

СЕКЦІЯ XV. ТРАНСПОРТ ТА ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ВПЛИВ ПОШКОДЖЕНЬ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Губаревич Олег Володимирович

ORCID ID: 0000-0001-7864-0831

канд. техн. наук, доцент,

доцент кафедри електромеханіки та рухомого складу залізниць

Київський інститут залізничного транспорту

Державного університету інфраструктури та технологій, Україна

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором є найбільш застосовуваним типом електричних машин у приводах різних механізмів транспортної інфраструктури. Таке поширення асинхронні електродвигуни набули завдяки невеликій вартості, простоті обслуговування та високій надійності. Однак, більш ефективному їх використанню перешкоджає ушкоджувальність, викликана меншою мірою експлуатаційними раптовими відмовами аварійного характеру, ніж недостатньою точністю діагностування поточного стану та роботою двигунів значний час з відхиленням поточних експлуатаційних параметрів від нормованих.

Таким чином, завдання підвищення ефективності експлуатації транспортних засобів та їх надійності, зниження рівня прямих і непрямих витрат у процесі експлуатації зв'язані з контролем поточного стану асинхронних двигунів з недопущенням їх використання у пошкодженному стані.

Враховуючи зростаючу відповідність функцій, що виконують електродвигуни у транспортних механізмах, підвищення вимог до якості та точності завдань що вони виконують в сучасних транспортних засобах, особливе значення набуває контроль та утримання їх справного технічного стану. Як свідчить експлуатаційна статистика найбільші відмови асинхронних електродвигунів із короткозамкненим ротором відбуваються з пошкоджень обмотки статора – до 80% усіх відмов двигуна [1, 2]. Значна доля (до 50%) відмов обмотки статора доводиться на міжвиткові замикання у фазі обмотки двигуна. Міжвиткові замикання є складним для виявлення пошкодженням двигуна при якому він продовжує працювати із зміною його експлуатаційних показників та характеристик. Однак, в залежності від кількості замкнених витків у фазі обмотки, час безаварійної роботи двигуна буде різним [3] та збільшується вірогідність аварійної зупинки електропривода.

Для визначення та оцінки впливу пошкоджень обмотки статора при міжвиткових замкненнях у фазі на параметри асинхронного двигуна проведені дослідження з використанням математичного моделювання в програмному середовищі *MATLab*, принципи побудови якої наведені в роботі [4]. Вибір моделі обумовлений встановленим рівнем адекватності її роботи у різних режимах роботи [5]. Прийнята імітаційна модель асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором записана в «загальмованих координатах».

Дослідження проводились для моделі асинхронного двигуна типу *AIP 132/4* з паспортними даними: $P_{2н} = 11,0 \text{ кВт}$; $f = 50 \text{ Гц}$; $U_n = 220 \text{ В}$; $2p = 4$; $I_n = 21,5 \text{ А}$; $\eta = 89,5\%$, $n = 1450 \text{ об/хв}$; $\cos\varphi = 0,863$; $M_n = 72,67 \text{ Н·м}$; $m = 3$, $w = 96$ витків.

Виткові замикання витків фази обмотки статора двигуна на математичній моделі здійснювалися шляхом зменшення комплексного опору обмотки однієї фази до 90% та до 80% від номінального значення, що відповідає 10 та 19 замкненим виткам відповідно.

Моделювання проводилося з перерахуванням параметрів до фіксованої швидкості обертання валу двигуна для 100% (статор не має пошкоджень), 90% та 80% комплексного опору обмотки статора [6]. Отримані результати моделювання значень активної потужності, що споживається з мережі (P_1), струму статора (I_1), коефіцієнта корисної дії (η) та коефіцієнта потужності ($\cos\varphi$) в залежності від частоти обертання валу двигуна (n) наведені у (табл. 1).

Таблиця 1

Результати моделювання основних параметрів асинхронного двигуна

n , об/хв	$P_{2н}$, кВт	P_1 , кВт			I_1 , А			η , в.о.			$\cos\varphi$, в.о.		
		100,%	90,%	80,%	100,%	90,%	80,%	100,%	90,%	80,%	100,%	90,%	80,%
1425,	15,1	17,26	17,51	17,91	29,742	30,40	31,69	0,88	0,873	0,867	0,879	0,872	0,856
1440,	12,6	14,3	14,43	14,79	24,742	25,39	26,62	0,887	0,882	0,874	0,866	0,861	0,842
1450,	11,0	12,29	12,4	12,8	21,57	22,08	23,12	0,895	0,88	0,87	0,863	0,85	0,83
1470,	6,76	7,347	7,539	7,657	14,977	15,33	15,89	0,92	0,899	0,887	0,743	0,745	0,72
1485,	3,34	3,713	3,87	3,971	10,995	11,33	11,88	0,9	0,865	0,859	0,512	0,518	0,506
1488,	2,74	3,051	3,22	3,498	10,432	10,8	11,48	0,899	0,853	0,846	0,443	0,452	0,461
1490,	2,13	2,433	2,539	2,635	10,021	10,4	10,88	0,878	0,842	0,81	0,368	0,37	0,367
1493,	1,52	1,767	1,89	2,007	9,771	10,08	10,42	0,861	0,805	0,759	0,274	0,284	0,292
1494,	1,17	1,43	1,483	1,598	9,623	9,939	10,28	0,822	0,775	0,72	0,225	0,226	0,235
1496,	0,74	0,995	1,042	1,138	9,505	9,826	10,17	0,751	0,717	0,647	0,159	0,161	0,169
1497,	0,36	0,614	0,673	0,764	9,435	9,758	10,10	0,599	0,537	0,483	0,099	0,105	0,115
1498,	0	0,175	0,22	0,30	9,403	9,728	10,07	0	0	0	0,028	0,03	0,04

[авторська розробка]

З аналізу отриманих результатів моделювання (табл. 1) слід, що зі збільшенням кількості замкнених витків у фазі обмотки статора до 20% для номінальному режиму роботи ($n = 1450 \text{ об/хв}$) двигуна збільшується також на 4,2% активна потужність, що споживається з мережі P_1 та значення струму фази статора I_1 на 7,2%. Таке суттєве збільшення струму веде до перегріву неушкодженої частини фазної обмотки та 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%, а коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ на 2,9 % у номінальному режимі.

Відповідне збільшення струму статора та активної потужності, що споживається з мережі відбувається і у режимі холостого ходу ($n = 1498 \text{ об/хв}$).

Крім того, як відомо з ряду досліджень, при виникненні міжвиткових замикань у обмотці статора порушується симетричність обертового магнітного поля статора, що додатково викликає підвищену вібрацію двигуна [7]. Розглянуті фактори впливу пошкоджень обмотки статора двигуна на енергетичні показники двигуна свідчать про зниження ефективності експлуатації та надійності роботи приводів транспортного обладнання з прискоренням виходу їх з ладу у аварійному режимі.

Висновки. У статті проведено аналіз впливу пошкодження статора, що важко діагностується – міжвиткового замикання у фазі обмотки, на параметри асинхронного двигуна в період їх експлуатації. Дослідження з впливу міжвиткового замикання на характеристики двигуна проводилися з використанням імітаційного моделювання для діапазону частоти обертання 1498,0 – 1425,7 об/хв, який включає навантаження двигуна від режиму холостого ходу до 15,1кВт. Оскільки доцільно проводити контроль стану обмотки статора в період експлуатації двигуна, тобто під навантаженням, то більш актуальні отримані результати для роботи двигуна у номінальному режимі ($n=1450$ об/хв).

При номінальному режимі роботи двигуна, згідно з результатами досліджень, при зростанні кількості замкнених витків фази обмотки до 20% від загальної їх кількості, зростає повна потужність, що споживається з мережі на 7,1%, активна потужність, що споживається з мережі на 4,3% та збільшується на 7,1% середнє значення струму фази статора. Також визначено зниження енергетичних показників двигуна: ККД двигуна при замкнених 20% витків обмотки знижується на 2,4%, а коефіцієнт потужності $\cos\varphi$ на 2,7% у номінальному режимі роботи двигуна.

Збільшення струму веде до перегріву неушкодженої частини фазної обмотки та збільшує вірогідність наступного пробою як наступного міжвиткового так і корпусного з аварійною зупинкою двигуна. Рівень збільшення струму статора при наявності міжвиткових замикань може бути використаний для прогнозування періоду безаварійної роботи через визначення температурного режиму пошкодженої фази. Крім погіршення експлуатаційних параметрів двигуна міжвиткове замкнення супроводжується появою вібрації, яка прискорює розвиток інших пошкоджень.

Тому своєчасне виявлення наявності міжвиткового замкнення у фазі обмотки статора є актуальним завданням, що сприяє підвищенню надійності та ефективності роботи транспортних засобів.

Результати проведених досліджень актуальні для оцінки ступеню відхилень параметрів працюючих електроприводів при пошкодженні обмотки статора та можуть бути використані при прогнозуванні безвідмовного часу експлуатації асинхронних електродвигунів у складі транспортних засобів.

Список використаних джерел:

1. Merizalde, Y., Hernandez-Callejo, L., Duque-Perez, O. (2017). State of the art and trends in the monitoring, detection and diagnosis of failures in electric induction motors. *Energies* [online], 10(7), 1056.
2. Gubarevich O.V. (2016). Nadezhnost' i diagnostika elektroobladaniya. Pidruchnik. Sêvêrodonets'k: vid-vo SNU im. V. Dalya, 248 [in Ukrainian].
3. Bento F., Adouni A., Muxiri A. C., Fonseca D. S., Marques Cardoso A. J. (2021). 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*, 15, 1, 51-62.
4. Goolak, S., Gubarevych, O., Yermolenko, E., Slobodyanyuk, M., & Gorobchenko, O. (2020). Mathematical Modeling of an Induction Motor for Vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(2), 25-34.
5. Gubarevych, O., Golubieva, S., Melkonova, I. (2022). Comparison of the results of simulation modeling of an asynchronous electric motor with the calculated electrodynamic and energy characteristics. *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 98, 10/2022, 61-66.
6. Goolak, S., Gerlici, J., Gubarevych, O., Lack, T., & Pustovetov, M. (2020). 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*, 23(2), C65-C74.
7. Adouni A., J Marques Cardoso A. (2021). Thermal Analysis of Low-Power Three-Phase Induction Motors Operating under Voltage Unbalance and Inter-Turn Short Circuit Faults. *Machines*, 9, 1, 2-11.