змінювались при зміні навантажень. На Рис. 6, 7 зображено експериментальні залежності струмів в фазах від навантаження на валу для умовно бездефектного АД та для АД з витковими замиканнями обмотки статора. Крім того, зображено розрахункові криві за моделями Рис. 1 та Рис. 2 для двох значень короткозамкнених гілок.

Експериментальні криві для фазних струмів (Рис. 7) підтверджують той факт, що при випробуванні АД з дефектною обмоткою статора мали місце виткові замикання у фазі обмотки статора. Співставлення даних фізичного і математичного моделювання підтверджують, що замикання відбулись у фазі В. При однаковій кількості замкнутих

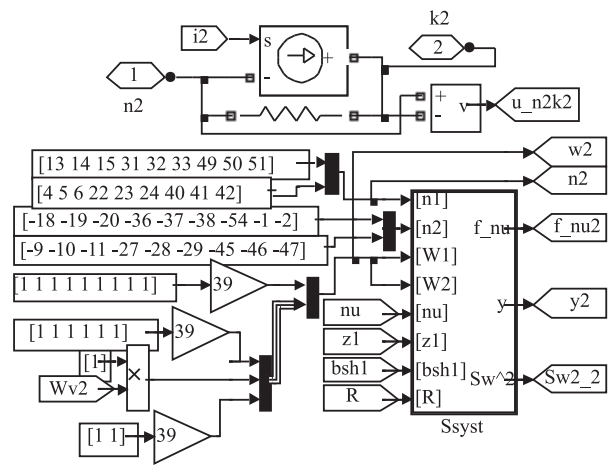


Рис. 5. Імітаційний блок uszkodженої другої гілки.

витків (кількість витків четвертої закороченої гілки $Wv4=19$) кореляція розрахункових і експериментальних результатів відповідає дійсності, особливо у області номінальних режимів. При відхиленні від них розбіжності зростають. Це пояснюється застосуванням при математичному моделюванні методики визначення параметрів заступної схеми АД для номінальних режимів. За потреби уточненого розрахунку слід застосовувати нелінійні параметри заступної схеми за результатами польового аналізу [5]. Моделювання із зміною кількості замкнутих витків ($Wv4=32$) забезпечує порівняльне дослідження отриманих при

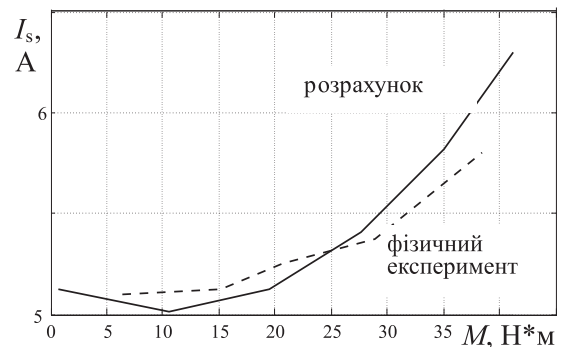


Рис. 6. Залежність струму в фазах від навантаження на валу при умові – "двигун без дефектів".

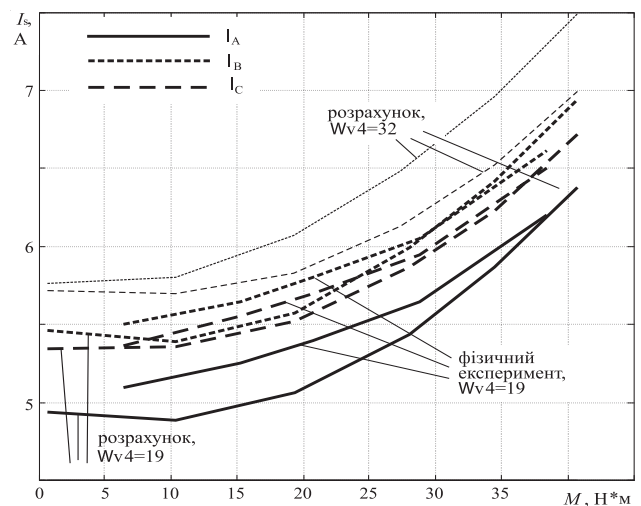


Рис. 7. Залежність струму в фазах від навантаження на валу при умові – "виткове замикання обмотки статора"



цьому струмових характеристик і їх використання у якості діагностичних ознак технічного стану обмотки статора, що здійснюється за результатами розрахунку робочих характеристик пошкодженого АД (модель, Рис. 2).

Висновки. Розроблені математичні і програмні засоби дослідження системи діагностування пошкоджень обмотки статора забезпечують моделювання аварійних і передаварійних режимів та розрахунок робочих характеристик за довільної зміни структури обмотки статора. Порівняльний аналіз результатів математичного і фізичного моделювання показав їх добру кореляцію, що забезпечує розв'язання задач проектування системи діагностування обмотки статора та формування системи діагностичних ознак відповідно до характеру пошкоджень цієї обмотки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Попович О.М. Математична модель асинхронної машини електромеханотронної системи для імітаційного та структурного моделювання / О.М. Попович // Техн. електродинаміка. — 2010. — № 4. — С.25–32.
2. Унифицированная серия асинхронных двигателей Интерэлектро / [Радин В.И., Лондин Й., Розенкноп В.Д. и др.]; Под ред. В.И. Радина. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 416с.
3. 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.
4. Цибулевский П.И. Обмоточные данные асинхронных двигателей /Цибулевский П.И. —М.—Л.: Энергия, 1966. — 368 с.
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. Попович О.М. Визначення та дослідження коефіцієнту потужності електромеханотронних систем з асинхронними двигунами / О.М.Попович // Техн. електродинаміка. — 2014. — № 4. — С. 111–113.

© Попович О.М., Гуторова М.С., 2017

