

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.313.33

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/04>

Кривоносов В.Є.

Азовський морський інститут
Національного університету «Одеська морська академія»

Василенко С.В.

Азовський морський інститут
Національного університету «Одеська морська академія»

Скосирев В.Г.

Приазовський державний технічний університет

ОЦІНКА ВПЛИВУ КЛАСІВ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ ПІД ЧАС ВИЯВЛЕННЯ ПОЧАТКОВОГО МОМЕНТУ ВИТКОВОГО ЗАМИКАННЯ В ОБМОТЦІ СТАТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Виявлення виткового замикання в обмотці статора асинхронного двигуна на ранній стадії (до 10% замкнутих витків) його появи є дефектом, який важко діагностується. Існуючі методи діагностування виткових замикань (вібродіагностика, метод спектрального аналізу споживаного струму, метод визначення спотворення магнітного поля в повітряному зазорі) володіють необхідною чутливістю та достовірністю під час діагностики двигунів потужністю понад 25 кВт, а для двигунів потужністю до 15 кВт дозволяють виявляти замикання понад 30% витків. У роботі [3] запропонований спосіб виявлення виткового замикання на ранній стадії для асинхронних двигунів потужністю до 15 кВт. На чутливість і достовірність запропонованого способу впливає вибір класу точності вимірювальних приладів. У дослідженні розглянуто вплив класу точності вимірювальних приладів на достовірність і чутливість виявлення початкового моменту виникнення виткового замикання в обмотці статора асинхронних двигунів потужністю до 15 кВт. Запропоновано критерій виявлення початкового моменту виникнення виткового замикання, яким є порівняння виміряного фазного струму з розрахунковим струмом з урахуванням зони довірчого інтервалу. Величина довірчого інтервалу залежить від класів точності вимірювальних приладів, розкиду фізичних величин опорів схеми заміщення двигуна, методів вимірювання та швидкості зміни параметрів мережі живлення. Оцінка впливу класу точності вимірювальних приладів на величину довірчих інтервалів розглянута залежно від класу точності вимірювальних приладів за стаціонарної зміни параметрів мережі. Отримано аналітичний вираз, що дозволяє оцінити вплив класу точності вимірювальних приладів на зміну похибки під час визначення розрахункового струму як за окремого, так і за спільного обліку похибок усіх приладів. Визначено необхідну чутливість вимірювальної системи для виявлення початкового моменту виникнення виткового замикання. Проведено апробацію отриманих результатів, для досліджуваних двигунів визначені класи точності вимірювальних приладів, необхідні для виявлення 2, 5 і 10% замкнутих витків у пази обмотки статора.

Ключові слова: асинхронний двигун, обмотка статора, виткові замикання, чутливість, вимірювальний прилад, клас точності.

Постановка проблеми. Асинхронні двигуни (далі – АД) завдяки надійності й простоті експлуатації є основним елементом електроприводу як в електротехнічних комплексах промислових підприємств, так і в портових і суднових електротехнічних установках. Масове виробництво й доступна ціна пристроїв тиристорних перетво-

рювачів частоти (далі – ТПЧ) значно розширили сферу застосування АД у керованому й некерованому електроприводах. Своєчасне виявлення дефектів в АД дозволяє підвищити надійність, безпеку й безперебійність роботи електротехнічних систем, відповідальних за забезпечення безперервності технологічних процесів, а в деяких

випадках – за життя обслуговуючого персоналу. У портах і на судах системи «АД + ТПЧ» застосовуються в системах пожежогасіння, охолоджуючих системах забортною водою, в системі забезпечення кренування та деферентності судна, осушувальної та вентиляційної системи, в системах забезпечення роботи головних рушійних приводів і генераторів, у приводах розвантажувально-навантажувальних комплексів портів, у системах забезпечення безперервності циклів металургійного виробництва й іншому. Потужність АД у таких системах, як правило, коливається від 0,75 кВт до 15 кВт. Проведені дослідження причин скорочення термінів експлуатації АД показують, що в 45% випадків причиною виходу АД із ладу є пошкодження обмотки статора через появу в них виткових замикань. Виткові замикання виникають під час локального зниження діелектричних властивостей ізоляції обмоток статора внаслідок механічних і теплових перевантажень [1; 2].

Виявлення виткового замикання в статорних обмотках АД на ранній стадії їх появи є одним із найважче діагностованих дефектів. Відомі способи виявлення виткових замикань у статорних обмотках АД, застосовні для АД потужністю 25 кВт і вище, для АД потужністю нижче 15 кВт, відомі методи, характерні низькою чутливістю та невисокою достовірністю. Для АД малої потужності розроблений спосіб виявлення початкового моменту виткових замикань [3]. На достовірність визначення початкового моменту появи виткового замикання впливає вибір класу точності вимірювальних засобів. Питання впливу класу точності вимірювальних засобів на достовірність і чутливість виявлення початкового моменту виткового замикання в статорних обмотках АД малої потужності є актуальним і недостатньо дослідженим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомий метод вібродіагностики для виявлення виткового замикання [4; 5]. Метод заснований на амплітудно-частотному аналізі вібраційних сигналів, виміряних у різних точках АД із використанням одного з вимірювальних комплексів, таких як Fluke 180, ExtechVB-500, BalltechVP-3470, КОМПАС-РПЕ та інші Класи точності вимірювальних комплексів у середньому відповідають 0,01 (за датчиком обертання валу), 0,5 (за датчиком вібрації корпусу АД), 0,01 (за датчиком вібрації) і 0,25–0,4 (за датчиками вібропереміщення та віброприскорення корпусу АД) відповідно. Такі класи точності комплексів дозволяють використовувати цей метод для діагностики АД потужністю понад 30 кВт, що мають обмотки із числом витків у пазу

статора АД не більше 12 провідників. Для АД потужністю до 22 кВт, що мають у пазу статора АД понад 20 провідників, метод не володіє достатньою чутливістю, тому що струми зворотної послідовності, які виникають за такої умови, складають до 1% від робочого струму АД і не викликають зміни амплітуди шумового сигналу, що не перевищує шумовий фон. Поява початкового моменту виткового замикання характеризується появою несиметрії фазних струмів. Несиметрія фазних струмів приводить до появи тангенціальної вібрації в АД із подвоєною частотою f_u промислової мережі згідно із [6], що відповідає аналогічним ефектам за коефіцієнта несиметрії напруг мережі живлення k_{2U} , який змінюється від 0 до 2%.

Метод амплітудно-частотної діагностики стану АД заснований на спектральному аналізі фазного струму [7; 8]. У методі використовуються аналізатори спектра, такі як PQM-703 (виробництва Sonel), Fluke 434 (виробництва Fluke), MI 2390 (виробництва Metrel) і інші. Виткові замикання викликають підвищення амплітуд непарних гармонік: $\nu = 3, 5, 7$ і 9 гармоніки. На достовірність і чутливість результатів спектрального аналізу впливають якість напруги мережі живлення, зовнішні електромагнітні поля, різке збільшення зубцових гармонійних складових частин у фазних токах, які спостерігаються під час зміни навантаження на вал АД. Застосування такої методики ефективно для АД потужністю понад 15 кВт, що працюють із постійним навантаженням і мають не більше 25 витків у пазу статора АД. Наприклад, для АД потужністю до 15 кВт із числом у пазу статора понад 25 витків замикання до 15% витків викликає появу гармонійних складових частин у токах $\nu = 3, 5, 7$ і 9 , що в порівнянні з амплітудами гармонійних складових частин фазних струмів викликає наявність несиметричних напруг до 1% і несинусоїдальності напруг мережі живлення до 2%. Проведені вимірювання показників якості електроенергії (далі – ПКЕ) мереж Маріупольського державного порту показали, що несиметрія напруг мережі коливається від 0,5% до 1,5%, несинусоїдальності напруги – від 0,3% до 1%. За наявності в мережі живлення таких ПКЕ метод дозволяє виявляти виткові замикання в обмотці статора АД у разі виходу з ладу понад 30% витків у пазу статора, що відповідає чутливості 12 витків у пазу.

Метод аналізу спотворення магнітного поля в повітряному зазорі [9], заснований на виділенні зі спектра просторових гармонік індукції тих, які відповідають появі виткового замикання,

в основному застосовують для АД потужністю понад 55 кВт із числом провідників у пазу обмотки не більше 18. Для АД потужністю до 55 кВт метод має низьку чутливість і становить 40–60 % замкнених витків у пазу.

Методи діагностики, засновані на контролі експлуатаційних параметрів АД, таких як напруга живлення, споживаний струм, частота мережі й обороти АД, застосовні для АД потужністю нижче 15 кВт. Такі методи дозволяють виявити початковий момент виткового замикання [3; 10] і залежно від класу точності вимірювальних засобів володіють необхідною чутливістю та достовірністю.

Чутливість методів функціональної діагностики безпосередньо залежить від класів точності застосовуваних вимірювальних приладів. Натепер вивчення питання актуальне.

Постановка завдання. Мета роботи – дослідження впливу класу точності (далі – КТ) вимірювальних засобів для оцінки достовірності й чутливості виявлення початкового моменту виткових замикань у статорних обмотках асинхронних двигунів потужністю до 15 кВт.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розроблений спосіб [3] заснований на порівнянні результатів вимірювань фазних струмів АД I_ϕ з їх розрахунковими значеннями I_p . Критеріальною залежністю виявлення початкового моменту виявлення виткового замикання є вираз:

$$I_\phi \neq I_p + \delta_w, \quad (1)$$

де I_ϕ – вимірюваний струм в фазі АД у разі виткового замикання; I_p – розрахунковий струм у фазі АД у разі виткового замикання, δ_w – величина зони довірчих інтервалів, пов’язана з КТ вимірювальних приладів, розкидом фізичних величин опору АД та аналітично отриманих величин елементів схеми заміщення АД методами вимірювань і

швидкістю зміни величин режимних параметрів навантаження та живлячої мережі.

Оцінка впливу КТ вимірювальних приладів на величину зони довірчих інтервалів розглянута за стаціонарною зміною величин параметрів мережі й АД, а величини елементів схеми заміщення визначені згідно з методикою [11].

У табл. 1 наведено перелік вимірювальних приладів та їх КТ.

Абсолютна похибка вимірювального приладу визначається виразом згідно з [12]:

$$\Delta_{np} = \frac{\gamma_{np} \cdot X_{II}}{100}, \quad (2)$$

де γ_{np} – приведена похибка приладу (клас точності); X_{II} – свідчення цифрового вимірювального приладу.

Розрахункові похибки вимірювальних приладів у відносних одиницях (в.о.) представлені в табл. 2.

Розрахункове значення фазного струму I_p в обмотці АД визначається за виразом згідно з [3]:

$$I_{pi} = \frac{U_i}{|Z_i|} = \frac{U_i}{\sqrt{R_i^2 + X_i^2}}, \quad (3)$$

де U_i – значення фазної напруги мережі живлення, виміряне в i -й фазі; X_i – індуктивна складова частини повного опору i -ї фази АД; R_i – активна складова частини повного опору i -ї фази АД.

Повний комплексний опір Z_i i -ї фази АД згідно з [13] визначиться за формулою:

$$\underline{Z}_i = (r_1 + jx_1) + \frac{\left(\frac{r_2'}{s} + jx_2'\right) \cdot (r_\mu + jx_\mu)}{\left(\frac{r_2'}{s} + jx_2'\right) + (r_\mu + jx_\mu)}, \quad (4)$$

де r_1 , x_1 – активний та індуктивний опір розсіювання обмотки статора; r_2' , x_2' – наведені до обмотки статора активний та індуктивний опір розсіювання роторної обмотки; r_μ , x_μ – активний та індуктивний опір намагнічуючого контуру, s – ковзання.

Таблиця 1

Сучасні цифрові вимірювальні прилади

КТ	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5
Амперметри	СА 3010 PM800***	СА 3021 Д5075	ЩП 120П 7КТ1120* AMTD-1-R**	ЩП-72 DJ-A965	А-72-6
Вольтметри	ЩП20-П PM800***	Серія Р	VMD-933 7КТ1110*	V-03	ВМ-3
КТ	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2
Тахометри	ДО-03	Testo-465	DT-2234C+ DT-30 LK	ТЭ-Д	ТЭМП-4 ЗТСТ
Частотоміри	СС3021	ЩЧ02	ЦП85/12 ЧС-01-ТК	Ф5043	ЩЧ120

Примітки: * – виробництва Siemens;
** – виробництва АВВ;
*** – виробництва Schneider Electric.

Поява виткового замикання викликає зміни активного й індуктивного опорів обмотки статора й індуктивного опору намагнічуючого контуру, які залежать від кількості замкнутих витків. Згідно з [3] відносний коефіцієнт зміни числа витків k_w визначається за виразом:

$$k_w = 1 - \frac{w_k}{w_1}, \quad (5)$$

де w_k – кількість замкнутих витків у пазу обмотки статора АД; w_1 – загальне число витків в обмотці.

За наявності виткового замикання з урахуванням коефіцієнта k_w вираження (4) запишеться у вигляді:

$$\underline{Z}_i = (r_1 \cdot k_w + jx_1 \cdot k_w^2) + \frac{\left(\frac{r_2'}{s} + jx_2'\right) \cdot (r_\mu + jx_\mu \cdot k_w^2)}{\left(\frac{r_2'}{s} + jx_2'\right) + (r_\mu + jx_\mu \cdot k_w^2)}, \quad (6)$$

Використання методики [11] визначення величин елементів схеми заміщення АД у порівнянні з методами, наведеними в [13; 14; 15], дозволило підвищити чутливість виявлення початкового моменту виткового замикання, наприклад, для АД потужністю до 15 кВт до 1,5%, що склало 3 витки.

Введемо коефіцієнт чутливості β_I , що характеризує відношення розрахункового фазного струму за виразом (3) до фактично виміряного струму, який за виткового замикання змінюється залежно від кількості коротко замкнутих витків у пазу статора w_k . Коефіцієнт β_I є функцією коефіцієнта зміни числа витків k_w і визначається виразом:

$$\beta_I = f(k_w) = \frac{I_p}{I_b(k_w)}, \quad (7)$$

де $I_b(k_w)$ – вимірний фазний струм за виткового замикання у фазі обмотки статора, що залежить від коефіцієнта k_w ; у нормальному режимі роботи $I_b = I_p$, а коефіцієнт чутливості β_I дорівнює 1.

Величина зони довірчих інтервалів як функція КТ вимірювальних приладів повинна задовольняти умові:

$$\delta_w > f(\Delta \tilde{I}_{np} + \Delta \tilde{I}_k), \quad (8)$$

де \tilde{I}_{np} – похибка виміряного струму, відповідна до КТ амперметрів, що застосовуються

для визначення величини виміряного струму I_p ; \tilde{I}_k – похибка розрахункового струму, що залежить від КТ вольтметрів, частотомірів і тахометрів під час визначення величини розрахункового струму I_p .

Похибка виміряного струму \tilde{I}_{np} відповідає значенням, представленим у табл. 2 для амперметрів різних КТ, тобто $\Delta \tilde{I}_{np} = \Delta_{npA}$.

Похибка \tilde{I}_k під час визначення розрахункового струму непрямим способом є функцією трьох змінних: похибки вольтметра, похибки частотомера й похибки тахометра. Похибка знаходиться як різниця значень розрахункового струму у функції від КТ приладів (коли значення змінних взяті з урахуванням похибок) і розрахункового струму з нульовою похибкою за висловом:

$$\Delta \tilde{I}_k = \pm (I_p(f(\Delta_{npv}, \Delta_{npn}, \Delta_{npr})) - I_p), \quad (10)$$

де $I_p(f(\Delta_{npv}, \Delta_{npn}, \Delta_{npr}))$ – значення розрахункового струму з урахуванням похибок вольтметра, тахометра й частотомера за різних КТ приладів.

За стаціонарного режиму мережі й незмінного навантаження АД відхилення контрольованих параметрів від дійсних значень зумовлено похибками приладів вимірювання. Розкид вимірних значень напруг, оборотів і частоти мережі визначається виразами:

$$U_\Delta = U \pm \Delta_{npv}; \quad (11)$$

$$n_\Delta = n \pm \Delta_{npn}; \quad (12)$$

$$f_\Delta = f \pm \Delta_{npr}. \quad (13)$$

Підставами вираження (12), (13) у вираз (4) і визначимо похибку визначення опору залежно від КТ частотомера й тахометра:

$$\underline{Z}_{\Delta s} = (r_1 + jx_1) + \frac{\left(\frac{r_2'}{s \pm \Delta_s} + jx_2'\right) \cdot (r_\mu + jx_\mu)}{\left(\frac{r_2'}{s \pm \Delta_s} + jx_2'\right) + (r_\mu + jx_\mu)}, \quad (14)$$

де Δ_s – похибка визначення ковзання залежно від КТ частотомера й тахометра, визначається за виразом:

$$\Delta_s = \pm \frac{n \cdot (\Delta - 1)}{n_o}, \quad (15)$$

Таблиця 2

Похибки приладів Δ_{np} різних КТ

КТ		0,1	0,2	0,5	1,0	1,5
Амперметри	Δ_{npA} , в.о.	±0,001	±0,002	±0,005	±0,01	±0,015
Вольтметри	Δ_{npV} , в.о.					
КТ		0,01	0,02	0,05	0,1	0,2
Тахометри	Δ_{npr} , в.о.	±0,0001	±0,0002	±0,0005	±0,001	±0,002
Частотоміри	Δ_{nps} , в.о.					

де n – робочі обороти АД, n_o – частота обертання поля статора, Δ – коефіцієнт, що враховує похибки частотоміра й тахометра:

$$\Delta = \frac{1 \pm \frac{\Delta_{np\ n}}{n}}{1 \pm \frac{\Delta_{np\ f}}{f}} \quad (16)$$

Розрахунковий струм $I_p(f(\Delta_{np\ v}, \Delta_{np\ n}, \Delta_{np\ f}))$ з урахуванням (11) і (14) запишеться як:

$$I_p(f(\Delta_{np\ v}, \Delta_{np\ n}, \Delta_{np\ f})) = \frac{U \pm \Delta_{np\ v}}{(r_1 + jx_1) + \frac{\left(\frac{r_2'}{s \pm \Delta_s} + jx_2'\right) \cdot (r_\mu + jx_\mu)}{\left(\frac{r_2'}{s \pm \Delta_s} + jx_2'\right) + (r_\mu + jx_\mu)}} \quad (17)$$

Вираз (10) з урахуванням виразу (17) дозволяє оцінити:

1) вплив КТ кожного вимірювального приладу (вольтметра, тахометра й частотоміра) на зміну похибки під час визначення розрахункового струму, тобто $\Delta \tilde{I}_{kU} \rightarrow I_p(f(\Delta_{np\ v}))$, $\Delta \tilde{I}_{kn} \rightarrow I_p(f(\Delta_{np\ n}))$, $\Delta \tilde{I}_{kf} \rightarrow I_p(f(\Delta_{np\ f}))$;

2) спільний вплив КТ всіх застосовуваних приладів на похибку під час визначення розрахункового струму, тобто $\Delta \tilde{I}_k \rightarrow I_p(f(\Delta_{np\ v}, \Delta_{np\ n}, \Delta_{np\ f}))$.

Оцінка похибки розрахункового фазного струму проведена для АД потужністю до 15 кВт, модель АД 4А80А4У3. Приймаємо КТ для всіх вимірюваних приладів відповідно до табл. 1. Мінімальна похибка під час визначення відповідає КТ 0,1 для вольтметрів, 0,01 для тахометрів і 0,01 для частотомірів. На рис. 1 представлені графіки залежності похибки розрахункового струму від КТ приладів кожного контрольованого параметра окремо. На рис. 2 представлена залежність зміни похибки

визначення розрахункового струму під час зміни КТ приладів всіх вимірюваних параметрів, також пунктиром показані графіки, зображені на рис. 1.

Залежності, наведені на рис. 1, показують, що найбільший вплив на інтервали меж похибки надають КТ приладів, що вимірюють частоту й обороти АД.

Відповідно до рис. 1 похибка розрахункового струму $\Delta \tilde{I}_k$:

– збільшується з 0,2 % за КТ вольтметра 0,1 до 3,2 % за КТ 1,5;

– збільшується з 0,3 % за КТ тахометра 0,01 до 38,7 % за КТ 1,5;

– збільшується з 0,3 % за КТ частотоміра 0,01 до 37,4 % за КТ 1,5.

Аналіз залежності похибок розрахункового струму від зміни КТ вимірювальних приладів, наведених на рис. 2, показує, що зміна похибки під час розрахунків фазного струму від зміни КТ приладів має лінійну залежність. Для вольтметра КТ = 0,1, тахометра КТ = 0,01 і частотоміра КТ = 0,01 загальна похибка розрахункового струму становить 0,8%. Під час використання вольтметра КТ = 0,2, тахометра КТ = 0,02 і частотоміра КТ = 0,02 загальна похибка розрахункового струму становить 1,3%. Під час використання вольтметра КТ = 0,5, тахометра КТ = 0,05 і частотоміра КТ = 0,05 загальна похибка розрахункового струму становить 2,8%.

Найбільша величина похибки розрахункового струму виникає за умови відхилень контрольованих параметрів: $U_\Delta = U + \Delta_{np\ v}$; $n_\Delta = n - \Delta_{np\ n}$; $f_\Delta = f + \Delta_{np\ f}$. Величина $\Delta \tilde{I}_{k\ max}$ буде критерієм визначення довірчого інтервалу чутливості δ_w .

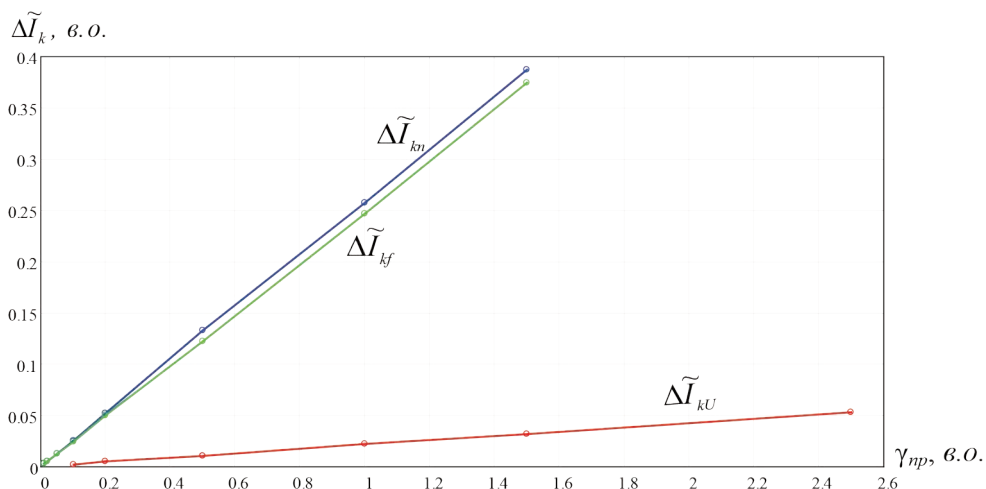


Рис. 1. Графіки залежності похибки розрахункового струму $\Delta \tilde{I}_k$ від КТ вольтметрів (крива $\Delta \tilde{I}_{kU}$), частотомірів (крива $\Delta \tilde{I}_{kf}$) і тахометрів (крива $\Delta \tilde{I}_{kn}$)

Приріст виміряного струму ΔI_e щодо розрахункового струму I_p за наявності виткового замикання в обмотці пов'язаний із коефіцієнтом чутливості β_l співвідношенням:

$$\Delta I_e = (1 - \beta_l) \cdot I_e. \quad (18)$$

Чутливість вимірювальної системи під час виявлення початкового моменту виткового замикання у відносних одиницях з урахуванням (18) визначиться за формулою:

$$1 - \beta_l \geq \delta_w. \quad (19)$$

Виконання умови (19) є критерієм виявлення початкового моменту появи виткового замикання в обмотці статора АД.

Апробація отриманих результатів. Оцінка коефіцієнта чутливості β_l залежно від кількості замкнутих витків у пазу статора w_k проведена для АД типів: 4A71A2Y3 потужністю 0,75 кВт, $n_o = 3000$ об/хв, кількість витків в обмотці $w_l = 356$, кількість витків у пазу $S_n = 89$, робочий струм $I_p = 1,007$ А; 4A80A4Y3 потужністю 1,1 кВт, $n_o = 1500$ об/хв, $w_l = 360$, $S_n = 60$, $I_p = 2,127$ А; 4A160M6Y3 потужністю 15 кВт, $n_o = 1000$ об/хв, $w_l = 102$,

$S_n = 34$, $I_p = 21,33$ А. Розрахунок параметрів схеми заміщення проведений за уточненою методикою [11]. Відповідні графіки наведені на рис. 3.

Залежності на рис. 3 дозволяють оцінити початковий момент утворення виткового замикання на виході з роботи витків у пазу статора. Для АД потужністю 0,75 кВт початковий момент виявляється під час замикання 3 витків, коефіцієнт чутливості дорівнює 0,993; для АД потужністю 1,1 кВт початковий момент виявляється під час замикання 2 витків, коефіцієнт чутливості дорівнює 0,991; для АД потужністю 15 кВт початковий момент виявляється під час замикання 2 витків, коефіцієнт чутливості дорівнює 0,99.

У табл. 3 представлені зміни коефіцієнта чутливості β_l під час замикання до 10% витків у пазу статора для досліджуваних АД.

Результати розрахунку приросту виміряного струму ΔI_e при 2, 5 і 10 % замкнутих витків у пазу для розглянутих АД представлені в табл. 4.

У табл. 5 наведені результати розрахунку похибок розрахункового струму залежно від КТ застосованих амперметрів.

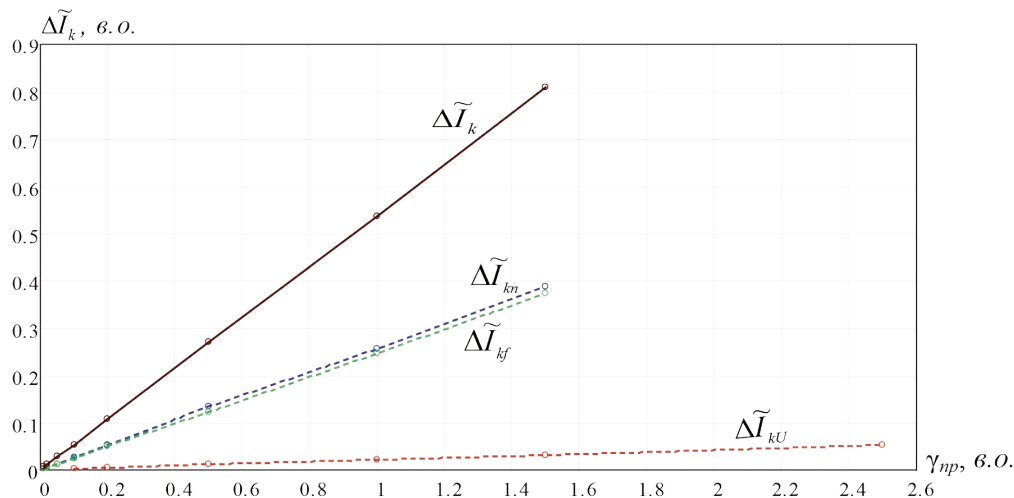


Рис. 2. Графік залежності похибки розрахункового струму від зміни КТ вимірювальних приладів

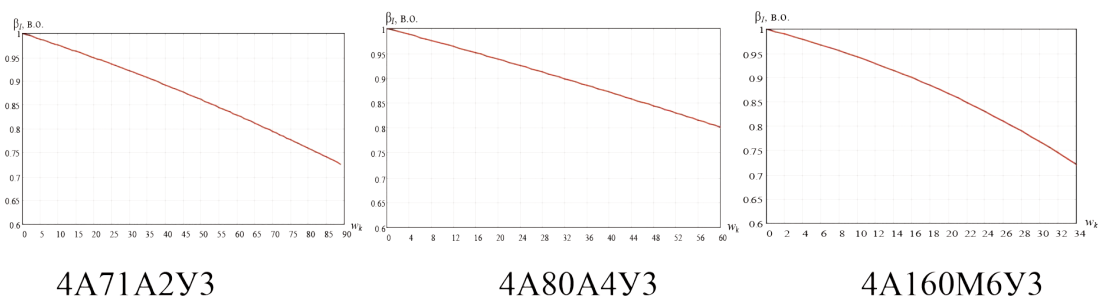


Рис. 3. Графіки залежності коефіцієнта чутливості β_l від зміни числа замкнутих витків у пазу статора w_k

У табл. 6 наведені результати розрахунку похибки розрахункового струму $\tilde{I}_{k \max}$ для досліджуваних АД залежно від КТ застосованих вимірювальних приладів, довірчі інтервали δ_w і коефіцієнт чутливості вимірювальної системи.

Аналіз даних, наведених у табл. 6, показав:

– чутливість виявлення 2–5% замкнутих витків у пазу забезпечується застосуванням:

– амперметрів і вольтметрів КТ 0,2, частотомірів КТ 0,02 / 0,01 і тахометрів КТ 0,01 / 0,02 для АТ 4А71А2У3;

– амперметрів і вольтметрів КТ 0,2, частотомірів і тахометрів КТ 0,01 для АТ 4А80А4У3 або КТ амперметрів / вольтметрів 0,1 / 0,2 і частотомірів / тахометрів КТ 0,02 / 0,01;

– амперметрів КТ 0,2 і вольтметрів КТ 0,1, частотомірів і тахометрів КТ 0,01 для АТ 4А160М6У3;

– чутливість виявлення 6–10% замкнутих витків у пазу забезпечується застосуванням:

– амперметрів КТ 0,5 / 0,2 і вольтметрів КТ 0,2 / 0,5, частотомірів КТ 0,02 / 0,05 і тахометрів КТ 0,05 / 0,02 для АТ 4А71А2У3 і 4А80А4У3;

– амперметрів / вольтметрів КТ 0,2 / 0,1, частотомірів і тахометрів КТ 0,01 для АТ 4А160М6У3.

Отримані результати показують, що для виявлення початкового моменту появи виткового замикання з чутливістю 2–5 витків для АД потужністю від 0,5 до 15 кВт необхідне застосування приладів амперметрів / вольтметрів із КТ не вище 0,5 / 0,2 для частотомірів / тахометрів із КТ не вище 0,02 / 0,02.

Висновки.

1. Визначено межі зміни похибок вимірюваного фазного струму й значення розрахункового струму й установлено, що зміна КТ вольтметра від 0,1 до 1,5 приводить до збільшення похибки

Таблиця 3

Коефіцієнт чутливості відношення розрахункового фазного струму за виразом (3) до фактично вимірюваного струму β_I залежно від w_k

w_k	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	4А71А2У3								
β_I	0,998	0,995	0,993	0,990	0,988	0,985	0,983	0,980	0,978
	4А80А4У3								
β_I	0,997	0,994	0,991	0,988	0,985	0,982			
	4А160М6У3								
β_I	0,995	0,990	0,984	0,979					

Таблиця 4

Приріст струму ΔI_ϵ під час зміни числа замкнутих витків у пазу w_k

w_k	%	2			5			10		
	ВІТКИ	2	1	1	5	3	2	9	6	4
β_I , в. о.		0,995	0,997	0,995	0,988	0,991	0,990	0,978	0,982	0,979
ΔI_ϵ , А	4А71А2У3	0,005			0,012			0,022		
	4А80А4У3		0,006			0,019			0,038	
	4А160М6У3			0,11			0,21			0,45

Таблиця 5

Похибка \tilde{I}_{np} амперметрів різних КТ

γ_{np}	0,1	0,2	0,5	1,0	1,5
	4А71А2У3 ($I_p = 1,007$ А)				
\tilde{I}_{np} , А	0,001	0,002	0,005	0,010	0,015
	4А80А4У3 ($I_p = 2,127$ А)				
\tilde{I}_{np} , А	0,002	0,004	0,011	0,021	0,032
	4А160М6У3 ($I_p = 21,33$ А)				
\tilde{I}_{np} , А	0,02	0,04	0,11	0,21	0,32

Наведені похибки $\tilde{\Delta}_{np}$ і $\tilde{\Delta}_{k\ max}$ залежно від КТ приладів, довірчі інтервали δ_w і чутливість вимірювальної системи

γ_{np} амперметр	γ_{np} вольтметр	γ_{np} тахометр	γ_{np} частотомір	$\tilde{\Delta}_{np}$, А	$\tilde{\Delta}_{k\ max}$, А	δ_w , А	$(1-\beta_I) I_{изм}$, А	Чут-ть, w_k
4A71A2Y3								
0,1	0,1	0,01	0,01	0,001	0,005	0,007	0,007	3
0,2	0,2	0,01	0,01	0,002	0,006	0,009	0,010	4
0,2	0,2	0,02	0,01	0,002	0,008	0,011	0,012	5
0,2	0,2	0,01	0,02	0,002	0,008	0,011	0,012	5
0,2	0,2	0,02	0,02	0,002	0,010	0,013	0,015	6
0,5	0,5	0,01	0,01	0,005	0,009	0,015	0,015	6
0,5	0,5	0,02	0,02	0,005	0,013	0,019	0,020	8
0,2	0,2	0,05	0,02	0,002	0,015	0,018	0,020	8
0,2	0,5	0,02	0,05	0,002	0,018	0,021	0,022	9
0,2	0,2	0,05	0,05	0,002	0,021	0,024	0,025	10
4A80A4Y3								
0,1	0,1	0,01	0,01	0,002	0,007	0,010	0,013	2
0,2	0,1	0,01	0,01	0,004	0,007	0,011	0,013	2
0,1	0,2	0,01	0,01	0,002	0,010	0,013	0,013	2
0,2	0,2	0,01	0,01	0,004	0,010	0,016	0,019	3
0,2	0,1	0,01	0,02	0,004	0,010	0,016	0,019	3
0,2	0,2	0,02	0,02	0,004	0,015	0,021	0,026	4
0,5	0,5	0,02	0,02	0,011	0,021	0,032	0,032	5
0,2	0,2	0,05	0,02	0,004	0,023	0,029	0,032	5
0,2	0,5	0,02	0,05	0,004	0,029	0,035	0,038	6
0,5	0,5	0,05	0,02	0,011	0,029	0,041	0,045	7
4A160M6Y3								
0,1	0,1	0,01	0,01	0,02	0,15	0,17	0,21	2
0,2	0,1	0,01	0,01	0,04	0,15	0,20	0,21	2
0,2	0,2	0,01	0,01	0,04	0,21	0,27	0,34	3
0,2	0,1	0,02	0,01	0,04	0,27	0,33	0,34	3
0,1	0,2	0,01	0,02	0,02	0,30	0,33	0,34	3
0,2	0,2	0,02	0,02	0,04	0,38	0,44	0,45	4
0,5	0,2	0,02	0,01	0,11	0,30	0,43	0,45	4
0,2	0,5	0,01	0,02	0,04	0,36	0,42	0,45	4
0,5	0,2	0,02	0,02	0,11	0,38	0,51	0,58	5
0,5	0,5	0,02	0,02	0,11	0,45	0,57	0,58	5

під час визначення струму на 3%, зміна КТ частотоміра від 0,01 до 1,5 приводить до зростання похибки на 37,1%, а зміна КТ тахометра від 0,01 до 1,5 приводить до зростання похибки на 38,4%.

2. Для достовірного виявлення виткового замикання не більше 5% замкнутих витків у пазу статора АД потужністю до 15 кВт необхідно засто-

сування амперметрів і вольтметрів КТ не вище 0,2, а частотомірів і тахометрів – КТ не вище 0,02.

3. Для достовірного виявлення виткового замикання 6–10% замкнутих витків у пазу статора для АД потужністю до 15 кВт необхідно застосування амперметрів і вольтметрів КТ не вище 0,5, а частотомірів і тахометрів – КТ не вище 0,05.

Список літератури:

1. Кривонос В.Е., Василенко С.В. Влияние запыленной среды на срок службы обмоток статора асинхронных двигателей. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2015. Вып. № 6. С. 35–40.
2. Кривонос В.Е., Василенко С.В. Управление ресурсом работы асинхронного двигателя в условиях не симметрии питающей сети. *Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии*. 2012. Вып. № 2 (10Е). С. 14–24.
3. Кривонос В.Е., Василенко С.В., Бухлал Н.А. Розробка програмного забезпечення виявлення між-виткового замикання в статорних обмотках електродвигуна в умовах несиметрії напруг. *Наука та виробництво* : міжвуз. темат. зб. наук. праць. 2020. Вип. № 23. С. 131–141.

4. Браташ О.В., Калинов А.П. Анализ методов вибродиагностики асинхронных двигателей. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2012. Вып. № 5. С. 43–50.
5. Николайчук Ю.С., Дорошев Ю.С. Методы вибродиагностики электрических машин. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011. Вып. № 10. С. 56–61.
6. Чепульский Ю.П., Замаев К.С. Вибродиагностика деталей машин : Учебное пособие. Москва, 2009. 75 с.
7. Губаревич О.В., Гулак С.О., Поляков А.П. Діагностування обмоток статора асинхронних двигунів з використанням моделювання на основі годографа вектора парка. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. Вип. № 3. С. 29–36.
8. Барков А.В., Борисов А.А. Современные возможности диагностирования машин с электроприводом по току двигателя. *Металлургические процессы и оборудование*. 2013. Вып. № 1 (31). С. 61–65.
9. Гуторова М.С. Моделирование магнитного поля в промежутке асинхронных двигателей за витковых замыканий обмотки статора. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*. 2012. Вип. № 40. С. 90–94.
10. Устройство для контроля и защиты электродвигателя от неполнофазных режимов и витковых замыканий : авторское свидетельство № 1584028 А1 SU: H02H 7/085, 7/08 ; заявл. 09.03.88 ; опубл. 07.08.90. Бюл. № 29. 6 с.
11. Krivosov V.E., Vasilenko S.V. Comparative analysis of methods for calculating the parameters of asynchronous engines for reference data. *ÖsterreichischesMultiscience Journal*. 2019. Vol. 1. № 18. P. 36–42.
12. Кухарчук В.В., Кучерук В.Ю., Долгополов В.П., Грумінська Л.В. Метрологія та вимірювальна техніка : Навчальний посібник. Вінниця, 2004. 252 с.
13. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных электродвигателей. Москва, 1984. 240 с.
14. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным. *Электричество*. 1998. Вып. № 4. С. 38–42.
15. Усольцев А.А., Лукичев Д.В. Определение параметров схемы замещения АД по справочным данным. *Известия ВУЗов. Серия Приборостроение*. 2008. Т. 51. № 10. С. 35–41.

Kryvonosov V.E., Vasilenko S.V., Skosyrev V.G. ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF ACCURACY CLASSES OF MEASURING INSTRUMENTS IN THE DETECTION OF THE INITIAL MOMENT OF A TURN CIRCUITS IN THE STATOR WINDING

Detection of a turn circuit in the stator winding of an induction motor at an early stage (up to 10% of closed turns) of its appearance is the most difficult defect to diagnose. Existing methods for diagnosing short circuits (vibration diagnostics, method of spectral analysis of current consumption, method for determining the distortion of the magnetic field in the air gap) have the necessary sensitivity and reliability in diagnosing motors with a power over 25 kW, and for motors with a power up to 15 kW allow detecting short circuits of more than 30 % of turns. In [3], a method is proposed for detecting turn-to-turn short circuits at an early stage for asynchronous motors up to 15 kW. The sensitivity and reliability of the proposed method is influenced by the choice of the accuracy class of the measuring instruments. The paper investigates the influence of the accuracy class of measuring instruments on the reliability and sensitivity of detecting the initial moment, the occurrence of a turn circuit in the stator winding of asynchronous motors with a power of up to 15 kW. A criterion for identifying the initial moment of occurrence of a turn circuit is proposed, which is a comparison of the measured phase current with the calculated current, taking into account the confidence interval. The value of the confidence interval depends on the accuracy classes of the measuring instruments, the spread of the physical values of the resistances of the equivalent circuit of the motor, the measurement methods and the rate of change of the parameters of the supply network. Assessment of the influence of the accuracy class of measuring instruments on the value of the confidence intervals is considered with a stationary change in the network parameters. An analytical expression has been obtained that makes it possible to evaluate the influence of the accuracy class of measuring instruments on the change in the error in determining the rated current, both separately and when the errors of all instruments are taken into account together. The required sensitivity of the measuring system for detecting the initial moment of occurrence of a turn circuit has been determined. The results obtained have been tested; for the motors under study, the accuracy classes of the measuring instruments are determined, which are necessary to identify 2, 5 and 10% of closed turns in the groove of the stator winding.

Key words: induction motor, stator winding, turn-to-turn short circuits, sensitivity, measuring instrument, accuracy class.