

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ MONITORING, DIAGNOSIS AND MANAGEMENT OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT

УДК 621.873-83(082)

DOI 10.20535/1813-5420.1.2022.259240

О.О. Закладний, канд. техн. наук, доцент, ORCID: 0000-0003-2813-3692
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИЗНАЧЕННЯ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ЗАСОБАМИ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ ЇХ СТАНУ

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 550-700 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 спожитої реактивної потужності.

Одним із перспективних видів захисту від аварійних режимів є застосування сучасних систем діагностування із функцією моніторингу за ознаками аварійних режимів. Тому актуальною задачею є усунення недоліків пристроїв захисту шляхом використання сучасних інтелектуальних систем діагностування їх стану.

Завдання полягає у визначенні сукупності діагностичних ознак аварійних електричних режимів асинхронних електродвигунів для застосування цих ознак в системах функціонального діагностування енергетичного і технічного стану двигуна і збільшення достовірності встановлення характерних видів ушкоджень.

У статті розглянуто сукупність ознак аварійних електричних режимів для різних видів ушкоджень асинхронних двигунів. Ці ознаки можуть бути використані в сучасних системах діагностування енергоефективності та технічного стану електромеханічних систем, які можуть також виконувати функцію захисту електродвигунів від аварійних режимів.

Ключові слова: діагностування, електродвигун, аварійні режими, короткі замикання.

Вступ. Значна частина промислових установок і механізмів на підприємствах України експлуатуються з перевищенням установленого строку служби, що призводить до їх високої аварійності та виходу з ладу асинхронних двигунів (АД) [1]. Аварії поділяються на технологічні – близько 35%, експлуатаційні (головним чином незадовільний захист АД) – 50% та конструкційні – 15% [2].

Щороку виходять з ладу до 20% АД у машинобудівній промисловості, 30% - у гірничовидобувній, 15% - у металургійній, 55% - у будівництві, 20% - у машинобудуванні, 10 -15% - у хімічній [3].

Експлуатація установок і механізмів з АД, яка супроводжується численними ремонтами, призводить до того, що на підприємствах використовується асинхронні електроприводи, реальні

енергетичні показники якого значно нижчі декларованих виробником, а середній строк служби двигунів не перевищує 5-7 років.

Аварії електродвигунів поділяються на два основних типи: механічні та електричні. До механічних належать: деформація або поломка валу ротора, ослаблення кріплення осердя статора до станини, ослаблення обпресування осердя ротора, виплавляння бабіту в підшипниках ковзання, руйнування сепаратора, кільця або кульок у підшипниках кочення, поломка крильчатки, відкладення пилу й бруду в рухомих елементах тощо [1].

Причиною більшості механічних аварій є радіальна вібрація через асиметрію мережі живлення, механічні перевантаження на валу електродвигуна, виробничий брак комплектуючих елементів або неакуратне складання. До 10% всіх аварій електродвигунів мають механічне походження. З них 8% складає частка аварій, пов'язаних з асиметрією фаз, і лише 2% - аварії, пов'язані з механічним перевантаженням. Частка аварій, пов'язаних з браком є незначною, тому її можна не брати до уваги. На сьогодні оцінка ймовірностей виникнення механічних аварій відсутня. Більша їх частина має прихований характер і виявляється лише після відповідних випробувань або розбирання двигуна, однак постійний контроль мережевої напруги та струму електродвигунів дозволяє у більшості випадків звести цю ймовірність до мінімуму.

Електричні аварії електродвигунів, у свою чергу, поділяються на три типи:

- мережеві аварії (аварії за напругою), пов'язані з аваріями в електромережі;
- струмові аварії, пов'язані з обривом провідників у обмотках статора, ротора або кабеля, міжвитковим і міжфазним замиканнями обмоток, порушенням контактів і руйнуванням з'єднань, виконаних за допомогою паяння або зварювання; аварії, пов'язані з пробоем ізоляції в результаті нагрівання, викликаного протіканням струмів перевантаження або короткого замикання (к.з.);
- аварії, пов'язані зі зниженням опору ізоляції внаслідок її старіння, руйнування або зволоження.

Постановка задачі дослідження. Для того, щоб захистити електродвигун від аварійних режимів, застосовують релейний захист: тепловий, струмовий, температурний і комбінований. Багаторічний досвід експлуатації електродвигунів показав, що більшість існуючих пристроїв захисту не гарантують їх безаварійної роботи [1]. Застосування надійного й ефективного захисту від аварійних режимів роботи дозволяє значно скоротити кількість і частоту аварійних ситуацій і подовжити термін служби електродвигунів, зменшити витрати електроенергії й втрати від зупинення технологічного процесу.

Переважає більшість існуючих пристроїв захисту асинхронних електродвигунів (АД) відрізняються один від одного за своїми функціональними можливостями і мають загальні недоліки: низьку точність встановлення струмів, спрацьовування за максимально допустимого струму, відсутність контролю напруги. Вони в повній мірі не вирішують завдання захисту АД від перевантажень, ушкоджень силового живильного кабелю, перекошу фазних струмів, пов'язаних із внутрішніми аваріями двигуна або з погіршенням опору ізоляції обмоток.

Одним із перспективних видів захисту від аварійних режимів є застосування сучасних систем діагностування із функцією моніторингу за ознаками аварійних режимів. Тому актуальною задачею є усунення недоліків пристроїв захисту шляхом використання сучасних інтелектуальних систем діагностування їх стану.

Завдання полягає у визначенні сукупності діагностичних ознак аварійних електричних режимів АД для застосування цих ознак в системах функціонального діагностування енергетичного і технічного стану двигуна і збільшення достовірності встановлення характерних видів ушкоджень.

Основні матеріали дослідження. Експлуатація установок і механізмів з АД має такі особливості: технічний стан і надійність їх роботи спричиняють критичний вплив на рівень виробничих ризиків (простої обладнання тощо); АД використовуються не в номінальних режимах роботи; фізична зношеність 60-90% і неефективність технологічного обладнання; високий рівень пошкоджуваності (підтримання працездатності АД забезпечується за рахунок ремонтів); витрати на технічне обслуговування і ремонт становлять значну частку загальної структури витрат; висока вартість нового устаткування, тривалі терміни пусконаладжувальних робіт; завищена встановлена потужність двигунів. Ці обставини призводять до зниження ефективності електромеханічного перетворення енергії та ККД.

Основні типи аварій АД – електричні.

Трифазні симетричні короткі замикання (табл. 1). Найпростішим випадком трифазного короткого замикання (КЗ) є одночасне замикання трьох фаз в одній точці. За умови рівності перехідних опорів замикання буде симетричним, за нерівності - несиметричним. Залежно від співвідношення реактивного $X_{\phi,к}$ і активного $R_{\phi,к}$ опорів фази від джерела живлення до місця КЗ між струмами й відповідними ЕРС устанавлюється зсув (рис. 1)

$$\varphi_k = \arctg \frac{X_{\phi,к}}{R_{\phi,к}}$$

відмінний від зсуву в нормальному режимі [4]. У кабельних мережах φ_k менший, а в повітряних лініях – більший кута зсуву між струмом і напругою в нормальному режимі.

Таблиця 1. Ознаки трифазних симетричних КЗ АД

Ознаки аварійного режиму	Вплив на електропривод і мережу
Струми фаз різко зростають (струм КЗ може перевищувати пусковий струм двигуна), фазні й лінійні напруги зменшуються. Між струмами й відповідними напругами встановлюється зсув відмінний від зсуву в нормальному режимі. Вектори струмів і напруг є симетричними й урівноваженими, у них відсутні складові зворотних і нульових послідовностей.	При зниженні напруги різко зменшується обертальний момент двигуна ($M \equiv U^2$), фазні обмотки статора перегріваються й згорають. Ударні струми являють велику небезпеку – викликають значні зусилля між струмопровідними частинами устаткування, руйнуючи його й викликаючи нагрівання, що у багато разів перевищує термічну стійкість ізоляції.

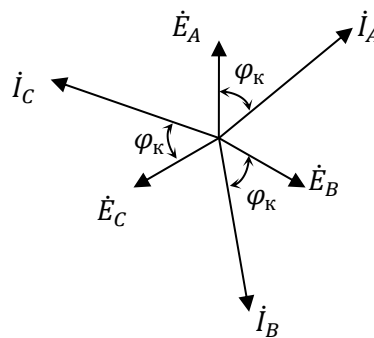


Рисунок 1 - Векторна діаграма ЕРС і струмів трифазного КЗ

Струм трифазного КЗ

$$I_k^{(3)} = \frac{E_\phi}{Z_{\phi,k}}$$

де E_ϕ – ЕРС фази; $Z_{\phi,k}$ – повний опір однієї фази.

Двофазні (міжфазні) КЗ (табл. 2). Міжфазні КЗ в обмотках статора є основним видом ушкоджень у АД. Вони супроводжуються значними струмами, які викликають руйнування обмоток і сталі двигуна [5]. Найпростішим випадком двофазного КЗ є металічне замикання двох фаз в одній точці, а більш складним - замикання двох фаз через перехідні опори в одній або різних точках мережі.

Якщо знехтувати струмами навантаження, то при замиканні фаз В і С струм у фазі А дорівнює нулю, а струми в ушкоджених фазах дорівнюють двофазному струму короткого замикання (рис. 2,а). Вектор струму I_B відстає від ЕРС $E_{BC} = E_B - E_C$ на кут φ_k , а I_C спрямований протилежно I_B . Фазні напруги ушкоджених фаз у місці КЗ дорівнюють за модулем і збігаються за фазою. Напруга ушкодженої фази дорівнює половині напруги неушкодженої фази й протилежна їй за знаком

$$\dot{U}_A = \dot{E}_A; \dot{U}_B = \dot{U}_C = -0,5\dot{U}_A; \dot{U}_{AB} = \dot{U}_{AC} = 1,5\dot{E}_A; \dot{U}_{BC} = 0.$$

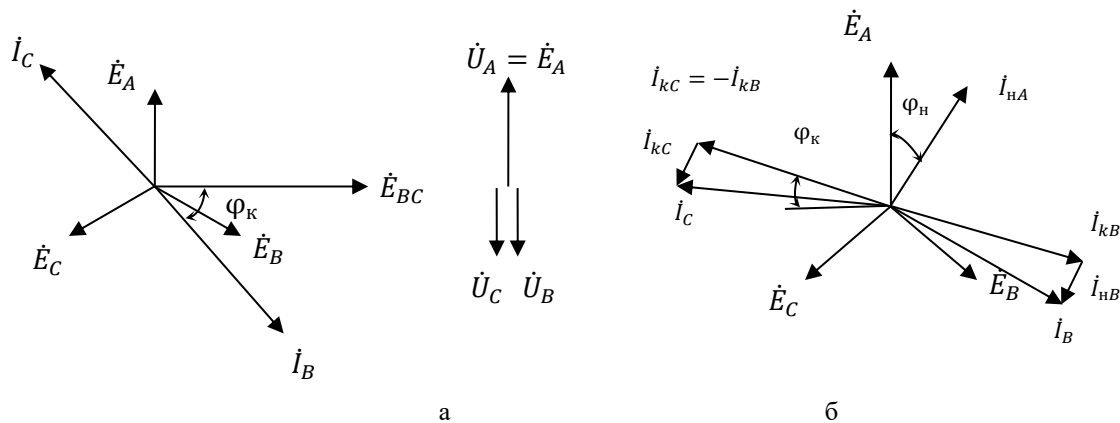


Рисунок 2 - Векторна діаграма ЕРС і струмів та діаграма напруг при двофазному КЗ без урахування навантаження (а), векторна діаграма ЕРС і струмів із урахуванням навантаження (б)

Ступінь і знак впливу струму навантаження на струм КЗ залежать від значень і кутів повних опорів навантаження й мережі. При позитивній різниці (рис. 2,б), тобто, при $\varphi_n > \varphi_k$ струм випереджальної фази I_B зменшується, а відстаючої фази I_C – збільшується (φ_n, φ_k – кути між ЕРС і струмом навантаження й короткого замикання). При $\varphi_n < \varphi_k$, що є характерним для мереж з поздовжньою або поперечною ємнісною компенсацією, відбувається зворотне явище. У практичних умовах, для мереж без компенсації різниця фазових кутів опорів навантаження й мережі не перевищує $55 - 60^\circ$.

Таблиця 2. Ознаки двофазних КЗ АД

Ознаки аварійного режиму	Вплив на електропривод і мережу
КЗв одній точці	
<p>Струми значно перевищують номінальний струм двигуна. Якщо КЗ відбувається при навантаженні, то в неушкодженій фазі протікає лише струм навантаження, а в uszkodжених фазах струм навантаження накладається на струми КЗ, збільшуючи повний струм однієї фази й зменшуючи іншої.</p> <p>Фазні напруги в місці КЗ вищі нуля, одна міжфазна напруга знижується до нуля, а значення двох інших в 1,5 рази більше фазної.</p> <p>Вектори струмів і напруг утворюють несиметричну, але врівноважену систему, мають складові прямої і зворотної послідовностей, але не мають складових нульової.</p>	<p>Результуючий момент двигуна визначається різницею моментів, обумовлених полями прямої і зворотної послідовностей. При ковзанні $s=1$ результуючий момент дорівнює нулю. У міру росту швидкості момент двигуна залишається незначним, двигун може зупинитися і перегрітися.</p> <p>Найбільш важкий режим роботи двигуна настає при металічному КЗ, коли напруги прямої й зворотної послідовностей однакові й дорівнюють $0,5U_n$. Для мереж без компенсації різниця фазових кутів опорів навантаження й мережі не перевищує $55 - 60^\circ$.</p>
КЗ із неоднаковим числом замкнутих витків окремих фаз	
<p>Струми при такому uszkodженні визначаються за методом симетричних складових. Різниця кутів між струмами фаз перевищує 60°.</p>	<p>Аварійні струми викликають руйнування обмоток і сталі двигуна.</p>
КЗ на землю в мережі з ізольованою нейтраллю	
<p>Значення струмів uszkodжених фаз, міжфазних напруг залишаються такими ж, як і при звичайному двофазному замиканні. Струм нульової послідовності відсутній.</p> <p>Ушкоджені фази в місці металічного КЗ вимушено набувають потенціалу землі. З'являється напруга нульової послідовності. Нейтраль системи (трансформатора) одержує відносно землі зсув $0,5$ ЕРС, а напруга неушкодженої фази зростає до $1,5$ ЕРС.</p>	<p>Аварійні струми викликають руйнування обмоток і сталі двигуна.</p>
КЗ на землю в мережі з глухозаземленою нейтраллю	
<p>Сильне зниження міжфазних і фазних напруг uszkodжених фаз (у місці КЗ до нуля) і поява складових нульової послідовності не лише у фазних напругах, але й струмах.</p> <p>Напруга між uszkodженими фазами дорівнює нулю. Напруга неушкодженої фази залишається нормальною. Міжфазні напруги між uszkodженими фазами й неушкодженою знижуються до фазної напруги.</p> <p>Вектори струмів і напруг несиметричні й не врівноважені, з'являються складові прямої послідовності, зворотної і нульової.</p>	<p>Через різке зниження напруги в місці КЗ (режим має найменше значення напруги прямої послідовності) цей вид uszkodжень після трифазного КЗ є найважчим з точки зору збереження стійкості енергосистеми й споживачів.</p>

При несиметричному КЗ фаз B і C маємо $R_A = \infty; R_B = R_C = 0$. Тоді фазні напруги та їх симетричні складові дорівнюють (рис. 3)

$$U_B = U_C = 0,5U_A; U_1 = U_2 = -0,5U_A; U_0 = 0.$$

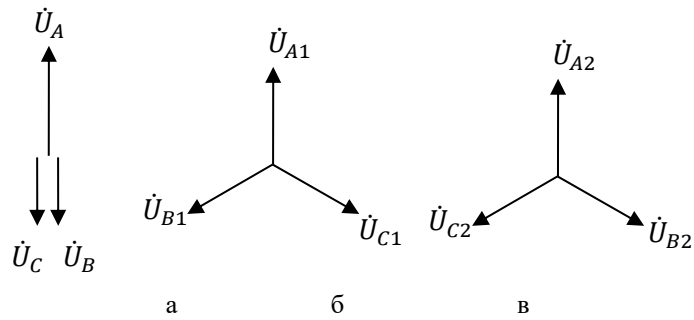


Рисунок 3 - Векторні діаграми напруг (а) у місці двофазного КЗ і їх симетричних складових (б, в)

Двофазне КЗ із неоднаковою кількістю замкнутих витків окремих фаз є одним з найбільш імовірних видів міжфазних КЗ (рис. 4) [6].

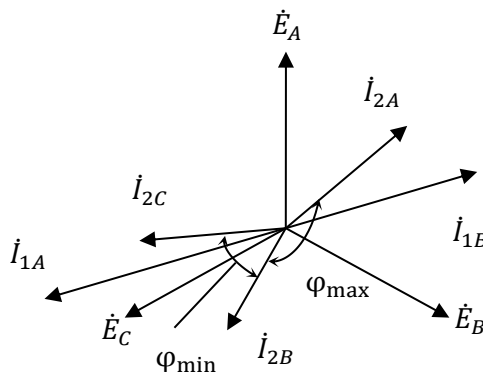


Рисунок 4 - Векторна діаграма двофазного КЗ із неоднаковим числом короткозамкнених витків

Різницю кутів між струмами фаз можна визначити як $\Delta\varphi = \varphi_{\max} - \varphi_{\min}$, де φ_{\max} , φ_{\min} максимальний і мінімальний кути зсуву між струмами фаз АД з боку живлення. Різниця кутів $\Delta\varphi$ при двофазному КЗ перевищує 60° . Отже, цей параметр є надійним критерієм виявлення двофазного КЗ із неоднаковою кількістю замкнутих витків окремих фаз.

Двофазні КЗ на землю. КЗ на землю в мережі з ізольованою нейтраллю відрізняються від звичайного двофазного тим, що ушкоджені фази, наприклад В і С, у місці металічного КЗ вимушено набувають потенціалу землі [7].

Симетричні складові фазних напруг $U_1 = U_2 = U_0 = \frac{1}{3} U_A$. Оскільки $R_A = \infty$, струм у неушкодженій фазі $I_A = I_1 + I_2 + I_0 = 0$, а струми в ушкоджених фазах $I_B = a^2 I_1 + a I_2$; $I_C = a I_1 + a^2 I_2$.

У мережі із глухозаземленою нейтраллю [7] у місці КЗ напруги ушкоджених фаз дорівнюють нулю $U_B = U_C = 0$. Напряга між ушкодженими фазами також дорівнює нулю $U_{BC} = 0$. Напряга неушкодженої фази U_A лишається нормальною. Міжфазні напруги між ушкодженими й неушкодженими фазами U_{AB} і U_{CA} знижуються до фазної напруги U_A . В ушкоджених фазах В і С протікають струми I_B і I_C , що замикаються через землю $I_K = I_B + I_C$ [8]. Сума струмів трьох фаз не дорівнює нулю (у неушкодженій фазі струм відсутній $I_A = 0$) $I_A + I_B + I_C = I_K = 3I_0$.

Подвійні замикання на землю можливі лише в мережах з ізольованими нейтраллями або з нейтраллями, заземленими через дугогасильний реактор. Вони виникають на приєднаннях з ослабленою ізоляцією за перенапруг, які з'являються при однофазних замиканнях на землю. Правилами технічної експлуатації допускається працювати із заземленою фазою протягом двох годин. При цьому струм в обмотці статора буде приблизно такий само, як при двофазному КЗ [5].

Однофазні замикання на землю (табл. 3). Ушкодження ізоляції обмотки статора призводить до замикання фази на заземлений корпус АД. Існує кілька причин, що викликають замикання на землю. Перша пов'язана з поступовим погіршенням ізоляції до пробоя під дією напруги, друга - пробій у результаті комутаційних перенапруг.

Однофазні КЗ є найчастішим видом ушкоджень у мережах із глухозаземленими нейтраллями, що характерно для чотирипровідних мереж напругою до 1кВ. Мережі із заземленою нейтраллю дозволяють, наприклад, при чотирипровідній системі, забезпечити живлення 380В для двигунів і 220В для освітлення.

Замикання фази на землю в мережі 380В становить небезпеку для АД і є однофазним КЗ, що характеризується протіканням великих струмів сумірних зі струмами міжфазних КЗ [5].

Векторні діаграми напруг і струмів мають наступні особливості: струми й напруги несиметричні й нерівноважені, ушкоджена фаза в місці КЗ набуває потенціалу землі (рис. 5) [8].

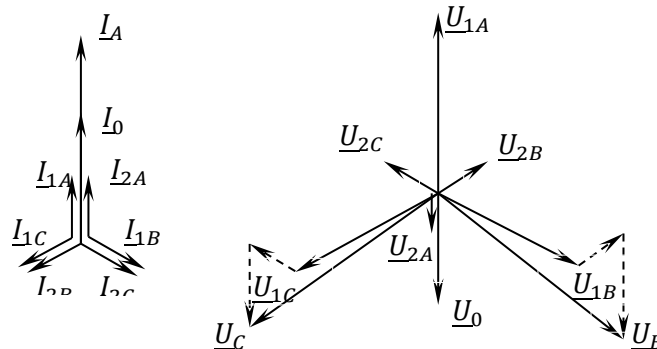


Рисунок 5 - Векторні діаграми струмів і напруг при однофазному КЗ у мережах із глухозаземленою нейтраллю трансформатора

Таблиця 3. Ознаки однофазних КЗ АД

Ознаки аварійного режиму	Вплив на електропривод і мережу
КЗ на землю в мережі з глухозаземленою нейтраллю	
Характеризуються протіканням великих струмів сумірних зі струмами міжфазних КЗ. Ушкоджена фаза в місці КЗ вимушено набуває потенціалу землі. Струми й напруги несиметричні і нерівноважені, внаслідок чого з'являються складові прямих, зворотних і нульових послідовностей.	Однофазні КЗ є найчастішим видом ушкоджень у мережах із глухо заземленими нейтраллями, що характерно для чотирипровідних мереж напругою до 1кВ. Замикання фази на землю в мережі 380В становить небезпеку для двигуна й характеризується протіканням великих струмів сумірних зі струмами міжфазних КЗ.
КЗ на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю	
Не викликають КЗ, оскільки ЕРС ушкодженої фази не шунтується з'єднанням, що з'явилося з землею, і для струму пошкодження відсутнє замкнуте коло від місця пошкодження до нейтралі трансформатора. Струм замикається через ємність проводів непошкоджених фаз мережі щодо землі й має невелике значення. Напруга пошкодженої фази стосовно землі дорівнюватиме нулю, а напруги двох інших фаз збільшаться в $\sqrt{3}$ раз і дорівнюватимуть міжфазним напругам мережі, які залишаються незмінними.	Однофазне замикання на землю в мережі з ізолюваною нейтраллю не порушує роботу споживачів, однак викликає перенапругу в мережі. Перенапруги, у свою чергу, викликають порушення ізоляції обмоток щодо землі двох неушкоджених фаз двигуна й переходу однофазного замикання на землю в міжфазне КЗ або подвійне замикання на землю.
Однофазні виткові замикання	
Є несиметричними ушкодженнями, що призводять до спотворення діаграми струмів і напруг. Різко зростає струм прямої послідовності, струм зворотної послідовності лишається практично без зміни. Коротке замикання всього 3-5% витків однієї фази обмотки статора АД призводить до неприпустимого перегрівання, що викликає руйнування ізоляції.	Знижується момент обертання двигуна, і він перегрівается. Ступінь зниження моменту залежить від співвідношення потужностей ушкодженого двигуна й живильної мережі, відносного числа витків, що замкнулися і т. ін. При виткових замиканнях двигун слід негайно вимкнути.

Точне визначення струму I_k можна зробити за методом симетричних складових. При однофазних КЗ $R_{пА} = 0; R_{пВ} = R_{пС} = \infty$. При цьому

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 = 0; \dot{U}_1 = -(\dot{U}_2 + \dot{U}_0); \\ \dot{U}_2 &= \dot{I}_2 \frac{z_{C2} z_{H2}}{z_{C2} + z_{H2}}; \dot{U}_0 = \dot{I}_2 z_{C0}. \end{aligned}$$

Для знаходження повних струмів окремих фаз урахується умова $R_{ПВ} = R_{ПС} = \infty$ $\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = I_K$; $\dot{I}_B = a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 + \dot{I}_0$; $\dot{I}_C = a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 + \dot{I}_0$.

У мережах з ізольованою нейтраллю однофазне замикання на землю безпосередньої небезпеки для АД й мережі не являють. Небезпека замикань полягає в тому, що вони можуть переходити в подвійні замикання на землю, а струми uszkodження можуть досягати значення струму двофазного КЗ [9].

Виткові замикання обмоток статора АД є поширеним видом uszkodжень. Коротке замикання 3-5% витків однієї фази обмотки статора АД призводить до неприпустимого перегрівання, що викликає руйнування ізоляції.

Виткові замикання АД можуть бути одно-, дво- і трифазні; симетричні й несиметричні, металічні й неметалічні тощо. Основною причиною виникнення виткових замикань є зниження електричної міцності ізоляції обмоток. Виткові замикання є несиметричними uszkodженнями, що призводять до спотворення діаграми струмів і напруг нормального режиму й супроводяться зниженням обертального моменту двигуна (рис. 6). При виткових замиканнях двигуни підлягають негайному відключенню.

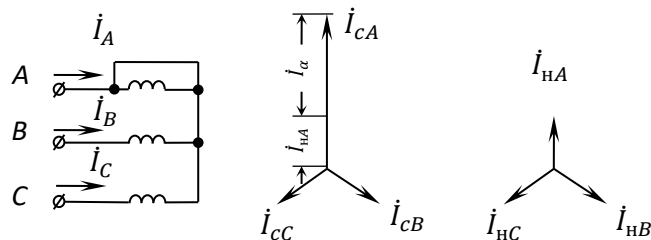


Рисунок 6 - Схема й векторні діаграми струмів при замиканні всіх витків фази А

Обрив фази живильної мережі (робота трифазних двигунів у однофазному режимі) (табл. 4). Причинами виникнення такого режиму можуть бути перегорання одного із запобіжників, обрив фазного проводу в мережі, порушення контакту у фазі, обрив фази в обмотці статора, порушення контакту у вивідній коробці тощо. Відомо, що пуск АД в такому режимі неможливий, і двигун відключається захистом від перевантаження.

Ураховуються такі фактори: схема сполучення обмоток двигуна; робочий стан двигуна в момент втрати фази (до або після ввімкнення двигуна, під час роботи під навантаженням, ступінь завантаження двигуна); число двигунів, які працюють зі втратою фази та їх взаємний вплив [10]. Якщо неповнофазний режим виник під час роботи АД, то захист може виявитися неефективним, оскільки при малому завантаженні двигуна струми в обмотках статора можуть виявитися нижчими, ніж уставка захисту від перевантаження.

При сполученні обмоток статора в зірку й обриві лінійного проводу А дві послідовно з'єднані обмотки двигуна виявляються включеними на лінійну напругу (рис. 7,а). При загальмованому роторі напруга на фазах В й С дорівнює половині лінійної напруги U_{BC} , а напруга на фазі А, дорівнює нулю. При швидкості обертання близькій до синхронної на обмотках відновлюється симетрична система трифазної напруги, а напруга нейтралі зірки дорівнює нулю. Для струмів \dot{I}_A, \dot{I}_B й \dot{I}_C одержимо $\dot{I}_A = 0$; $\dot{I}_B = -\dot{I}_C = \dot{I}_{06}$, де \dot{I}_{06} – струм статора двигуна в однофазному режимі.

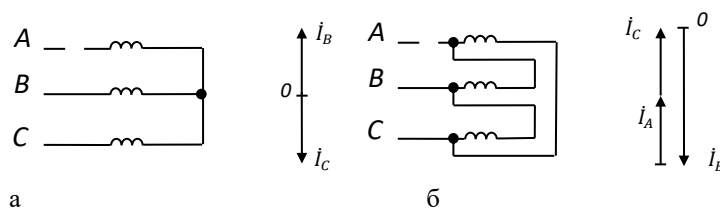


Рисунок 7 - Схеми й векторні діаграми струмів АД, з'єднаного відповідно в Y (а) і Δ (б) при обриві лінійного проводу

При сполученні в трикутник і обриві лінійного проводу у фазі А, обмотка фази С виявляється ввімкненою на лінійну напругу U_{BC} , а обмотки фаз А й В увімкнені послідовно на ту само лінійну напругу (рис. 7, б). Напруги на виводах АВ й СА будуть залежати від швидкості обертання ротора. При загальмованому роторі напруги на виводах АВ й СА дорівнюють половині лінійної. При синхронній швидкості відновлюється симетрична система напруг, і напруги на виводах АВ й СА дорівнюють лінійній напрузі [8]. Для лінійних струмів справедливі співвідношення $\dot{I}_{\Delta A} = 0$; $\dot{I}_{\Delta B} = -\dot{I}_{\Delta C} = \dot{I}_{06}$, а для фазних струмів $\dot{I}_A = -\frac{1}{3}\dot{I}_{06}$; $\dot{I}_B = -\frac{1}{3}\dot{I}_{06}$; $\dot{I}_C = \frac{2}{3}\dot{I}_{06}$; $\dot{I}_A = \dot{I}_B = -0,5\dot{I}_C$.

Таблиця 4. Ознаки обриву фази живильної мережі АД

Ознаки аварійного режиму	Вплив на електропривод і мережу
Сполучення обмоток статора в зірку	
<p>Дві сполучені послідовно обмотки двигуна виявляються включеними на лінійну напругу. При загальмованому роторі напруга на неушкоджених фазах дорівнює половині лінійної напруги, а напруга на uszkodженій фазі – нулю.</p> <p>Якщо втрата фази відбулася до вмикання двигуна, то пусковий струм становить 86% від пускового при трифазному живленні, тобто в понад 5 раз перевищує номінальний. За короткий час такий струм перегріє обмотки. У випадку втрати фази після вмикання двигуна в роботу величина струму збільшується на 75%.</p>	<p>В однофазному режимі в обмотці статора проходить однофазний струм, що створює пульсуюче магнітне поле. Поле змінюється в часі, але не переміщується по колу статора.</p> <p>Якщо втрата фази відбулася до включення двигуна в мережу, то він не може запуститися навіть за відсутності навантаження на валу.</p> <p>При переході двигуна із трифазного режиму роботи в однофазний на ходу утвориться обертальний момент. Якщо швидкість двигуна близька до номінальної, обертальний момент достатній для продовження роботи з невеликим зниженням швидкості.</p>
Сполучення обмоток статора в трикутник	
<p>Обмотка однієї фази виявляється ввімкненою на лінійну напругу, а обмотки двох інших фаз - послідовно на ту саму напругу.</p> <p>Напруги між uszkodженою фазою й неушкодженими залежать від швидкості обертання ротора. При загальмованому роторі ці напруги дорівнюють половині лінійної, при синхронній швидкості вони дорівнюють лінійній напрузі.</p> <p>У пусковому режимі при втраті фази пусковий струм в одній з фаз дорівнює пусковому струму при трифазному живленні, а лінійний струм зростає менш інтенсивно. У випадку втрати фази після введення двигуна в роботу струм у найбільш навантаженій фазі збільшиться вдвічі, а лінійний – в 1,73 рази.</p>	<p>При швидкості обертання близької до синхронного на обмотках відновлюється симетрична система трифазної напруги. На відміну від трифазного симетричного режиму з'являється характерне гудіння. В іншому зовнішні прояви аварійного режиму не спостерігаються.</p> <p>Перевантаження по струму при обриві лінійного проводу настає при $P \geq 0,5P_n$, тому двигун у цьому режимі може працювати, не виходячи за межі допустимого нагрівання, тільки при зниженні потужності на валу до 50-60% номінальної.</p>

Визначення заклинювання ротора здійснюється за допомогою контролю струмів фаз. Критерієм настання аварії є перевищення струмом максимально припустимого в статичному режимі значення протягом певного часу. Відмінність від режиму пуску, що не відбувся, полягає в протіканні по фазах двигуна припустимих струмів до моменту виникнення аварії.

Висновки

1. Розглянуто ознаки аварійних режимів (трифазні симетричні КЗ, двофазні КЗ в одній точці, двофазні КЗ із неоднаковою кількістю замкнутих витків окремих фаз, двофазні КЗ на землю в мережі з ізольованою і з глухозаземленою нейтраллю, однофазні КЗ на землю в мережі з глухозаземленою та з ізольованою нейтраллю, однофазні виткові замикання, обрив фази живильної мережі) і вплив на АД й мережу (характер змін у роботі двигуна й мережі).

2. Визначені ознаки є надійним критерієм виявлення електричних ушкоджень АД. Їх застосування для засобів функціонального діагностування енергетичного й технічного стану двигуна дозволить автоматизувати процес і збільшити достовірність встановлення характерних видів ушкоджень.

Список використаної літератури

1. Соркінд М. Асинхронные электродвигатели 0,4 кВ. Аварийные режимы работы / М. Соркінд // «Новости Электротехники», №2(32), 2005.
2. Сивокобыленко В.Ф. Тепловая защита асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при несимметрии питающего напряжения / В.Ф. Сивокобыленко, С.Н. Ткаченко // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. – 2009. – Вип. 3(56), ч.2. – С. 74-78.
3. Синчук О.Н. Тепловая модель кранового АД для диагностирования и настройки цифровой защиты от перегрузок / О.Н. Синчук, В.В. Чумак, С.Л. Михайлов // Электротехника, 2003. - №3. – С. 61-66.
4. Гимоян Г.Г. Релейная защита горных электроустановок / Г.Г. Гимоян. – изд. 2, перераб. и доп. М.: «Недра», 1978, 349 с.
5. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников Под ред. Л.Г. Мамакоянца. – 4-е изд., переработ. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с., ил.

6. Корогодский В.И. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ / В.И. Корогодский, С.Л. Кузнецов, Л.Б. Паперно – М.: Энергоатомиздат, 1987 – 248 с.
7. Коваленский И.В. Релейная защита электродвигателей высокого напряжения / И.В. Коваленский, - Л.: Энергия, 1964 – 81 с.
8. Сушко В. Защита низковольтных электродвигателей совершенных устройств / В. Сушко // «Новости Электротехники», №5(35), 2005.
9. Чернобровов Н.В. Релейная защита энергетических систем: Учеб. пособие для техникумов / Н.В. Чернобровов, Семенов В.А. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.: ил.

O. Zakladnyi, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-2813-3692
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

DETERMINATION OF EMERGENCY REGIMES OF ELECTRIC MOTORS BY MEANS OF MODERN SYSTEMS OF DIAGNOSING THEIR CONDITION

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 (high humidity, temperature), decrease in insulation resistance, cooling disorders.

The consequence of such deviations are emergency modes of operation of electric motors. In some subsectors of the industry, the accident rate of electric motors ranges from 20 to 50% per year. Failure of the motor leads to severe accidents and significant material damage due to downtime, the cost of troubleshooting and repair of the failed motor. Repair of an electric car with a capacity of 1 kW costs 550-700 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 energy consumption and increased reactive power consumption.

One of the promising types of protection against emergencies is the use of modern diagnostic systems with the function of monitoring the signs of emergencies. Therefore, the urgent task is to eliminate the shortcomings of protection devices through the use of modern intelligent systems for diagnosing their condition.

The task is to determine the set of diagnostic features of emergency electric modes of induction motors for the application of these features in the systems of functional diagnostics of energy and technical condition of the engine and increase the reliability of establishing the characteristic types of damage.

The article considers a set of signs of emergency electrical modes for different types of damage to induction motors. These features can be used in modern systems for diagnosing energy efficiency and technical condition of electromechanical systems, which can also perform the function of protecting electric motors from emergency modes.

Key words: *diagnosing, electric motor, emergency modes, short circuits.*

Refereneces

1. Sorkind M. Asynchronous motors 0.4 kV. Emergency operating modes / M. Sorkind // "Electrical Engineering News", №2 (32), 2005.
2. Sivokobylenko V.F. Thermal protection of an asynchronous motor with a short-circuited rotor with asymmetry of the supply voltage / V.F. Sivokobylenko, SN Tkachenko // Bulletin of the KSPU them. M. Ostrogradsky. - 2009. - No. 3 (56), part 2. - P. 74-78.
3. Sinchuk ON Thermal model of crane AD for the diagnosis and adjustment of digital overload protection / ON. Sinchuk, V.V. Chumak, S.L. Mikhailov // Electrical Engineering, 2003. - №3. - pp. 61-66.
4. Gimoyan GG Relay protection of mountain electrical installations / G.G. Himoyan. - ed. 2, rework. and ext. M.: Nedra, 1978, 349 p.
5. Syromyatnikov IA Modes of operation of asynchronous and synchronous motors / IA Syromyatnikov Ed. L.G. Mamikoyanets. - 4th ed., Reworking. and ext. - M.: Energoatomizdat, 1984. - 240 pp., III.
6. Korogodsky VI Relay protection of motors above 1 kV / VI Korogodsky, S.L. Kuzhekov, L.B. Paper - M.: Energoatomizdat, 1987 - 248 p.
7. Kovalensky IV Relay protection of high voltage electric motors / IV. Kovalensky, L.: Energy, 1964 - 81 p.
8. Sushko V. Protection of low-voltage electric motors of perfect devices / V. Sushko // «Electrical Engineering News», №5 (35), 2005.
9. Chernobrov NV Relay protection of power systems: Textbook. manual for technical schools / NV Chernobrov, VA Semenov - M.: Energoatomizdat, 1998. - 800 p.: III.

Надійшла 03.04.2022

Received 03.04.2022