
ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)

УДК 629.1:621.3.045

КОМПЛЕКСНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОШКОДЖЕНЬ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Канд. техн. наук О. В. Губаревич

A COMPREHENSIVE STUDY OF THE INFLUENCE OF DAMAGES OF THE STATOR WINDING OF ASYNCHRONOUS MOTORS DURING OPERATION OF VEHICLES

PhD (Tech.) O. Gubarevych

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.202.2022.273633>



***Анотація.** Ефективність забезпечення транспортних перевезень пов'язана з підвищенням надійності роботи транспортної інфраструктури. Для забезпечення надійної та економічної роботи необхідний розвиток систем функціональної діагностики основних елементів транспортних засобів, що гарантують безперервний контроль технічного стану основних його елементів. Контроль стану асинхронних електродвигунів у складі електроприводів транспортних засобів є важливим сучасним питанням, від вирішення якого залежить надійність роботи всієї транспортної інфраструктури. Найпоширенішим видом пошкодження у двигунах у період експлуатації є міжвиткові замикання у фазі обмотки статора. Міжвиткові замикання складні для виявлення, але за їхньої наявності двигун продовжує працювати з зміною його робочих та електродинамічних показників і характеристик. У статті проведено дослідження впливу міжвиткового замикання різного ступеня на механічні, електричні та енергетичні показники і характеристики двигуна при різних режимах його роботи. При проведенні досліджень використано математичну модель асинхронного двигуна.*

На основі отриманих даних рекомендовано вибір найбільш ефективного струмового методу діагностики міжвиткових замикань при оцінюванні технічного стану та прогнозування безвідмовного періоду роботи асинхронного електродвигуна для використання у складі вбудованих діагностичних систем транспортних засобів.

***Ключові слова:** транспортні технології, асинхронні двигуни, міжвиткові замикання, технічна діагностика, математичне моделювання.*

***Abstract.** The efficiency of providing transportation is related to increasing the reliability of the transportation infrastructure. To ensure reliable and economical operation, it is necessary to develop systems of functional diagnostics of the main elements of vehicles, which provide continuous control of the technical condition of its main elements. Monitoring the state of asynchronous electric motors as part of electric drives of vehicles is an important modern issue, the solution of which depends on the reliability of the entire transport infrastructure. The most common type of damage in motors during operation is an inter-turn short circuit in the stator winding phase. Turn-to-turn closures are difficult to detect, but if they are present, the engine continues to operate with a change in its operating and electrodynamic indicators and characteristics. However, depending on the degree of turn-to-turn closures (the number of closed turns) in the winding phase, the probability and time of an emergency stop of the electric drive increase.*

In this paper, the influence of turn-to-turn closures of varying degrees on mechanical, electrical and energy parameters and engine characteristics under various operating modes has been studied. In the course of the research, a mathematical model of an induction motor was used with the established adequacy of the simulation results and the possibility of creating an asymmetric rotating stator field. The adopted simulation model of an induction motor with a squirrel-cage rotor is written in retarded coordinates.

Also, studies were carried out on the effect of turn-to-turn closures on the ripple coefficient of the electromagnetic torque and the unbalance coefficient of the stator phase currents.

Based on the data obtained, recommendations are given on choosing the most effective method of electric current for diagnosing interturn faults in assessing the technical condition and predicting the failure-free operation of an asynchronous electric motor for use as part of an electric motor under construction. - in diagnostic systems of cars.

Keywords: *transport technologies, induction motors, turn-to-turn closures, technical diagnostics, mathematical modeling.*

Вступ. В умовах пошуку шляхів зниження витрат на виробництво, доставку та реалізацію товарів усе більш актуальними стають питання з транспортної логістики, спрямовані переважно на ефективне вирішення транспортних завдань. Ефективність забезпечення транспортних перевезень пов'язана з підвищенням надійності роботи транспортної інфраструктури. Для забезпечення надійної та економічної роботи необхідний розвиток систем функціональної діагностики основних елементів транспортних засобів, що забезпечують безперервний контроль технічного стану основних його елементів.

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором є найбільш застосовуваним типом електричних машин у приводах транспортних засобів, що найбільше впливають на роботу транспорту і мають достатній рівень аварійних відмов. На електродвигуни в сучасних транспортних системах і механізмах може діяти комплекс цілого ряду специфічних факторів: різко змінний характер робочих навантажень, вібромеханічні навантаження, у тому числі і від робочих механізмів, підвищені і низькі температури, підвищена вологість та ін. Враховуючи зростаючу відповідність функцій, що виконують електроприводи в транспортних системах, підвищення вимог до якості та точності

завдань, виконуваних електродвигунами, і особливості умов їхньої експлуатації в сучасних транспортних засобах, особливого значення набуває контроль та утримання їхнього справного технічного стану [1-3]. Як свідчить експлуатаційна усереднена статистика ремонтних підприємств, відмови по вузлах асинхронних електродвигунів із короткозамкненим ротором поділяються так: відмови обмотки статора – 77,4 %; відмови ротора – 8,4 %; відмови підшипникових вузлів – 14,2 % [4, 5]. Значна частка (43,4 %) відмов обмотки статора припадає на міжвиткові замикання у фазі обмотки двигуна. Міжвиткові замикання є складним для виявлення пошкодженням двигуна, при якому він продовжує працювати зі зміною його робочих та електродинамічних показників і характеристик [6]. Однак залежно від ступеня міжвиткового замкнення (кількості замкнених витків) у фазі обмотки час безаварійної роботи двигуна буде різним [6, 7].

Аналіз останніх досліджень і постановка проблеми. Міжвиткові замкнення у фазі обмотки статора асинхронних двигунів є найбільш поширеним видом дефектів і причиною відмов електричних машин. Завчасне визначення наявності таких дефектів під час роботи – це важливий фактор надійної роботи двигунів, подовження їхнього

ресурсу та запобігання зупинці аварійного характеру. Крім того, точне встановлення ступеня міжвиткового замкнення дозволяє прогнозувати час безвідмовної роботи обладнання, що також є важливим сучасним питанням при експлуатації електромеханічного устаткування [8].

Проблемі діагностування та виявлення міжвиткових замикань приділяється велика увага з боку вчених і спеціалістів-дослідників. Так, у роботі [9] подано методи, засновані на передових технологіях обробки сигналів з оцінювання спектральної щільності потужності, і частотно-часові для виявлення міжвиткових коротких замикань у статорі асинхронних машин. Автори в роботах [10, 11] для виявлення міжвиткових замикань розглядають методологію моніторингу стану двигуна, засновану на тепловому аналізі. У роботах [12-14] методам аналізу вібрації приділяється особлива увага як широко використовуваним методам через можливість виявлення високої ймовірності відмов. У цих роботах подано розроблення моделей з класифікуючим алгоритмом для отримання показань вібрації від електродвигунів і визначення того, чи має машина несправну поведінку, і якщо так, то яка саме несправність. Однак, щоб алгоритм міг визначити тип відмови, для моделей необхідно розробити набір даних із показниками кількох двигунів у різних умовах відмови. Це не зовсім зручно для використання в умовах експлуатації.

Враховуючи, що електродвигуни за наявності міжвиткового замикання продовжують експлуатуватися, проведення досліджень з впливу та прояву міжвиткового замкнення різного ступеня на робочі та електродинамічні характеристики і показники двигуна є актуальним завданням.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є проведення досліджень з впливу міжвиткових замикань на характеристики асинхронного електродвигуна, що експлуатується, із

використанням імітаційного моделювання та пропозиції щодо визначення діагностичних проявів пошкоджень обмотки статора методами функціональної діагностики.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- вибрати математичну модель асинхронного двигуна зі встановленим рівнем адекватності, здатну реалізовувати різний ступень замкнення витків в обмотці статора;

- провести дослідження впливу ступеня міжвиткового замкнення на одній з обмоток статора двигуна з використанням математичної моделі;

- провести аналіз для досліджених параметрів і характеристик про вплив ступеня міжвиткового замикання на динаміку їхньої зміни;

- визначити напрям розвитку методів функціональної діагностики транспортного обладнання для виявлення міжвиткового замкнення при створенні вбудованої діагностичної системи.

Основна частина дослідження.

Природою міжвиткового замкнення є пробій твердого діелектрика внаслідок порушення електричної міцності та втрачання своїх ізоляційних властивостей ізоляції обмотки двигуна [5]. Міжвитковим замкненням в електричній машині вважається коротке замикання між різними витками однієї котушки або секції обмотки двигуна. До найпоширенішої причини виникнення цього пошкодження при експлуатації транспортного обладнання належить тривале перевантаження двигуна, що може виникнути через нештатний режим експлуатації обладнання, яке приводиться в дію цим двигуном, або при виході з ладу механічних деталей, наприклад заклинювання підшипника, несправності в редукторі або іншому механізмі. У результаті цього по обмотках протікає підвищений струм, що призводить до перегріву проводів і руйнування ізоляції в пошкоджених раніше місцях. Внаслідок цього відбувається коротке замикання між

витками обмотки. Крім експлуатаційних, ще існують технологічні причини пробою ізоляції внаслідок порушення технологічного процесу виготовлення обмотки або при її укладанні в пази при виробленні або ремонті двигуна [5]. Підвищена вологість обмотки при порушенні ступеня захисту від впливу

навколишнього середовища двигуна в період його експлуатації або зберігання також сприяє міжвитковому замиканню в обмотці фази двигуна.

Для проведення досліджень обрано асинхронний двигун з короткозамкненим ротором серії АІР132М4, основні паспортні параметри якого наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Паспортні параметри асинхронного двигуна АІР 132М4

Параметр	Позначення	Одиниця вимірювання	Значення
Номінальна потужність	P_n	$кВт$	11,0
Номінальна фазна напруга	U_n	$В$	220
Частота напруги живлення	f	$Гц$	50
Частота обертання в режимі холостого ходу	n_{xx}	$об/хв$	1498
Момент холостого ходу	M_{xx}	$Н·м$	0,38
Активний опір обмотки статора	r_1	$Ом$	0,5
Активний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора	r'_2	$Ом$	0,36
Реактивний опір обмотки статора	x_1	$Ом$	0,56
Кількість витків фази статора	w	–	96
Середня довжина витка обмотки	$l_{сер1}$	$м$	0,706
Частота обертання в номінальному режимі	n_n	$об/хв$	1450
Номінальний момент двигуна	M_n	$Н·м$	72,671
Момент інерції двигуна	J	$кг·м^2$	0,04

При виборі математичної моделі для проведення досліджень міжвиткових замикань у фазі обмотки статора асинхронного двигуна необхідно враховувати можливість створення в ній несиметричного обертального поля, що відбувається при міжвитковому замиканні різного ступеня (різної кількості витків).

Для проведення досліджень обрана імітаційна модель асинхронного двигуна, що виконана в програмному середовищі

MATLab, принципи побудови якої наведені в роботах [15, 16]. Вибір моделі обумовлений встановленим рівнем її адекватності в різних режимах роботи [17].

Прийнята імітаційна модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором записана в «загальмованих координатах».

Як відомо, при виникненні міжвиткових замикань в обмотці статора порушується симетричність обертального

магнітного поля статора. Для реалізації імітації режиму роботи асинхронного двигуна з несиметричними обмотками в моделі задається зміна активного опору обмотки та індуктивність розсіювання.

Для передбачення зміни взаємної індуктивності обмоток визначається, який саме вплив має зміна комплексного опору однієї обмотки (декількох обмоток) на індуктивність магнітного ланцюга. Тобто встановлюється, на скільки відрізняються дійсні значення зазначених параметрів від номінальних значень. Після цього враховуються в запропонованій моделі зміни взаємної індуктивності обмоток при проведенні моделювання [16].

Отже, реалізація міжвиткового замикання на моделі виконана зниженням комплексного опору фазної обмотки статора, що імітує замкнення витків у відсотковому відношенні від загальної кількості у фазі непошкодженої обмотки з урахуванням зміни взаємної індуктивності обмоток.

Дослідження впливу міжвиткового замкнення на механічні та робочі характеристики двигуна. Дослідження впливу міжвиткового замкнення різного ступеня в обмотці фази асинхронного двигуна на механічні та робочі характеристики проведено для таких випадків: 100 % – статор не має пошкоджень, 90 % – відповідає замиканню 10 % витків обмотки фази, 80 % – замиканню 20 % витків обмотки фази їхньої загальної кількості. Для імітації міжвиткового замикання в математичній моделі спочатку на 10 %, потім 20 % витків зменшувався комплексний опір обмотки статора. Моделювання проводилося з перерахуванням параметрів до фіксованої швидкості частоти обертання двигуна для 100, 90 та 80 % відносного комплексного опору статора z [18]. Результати моделювання вказаних процесів на імітаційній моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором наведено в табл. 2-4.

Таблиця 2

Результати моделювання залежності моменту двигуна (M), корисної потужності (P_2), відносного значення корисної потужності (P_2^*), повної споживаної потужності (S) від частоти обертання двигуна (n)

n , об/хв	M , Н·м			P_2 , кВт			$P_2^* = \frac{P_2}{P_{2ном}}$, в.о.			S , кВА		
	100 %	90 %	80 %	100 %	90 %	80 %	100 %	90 %	80 %	100 %	90 %	80 %
1425,7	101,819	102,354	103,964	15,19	15,28	15,52	1,381	1,389	1,411	19,63	20,07	20,921
1440,8	84,072	84,419	85,779	12,68	12,73	12,84	1,153	1,157	1,176	16,507	16,76	17,575
1450,0	72,443	72,695	73,989	11,0	11,03	11,23	1,0	1,003	1,021	14,24	14,573	15,263
1470,8	43,933	44,022	44,13	6,76	6,775	6,793	0,615	0,616	0,618	9,885	10,12	10,493
1485,8	21,518	21,541	21,569	3,342	3,346	3,351	0,304	0,304	0,305	7,257	7,478	7,847
1488,3	17,64	17,654	18,607	2,743	2,746	2,92	0,249	0,25	0,265	6,885	7,128	7,582
1490,8	14,747	13,731	14,27	2,136	2,138	2,14	0,194	0,194	0,195	6,614	6,864	7,183
1493,3	9,765	9,77	9,777	1,521	1,522	1,523	0,138	0,138	0,138	6,449	6,656	6,88
1494,8	7,506	7,376	7,4069	1,175	1,149	1,15	0,107	0,104	0,105	6,351	6,56	6,788
1496,4	4,805	4,807	5,4343	0,747	0,747	0,748	0,068	0,068	0,068	6,273	6,485	6,715
1497,3	2,385	2,386	2,387	0,368	0,368	0,369	0,033	0,033	0,034	6,227	6,44	6,671
1498,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6,204	6,42	6,652

Таблиця 3

Результати моделювання залежності реактивної потужності (Q_l), активної потужності (P_1) і відносного значення активної потужності (P_1^*) від частоти обертання двигуна (n)

$n, \text{об/хв}$	$Q_l, \text{кВАр}$			$P_1, \text{кВт}$			$P_1^* = \frac{P_1}{P_{1n}}, \text{в.о.}$		
	100%	90%	80%	100%	90%	80%	100%	90%	80%
1425,7	9,35	9,808	10,813	17,26	17,51	17,91	1,404	1,425	1,457
1440,8	8,255	9,525	9,494	14,3	14,43	14,79	1,151	1,174	1,203
1450,0	7,193	7,574	8,298	12,29	12,45	12,81	1,0	1,013	1,042
1470,8	6,613	6,751	7,174	7,347	7,539	7,657	0,598	0,613	0,623
1485,8	6,235	6,399	6,768	3,713	3,87	3,971	0,302	0,315	0,323
1488,3	6,172	6,359	6,727	3,051	3,22	3,498	0,248	0,262	0,285
1490,8	6,15	6,377	6,682	2,433	2,539	2,635	0,198	0,207	0,214
1493,3	6,202	6,382	6,581	1,767	1,89	2,007	0,144	0,154	0,163
1494,8	6,188	6,39	6,597	1,43	1,483	1,598	0,116	0,121	0,113
1496,4	6,194	6,401	6,618	0,995	1,042	1,138	0,081	0,085	0,093
1497,3	6,197	6,405	6,627	0,614	0,673	0,764	0,05	0,055	0,062
1498,0	6,203	6,416	6,645	0,175	0,225	0,304	0,014	0,018	0,025

Таблиця 4

Результати моделювання залежності середнього струму статора ($I_{1сеп}$), відносного значення середнього струму статора ($I_{1сеп}^*$), коефіцієнта корисної дії (η), коефіцієнта потужності ($\cos\phi$) від частоти обертання двигуна (n)

$n, \text{об/хв}$	$I_{1сеп}, A$			$I_{1сеп}^* = \frac{I_{1сеп}}{I_{1n}}, \text{в.о.}$			$\eta, \text{в.о.}$			$\cos\phi, \text{в.о.}$		
	100 %	90 %	80 %	100 %	90 %	80 %	100 %	90 %	80 %	100 %	90 %	80 %
1425,7	29,742	30,409	31,698	1,378	1,409	1,469	0,88	0,873	0,867	0,879	0,872	0,856
1440,8	24,742	25,394	26,629	1,147	1,177	1,234	0,887	0,882	0,874	0,866	0,861	0,842
1450,0	21,576	22,08	23,126	1,0	1,023	1,072	0,895	0,886	0,876	0,863	0,854	0,839
1470,8	14,977	15,333	15,898	0,694	0,711	0,737	0,92	0,899	0,887	0,743	0,745	0,72
1485,8	10,995	11,33	11,889	0,51	0,525	0,551	0,9	0,865	0,859	0,512	0,518	0,506
1488,3	10,432	10,8	11,488	0,483	0,501	0,532	0,899	0,853	0,846	0,443	0,452	0,461
1490,8	10,021	10,4	10,883	0,464	0,482	0,504	0,878	0,842	0,81	0,368	0,37	0,367
1493,3	9,771	10,085	10,424	0,453	0,467	0,483	0,861	0,805	0,759	0,274	0,284	0,292
1494,8	9,623	9,939	10,285	0,446	0,461	0,477	0,822	0,775	0,72	0,225	0,226	0,235
1496,4	9,505	9,826	10,174	0,441	1,409	0,472	0,751	0,717	0,647	0,159	0,161	0,169
1497,3	9,435	9,758	10,108	0,437	1,177	0,468	0,599	0,537	0,483	0,099	0,105	0,115
1498,0	9,403	9,728	10,079	0,436	1,023	0,467	0	0	0	0,028	0,035	0,046

За результатами моделювання, наведеними в табл. 2, побудовано механічні характеристики двигуна $n=f(M)$ для замкнення різної кількості витків обмотки

статора у відсотковому відношенні (рис. 1). За результатами табл. 2-4 побудовано графіки залежності повної потужності, що споживається з мережі (рис. 2) $S=f(P_2^*)$,

відносного значення активної потужності (рис. 3) $P_1^* = f(P_2^*)$ і відносного значення середнього струму фази статора $I_{Icep} = f(P_2^*)$ від відносного значення корисної потужності (рис. 4). За результатами табл. 2

та 4 побудовано графіки залежностей коефіцієнта корисної дії (рис. 5) і коефіцієнта потужності (рис. 6) від відносного значення корисної потужності P_2 .

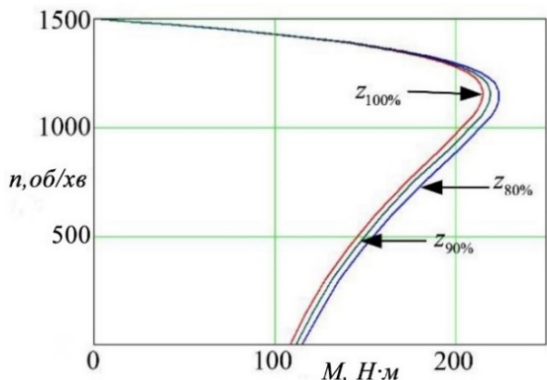


Рис. 1. Графік залежності частоти обертання вала двигуна від моменту на валу для різного пошкодження обмотки

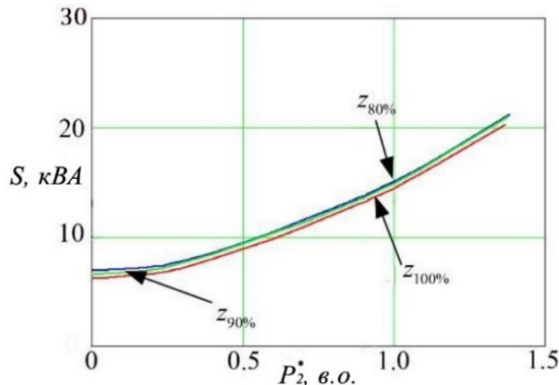


Рис. 2. Графік залежності повної потужності від корисної потужності для різного пошкодження обмотки

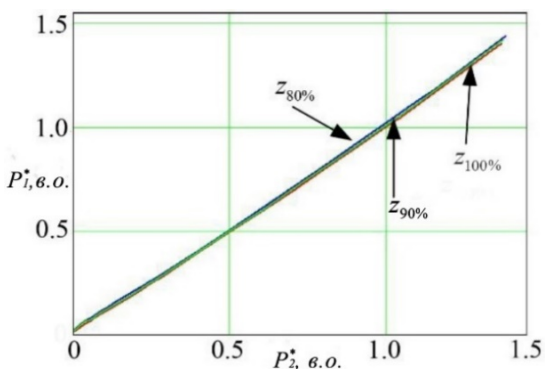


Рис. 3. Графік залежності активної потужності, що споживається з мережі, від корисної потужності для різного пошкодження обмотки

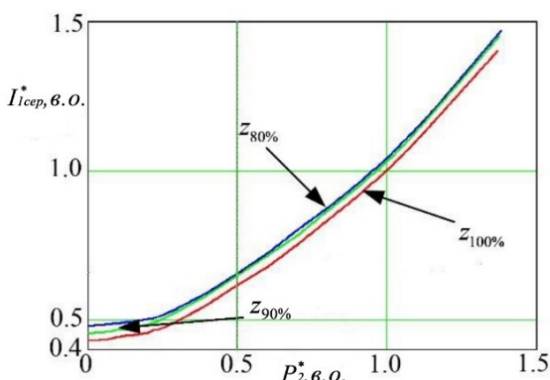


Рис. 4. Графік залежності середнього струму фази статора від корисної потужності для різного пошкодження обмотки

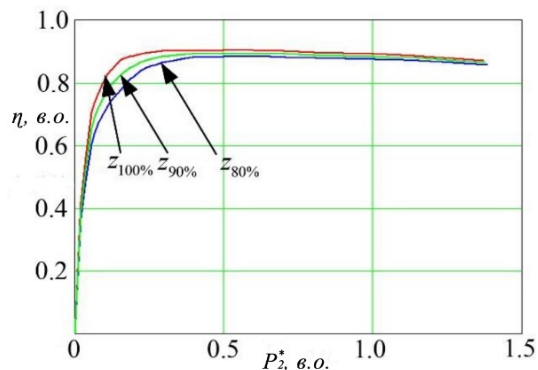


Рис. 5. Графік залежності коефіцієнта корисної дії від корисної потужності двигуна для різного пошкодження обмотки

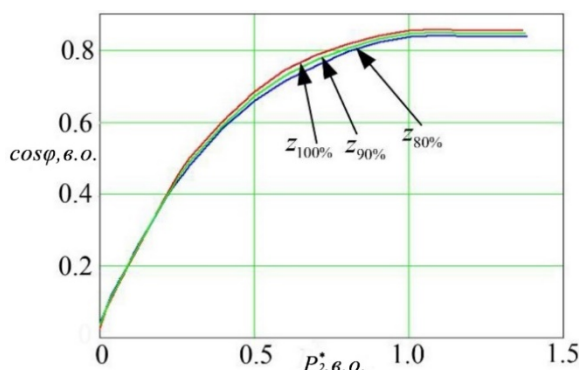


Рис. 6. Графік залежності коефіцієнта корисної дії від корисної потужності двигуна для різного пошкодження обмотки

З рис. 1 випливає, що зі збільшенням кількості замкнених витків в обмотці статора збільшується значення критичного моменту і пускового моменту двигуна. У той же час значення моменту в номінальному режимі не змінюється. Отже, погіршення властивостей двигуна через механічні властивості за наявності міжвиткових замкнень у фазі обмотки статора не відбувається.

З рис. 2-4 випливає, що при роботі двигуна при номінальному навантаженні та замкненні 20 % витків в одній фазі двигуна повна потужність, споживана з мережі, збільшується на 7,1 %. При цьому на 4,3 % збільшується активна потужність, споживана з мережі, і відповідно середнє значення струму у фазі статора на 7,1 %. Таке суттєве збільшення струму веде до перегріву неушкодженої частини фазної обмотки і збільшує вірогідність наступного пробою та можливої аварійної зупинки двигуна.

Міжвиткові замкнення у фазі обмотки статора також погіршують енергетичні характеристики асинхронного двигуна. Так, ККД двигуна при замкнених 20 % витків

обмотки знижується на 2,4 % (рис. 5), а коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ – на 2,7 % (рис. 6) у номінальному режимі.

Для визначення діагностичних параметрів зі встановлення наявності міжвиткових замикань у фазі обмотки статора проведено дослідження з впливу міжвиткового замкнення на електродинамічні процеси в двигуні.

Дослідження впливу міжвиткового замикання у фазі обмотки статора асинхронного двигуна на пульсації моменту і небаланс фазних струмів. Для встановлення параметрів двигуна при міжвиткових замкненнях проведено моделювання значень низки електродинамічних параметрів трифазного асинхронного двигуна при симетричному режимі роботи (100 %) і зменшенні комплексного опору фази A на 10 і 20 %, викликане замиканнями різної кількості витків у фазі обмотки. Результати моделювання параметрів двигуна проведено для номінального режиму та режиму холостого ходу і зведено в табл. 5.

Таблиця 5
Результати моделювання значень параметрів асинхронного двигуна за наявності міжвиткового замикання при пошкодженнях обмотки

Параметр	Холостий хід			Номінальний режим		
	100 %	90 %	80 %	100 %	90 %	80 %
1	2	3	4	5	6	7
Частота обертання n , об/хв	1498	1498	1498	1450	1450	1450
Середній електромагнітний момент $M_{сер}$, Н·м	0,380	0,506	0,508	72,443	72,695	73,989
Максимальний електромагнітний момент $M_{макс}$, Н·м	0,380	1,174	1,847	72,443	74,066	76,95
Мінімальний електромагнітний момент $M_{мін}$, Н·м	0,3804	-0,161	-0,831	72,443	71,324	71,028
Частота пульсацій моменту $f_{пульс}$, Гц	0	100	100	0	100	100
Діючий струм фази A статора I_{1A} , А	9,403	10,219	11,148	21,8	22,996	24,76
Діючий струм фази B статора I_{1B} , А	9,403	9,443	9,465	21,8	21,228	20,967
Діючий струм фази C статора I_{1C} , А	9,403	9,52	9,627	21,8	21,389	21,297
Діючий струм фази A ротора I_{2A} , А	0,091	0,177	0,317	18,713	19,286	19,914
Діючий струм фази B ротора I_{2B} , А	0,091	0,115	0,278	18,713	18,661	18,268

1	2	3	4	5	6	7
Діючий струм фази C ротора I_{2C}, A	0,091	0,292	0,45	18,713	19,081	19,491
Коефіцієнт пульсацій електромагнітного моменту $k_{пульсМ}, \%$	0	131,84	263,71	0	2,001	3,991
Коефіцієнт небалансу фазних струмів статора, $k_{нбІ}, \%$	0	8,253	16,341	0	8,11	15,916

Коефіцієнти пульсації електромагнітного моменту в табл. 5 розраховані за формулою [16]

$$k_{пульсМ} = \frac{M_{макс} - M_{мін}}{2 \cdot M_{сер}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де $M_{макс}$ – максимальне значення моменту, $H \cdot м$;

$M_{мін}$ – мінімальне значення моменту, $H \cdot м$;

$M_{сер}$ – середнє значення моменту, $H \cdot м$.

Коефіцієнти небалансу струмів фаз статора (табл. 5) визначаються за формулою [16]

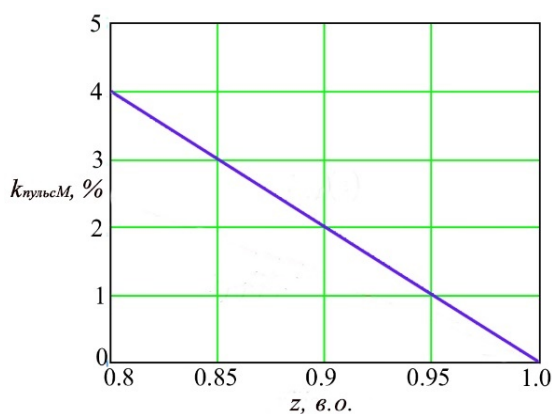
$$k_{нбІ} = \frac{I_{ст.макс} - I_{ст.мін}}{I_{ст.сим.р}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де $I_{ст.макс}$ – максимальне значення фазного струму статора, A ;

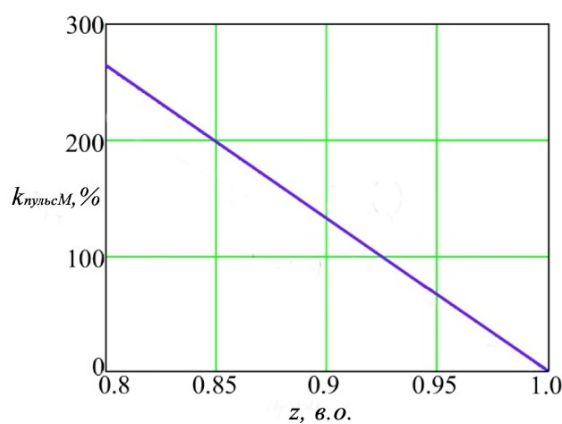
$I_{ст.мін}$ – мінімальне значення фазного струму статора, A ;

$I_{ст.сим.р}$ – значення фазного струму статора при симетричному режимі.

За результатами моделювання з табл. 5 побудовано графіки залежності коефіцієнта пульсацій електромагнітного моменту (рис. 7, а, б) і залежності коефіцієнта небалансу фазних струмів статора (рис. 8, а, б) від кількості неушкоджених витків у відносному вираженні через відповідну зміну комплексного опору z для режиму холостого ходу та номінального режиму.



а



б

Рис. 7. Графіки залежності коефіцієнта пульсацій електромагнітного моменту від пошкоджень фази статора:

а – режим холостого ходу; б – номінальний режим

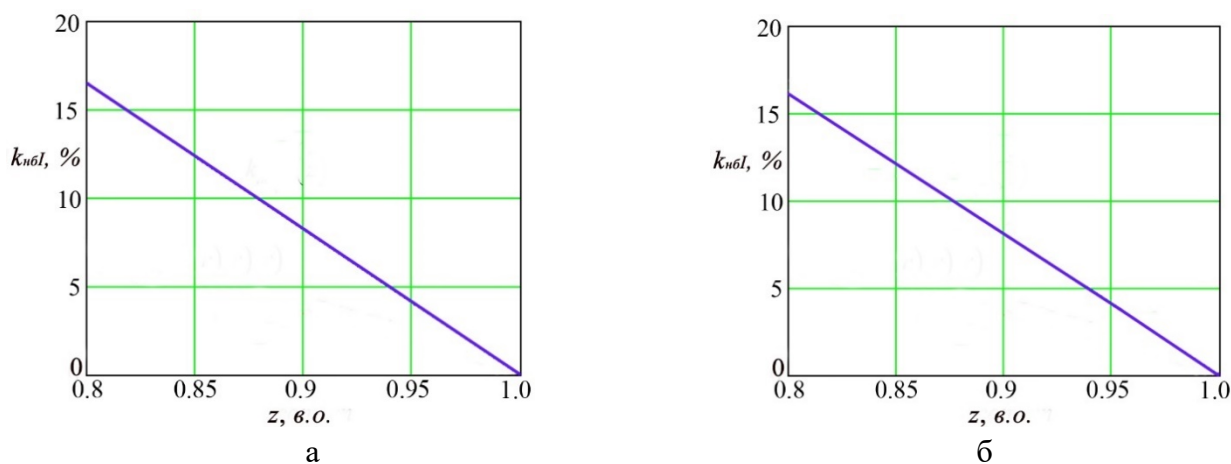


Рис. 8. Графіки залежності коефіцієнта небалансу фазних струмів від пошкоджень фази статора: а – режим холостого ходу; б – номінальний режим

Аналіз отриманих результатів показав, що найбільш істотні зміни відбуваються з пульсацією електромагнітного моменту при зміні комплексного опору однієї з фаз на холостому ході, коефіцієнт пульсацій електромагнітного моменту досягає 263,71 %. У номінальному режимі значення цього коефіцієнта складає 3,99 % при замиканні 20 % витків фази обмотки. Це свідчить про доцільність використання вібраційного методу діагностики цього пошкодження виключно в режимі холостого ходу, тобто при стендових випробуваннях. При навантаженні двигунів використання вібраційних систем ускладнено у зв'язку з незначними відхиленнями коефіцієнта пульсацій, що може бути викликано іншими пошкодженнями, або порушенням якості напруги живлення. Коефіцієнт небалансу фазних струмів статора (рис. 8) при зміні комплексного опору фази двигуна має однаковий характер змін та отриманих значень для номінального режиму і режиму холостого ходу, що робить використання діагностичного струмового методу більш універсальним.

Висновки. У статті проведено комплекс досліджень впливу міжвиткового замикання на параметри та характеристики асинхронних двигунів у період їхньої

експлуатації та визначено рівень зниження економічності використання транспортного обладнання. У результаті проведених досліджень також запропоновано діагностичні методи для встановлення міжвиткового замикання в електроприводах транспортних засобів.

Проведені дослідження впливу міжвиткового замикання на механічні характеристики показали, що при збільшенні ступеня міжвиткового замикання у фазі статора критичний і пусковий моменти двигуна зростають, а зона номінального режиму в діапазоні робочих частот обертання двигуна змінюється незначно.

При номінальному режимі роботи двигуна, за результатами досліджень, зі збільшенням кількості замкнених витків обмотки фази до 20 % загальної їхньої кількості зростає повна потужність, споживана з мережі, на 7,1 %, активна потужність, споживана з мережі, на 4,3 %, і збільшується на 7,1 % середнє значення струму фази статора.

Після проведення досліджень міжвиткових замкнень у фазі обмотки статора визначено зниження енергетичних показників асинхронного двигуна: ККД двигуна при замкнених 20 % витків фазної обмотки знижується на 2,4 %, а коефіцієнт

потужності $\cos\varphi$ – на 2,7 % у номінальному режимі роботи двигуна.

Таке збільшення струму веде до перегріву неушкодженої частини фазної обмотки та збільшує вірогідність наступного міжфазного пробоя і руйнування корпусної ізоляції з можливою аварійною зупинкою двигуна. Рівень збільшення струму статора за наявності міжвиткових замикань може бути використаний для прогнозування періоду безаварійної роботи через визначення температурного режиму пошкодженої фази.

З цього випливає, що своєчасне виявлення наявності та ступеня міжвиткового замикання є актуальним завданням, що сприяє підвищенню надійності роботи транспортних засобів.

Для визначення діагностичних проявів пошкоджень обмотки статора проведено дослідження впливу міжвиткових замикань на пульсації електромагнітного моменту і небаланс фазних струмів статора. За результатами моделювання встановлено, що коефіцієнт пульсацій електромагнітного моменту в режимі холостого ходу досягає 263,67 %. У номінальному режимі значення цього коефіцієнта складає 3,99 % при замиканні 20 % витків фази обмотки. Це вказує на

доцільність використання вібраційного методу діагностики цього пошкодження виключно в режимі холостого ходу, тобто при стендових випробуваннях, де вібраційні прояви мають більш виражений характер. Коефіцієнти небалансу фазних струмів статора при зміні комплексного опору фази обмотки мають близькі значення для режиму холостого ходу ($k_{нбI} = 16,34$ %) і номінального режиму ($k_{нбI} = 15,91$ %).

Проведені дослідження свідчать про більшу ефективність використання струмових методів діагностики при оцінюванні та прогнозуванні стану обмотки статора асинхронного електродвигуна у складі діагностичних систем транспортних засобів.

Результати проведених досліджень актуальні для оцінювання ступеня відхилень параметрів працюючих електроприводів при пошкодженні обмотки статора та можуть бути використані при створенні систем функціональної діагностики транспортного обладнання у складі приводів транспортних засобів, що працюють постійно під навантаженням, для підвищення надійності та ефективності роботи транспортної інфраструктури.

Список використаних джерел

1. Merizalde Y., Hernandez-Callejo L., Duque-Perez O. State of the art and trends in the monitoring, detection and diagnosis of failures in electric induction motors. *Energies* [online]. 2017. 10(7). P. 1056. URL: <https://doi.org/10.3390/en10071056>.
2. Choudhary A., Goyal D., Shimi S.L. et al. Condition monitoring and fault diagnosis of induction motors: a review. *arch computer methods eng* 26. 2019. P.1221–1238. URL: <https://doi.org/10.1007/s11831-018-9286-z>.
3. Mairte J., Gaboury S., Bouchard B., Bouzouane A. A new computational method for stator faults recognition in induction machines based on hyper-volumes. In: 2015 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT). IEEE [online]. 2015. P. 216-220. ISSN: 2154-0357. URL: <https://doi.org/10.1109/EIT.2015.7293343>.
4. Губаревич О. В. Надійність і діагностика електрообладнання: підручник. Сєверодонецьк : Вид-во СХУ ім. В. Даля, 2016. 248 с.
5. Губаревич О. В., Голубева С. М. Аналіз методів діагностики технічного стану ізоляції асинхронних двигунів. *Всеукраїнський науковий збірник «Наукові праці Донецького національного технічного університету»*. Серія : Електротехніка і енергетика. Покровськ:

Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет». 2019. № 1(21). С. 55-63. URL: <https://doi.org/10.31474/2074-2630-2019-1-55-63>.

6. Bento F., Adouni A., Muxiri A. C., Fonseca D. S., Marques Cardoso A. J.. On the risk of failure to prevent induction motors permanent damage, due to the short available time-to-diagnosis of inter-turn short-circuit faults. *IET Electric Power Applications*. 2021. Vol. 15. N. 1. P. 51-62. URL: <https://doi.org/10.1049/elp2.12008>.

7. Asfani D. A., Negara I. M. Y., Hernanda I. G. N. S., Fahmi D., Muljadi E. & Nelms R. M. (2020, October). Methods to Determine the Stator Inter-turn Short Circuit in an Induction Motor with Installed Rotor. In: 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2020. P. 7-13. URL: <https://doi.org/10.1109/ECCE44975.2020.9236051>.

8. Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем: монография / А. П. Черный, Д. И. Родькин, А. П. Калинов, О. С. Воробейчик. Кременчуг: ЧП Щербатых А. В., 2008. 246 с.

9. Wissam Dehina & Mohamed Boumechraz. Experimental investigation in induction motors using signal processing techniques for early detection of inter-turn short circuit faults. *International Journal of Modelling and Simulation*. 42:5. 2022. P. 855-867. URL: <https://doi.org/10.1080/02286203.2021.2001635>.

10. Muxiri A. C. P., Bento F., Fonseca D. S. B. and Marques Cardoso A. J. Thermal Analysis of an Induction Motor Subjected to Inter-Turn Short-Circuit Failures in the Stator Windings. *International conference on industrial engineering, applications and manufacturing (ICIEAM)*. 2019. P. 1-5. URL: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2019.8743076>.

11. Adouni A., J Marques Cardoso A. Thermal Analysis of Low-Power Three-Phase Induction Motors Operating under Voltage Unbalance and Inter-Turn Short Circuit Faults. *Machines*. 2021. Vol. 9. N. 1. P. 2-11. URL: <https://doi.org/10.3390/machines9010002>.

12. Hashish E., Miller K., Finley W. and Kreitzer S. Vibration Diagnostic Challenges: Case Studies in Electric Motor Applications. *IEEE Industry Applications Magazine*. July-Aug. 2017. Vol. 23. N. 4. P. 22-34. URL: <https://doi.org/10.1109/MIAS.2016.2600718>.

13. Álvaro Souza de Araújo, Oberdan Pinheiro Rocha, Alex Álisson Bandeira Santos, Computational Model for Electrical Motors Condition Analysis and Monitoring, VI Simpósio Internacional de Inovação e Tecnologia. *Blucher Engineering Proceedings*. 2020. Vol. 7. N 2. P. 543-550. ISSN 2357-7592. URL: <https://doi.org/10.34178/jbth.v5i2.206>.

14. Suechoey B., Siriporananon S., Chupun P., Boonkhun C. & Chompooinwai C. (2021). Performance Analysis and Fault Classification in a Large Electric Motor Using Vibration Assessment Technique. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*. 2021. 14(1). P. 124–133. URL: <https://doi.org/10.22266/ijies2021.0228.13>.

15. Goolak S., Gubarevych O., Yermolenko E., Slobodyanyuk M. & Gorobchenko O. Mathematical Modeling of an Induction Motor for Vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 2(2). P. 25–34. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.199559>.

16. Goolak S., Gerlici J., Tkachenko V., Sapronova S., Lac T., Kravchenko K. Determination of parameters of asynchronous electric machines with asymmetrical windings of electric locomotives. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*. 2019. 21(2). P. C24-C31. URL: <https://doi.org/10.26552/com.C.2019.2.24-31>.

17. Gubarevych O., Golubieva S., Melkonova I. Comparison of the results of simulation modeling of an asynchronous electric motor with the calculated electrodynamic and energy characteristics. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2022. R. 98. N 10/2022. P. 61-66. URL: <https://doi.org/10.15199/48.2022.10.11>.

18. Goolak S., Gerlici J., Gubarevych O., Lack T. & Pustovetov M. Imitation Modeling of an Inter-Turn Short Circuit of an Asynchronous Motor Stator Winding for Diagnostics of Auxiliary Electric Drives of Transport Infrastructure. *Communications-Scientific letters of the University of Zilina*. 2021. 23(2). P. C65–C74. URL: <https://doi.org/10.26552/com.C.2021.2.C65-C74>.

Губаревич Олег Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електромеханіки та рухомого складу залізниць, Державний університет інфраструктури та технологій. ORCID iD: 0000-0001-7864-0831. E-mail: oleg.gbr@ukr.net.

Oleg Gubarevych, PhD (Tech), Associate Professor, department of Electromechanics and Rolling Stock, The State University of Infrastructure and Technology. ORCID iD: 0000-0001-7864-0831. E-mail: oleg.gbr@ukr.net.

Статтю прийнято 09.10.2022 р.