

О.О. Закладний, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2813-3692
В.В. Прокопенко, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-5518-5802
Т.В. Гребенюк, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-9287-2919
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СИСТЕМА ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Діагностування стану електрообладнання при його виготовленні, ремонті та профілактичних перевірках є невід'ємною частиною технологічного процесу. Приладів для діагностування потребують підприємства промислово-енергетичного комплексу, залізничного й морського транспорту, гірничодобувні, збагачувальні й целюлозно-паперові комбінати, ремонтні заводи і т. ін. При серійному й масовому виробництві природним є прагнення максимально автоматизувати виробничий процес, що містить у собі також етап випробування електричних машин. Дослідження показали, що трудомісткість контрольних операцій становить до 15% трудомісткості виготовлення електродвигунів. Середні норми часу на проведення приймально-здавальних випробувань однієї електричної машини середньої потужності складають 3...35 год. Середні норми часу на обробку результатів приймально-здавальних випробувань однієї машини становлять 0,6...4 год. Природно, що така висока трудомісткість проведення випробувань і обробки їх результатів змушує шукати шляхи автоматизації випробувань. Електродвигуни, як правило, розраховані на термін служби 15...20 років без капітального ремонту, за умови правильної їх експлуатації. Під правильною експлуатацією розуміється робота відповідно до номінальних параметрів, зазначених в паспортних даних електродвигуна. Однак на практиці має місце значне відхилення від номінальних режимів експлуатації. Це, передусім, низька якість напруги живлення й порушення правил технічної експлуатації: технологічні перевантаження, умови навколишнього середовища (підвищені вологість, температура), зниження опору ізоляції, порушення охолодження. Наслідком таких відхилень є аварійні режими роботи електродвигунів. У окремих підгалузях промисловості аварійність електродвигунів коливається від 20 до 50% на рік. Вихід з ладу електродвигуна призводить до важких аварій і значних матеріальних збитків через простої обладнання, затрати на усунення наслідків аварій і ремонт електродвигуна, що вийшов з ладу. Ремонт електричної машини потужністю 1 кВт обходиться в 250-300 грн. Щоб оцінити вартість ремонту потужнішої машини, треба помножити цю цифру на потужність двигуна. Крім цього, робота на аварійних режимах призводить до підвищеного енергоспоживання та збільшення споживаної реактивної потужності.

Ключові слова: діагностування, електродвигун, аварійні режими, автоматизація випробувань.

Вступ. На сьогоднішній день існує ряд прикладів реалізації стендів для діагностики електродвигунів при їх виробничому або післяремонтному випробуванні.

Розроблена система діагностування - це програмно-апаратний комплекс, призначений для поточного моніторингу й післяремонтних випробувань, дослідження та аналізу реального стану електромеханічних систем, експериментальної оцінки стану електродвигуна й видачі рекомендацій щодо умов експлуатації діагностованої електричної машини. Система визначає параметри електричних машин без приєднання до них навантажувальних пристроїв. Випробування проводяться при зниженій напрузі.

Система визначає номінальну потужність, частоту обертання, струм, момент, а також активний та індуктивний опори обмоток, електромагнітну сталу часу, електромеханічну сталу часу, швидкість ідеального холостого ходу (синхронну) та момент інерції двигуна [1].

Алгоритм роботи системи діагностування, складається з:

- циклу випробувань, що включає послідовну роботу машини у трьох динамічних режимах – короткого замикання, холостого ходу та вільного вибігу;
- проведення контрольних вимірювань значень струму двигуна, частоти обертання та тривалості режимів короткого замикання, холостого ходу та вільного вибігу;
- обробки результатів тестування за допомогою спеціального математичного апарату й визначення параметрів випробовуваного двигуна;
- формування нового паспорта діагностованої машини.

© О.О. Закладний, В.В. Прокопенко, Т.В. Гребенюк, 2020

Матеріал і результати досліджень. Проведені експерименти й розрахунки показують, що при роботі в межах робочих частин механічних характеристик при зміні напруги двигун постійного струму (ДПС), або при частотному керуванні асинхронний двигун (АД) чи синхронний (СД) можна представити лінійним об'єктом. За цих умов складна система нелінійних рівнянь приводиться до лінійної передатної функції, для чого необхідно апроксимувати експериментальні криві перехідного процесу лінійними диференціальними рівняннями необхідного порядку. Отримані в результаті реальної апроксимації передатні функції електродвигуна з коефіцієнтами в числовому вигляді будуть ураховувати весь набір вихідних параметрів і залежностей системи без додаткових допущень, що призводять до істотної відмінності їх від реального об'єкта. Статичні характеристики, наприклад, ДПС при різних напругах наведені на рис. 1.

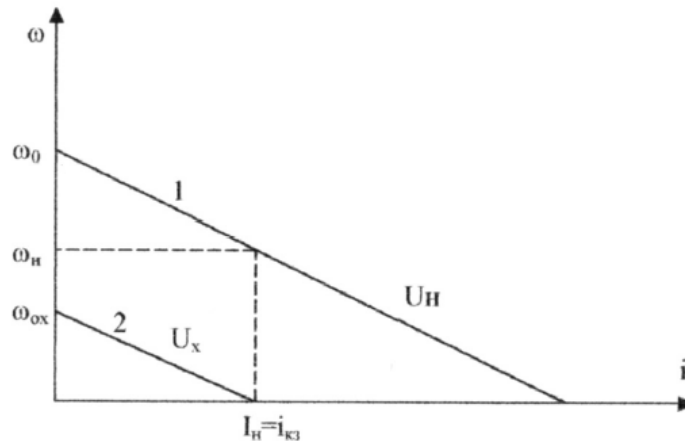


Рисунок 1 - Статичні характеристики ДПС при різних напругах.

Характеристика 1 відповідає номінальній напрузі живлення, а 2 – зниженій. При пуску ротор двигуна почне обертатися лише після того, як його момент стане більшим від статичного. Тому процес пуску складається з двох періодів – режиму короткого замикання та, власне, пуску двигуна [2].

При зазначених вище умовах, електродвигунам в межах робочих напруг притаманна практично стала жорсткість механічних характеристик. Тобто відношення напруги до частоти обертання залишається сталим. Це дозволяє для зменшення струму двигуна проводити режим короткого замикання при низькій напрузі живлення U_x . Доцільно задатися такою напругою, при якій струм короткого замикання буде чисельно дорівнювати номінальному струму $I_{кз} = I_n$.

Для визначення другої точки на характеристиці 2 необхідно провести пуск двигуна в режимі холостого ходу. В результаті знаходимо точку ω_{0x} . Знаючи дві точки, можна побудувати характеристику 2 при напрузі U_x . Щоб отримати значення номінальної частоти обертання ω_n необхідно характеристику 2 підняти вище, пропорційно збільшенню напруги від U_x до U_n . Задаючись струмом $I_{кз} = I_n$, по характеристиці 1 знаходять значення ω_n .

Режим короткого замикання. При досліді короткого замикання на статор подається знижена напруга U_x , ротор загальмовується, а у випадку фазного ротора обмотки шунтуються накоротко на кільцях. Напруга, що подається на статор, повинна бути практично симетричною й номінальної частоти [3].

У процесі тесту одночасно вимірюють напругу, струм статора (лінійний струм $I_{кз}$ короткого замикання), споживану потужність $P_{кз}$ (кВт), початковий пусковий момент (для електродвигунів малої й середньої потужності), а безпосередньо після досліді визначають опір обмотки статора між виводами, що відповідає температурі наприкінці досліді.

Закон зміни струму носить експоненціальний характер (рис. 2)

$$I = I_{кз} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + I_{нач} e^{-\frac{t}{T}}.$$

Методика визначення параметрів двигуна за результатами режиму короткого замикання полягає в наступному:

- осцилографують процес короткого замикання $I(t)$ при зниженій напрузі;
- визначають усталене значення струму $I_{кз} = I_n$, $\frac{U_x}{R} = I_{кз}$;
- електромагнітну сталу якірного (статорного) кола двигуна T визначають за умови, що при $t=T$ струм досягне значення $I = 0,632 I_{кз}$.
- розраховують опір якірного (статорного) кола двигуна $R = U_x / I_{кз}$;
- визначають індуктивність якірного (статорного) кола двигуна $L = TR$;

- визначають тривалість перехідного процесу $t_{\text{пн}}$ і перевіряють величину T ;
- виміряють опір ізоляції обмоток стосовно корпусу машини й між обмотками й опір обмоток при постійному струмі. При цьому опір обмоток відповідає сталій температурі, отриманій при випробуванні на нагрівання. Ця температура досягається автоматично в режимі короткого замикання;
- визначають коефіцієнт трансформації (для двигуна з фазним ротором) як відношення фазних напруг статора і ротора.
- випробують ізоляції обмоток на електричну міцність щодо корпусу машини й між обмотками й на електричну міцність міжвиткової ізоляції обмоток статора й фазного ротора;
- визначають втрати та коефіцієнт потужності короткого замикання $\cos\varphi_{\text{кз}} = P_{\text{кз}} / (U_{\text{кз}} I_{\text{кз}})$.
- початковий пусковий момент визначають розрахунково за обмірюваними втратами $P_{\text{кз}}$ короткого замикання (чисельно рівним потужності, споживаній при дослідженні) $M_{\text{кз}} = P_{\text{кз}} / \omega_0$, де $P_{\text{кз}2} = P_{\text{кз}} - P_{\text{кз}1} - P_{\text{с}}$ - втрати в обмотці ротора при досліді короткого замикання; $P_{\text{кз}1} = I_{\text{кз}}^2 R_1$ - втрати в обмотці статора при досліді короткого замикання; $P_{\text{с}}$ - втрати в сталі з досліді холостого ходу [4].

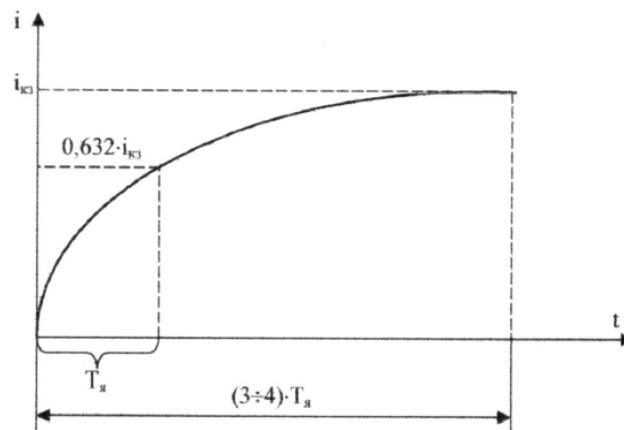


Рисунок 2 - Закон зміни струму

Для графічного зображення результатів досліді короткого замикання відкладають у функції напруги наступні величини: струм короткого замикання $I_{\text{кз}}$, втрати короткого замикання $P_{\text{кз}}$, коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{\text{к}}$ й обертаючий момент при короткому замиканні $M_{\text{кз}}$. Оскільки дослід короткого замикання проводиться при зниженій напрузі, то при визначенні струму й обертаючого моменту, що відповідають номінальній напрузі, необхідно ввести поправку на насичення шляхів потоків розсіювання. Для цього будується залежність струму короткого замикання від напруги. Зростання струму від напруги приймають таким, що йде по дотичній і визначають точку перетину дотичної з віссю абсцис $U_{\text{кз}0}$. Тоді струм короткого замикання при номінальній напрузі $I_{\text{кзн}}$ знаходять за формулою

$$I_{\text{кзн}} = (U_{\text{н}} - U_{\text{кз}0}) I_{\text{кз}} / (U_{\text{кз}} - U_{\text{кз}0}),$$

де $I_{\text{кз}}, U_{\text{кз}}$ - відповідно найбільші струм і напруга, вимірювані в процесі досліді; $U_{\text{н}}$ - номінальна напруга.

Обертовий момент при короткому замиканні, що відповідає номінальній напрузі, називається початковим пусковим обертаючим моментом $M_{\text{кзн}}$

$$M_{\text{кзн}} = (I_{\text{кзн}} / I_{\text{кз}})^2 M_{\text{кз}},$$

де $M_{\text{кз}}$ - обертаючий момент при найбільшій напрузі з досліді короткого замикання.

Початковий пусковий струм і початковий пусковий момент можна також визначити при пуску, а початковий пусковий момент, крім того, вимірюють при зніманні статичної кривої моменту. Величина початкового пускового моменту залежить від відносного положення зубців статора й ротора в момент вимірювання. Тому за величину початкового пускового моменту приймають найменше з отриманих при вимірюваннях його значень [5].

Режим холостого ходу. При прийнятно-здавальних випробуваннях вимірюють струм і втрати холостого ходу лише за номінального значення напруги.

Апроксимуючи криву частоти обертання двигуна диференціальним рівнянням другого порядку, знаходимо перехідну функцію у вигляді

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}} \right),$$

де T_1 і T_2 - фіктивні сталі часу, причому $T_1 > T_2$.

Крива струму також має аперіодичний характер і при пуску з нульовим моментом опору визначається виразом

$$I = I_{\text{кз}} \frac{T_M}{T_1 - T_2} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right),$$

де $T_M = J \frac{R}{C^2}$ - електромеханічна стала двигуна, с; C - конструктивна стала двигуна; J - момент інерції двигуна, кгм²

Тривалість перехідного процесу (рис. 3) пуску двигуна без навантаження визначається більшою сталою часу, тобто T_1 .

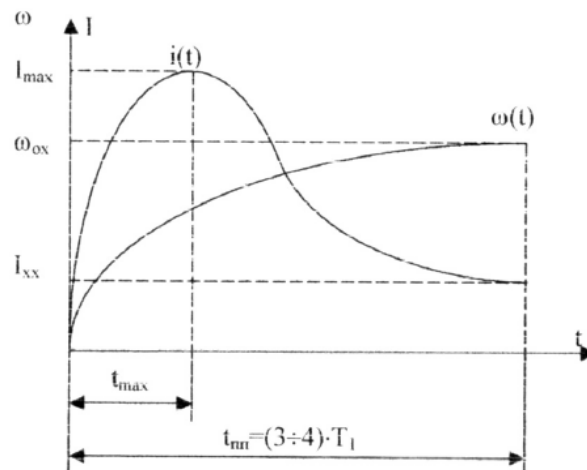


Рисунок 3 - Тривалість перехідного процесу пуску двигуна без навантаження

Методика визначення параметрів двигуна за результатами режиму холостого ходу полягає в наступному:

- осцилографують процес холостого ходу, тобто зміну струму й швидкості в часі при зниженій напрузі;
- визначають сталі значення швидкості ω_{ox} й I_{xx} (струм холостого ходу);
- розраховують конструктивну сталу двигуна $C = U_x / \omega_{ox}$;
- перераховують значення отриманих параметрів на природну характеристику. Визначають величину $\omega_n = \frac{U_n}{C} - \frac{I_n R}{C} = \omega_0 - \frac{I_n R}{C}$;
- визначають тривалість перехідного процесу й знаходять величину T_1 ;
- визначають втрати холостого ходу. Ці випробування роблять у режимі холостого ходу при сталому тепловому стані частин електродвигуна. Оскільки неможливо встановити сталий тепловий стан підшипників безпосереднім вимірюванням їх температури, цього досягають шляхом обертання електродвигуна без навантаження з частотою холостого ходу. При досліді холостого ходу вимірюють лінійну напругу $U_{0л}$ між всіма фазами, частоту мережі, лінійний струм $I_{0л}$ статора в кожній фазі й споживану потужність [6].

Коефіцієнт потужності холостого ходу обчислюється як $\cos\varphi_0 = P_0 / (U_{0л} I_{0л})$.

Результати досліді холостого ходу зазвичай зображують графічно - шляхом побудови залежності втрат P_0 , фазного струму I_0 і коефіцієнта потужності $\cos\varphi_0$ у функції напруги.

У процесі досліді вимірюють лінійні напруги U_n , струм I та споживану з мережі потужність P_1 . За результатами вимірів визначають коефіцієнт потужності та з урахуванням втрат - коефіцієнт корисної дії ККД.

- визначають максимальний обертаючий момент. Максимальний обертаючий момент - один з основних показників АД. Кратність максимального обертаючого моменту й перевищення температури електродвигуна обмежують можливості підвищення потужності двигуна в даному габариті.

Оскільки безпосередній вимір обертаючого моменту потребує зміну навантаження електродвигуна, то максимальний обертаючий момент знайдемо способом визначення кривої обертаючого моменту при пуску за результатами дослідів холостого ходу й короткого замикання.

Цей спосіб використовується зазвичай для знаходження максимального моменту електродвигунів великої потужності, коли здійснити навантаження випробуваного двигуна за допомогою навантажувальної машини не можливо. Для визначення кривої обертаючого моменту випробуваний двигун пускають

вхолосту, а процес пуску записується за допомогою ЕОМ. Основні труднощі проведення цього дослідження - короткочасність періоду пуску. Для подовження часу пуску необхідно збільшити момент інерції випробуваного двигуна, з'єднуючи його з іншою електричною машиною, ротор якої служить додатковою маховою масою, або з важким маховиком. В запропонованій методиці застосовується зниження напруги, що підводиться до випробуваного двигуна [7].

Зазвичай фіксується кутове прискорення, пропорційне обертаючому моменту. При цьому виникають наступні труднощі. Прискорення в процесі пуску змінюється внаслідок залежності пускового струму у функції ковзання, тому отримані значення обертаючого моменту перелічуються на номінальну напругу пропорційна квадрату напруги.

Крім того, на початкову частину процесу пуску спотворюваний вплив роблять перехідні процеси при включенні, а на машини з підшипниками ковзання - ще й високе значення їхнього початкового моменту тертя. Для усунення впливів, що спотворюють, застосовується попереднє обертання випробувального двигуна в протилежному напрямку. Змінюючи чергування фаз, двигун реверсує і записують криву обертаючих моментів. Масштаб моменту визначається за значенням початкового пускового моменту, одержаного з дослід короткого замикання. При реверсуванні початковий пусковий момент відповідає частоті обертання, що дорівнює нулю [8].

При визначенні максимального обертаючого моменту знаходять відповідному цьому моменту ковзання з застосуванням тахометра.

- визначають мінімальний обертаючий момент. Точне визначення величини мінімального обертаючого моменту АД має важливе значення, тому що зниження його нижче припустимого з стандарту може привести до "застрявання" електродвигуна на малій частоті обертання при пуску під навантаженням. Такий режим роботи близький до режиму короткого замикання і є аварійним.

Мінімальний обертаючий момент визначається із кривої обертаючого моменту, знятої у процесі пуску.

Режим вільного вибігу полягає у відімкненні двигуна від мережі. Електромагнітний момент двигуна в цьому випадку дорівнює нулю, і гальмуватися він буде під дією сил тертя (рис. 4).

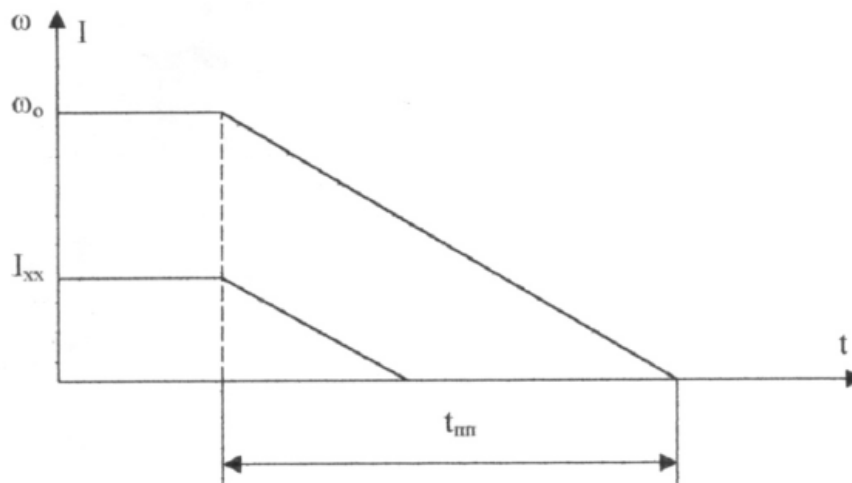


Рисунок 4 - Електромагнітний момент двигуна у режимі вільного вибігу

Методика визначення параметрів двигуна за результатами режиму вільного вибігу полягає в наступному:

- осцилографують процес вільного вибігу $\omega(t)$ при зниженій напрузі;
- визначають тривалість перехідного процесу;
- розраховують момент інерції J , електромеханічну сталу двигуна T_m , сталі T_1 і T_2 , максимальне значення струму I_{max} і час t_{max} .

Момент інерції двигуна можна визначити з рівняння руху

$$J = M \frac{t_{im}}{\omega_0} = \frac{U_x I_{xx} t_{im}}{\omega_0^2},$$

де M – електромагнітний момент двигуна в початковий момент гальмування.

Знаючи момент інерції, знаходять електромеханічну сталу двигуна T_m

Зв'язок між сталими часу визначається з виразів

$$T_m = T_1 + T_2; T_m T_{я} = T_1 T_2.$$

Знаючи T_1 і T_2 , можна знайти максимальне значення струму

$$I_{\max} = I_{\text{кз}} \frac{T_{\text{м}}}{T_2} \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{-\frac{T_1}{T_1 - T_2}},$$

і час, при якому струм досягає максимального значення

$$t_{\max} = \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \frac{T_1}{T_2}.$$

Після виконання усіх трьох режимів встановлюється наступний двигун. Одночасно контролер передає масив записаних даних в ЕОМ, яка їх обробляє та виводить на дисплей чи пристрій друку. Якщо отримані параметри двигуна, що випробовується, не виходять за допустимі межі, то це означає, що двигун пройшов прийнятно-здавальні випробування.

Номинальними показниками АД, значення яких установлені в паспортних даних або технічних умовах, є: ККД η , коефіцієнт потужності $\cos\phi_0$, максимальний момент $M_{\text{м}}$, а для двигунів з короткозамкненим ротором, крім того, початковий пусковий момент $M_{\text{п}}$ і початковий пусковий струм $i_{\text{п}}$.

Області на параметри електродвигунів ($i_0, i_{\text{к}}, P_0$ і $P_{\text{к}}$), розраховані за номінальними даними з урахуванням допусків, дозволяють здійснити контроль номінальних параметри електродвигунів за результатами прийнятно-здавальних випробувань.

З цією метою за результатами діагностування необхідно нанести в координатах i_0 - $i_{\text{к}}$; p_0 - $p_{\text{к}}$; $i_{\text{к}}$ - $p_{\text{к}}$ точки відповідні отриманим значенням параметрів прийнятно-здавальних випробувань. Розташування точок усередині всіх припустимих областей свідчить про відповідність номінальних даних випробуваного двигуна вимогам технічних умов з урахуванням допусків згідно з Держстандартом. Якщо хоч одна точка виходить за межі однієї із областей, це свідчить про те, що принаймні по одному номінальному параметру електродвигун не задовольняє необхідним вимогам.

За положеннями точок у областях (у тому випадку, якщо вони виявилися усередині областей) можна також одержати уявлення про величину номінальних даних випробуваного двигуна.

Для контролю, діагностування й аналізу зміни номінальних параметрів АД пропонується використати автоматизовану випробувально-діагностувальну систему із застосуванням ЕОМ, схема якої показана на рис.5.

Алгоритм контролю номінальних показників АД з короткозамкненим ротором на даній схемі представлений за значеннями струмів і втрат холостого ходу й короткого замикання ($i_0, p_0, i_{\text{к}}, p_{\text{к}}$).

Методика діагностування причин відхилень струмів і втрат холостого ходу й короткого замикання в процесі виробництва АД зводиться до визначення напрямків зсувів точок у припустимих зонах.

Цифрове вимірювання струмів і втрат холостого ходу й короткого замикання здійснюється за наведеною методикою. Відповідні канали перетворення вимірювальної системи побудовані на аналогових інтегруючих перетворювачах змінного струму й потужності трифазного кола з уніфікованими вихідними сигналами постійного струму (0...5 мА).

Дана система має 7 основних етапів випробувань АД. На першому етапі випробувань контролюється обрив фаз, а на другому - опори ізоляції обмоток щодо корпусу двигуна й між обмотками. На третьому і четвертому здійснюються випробування міжвиткової ізоляції обмоток на електричну міцність. На п'ятому електродвигуни випробовуються у режимах холостого ходу й короткого замикання. Шостий етап призначено для випробувань ізоляції обмоток щодо корпусу й між обмотками на електричну міцність, а сьомий - для вібраційних тестувань.

Під час випробувань на етапах 1-4, 6 і 7 блок порівняння видає негативний результат, якщо на відповідному етапі електродвигун не витримує випробування, якщо витримує - позитивний.

При випробуваннях АД на 5-му етапі в режимах холостого ходу й короткого замикання вимірюються струми й втрати.

Діагностування й відбраковування АД здійснюються шляхом обробки результатів вимірювань параметрів холостого ходу й короткого замикання випробуваних двигунів по алгоритму наведеному на рис.7.3.

Далі обробкою результатів вимірювань параметрів холостого ходу й короткого замикання придатних АД здійснюють їхній статичний аналіз.

Для кожного придатного АД оформляють протокол випробувань з реквізитами двигуна.

Удосконалення алгоритму функціонування в програмі ЕОМ спрямовано на забезпечення цифрового програмного керування роботою вимірювального комплексу й на використання додаткових процедур контрольно-вимірювальної, досліджувальної й діагностичної роботи для підвищення достовірності контролю параметрів і діагностування АД.

Пристрій визначає номінальні параметри двигуна:

- номінальну потужність;
- номінальну частоту обертання;

- номінальний струм;
- номінальний момент;
- внутрішні параметри:
- активний та індуктивний опори якоря;
- електромагнітну сталу часу;
- сталу двигуна;
- електромагнітну сталу часу;
- швидкість ідеального холостого ходу двигуна;
- момент інерції двигуна.

Тестування механічних і робочих характеристик проводять у процесі розгону електродвигуна. При цьому опір обмоток відповідає сталій температурі, отриманій при випробуванні на нагрівання. Ця температура досягається автоматично в режимі короткого замикання.

Експеримент, проведений з кількома двигунами ДК90-250-12М показав, що:

- для режиму короткого замикання $i_{кз}=I_n=2,2$ А; $t_{пп}=0,03$ с; $T_я=7,52 \cdot 10^{-3}$ с; $R_я=24$ Ом; $L_я=0,181$ Гн;
- для режиму холостого ходу $I_{хх}=0,5$ А; $\omega_{0х}=345,6$ с⁻¹; $t_{пп}=1,6$ с; $T_1=0,89$ с; $C_d=0,153$; $\omega_n=1091,52$ с⁻¹;
- для режиму вільного вибігу $t_{пп}=1$ с; $J=8,78 \cdot 10^{-4}$ кгм²; $T_m=0,9$ с; $T_1=0,892$ с; $T_2=7,587 \cdot 10^{-3}$ с;

$I_{max}=1,0$ А; $t_{max}=0,566$ с.

Електронно-обчислювальна машина (ЕОМ) відповідно до записаної програми здійснює керування процесом досліджень, переводить випробуваний електродвигун у різні досліджувані режими, комує вимірювачі, приймає інформацію від вимірювачів електричних і неелектричних величин, здійснює необхідні обчислення й видає оброблену інформацію на друк. Вимірювач електричних величин посилає через відповідні блоки ЕОМ миттєві значення вимірюваних величин через однакові проміжки часу з великою частотою. В ЕОМ ці дані обробляються й видаються на друкувальний пристрій або графобудівник. Для побудови кривих використовуються діючі значення обмірюваних електричних величин.

Процес автоматизації випробувань проводиться у два етапи. Мета першого етапу - підвищення точності визначення характеристик електродвигунів і скорочення малопродуктивної праці. На цьому етапі проводять випробування електродвигунів на нагрівання й визначають опору обмоток при постійному струмі й у холодному стані, характеристики холостого ходу, робочі, короткого замикання й механічну, а також імовірність безвідмовної роботи.

На другому етапі операції зняття показань приладів замінені обробкою інформації на міні-ЕОМ.

Блок вимірюваних величин містить набір однотипних блоків первинної реєстрації даних – давачів напруги (ДН) і струму (ДС), аналого-цифровий перетворювач (АЦП) та загальну шину даних. Масштабування сигналів виконується датчиками вимірюваних величин і вхідними подільниками, на виході яких включені фільтри, а далі - АЦП з гальванічною розв'язкою. На виході АЦП формується 11- розрядний код вимірюваної величини зі старшим знаковим розрядом. За допомогою буферного регістру 11 - розрядний код поступає на спільну шину даних.

Обчислювальний комплекс проводить необхідні обчислення згідно заданого алгоритму випробувань. Для збільшення швидкодії процесу вимірювання використано принцип прямого доступу до пам'яті, який реалізовано за допомогою спеціального контролера, який забезпечує синхронізацію пристроїв первинного збору інформації і ОЗУ. Після занесення в контролер початкових умов (адреси областей ОЗУ, числа вимірювань) він може працювати в автономному режимі, приймаючи на себе управління шиною адреси і даних.

Після закінчення процесу вимірювання система управління повертається у вихідний стан, що дозволяє обчислювальному комплексу перейти до обчислення за підпрограмами попередньої обробки даних та передати масив даних до периферійних пристроїв. Мініміально можливий час вимірювання визначається продуктивністю обчислювального комплексу, часом звернення до пам'яті і часом перетворення АЦП.

Випробування електродвигунів в статичному і динамічному режимах виконуються за допомогою послідовного, через рівні проміжки часу, занесення в оперативну пам'ять обчислювального комплексу контрольованих параметрів (ω , I , U) з подальшою обробкою результатів вимірювань. При цьому обчислювальний комплекс отримує необхідну інформацію від системи вимірювальних датчиків та виробляє управляючі впливи для наступного кроку вимірювання. В пам'ять автоматизованої системи вводиться програма реалізації алгоритму вимірювання і програма обробки результатів. Результатом циклу вимірювання буде масив даних, з яких після відповідної обробки можна виділити значення струмів, напруги і частоти обертання двигуна.

Висновки. Стенд є універсальним, оскільки дозволяє проводити випробування електродвигунів змінного струму (асинхронних і синхронних) та двигунів постійного струму. Система діагностування визначає параметри електричних машин без сполучення їх з навантажувальними пристроями та проводить випробування при зниженій напрузі живлення. Для цього цикл випробувань складається з послідовної роботи машини у трьох динамічних режимах – короткого замикання, холостого ходу та вільного вибігу.

Розроблена система діагностування електричних машин дозволяє одержати достовірні результати випробувань, прискорити проведення контрольних вимірювань і підвищити продуктивність праці. ЕОМ використовується не лише для обробки результатів випробувань, але й при керуванні процесом випробувань, статистичному контролю й аналізі результатів випробувань (не лише при вибіркового, але й при суцільному контролі).

Список використаної літератури

1. Ермолаев С.А. Эксплуатация энергооборудования в сельском хозяйстве / С.А. Ермолаев, Е.П. Масюткин, В.Ф. Яковлев. – Киев: Фирма “Инкос”, 2005. – 670 с.
2. И. Я. Браславский. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З.И. Ишматов, В.Н. Поляков. – Москва, Асадема 2004, 256 с.
3. Закладний О.М. Електропривод: навч. посіб. / О.М. Закладний, В.В. Прокопенко, О.О. Закладний. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 316 с
4. П.В. Тютёва Оценка стоимости асинхронных двигателей при изменении геометрии поперечного сечения / П.В. Тютёва, О.О. Муравлева // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316. № 4, с.183-186
5. Д.И. Родькин. Системы динамического нагружения и двагностики электродвигателей при послеремонтных испытаниях / Д.И. Родькин – М.: недра, 1992. – 236 с.
6. Закладний О.О. Методика функціонального діагностування енергоефективності асинхронного електропривода. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2013. №1, с. 79-84.
7. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников; под ред. Л.Г. Мамиконянца. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
8. Котеленец Н.Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: Учебник для вузов / Н.Ф. Котеленец, Н.А. Акимова, М.В. Антонов. – М.: Издательский центр “Академия”, 2003. – 384 с.

O. Zakladnyi, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0003-2813-3692
V. Prokopenko Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., **ORCID** 0000-0002-5518-5802
T. Hrebenuk, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.; **ORCID** 0000-0002-9287-2919
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

TECHNICAL DIAGNOSTIC SYSTEM FOR ELECTRIC MOTOR TESTS

Diagnosing the condition of electrical equipment during its manufacture, repair and preventive inspections is an integral part of the technological process. Devices for diagnostics are required by enterprises of the industrial and energy complex, railway and sea transport, mining, concentrating and pulp and paper mills, repair plants, etc.

In serial and mass production, the desire to automate the production process as much as possible is natural, which also includes the stage of testing electric machines. Studies have shown that the complexity of control operations is up to 15% of the complexity of the manufacture of electric motors. The average time norms for conducting acceptance tests of one electric machine of average power make 3 ... 35 hours. The average time for processing the results of acceptance tests of one machine is 0.6 ... 4 hours. Naturally, such a high complexity of testing and processing their results makes us look for ways to automate testing.

Electric motors are usually designed for a service life of 15... 20 years without major repairs, provided they are properly operated. Proper operation means operation in accordance with the nominal parameters specified in the passport data of the motor. However, in practice there is a significant deviation from the nominal modes of operation. These are, first of all, low quality of supply voltage and violation of rules of technical operation: technological overloads, environmental conditions (the raised humidity, temperature), decrease in resistance of isolation, cooling disturbance.

The consequence of such deviations are emergency modes of operation of electric motors. In some subsectors of industry, the accident rate of electric motors ranges from 20 to 50% per year. Failure of the electric motor leads to severe accidents and significant material damage due to downtime, the cost of repairing the consequences of accidents and repair of the failed electric motor. Repair of an electric car with a capacity of 1 kW costs 250-300 UAH. To estimate the cost of repairing a more powerful machine, you need to multiply this figure by the engine power. In addition, operation in emergency modes leads to increased power consumption and increased reactive power consumption.

Keywords: *diagnostics, electric motor, emergency modes, test automation.*

REFERENCES

1. Ermolaev S.A. Operation of power in agriculture / S.A. Ermolaev, E.P. Masyutkyn, V.F. Yakovlev. – Kiev: Fyrma “Ynkos”, 2005. – 670 p.
2. Y. Ya. Braslavskyy. Energy-saving asynchronous electric drive/ Y. Ya. Braslavskyy, Z.Y. Yshmatov, V.N. Polyakov. – Moskva, Academia 2004, 256 p.
3. Zakladnyi O.M. Electric drive: teach. guidance / O.M. Zakladnyi, V.V. Prokopenko, O.O. Zakladnyi. –K.: NTUU «KPI», 2007. – 316 p.
4. P.V. Tyuteva. Valuation of asynchronous motors when changing the cross-sectional geometry / P.V. Tyuteva, O.O. Muravleva // Yzvestyya Tomskoho polytekhnicheskoho unyversyteta. 2010. V. 316. # 4, p.183-186
5. D.Y. Rod'kyn. Systems of dynamic loading and diagnostics of electric motors with post-repair tests / D.Y. Rod'kyn – M.: Nedra, 1992. – 236 p.
6. Zakladnyi O.O. Methods of functional diagnostics asynchronous electric energy. Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya. 2013. #1, p. 79-84.
7. Syromyatnykov Y.A. Modes of operation of asynchronous and synchronous motors / Y.A. Syromyatnykov; edited by L.H. Mamykonyantsa. – 4th ed. revised and enlarged. – M.: Energoatomisdat, 1984. – 240 p.
8. N.F. Kotelenets, N.A. Akimova, and M.V. Antonov, Tests, operation and repair of electric machines: Textbook for high schools, Moscow, Russia: Publishing Center "Academy", 2003.

Надійшла 17.07.2020

Received 17.07.2020