

УДК 62-83-52.003(082)

## ВИЗНАЧЕННЯ ОЗНАК ДВОФАЗНИХ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Закладний О.М. к.т.н., доцент НТУУ «КПІ», Закладний О.О. к.т.н., асистент НТУУ «КПІ», Броницький В.О., студент

Розглянуто різновидності двофазних коротких замикань асинхронних двигунів. Визначено їх основні ознаки та вплив на електропривод і мережу.

*Ключові слова:* асинхронний двигун, двофазне коротке замикання, аварійний режим.

Рассмотрены разновидности двухфазных коротких замыканий асинхронных двигателей. Определены их основные признаки и влияние на электропривод и сеть.

*Ключевые слова:* асинхронный двигатель, двухфазное короткое замыкание, аварийный режим.

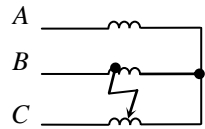
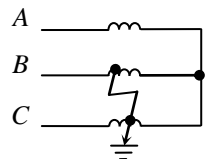
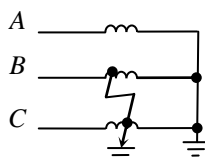
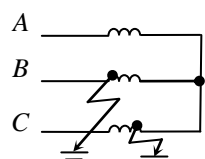
The varieties of two-phase short circuits of asynchronous engines are considered. Defined their main features and impact on electric and network.

*Keywords:* asynchronous motor, two-phase short circuit, emergency mode.

Автоматизована система діагностування рівня енергоефективності електромеханічних систем має визначати ознаки двофазних аварійних режимів електропривода з асинхронними двигунами (табл. 1).

Таблиця 1

Види двофазних струмових аварій асинхронного двигуна

Пошкодження	Різновидності	Електродвигун
Двофазні короткі замикання	Коротке замикання між двома фазами	
	Двофазне коротке замикання на землю	
	Двофазне коротке замикання на землю в мережі з глухозаземленою нейтраллю	
	Подвійне коротке замикання на землю	

Міжфазні короткі замикання в обмотках статора є основним видом ушкоджень у АД.

Вони супроводжуються значними струмами, які значно перевищують номінальний струм двигуна. Аварійні струми викликають руйнування обмоток і сталі двигуна [5]. Найпростішим випадком двофазного короткого замикання є металічне замикання двох фаз в одній точці, а більш складним - замикання двох фаз через перехідні опори в одній або різних точках мережі.

Двофазні короткі замикання характеризуються двома особливостями [4]: вектори струмів і напруг утворюють несиметричну, але врівноважену систему, тобто мають складові прямої і зворотної послідовності й не мають складових нульової послідовності; фазні напруги в місці короткого замикання більші нуля. Одна міжфазна напруга знижується до нуля, а значення двох інших в 1,5 рази більше фазної. Якщо знехтувати струмами навантаження, то при замиканні фаз *B* і *C* струм у фазі *A* дорівнює нулю, а струми в ушкоджених фазах дорівнюють двофазному струму короткого замикання (рис. 2,а).

Вектор струму  $I_B$  (рис. 2,а) відстає від ЕРС  $E_{BC} = E_B - E_C$  на кут  $\varphi_k$ , а  $I_C$  спрямований протилежно  $I_B$ . Фазні напруги ушкоджених фаз у місці короткого замикання дорівнюють за модулем і збігаються за фазою. Напруга ушкодженої фази дорівнює половині напруги неушкодженої фази й протилежна їй за знаком. З векторної діаграми напруг у місці короткого замикання (рис. 2,а)

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

Якщо коротке замикання відбувається при навантаженні (рис. 2,б), то в неушкодженій фазі протікає тільки струм навантаження, а в ушкоджених фазах струм навантаження накладається на струми коротких замикань, збільшуючи повний струм однієї фази й зменшуючи іншої. Урахування впливу струму навантаження на струм короткого замикання здійснюється в тих випадках, коли максимальний струм навантаження й мінімальний струм короткого замикання одного порядку. Наприклад, коли коротке замикання відбувається при пуску двигуна, потужність якого сумірна з потужністю живильного трансформатора.

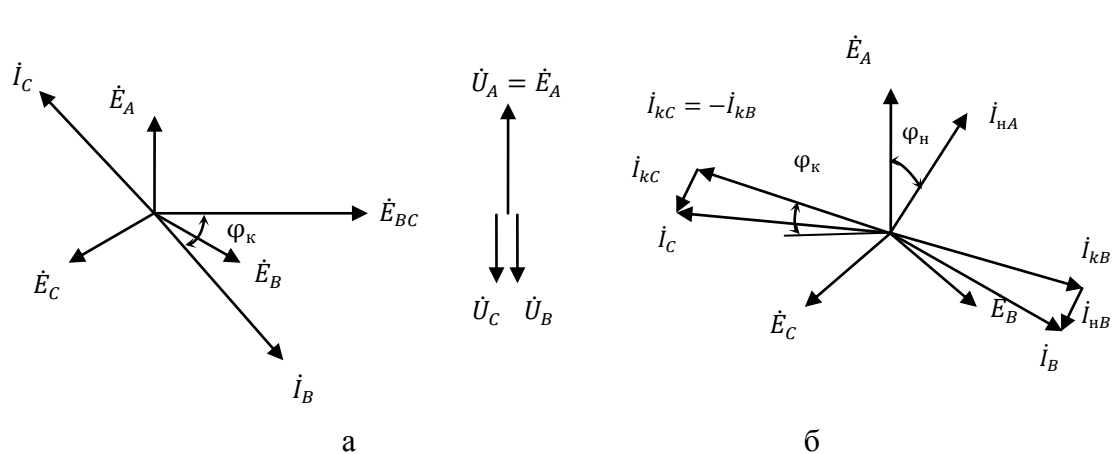


Рис. 2 Векторна діаграма ЕРС і струмів та діаграма напруг при двофазному короткому замиканню без урахування навантаження (а), векторна діаграма ЕРС і струмів із урахуванням навантаження (б)

Ступінь і знак впливу струму навантаження на струм короткого замикання 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 ( $\varphi_n, \varphi_k$  –кути між ЕРС і струмом навантаження й короткого замикання). При

$\varphi_H < \varphi_K$ , 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  $55 - 60^\circ$ .

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

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

Внаслідок виникнення струмів і напруг зворотної послідовності результуючий момент двигуна  $M$  при двофазному короткому замиканню складається з різниці двох моментів:  $M_1$  (обумовленого полем прямої послідовності) і  $M_2$  (обумовленого полем зворотної послідовності), тобто  $M = M_1 - M_2$ .

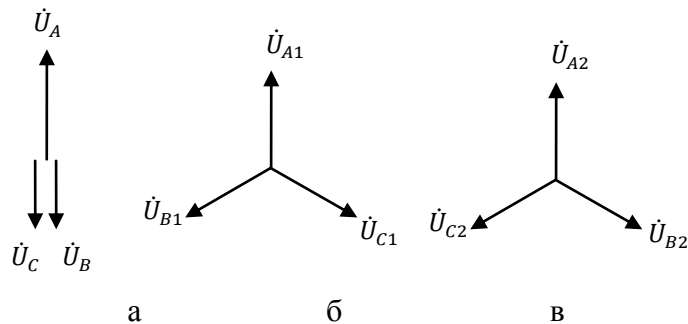


Рис. 3 Векторні діаграми напруг (а) у місці двофазного короткого замикання і їх симетричних складових (б, в)

Оскільки  $M_1 \equiv U_1^2$ , а  $M_2 \equiv U_2^2$ , то найбільш важкий режим роботи двигуна спостерігається під час металічного короткого замикання, коли напруги прямої й зворотної послідовностей однакові й дорівнюють  $0,5U_H$ . При ковзанні  $s=1$  обидва моменти дорівнюють  $0,25M_{ПН}$ , внаслідок чого результуючий момент дорівнює нулю. У міру зростання швидкості момент  $M_1$  збільшується, але результуючий момент двигуна залишається незначним, двигун може зупинитися й вийти з ладу через перегрівання.

Двофазне коротке замикання із неоднаковим числом замкнутих витків окремих фаз є одним з найбільш імовірних видів міжфазних коротких замикань. Струми при такому ушкодженні визначаються методом симетричних складових. На рис. Б.4 зображена векторна діаграма двофазного короткого замикання із неоднаковим числом короткозамкнених витків [4].

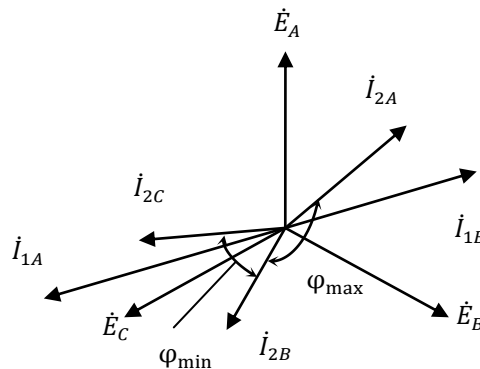


Рис. 4 Векторна діаграма двофазного короткого замикання із неоднаковим числом

короткозамкнених витків

Різницю кутів між струмами фаз можна визначити як  $\Delta\varphi = \varphi_{\max} - \varphi_{\min}$ , де  $\varphi_{\max}$ ,  $\varphi_{\min}$  максимальний і мінімальний кути зсуву між струмами фаз АД з боку живлення.

Різниця кутів  $\Delta\varphi$  при двофазному короткому замиканню перевищує  $60^\circ$ . Таким чином, цей параметр є надійним критерієм виявлення двофазного короткого замикання із неоднаковим числом замкнутих витків окремих фаз.

Струми двофазних коротких замикань можна визначити, якщо вони перевищують пусковий струм двигуна, що спостерігається при живленні двигунів короткими лініями від шин великої потужності

$$I_{\kappa}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}E_{\phi}}{2Z_{\phi,\kappa}}.$$

Струм двофазного короткого замикання можна знайти за струмом трифазного

$$\frac{I_{\kappa}^{(2)}}{I_{\kappa}^{(3)}} = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

*Двофазні короткі замикання на землю.* Коротке замикання на землю в мережі з ізольованою нейтраллю відрізняються від звичайного двофазного тим, що ушкоджені фази, наприклад  $B$  і  $C$ , у місці металічного короткого замикання вимушено набувають потенціалу землі. З'являється напруга нульової послідовності. Нейтраль системи (трансформатора) одержує стосовно землі зсув  $0,5E_A$ , а напруга неушкодженої фази  $A$  зростає до  $1,5E_A$  [5].

Симетричні складові фазних напруг  $U_1 = U_2 = U_0 = \frac{1}{3}U_A$ .

Значення струмів ушкоджених фаз, міжфазних напруг залишаються такими само, як і при звичайному двофазному замиканні [5]. Струм нульової послідовності буде відсутній, оскільки при незаземленій нейтралі навантаження  $Z_0 = \infty$ . Оскільки  $R_A = \infty$ , струм у неушкодженій фазі  $I_A = I_1 + I_2 + I_0 = 0$ , а струми в ушкоджених фазах  $I_B = a^2I_1 + aI_2$ ;  $I_C = aI_1 + a^2I_2$ .

У мережі із глухозаземленою нейтраллю двофазні короткі замикання супроводжуються сильним зниженням міжфазних і фазних напруг ушкоджених фаз (у місці короткого замикання до нуля) і появою складових нульової послідовності не лише у фазних напругах (як у мережах з ізольованими нейтраллями), але й у струмах. Співвідношення електричних величин найпростіше виявляються використанням методу симетричних складових [5].

Векторні діаграми напруг і струмів мають наступні особливості: струми й напруги несиметричні й неврівноважені, що спричиняє появу складових прямих, зворотних і нульових послідовностей; через різке зниження напруги в місці короткого замикання (режиму властиве найменше значення напруги прямої послідовності) цей вид ушкоджень після трифазного короткого замикання є найбільш важким для стійкості енергосистеми й споживачів електроенергії.

У місці короткого замикання напруги ушкоджених фаз дорівнюють нулю  $U_B = U_C = 0$ . Напруга між ушкодженими фазами також дорівнює нулю  $U_{BC} = 0$ . Напруга неушкодженої фази  $U_A$  залишається нормальною. Міжфазні напруги між ушкодженими й неушкодженими фазами  $U_{AB}$  і  $U_{CA}$  знижуються до фазної напруги  $U_A$ .

Під дією ЕРС  $E_B$  і  $E_C$  в ушкоджених фазах  $B$  і  $C$  протікають струми  $I_B$  і  $I_C$ , що замикаються через землю  $I_{\kappa} = I_B + I_C$  [2].

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 нейтраліями або з нейтраліями, 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 короткому замикання [5]. Таким чином, зазначені параметри є надійним критерієм виявлення міжфазного короткого замикання.

За приведеними вище ознаками можливо визначити пошкодження та вплив на електропривод і мережу (табл. 2).

Таблиця 2

Ознаки двофазних аварійних режимів асинхронного двигуна

Аварійний режим (пошкодження)	Ознаки аварійних режимів (зміна струмів і напруг)	Вплив на електропривод і мережу (характер змін у роботі двигуна й мережі)
Двофазні (міжфазні) короткі замикання в одній точці	Струми значно перевищують номінальний струм двигуна. Якщо коротке замикання відбувається при навантаженні, то в неушкодженій фазі протікає лише струм навантаження, а в ушкоджених фазах струм навантаження накладається на струми короткого замикання, збільшуючи повний струм однієї фази й зменшуючи іншої. Фазні напруги в місці короткого замикання вищі нуля, одна міжфазна напруга знижується до нуля, а значення двох інших в 1,5 рази більше фазної. Вектори струмів і напруг утворюють несиметричну, але врівноважену систему, мають складові прямої і зворотної послідовностей, але не мають складових нульової.	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. Найбільш важкий режим роботи двигуна настає при металічному короткому замиканню, коли напруги прямої й зворотної послідовностей однакові й дорівнюють $0,5U_H$ . Для мереж без компенсації різниця фазових кутів опорів навантаження й мережі не перевищує $55 - 60^\circ$ .
Двофазні короткі замикання із неоднаковим числом замкнутих витків окремих фаз	Струми при такому ушкодженні визначаються за методом симетричних складових. Різниця кутів між струмами фаз перевищує $60^\circ$ .	Аварійні струми викликають руйнування обмоток і сталі двигуна.

Продовження таблиці 2

Двофазні короткі замикання на землю	в мережі з ізолюваною нейтраллю	Значення струмів ушкоджених фаз, міжфазних напруг залишаються такими ж, як і при звичайному двофазному замиканні. Струм нульової послідовності відсутній. Ушкоджені фази в місці металічного короткого замикання вимушено набувають потенціалу землі. З'являється напруга нульової послідовності. Нейтраль системи (трансформатора) одержує відносно землі зсув $0,5 E_{PC}$ , а напруга неушкодженої фази зростає до $1,5 E_{PC}$ .	Аварійні струми викликають руйнування обмоток і сталі двигуна.
	в мережі з глухозаземленою нейтраллю	Сильне зниження міжфазних і фазних напруг ушкоджених фаз (у місці короткого замикання до нуля) і поява складових нульової послідовності не лише у фазних напругах, але й струмах. Напруга між ушкодженими фазами дорівнює нулю. Напруга неушкодженої фази залишається нормальною. Міжфазні напруги між ушкодженими фазами й неушкодженою знижуються до фазної напруги. Вектори струмів і напруг несиметричні й неврівноважені, з'являються складові прямої послідовності, зворотної і нульової.	Через різке зниження напруги в місці короткого замикання (режим має найменше значення напруги прямої послідовності) цей вид ушкоджень після трифазного короткого замикання є найважчим з точки зору збереження стійкості енергосистеми й споживачів.

**Висновок:**

Для двофазних коротких замикань асинхронних двигунів встановлено їх основні ознаки та вплив на електропривод і мережу. Ці ознаки двофазних коротких замикань можуть бути використані в системах діагностування енергетичної ефективності асинхронних двигунів.

Література

1. Гимоян Г.Г. Релейная защита горных электроустановок / Г.Г. Гимоян. – изд. 2, перераб. и доп. М.: «Недра», 1978, 349 с.
2. Корогодский В.И. Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ / В.И. Корогодский, С.Л. Кужеков, Л.Б. Паперно. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 248 с.
3. Байтер И.И. Защита и АВР электродвигателей собственных нужд./ И.И. Байтер – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1980. – 104с.
4. Чернобровов Н.В. Релейная защита энергетических систем: Учеб. пособие для техникумов / Н.В. Чернобровов, В.А. Семенов – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
5. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для вузов./ А.М. Федосеев, М.А. Федосеев – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.
6. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: Учебник для вузов. / В.А. Андреев – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Выс. шк., 2006. – 639 с.
7. Мусин А.М. Аварийные режимы асинхронных электродвигателей и способы их защиты / А.М. Мусин– М.: Колос, 1979. – 112 с.
8. Беркович М.А. Основы техники релейной защиты / М.А. Беркович, В.В. Молчанов, В.А. Семенов, - 6-е изд., перераб и доп. – М.: Энергоиздат, 1984. – 376 с.
9. Соловьев А.Л. Защита асинхронных электрических двигателей напряжением 0,4 кВ. Учебное пособие / А.Л. Соловьев – СПб, ПЭИПК, 2007. – 72 с.