

## МЕТОДИКА ПРИСКОРОНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

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, несприятливі 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 тяжких аварій і значних матеріальних збитків через простої обладнання, затрати на ремонт і усунення наслідків аварій. 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.

На сьогоднішній день існують приклади реалізації засобів діагностики електродвигунів при їх виробничому або післяремонтному випробуванні [1, 2, 3]. Дослідження показали, що трудомісткість контрольних операцій становить до 15% трудомісткості виготовлення електродвигунів. Природно, що така висока трудомісткість проведення випробувань і обробки їх результатів змушує шукати шляхи її зниження.

Пропонована методика прискороного діагностування визначає параметри асинхронних двигунів (АД) без сполучення їх з навантажувальними пристроями, що значно знижує трудомісткість випробувань і скорочує час їх проведення [4].

Методика дозволяє визначити номінальні параметри двигуна, значення яких установлені в паспортних даних або технічних умовах (потужність, частоту обертання, струм, ККД, коефіцієнт потужності, максимальний момент  $M_{\max}$ , момент інерції двигуна  $J$ , а для двигунів з короткозамкненим ротором, крім того, початковий пусковий момент  $M_{\text{п}}$  і початковий пусковий струм  $I_{\text{п}}$ ), а також внутрішні і додаткові параметри (активні та індуктивні опори обмоток, струми і втрати короткого замикання й холостого ходу і т. ін.).

Алгоритм діагностування за даною методикою, складається з:

- контролю обриву фаз та опорів ізоляції між обмотками і корпусом двигуна;
- циклу випробувань, що включає послідовну роботу машини у трьох динамічних режимах

– короткого замикання, холостого ходу та вільного вибігу;

- вимірювання значень струму двигуна, напруги, споживаної потужності, частоти обертання й тривалості режимів короткого замикання, холостого ходу і вільного вибігу;
- обробки результатів тестування, визначення параметрів випробуваного двигуна і порівняння їх з технічними умовами;
- формування паспорта діагностованої машини.

Проведені експерименти й розрахунки показують, що при роботі в межах робочих частин механічних характеристик при частотному керуванні АД 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, наприклад, другого порядку. Отримані в результаті апроксимації передатні функції двигуна з коефіцієнтами в числовому вигляді будуть ураховувати весь набір вихідних даних і залежностей системи без додаткових допущень, що призводять до істотної відмінності їх від параметрів реального об'єкта.

При зазначених умовах, АД 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. Доцільно задатися такими параметрами джерела живлення, при яких струм короткого замикання буде чисельно дорівнювати номінальному струму  $I_{кз} = I_n$ .

**Режим короткого замикання.** При досліді короткого замикання на статор подається знижена напруга, ротор загальмовується, а у випадку фазного ротора обмотки шунтуються накоротко на кільцях.

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

Закон зміни струму носить експоненціальний характер

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

Визначення параметрів двигуна за результатами режиму короткого замикання полягає в наступному:

- контролюють обрив фаз, опори ізоляції обмоток щодо корпусу двигуна й між обмотками;
- випробовують міжвиткову ізоляцію обмоток, ізоляцію обмоток щодо корпусу й між собою на електричну міцність;
- записують процес короткого замикання  $I(t)$  при зниженій напрузі (рис. 1);
- визначають усталене значення струму  $I_{кз} = I_{ст}, \frac{U_x}{R} = I_{кз}$ ;
- визначають електромагнітну сталу статорного кола двигуна  $T$  за умови, що при  $t=T$  струм досягне значення  $I=0,632I_{кз}$ ;
- розраховують опір статорного кола двигуна  $R = U_x / I_{кз}$ ;
- визначають індуктивність статорного кола двигуна  $L = TR$ ;
- визначають тривалість перехідного процесу  $t_{ин}$  і перевіряють величину  $T$ ;
- вимірюють опори обмоток при постійному струмі і порівнюють їх значення з розрахунковими. При цьому вимірюваний опір обмоток відповідає сталій температурі, отриманій при випробуванні на нагрівання. Ця температура встановлюється автоматично в режимі короткого замикання;
- визначають коефіцієнт трансформації (для двигуна з фазним ротором) як відношення фазних напруг статора і ротора;
- визначають втрати та коефіцієнт потужності короткого замикання

$$\cos\phi_{кз} = P_{кз} / (U_{кз} I_{кз});$$

- визначають початковий пусковий момент розрахунково за обмірюваними втратами короткого замикання  $P_{кз}$  (чисельно рівними потужності, споживаній при дослідженні)

$$M_{кз} = P_{кз} / \omega_0,$$

де  $P_{\text{кз}} = P_{\text{кз}} - P_{\text{кз1}} - P_{\text{с}}$ ,  $P_{\text{кз1}} = I_{\text{кз}}^2 R_1$  – відповідно втрати в обмотках ротора і статора з досліду короткого замикання;

$P_{\text{с}}$  - втрати в сталі з досліду холостого ходу.

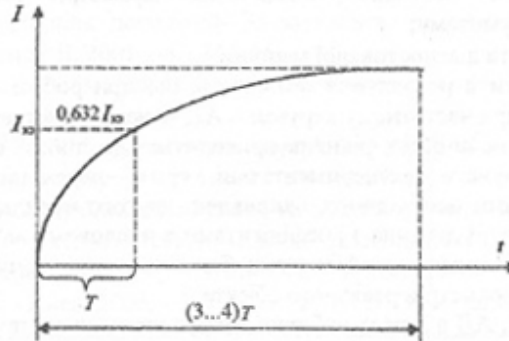


Рис. 1

Для графічного зображення результатів досліду короткого замикання відкладають у функції напруги такі величини: струм короткого замикання  $I_{\text{кз}}$ , втрати короткого замикання  $P_{\text{кз}}$ , коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_{\text{кз}}$  й обертальний момент при короткому замиканні  $M_{\text{кз}}$ . Оскільки дослід короткого замикання проводиться при зниженій напрузі, то при визначенні струму й обертального 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  $U_{\text{кз0}}$ . Струм короткого замикання при номінальній напрузі  $I_{\text{кзн}}$  знаходять за формулою:

$$I_{\text{кзн}} = (U_{\text{н}} - U_{\text{кз0}}) I_{\text{кз}} / (U_{\text{кз}} - U_{\text{кз0}}),$$

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

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

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

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

Початковий пусковий струм і початковий пусковий момент можна також визначити під час 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 його вимірюваннях значень.

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:

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

де  $T_{\text{м}} = J \frac{R}{C^2}$  - електромеханічна стала двигуна;

$C$  - конструктивна стала двигуна;

$J$  - момент інерції двигуна.

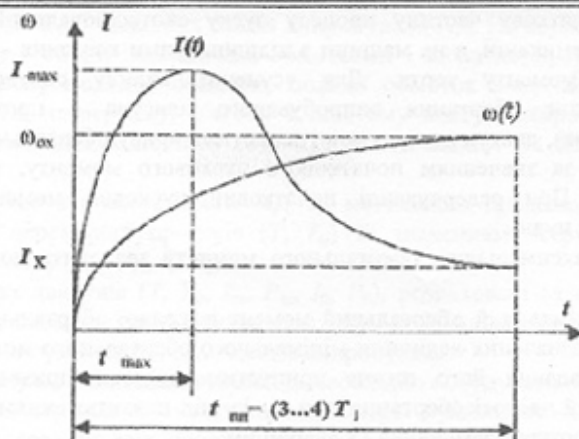


Рис. 2

Визначення параметрів двигуна за результатами режиму холостого ходу полягає в наступному:

- записують процес холостого ходу, тобто зміну струму й швидкості в часі (рис.2);
- визначають сталі значення швидкості  $\omega_0$  й струму холостого ходу  $I_{0x}$ ;
- розраховують конструктивну сталу двигуна  $C = U_n / \omega_0$ ;
- знаходять величину номінальної швидкості  $\omega_n = \frac{U_n}{C} - \frac{I_n R}{C} = \omega_0 - \frac{I_n R}{C}$ ;
- визначають тривалість перехідного процесу й знаходять величину  $T_1$ ;
- визначають втрати холостого ходу. Ці випробування здійснюють у режимі холостого ходу при сталому тепловому стані двигуна. 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  $U_{0x}$  між всіма фазами, лінійний струм  $I_{0x}$  статора в кожній фазі й споживану з мережі потужність  $P_1$ . За результатами вимірювань визначають коефіцієнт потужності та з урахуванням втрат - коефіцієнт корисної дії ККД.

Коефіцієнт потужності в режимі холостого ходу обчислюється як

$$\cos \varphi_0 = P_0 / (U_{0x} I_{0x}).$$

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

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

Оскільки безпосереднє вимірювання обертального моменту потребує зміни навантаження електродвигуна, що неможливо, то максимальний обертальний момент знайдемо способом визначення кривої обертального моменту при пуску за результатами дослідів холостого ходу й короткого замикання.

Цей спосіб зазвичай використовується для знаходження максимального моменту електродвигунів великої потужності, коли здійснити навантаження випробуваного двигуна за допомогою навантажувальної машини неможливо. Для визначення кривої обертального моменту випробуваний двигун пускають без навантаження, а процес пуску записується. Основні труднощі проведення цього досліді - короткочасність періоду пуску. Для подовження часу пуску необхідно збільшити момент інерції випробуваного двигуна, сполучаючи його з іншою електричною машиною, ротор якої служить додатковою маховою масою, або з маховиком. У запропонованій методиці, замість механічного сполучення з навантаженням, застосовується зниження напруги, що підводиться до випробуваного двигуна.

При цьому фіксується кутове прискорення, пропорційне обертальному моменту. В цьому випадку виникають деякі труднощі. Прискорення в процесі пуску змінюється внаслідок залежності пускового струму у функції ковзання, тому отримані значення обертального моменту перераховуються на номінальну напругу пропорційно квадрату напруги.

Крім того, на початкову частину процесу пуску спотворювальний вплив спричиняють перехідні процеси при вмиканні, а на машини з підшипниками ковзання - ще й високе значення їхнього початкового моменту тертя. Для усунення впливу спотворювальних чинників застосовується попереднє обертання випробуваного двигуна в протилежному напрямку. Змінюючи чергування фаз, двигун реверсують і записують криву обертальних моментів. Масштаб моменту визначається за значенням початкового пускового моменту, одержаного з досліду короткого замикання. При реверсуванні початковий пусковий момент відповідає частоті обертання, що дорівнює нулю.

При визначенні максимального обертального моменту знаходять ковзання, яке відповідає цьому моменту;

- визначають мінімальний обертальний момент із кривої обертального моменту, знятої в процесі пуску. Точне визначення величини мінімального обертального моменту АД має важливе значення, оскільки спадання його нижче припустимого може призвести до "застрягання" електродвигуна на малій частоті обертання при пуску під навантаженням. Такий режим роботи близький до режиму короткого замикання і є аварійним.

Режим вільного вибігу полягає у відімкненні двигуна від мережі. Обертальний момент двигуна в цьому випадку дорівнює нулю, і гальмування відбувається під дією сил тертя.

Визначення параметрів двигуна за результатами режиму вільного вибігу полягає в наступному:

- записують процес вільного вибігу  $\omega(t)$  (рис. 3);
- 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  $t_{\max}$ .

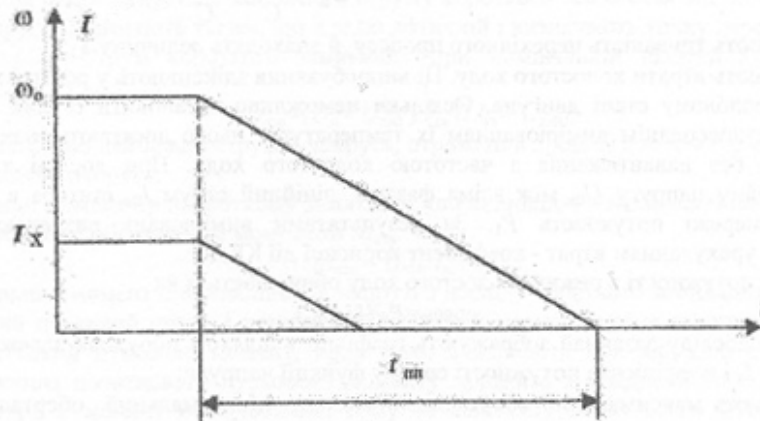


Рис. 3

Момент інерції двигуна визначається з рівняння руху:

$$J = M \frac{t_{\text{об}}}{\omega_0} = \frac{U_x I_{\text{хх}} t_{\text{об}}}{\omega_0^2},$$

де  $M$  – обертальний момент двигуна в початковий момент гальмування.

Знаючи момент інерції, знаходять електромеханічну сталу двигуна  $T_m$ .

Зв'язок між сталими часу визначається з виразів:

$$T_m = T_1 + T_2; \quad T_m T = T_1 T_2.$$

Знаючи  $T_1$  і  $T_2$ , можна знайти максимальне значення струму:

$$I_{\max} = I_{\text{хх}} \frac{T_m}{T_2} \left( \frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{T_1}{T_1 - T_2}},$$

і час, за який струм досягає максимального значення:

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

Ця методика передбачає 7 основних етапів випробувань АД. На першому етапі контролюють обрив фаз, на другому - опори ізоляції між обмотками і щодо корпусу двигуна. На третьому випробовують міжвиткову ізоляцію обмоток, ізоляції обмоток щодо корпусу й між ними на електричну міцність. На четвертому, п'ятому і шостому двигун випробовується відповідно у режимах короткого замикання, холостого ходу й вільного вибігу. На сьомому етапі виконують вібраційні тестування.

Результати контролю діагностованого АД за методикою представляються номінальними даними, параметрами перехідних процесів ( $T$ ,  $T_m$ ) та значеннями струмів і втрат короткого замикання й холостого ходу ( $I_{кз}$ ,  $P_{кз}$ ,  $I_0$ ,  $P_0$ ).

Межі на параметри двигунів ( $T$ ,  $T_m$ ,  $I_{кз}$ ,  $P_{кз}$ ,  $I_0$ ,  $P_0$ ), розраховані за номінальними даними з урахуванням допусків, дозволяють здійснити контроль номінальних параметрів діагностованих двигунів за результатами прийнятно-здавальних випробувань.

З цією метою за результатами діагностування необхідно побудувати в координатах  $T$ - $T_m$ ,  $I_{кз}$ - $I_0$ ,  $P_{кз}$ - $P_0$  точки, відповідні отриманим значенням параметрів прийнятно-здавальних випробувань. Розташування точок усередині всіх припустимих меж 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 меж, - це свідчить про те, що принаймні за одним номінальним параметром електродвигун не задовольняє необхідним вимогам.

За положеннями точок у межах (у тому разі, якщо вони виявилися усередині) можна також одержати уявлення про величини реальних номінальних даних і решту ресурсу випробуваного двигуна. Аналіз причин відхилень струмів і втрат холостого ходу й короткого замикання АД зводиться до визначення напрямків зсувів точок у припустимих зонах.

Діагностування й відбраковування АД здійснюються шляхом обробки результатів вимірювань параметрів випробуваних двигунів за наведеною програмою. Якщо отримані параметри двигуна, що випробовується, не виходять за допустимі межі, це означає, що двигун пройшов прийнятно-здавальні випробування. Для кожного придатного АД оформляють протокол випробувань з реквізитами двигуна. Далі здійснюють статистичний аналіз придатних АД.

#### Висновки

1. Методика діагностування визначає параметри АД без сполучення їх з навантажувальними пристроями. Для цього цикл випробувань складається з послідовної роботи машини у трьох динамічних режимах - короткого замикання, холостого ходу та вільного вибігу. Це значно знижує трудомісткість випробувань і дає змогу проводити прискорені випробування двигунів на стадії їх виробництва та післяремонтного діагностування.
2. Методика дозволяє одержати уявлення про величини реальних номінальних даних і решту ресурсу випробуваного двигуна.

#### Література

1. Чорний О.П., Курбанова І.Г. Комп'ютеризовані комплекси для діагностики машин // ЕЛЕКТРОінформ. - 2004. - №1. - С.19-22.
2. Черный А.П., Луговой А.В., Максимов М.Н., Родькин Д.И., Сисюк Г.Ю. Эксплуатационная надежность электрических двигателей переменного тока и пути ее повышения // Проблемы створення нових машин і технологій: Наук. праці КДПУ. - Кременчук: КДПУ, 2000. - Вип. 1(8). - С.150-156.
3. Луговой А.В., Родькін Д.Й. Випробувальний комплекс для діагностики електричних машин // ЕЛЕКТРОінформ. - 2001. - №1. - С.14-16.
4. Закладний О.М., Алтухов Є.І., Прядко С.Л., Смоляр В.Г. Пристрій для прискореного випробування колекторних машин // Вісник НТУУ "КПІ", серія "Гірництво", - 2000. Вип. 3. - С. 37-41.