



УДК 621.316.92:621.313.333

DOI: 10.31388/2220-8674-2019-1-30

ДІАГНОСТУВАННЯ ЗА СТРУМОМ, ЯК МЕТОД ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ З АСИНХРОННИМИ ЕЛЕКТРОДВИГУНАМИ

Нестерчук Д. М., к. т. н.

<http://orcid.org/0000-0003-1995-9564>

Курашкін С. Ф., к. т. н.

<http://orcid.org/0000-0002-3361-9489>*Таврійський державний агротехнологічний університет*e-mail: etem@tsatu.edu.ua

Анотація – розглянута можливість вдосконалення методології діагностування за струмом електромеханічної системи (ЕМС) з асинхронними електродвигунами (АД). Обґрунтовано, що впровадження надійної й ефективної системи діагностування та захисту АД від аварійних режимів роботи дозволить зменшити кількість та частоту аварійних ситуацій, подовжити термін служби електродвигунів та підвищити їх експлуатаційну надійність, так як найбільшу ефективність забезпечує діагностування в режимі функціонування з визначення дефектів на ранніх стадіях розвитку. Проаналізовані існуючі методи технічного діагностування асинхронних електродвигунів, як головної складової електромеханічної системи. Сформульовані основні завдання діагностування електромеханічної системи з асинхронними електродвигунами. Наведена структура алгоритму функціонування системи діагностування та захисту. Практична реалізація запропонованого алгоритму здійснена на базі контролю струму статора електродвигуна з використанням його перевантажувальної характеристики. Слід відзначити практичну значущість визначення коефіцієнтів математичних рівнянь, які описують перевантажувальні характеристики різних типів асинхронних електродвигунів серії АІР, що дозволяють в чисельному вигляді обґрунтовувати значення уставок спрацювання технічного пристрою моніторингу та захисту роботи АД. Пропонується принципова електрична схема, яка реалізує описаний вище алгоритм функціонування системи діагностування та захисту АД.

Ключові слова: надійність, електромеханічна система, асинхронний електродвигун, діагностування, захист, алгоритм функціонування, експлуатаційний режим, перевантаження, допустимий час роботи.

Постановка проблеми. Перетворення електричної енергії в механічну за допомогою трифазних асинхронних електродвигунів (АД) дозволяє легко і економічно вигідно приводити в рух різноманітні робочі машини та механізми технологічних ліній. Сучасні стандарти більшості країн світу висувають все жорсткіші умови щодо безпечної експлуатації АД. Вітчизняний та закордонний досвід показує популярність АД, але їхньому оптимальному використанню перешкоджає висока по-



шкоджуваність. Відмова АД може призвести до зупинки робочої машини, тому основним чинником безаварійної роботи АД є його надійність під час експлуатації. Одним із шляхів скорочення браку продукції на виробництві та підвищення надійності обладнання є прогнозування виходу з ладу за допомогою методів діагностування, моніторинг найбільш розповсюджених несправностей та захист АД від аварійних експлуатаційних режимів [1, 2, 3].

Трифазні асинхронні електродвигуни є головною складовою електромеханічної системи (ЕМС), однак постійного контролю параметрів потребують всі її складові: «мережа живлення – перетворювач – електродвигун», а також їх коливання, зміни, взаємовплив.

Цілком очевидно, що впровадження надійної й ефективної системи діагностування та захисту АД від аварійних режимів роботи дозволить зменшити кількість та частоту аварійних ситуацій, подовжити термін служби електродвигунів та підвищити їх експлуатаційну надійність. Найбільшу ефективність забезпечує діагностування в режимі функціонування з визначення дефектів на ранніх стадіях розвитку.

Аналіз останніх досліджень. Прогнозування технічного стану, а також аналіз причин відмов складових ЕМС є актуальною задачею під час діагностування параметрів надійності. Проблема вирішується за умови впровадження системи діагностування, яка контролює зміну характеристик і приймає рішення щодо виведення з експлуатації електродвигунів, коли параметри ЕМС змінюються настільки інтенсивно, що її аварійний вихід з ладу можливий раніше терміну планового відключення для технічного обслуговування.

Безвідмовне функціонування АД в процесі експлуатації характеризується надійністю ізоляції обмоток електродвигуна. Основною характеристикою ізоляції є електрична міцність, яка під час експлуатації може залишатися незмінною за умови роботи АД при номінальних (каталожних) параметрах. Однак, в процесі тривалої експлуатації на електродвигуни впливають різноманітні експлуатаційні чинники, що призводять до зростання температури обмоток та, як наслідок, до скорочення строку служби електродвигуна [3, 4]. Незадовільна якість напруги живлення, підвищена температура, наявність вологості, порушення правил технічної експлуатації обладнання призводять до виходу з ладу 20-25% АД за рік. Причини відмов – технологічні (близько 35%), конструкційні (до 15%), експлуатаційні (більш 50%) [3, 5].

Підвищити показники надійності можна за рахунок комплексного діагностування технічного стану електродвигунів замість оцінки показників працездатності їх окремих елементів – цей шлях є найбільш ефективним.

Формулювання цілей статті – вдосконалення системи діагностування та захисту АД для підвищення технічної та економічної ефективності експлуатації електродвигунів у складі електромеханічної системи.

Основні матеріали дослідження. Згідно з [4] діагностуванню підлягають теплові процеси, які відбуваються у АД, процеси, що супроводжуються надструмами, процеси при неповнофазних режимах, а також поточний стан ізоляції АД. Тому, доцільним є формулювання основних завдань діагностування ЕМС з АД, а саме:

- розробка технічного завдання на проведення прогнозування та діагностування;
- дослідження фону прогнозування, мета якого – опис впливу зовнішніх факторів на АД в процесі експлуатації;
- складання прогнозного діагнозу для узагальненого опису ЕМС, прогнозного фону для виявлення тенденцій їх загального розвитку, а також вибір методу прогнозування;
- побудова моделі прогнозування, яка описує ЕМС та визначає якісний та кількісний прогноз її технічного стану [6];
- контроль параметрів діагностування АД: споживаного струму та температури обмотки [4];
- контроль умов експлуатації;
- контроль показників якості електроенергії;
- розробка алгоритмів функціонування системи діагностування;
- визначення кроку дискретизації;
- оцінювання (порівняння) та аналіз фактичних та еталонних (регламентованих) значень теплових, електромагнітних та механічних параметрів з метою прогнозування залишкового ресурсу АД;
- захист від аварійних ситуацій та режимів роботи;
- складання протоколів діагностування ЕМС з АД та формування загального висновку щодо подальшої експлуатації.

На рис. 1 наведена узагальнена класифікація методів технічного діагностування ЕМС з АД.

Аналіз наведеної класифікації дозволив зробити висновок, що одні методи є такими, які дозволяють визначати види пошкоджень при проведенні технічного обслуговування, а інші застосовуються для АД в режимі їх функціонування. Комплексний підхід до вирішення проблеми експлуатаційної надійності ЕМС з АД з використанням методів діагностування в режимі їх функціонування в наш час є актуальним.

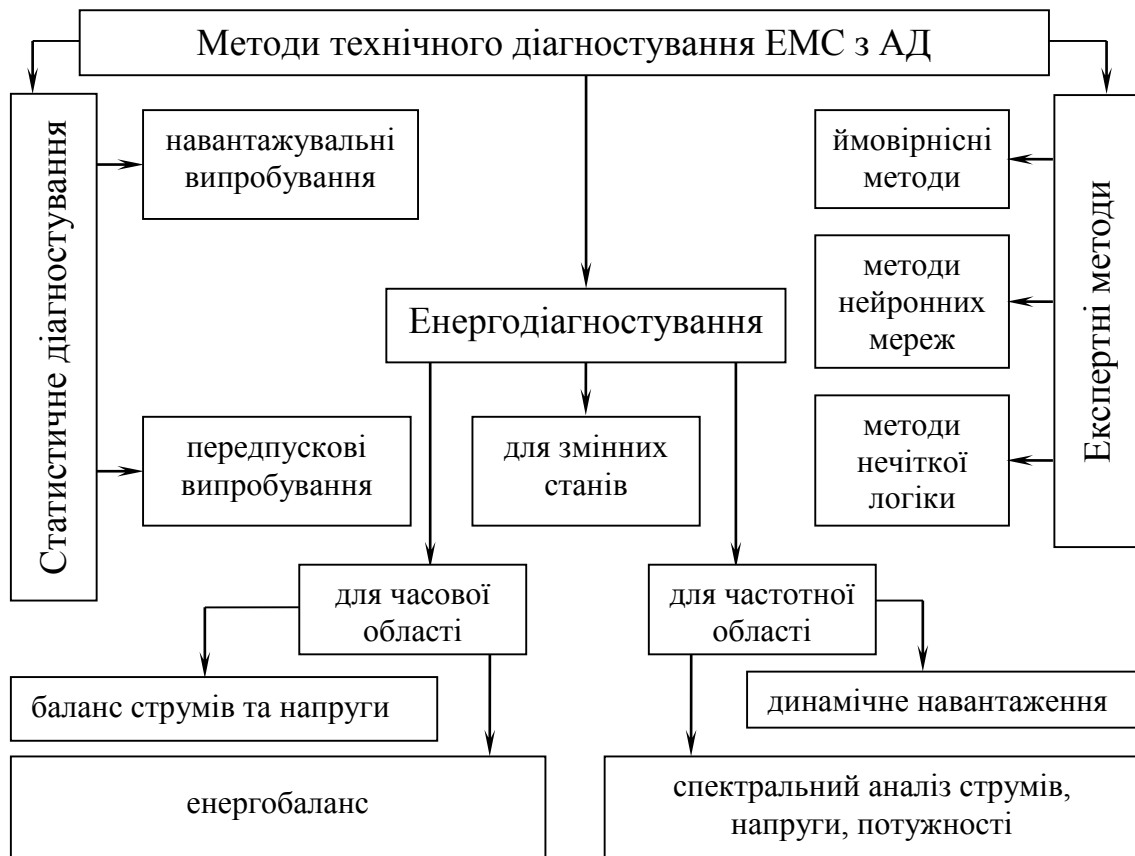


Рис. 1. Узагальнена класифікація методів технічного діагностування ЕМС з АД

Відомо, що найчастіше пошкоджуються обмотки статора та ротора АД. Збільшення струму АД за номінальне значення, є параметром діагностування теплового процесу, оскільки величина струму визначає втрати активної потужності в обмотках, які, в свою чергу, є причиною нагрівання провідників обмотки. Згідно [3...5] тривале перевантаження за струмом виникає через асиметрію напруги живлення та її відхилення, а також при навантажувальних режимах. Короткочасні перевантаження за струмом пов'язані з пусковими режимами.

Підвищення струму понад допустиме значення не відразу призводить до аварійного стану. Навіть з перевантаженням деякий час АД може працювати, поки перевищення температури його обмотки над температурою навколишнього середовища не досягне допустимого значення, перш ніж статор і ротор нагріються до граничної температури, тому немає необхідності в тому, щоб захист реагував на кожне перевищення струму. Він повинен відключати машину тільки в тих випадках, коли виникає небезпека швидкого зносу ізоляції. На час допустимої роботи АД впливають конструктивні параметри електродвигуна, а саме –



еквівалентна постійна часу нагрівання, коефіцієнту втрат, клас ізоляційної конструкції, а також залежить від режимних параметрів – температури навколишнього середовища, початкового перевищення температури обмотки та квадрату кратності струму.

Залежно від теплового стану АД і навколишнього середовища ступінь їх впливу може бути різною: якщо різниця температур електро-двигуна і навколишнього середовища невелика, а енергія, що виділяється, значна, то її основна частина поглинається обмоткою, сталлю статора і ротора, корпусом та іншими його частинами: виникає інтенсивне зростання температури ізоляції, а по мірі нагрівання все більше проявляється вплив тепловіддачі. Збільшення температури ізоляції обмоток є причиною старіння ізоляції обмоток статора, що сприяє появі таких відмов, як міжфазні короткі замикання та виткові замикання [4, 6].

З точки зору нагріву ізоляції велике значення мають величина і тривалість протікання струмів, що перевищують номінальне значення. Ці параметри залежать, насамперед, від характеру технологічного процесу [2, 3]. Зазначені обставини зумовлюють необхідність підвищення вимог щодо експлуатації АД з урахуванням їх реальних індивідуальних характеристик і параметрів, які можуть змінитися в процесі роботи або під час ремонту, впровадження нових підходів до принципів побудови пристроїв захисту АД, та удосконалення існуючих та розробка нових алгоритмів для системи діагностування та захисту АД.

Враховуючи вище наведені міркування, пропонується алгоритм функціонування системи діагностування та захисту на базі контролю струму статора з використанням перевантажувальної характеристики АД (рис. 2), який складається з наступних етапів [7]:

- етап 1 – початок алгоритмізації функціонування системи на базі контролю струму статора;
- етап 2 – введення масиву даних, що характеризують паспортні та конструктивні параметри АД: споживана номінальна активна потужність $P_{2н}, кВт$; номінальний коефіцієнт корисної дії η_H ; номінальний коефіцієнт потужності $\cos\varphi_H$; m_1 та m_2 – відповідно маса обмотки та сталі, $кг$; c_1 та c_2 – відповідно питома теплоємність міді та сталі, $Дж/кг\cdot^{\circ}C$; τ_1 та τ_2 – відповідно номінальне перевищення температури міді та сталі, $^{\circ}C$; номінальний струм $I_{ндв}, А$; γ – коефіцієнт втрат активної потужності в обмотці ротора; активний опір однієї фази обмотки статора $r_{1н}, Ом$;
- етап 3 – аналітичне визначення величини середньоквадратичного значення сили струму за вимірюваннями фазних струмів первинними вимірювальними перетворювачами ПВП фази А ПВП фази С;

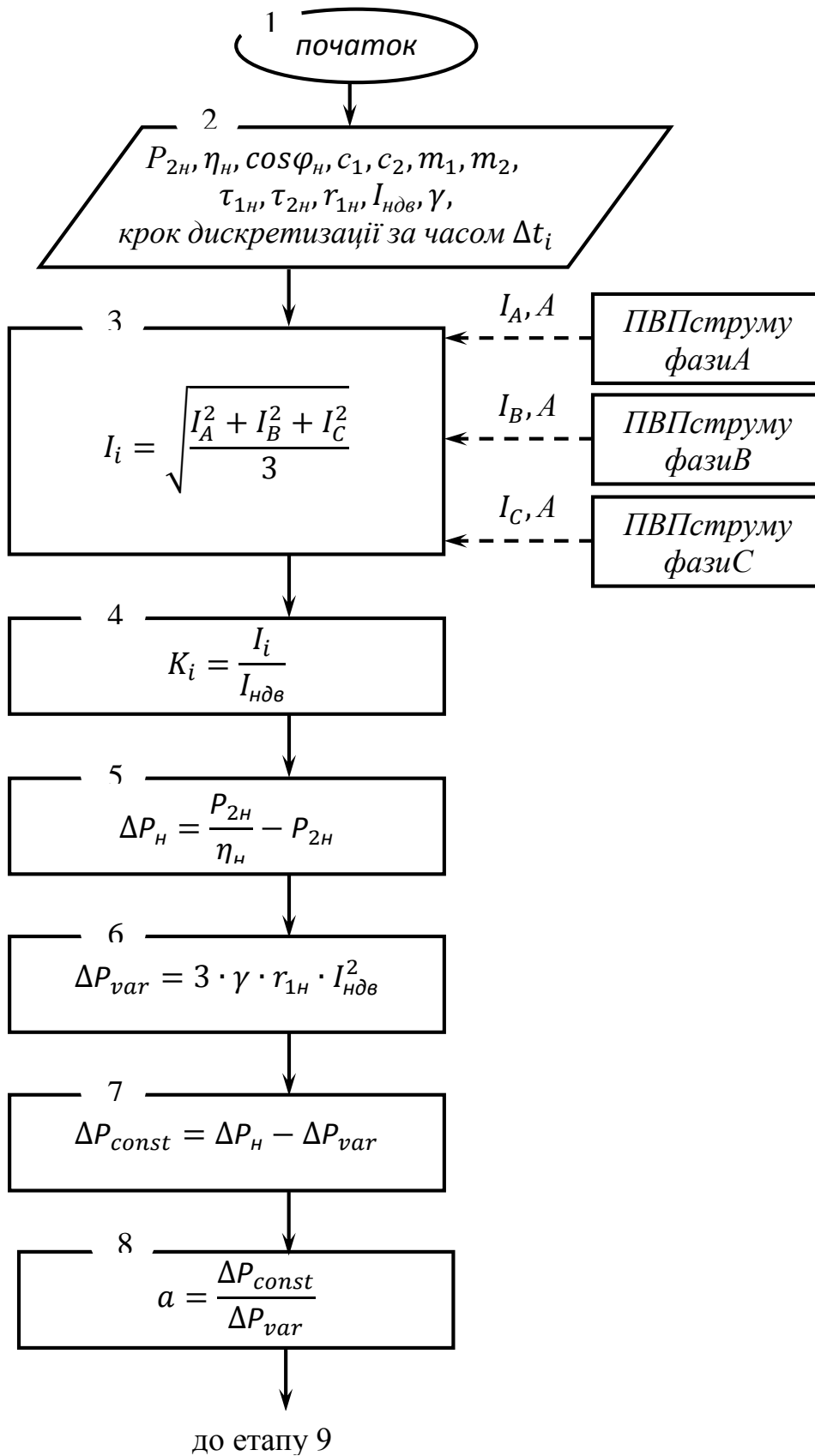


Рис. 2. Алгоритм функціонування системи діагностування та захисту АД

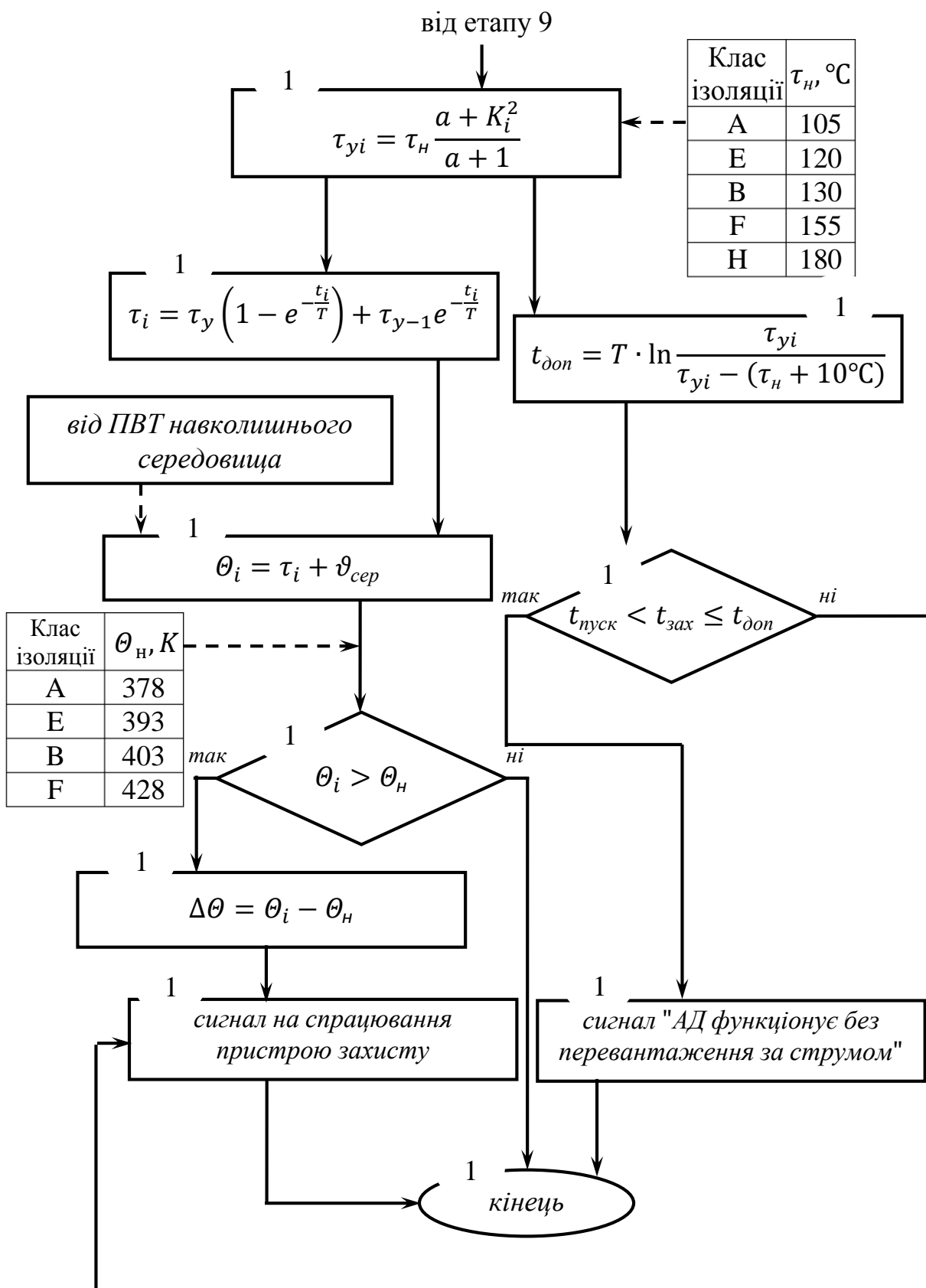


Рис. 2. Алгоритм функціонування системи діагностування та захисту АД



- етап 4 – аналітичне визначення величини кратності струму по відношенню до номінального значення K_i ;
- етап 5 – аналітичне визначення величини номінальних втрат ΔP_H , кВт;
- етап 6 – аналітичне визначення величини змінних втрат ΔP_{var} , кВт;
- етап 7 – аналітичне визначення величини постійних втрат ΔP_{const} , кВт;
- етап 8 – аналітичне визначення величини коефіцієнту втрат a ;
- етап 9 – аналітичне визначення величини постійної часу нагрівання T , с;
- етап 10 – аналітичне визначення усталеного перевищення температури обмотки τ_{yi} , с, з урахуванням класу ізоляції АД;
- етап 11 – аналітичне визначення перевищення температури обмотки τ_i , с;
- етап 12 – аналітичне визначення величини фактичної температури обмотки АД Θ_i , °C, з урахуванням температури навколишнього середовища $\vartheta_{сер}$;
- етап 13 – порівняння величини фактичної температури обмотки Θ_i , °C, з номінальною фактичною температурою обмотки Θ_H , °C, з урахуванням класу ізоляції АД;
- етап 14 – аналітичне визначення зміни фактичної температури обмотки $\Delta \Theta_H$, °C;
- етап 15 – формування в мікропроцесорі електричного сигналу на спрацювання блоку захисту АД;
- етап 16 – аналітичне визначення величини допустимого часу роботи АД з перевантаження $t_{дон}$, с;
- етап 17 – відлік часу роботи блоку захисту АД $t_{зах}$ та порівняння з часом пуску $t_{пуск}$ і допустимим часом роботи з перевантаження $t_{дон}$, с;
- етап 18 – формування в мікропроцесорі електричного сигналу про роботу АД без перевантаження;
- етап 19 – завершення алгоритму.

З метою практичної реалізації розробленого алгоритму на базі контролю струму статорздійснений розрахунок перевантажувальних характеристик $k_i=f(t_{дон})$ для АД серій АІР100L4У3 та АІР63В4У3.

Вихідні дані для розрахунків наведені в таблиці 1.

Результати розрахунків величин згідно етапів алгоритму для побудови перевантажувальної характеристики наведені в таблиці 2.

В таблиці 3 наведені результати розрахунків величин для побудови перевантажувальних характеристик електродвигунів.



Таблиця 1

Вихідні дані для розрахунків

Найменування даних	Величина	
	AIP100L4Y3	AIP63B4Y3
Тип електродвигуна	AIP100L4Y3	AIP63B4Y3
Номинальна потужність P_H , кВт	4,0	0,37
Номинальний струм I_H , А	8,5	1,18
Номинальний коефіцієнт корисної дії η_n	85,0	68
Номинальний коефіцієнт потужності $\cos\varphi_n$	0,84	0,70
Клас ізоляції	В	В
Маса міді m_1 , кг	3,39	0,61
Маса сталі m_2 , кг	25,61	4,99
Номинальне перевищення температури обмотки τ_{1H} , °С	90	90
Опір обмотки при температурі 20 °С r_{20} , Ом	1,27	21,5

Таблиця 2

Результати розрахунків

Показник згідно етапів алгоритму	Тип електродвигуна	
	AIP100L4Y3	AIP63B4Y3
ΔP_H , Вт	705,9	174,12
ΔP_{const} , Вт	320,9	42,64
ΔP_{var} , Вт	402,9	131,48
Коефіцієнт втрат, a	0,75	0,32
Постійна часу нагрівання, T , с	1272,6	995,34

Таблиця 3

Результати розрахунків

k	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
Асинхронний електродвигун AIP100L4Y3							
τ_{yct} , °С	90	100,8	112,6	125,5	139,3	154,2	170,2
t_{don} , с	∞	5122,76	2690,04	1979,14	1578,41	1307,35	1109,07
Асинхронний електродвигун AIP63B4Y3							
τ_{yct} , °С	90	104,27	119,9	136,89	155,24	174,95	196,02
t_{don} , с	∞	2970,69	1738,77	1278,51	1010,61	830,54	700,02

На рис. 3 наведені перевантажувальні характеристики $t_{\text{дон}} = f(K_i)$ досліджуваних електродвигунів.

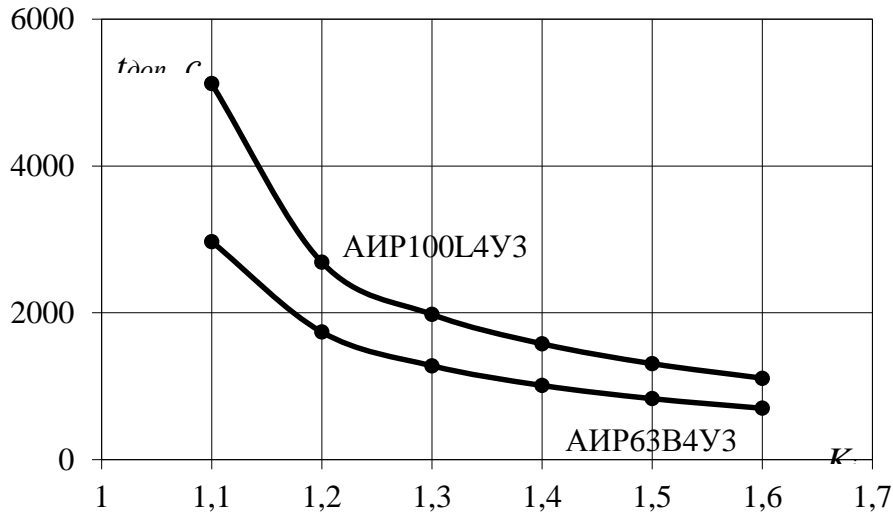


Рис. 3. Перевантажувальні характеристики АД

Після апроксимації отриманих графічних залежностей допустимого часу роботи електродвигуна з перевантаженням можна оперувати математичними рівняннями, які можуть бути покладені в основу роботи системи моніторингу та захисту роботи АД з використанням мікропроцесорної техніки.

В таблиці 4 наведені чисельні значення коефіцієнтів отриманих математичних рівнянь, які описують перевантажувальні характеристики електродвигунів.

Таблиця 4

Чисельні значення коефіцієнтів математичних рівнянь

Тип електродвигуна	Коефіцієнти в математичних рівняннях		
	$t_{\text{дон}} = ak_i^2 - bk_i + c$		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
AIР100L4У3	23098	69399	53217
AIР63В4У3	11830	36041	28171

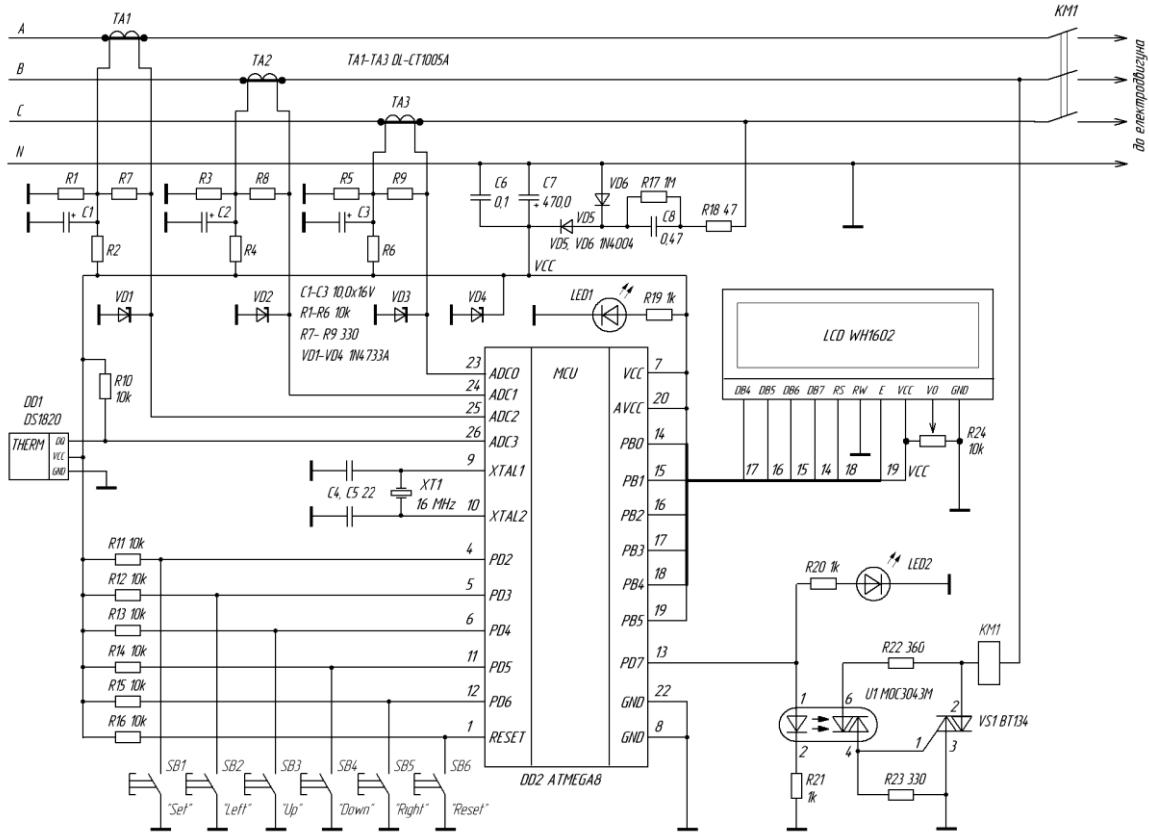


Рис. 4. Принципова електрична схема системи діагностування та захисту АД

Принципова електрична схема, яка реалізує описаний вище алгоритм функціонування системи діагностування та захисту АД приведена на рисунку 4.

Висновки. Під час захисту АД від перевантаження за допомогою контролю середньоквадратичного значення сили струму статора у якості часо-струмової характеристики застосовується перевантажувальна характеристика певного АД.

Визначення коефіцієнтів математичних рівнянь, які описують перевантажувальні характеристики електродвигунів, дозволяють в чисельному вигляді обґрунтовувати значення уставок спрацювання технічного пристрою моніторингу та захисту роботи АД.

Список використаних джерел

1. Тюков В. А. Электромеханические системы: учебн. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. 137 с.



2. *Матвейкин В. Г., Дмитриевский Б. С., Д. М. Шпрехер Д. М.* Системы управления и диагностирования электромеханических объектов: монография. Тамбов: ТГТУ, 2016. 160 с.

3. *Гольдберг О. Д., Хелемская С. П.* Надежность электрических машин: учебник / под ред. О. Д. Гольдберга. Москва: Академия, 2010. 288 с.

4. *Овчаров В. В.* Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве. Киев, 1990. 168 с.

5. *Закладний О.О.* Захист як одне із завдань системи моніторингу енергетичного стану асинхронного електроприводу. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. 2010. № 4 (63), ч. 2. С. 135-138.

6. *Халіман Л. Г., Братусь О. О, Нестерчук Д. М.* Систематизація та аналіз методів прогнозування технічних станів електромеханічних систем. *Збірник тез Всеукраїнської науково-технічна конференція магістрантів і студентів ТДАТУ (м. Мелітополь, 19-23 листопада 2018 р.)*. Мелітополь, 2018. С. 66.

7. *Нестерчук Д. М., Рижков А. О.* Алгоритмізація для функціонування системи діагностування та захисту низьковольтних асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором. *Праці ТДАТУ*. Вип. 15, т. 2. Мелітополь, 2015. С. 274-280.

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ПО ТОКУ, КАК МЕТОД ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С АСИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

Нестерчук Д. Н., Курашкин С. Ф.

Аннотация - рассмотрена возможность усовершенствования методологии диагностирования по току электромеханической системы (ЭМС) с асинхронными электродвигателями (АД). Обосновано, что внедрение надежной и эффективной системы диагностирования и защиты АД от аварийных режимов работы позволит уменьшить количество и частоту аварийных ситуаций, увеличить срок службы электродвигателей и повысить их эксплуатационную надежность, так как наибольшую эффективность обеспечивает диагностирование в режиме функционирования по определению дефектов на ранних стадиях развития. Проанализированы существующие методы технического диагностирования асинхронных электродвигателей, как главной составляющей электромеханической системы. Сформулированы основные задачи диагностирования электромеханической системы с асинхрон-



ными электродвигателями. Приведена структура алгоритма функционирования системы диагностирования и защиты. Практическая реализация предложенного алгоритма выполнена на базе контроля токов статора электродвигателя с использованием его перегрузочной характеристики. Следует отметить практическую значимость определения коэффициентов математических уравнений, которые описывают перегрузочные характеристики разных типов асинхронных электродвигателей серии АИР, что позволяет в численном виде обосновать значения уставок срабатывания технического устройства мониторинга и защиты работы АД. Предложена принципиальная электрическая схема, реализующая описанный выше алгоритм функционирования системы диагностирования и защиты АД.

Ключевые слова: надежность, электромеханическая система, асинхронный электродвигатель, диагностирования, защита, алгоритм функционирования, эксплуатационный режим, перегрузка, допустимое время работы.

DIAGNOSIS BY THE CURRENT AS A PROTECTION METHOD OF ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS

D. Nesterchuk, S. Kurashkin

Summary

The possibility of improving the methodology of diagnosing electromechanical system by the current with asynchronous electric motors is considered. It is grounded that the introduction of a reliable and effective system for diagnosing and protecting induction motors from abnormal modes of operation will reduce the number and timing of emergency situations, extend the electric motors' service life and improve their operational reliability, since the greatest effectiveness ensures diagnosis in the mode of operation with definition of defects in the early stages of development. The existing methods of technical diagnostics of asynchronous electric motors, as the main component of the electromechanical system, are analyzed. The main tasks of diagnosing an electromechanical system with asynchronous electric motors are formulated. The structure of the algorithm for the operation and protection system is presented. The proposed algorithm practical realization is performed on the basis of the electric motor stator current control with using its overloading characteristic. It should be noted the practical significance of determining the mathematical equations' coefficients that describe the overloading characteristics of different types of AIR series asynchronous motors, which allows to justify in numerical form the settings values of the technical devices for monitoring and protecting the induction motors' operation mode. The electric circuit which implements the algorithm of diagnosing system and protecting described above is proposed.

Key words: reliability, electromechanical system, asynchronous electric motor, diagnostics, protection, algorithm of operation, operating mode, overload, permissible working time.