

## УТОЧНЕНА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЖИМУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИПРОБУВАНЬ

**І.В. Головань**, канд.техн.наук  
 Інститут електродинаміки НАН України,  
 пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.  
 E-mail: [golovan\\_77@ukr.net](mailto:golovan_77@ukr.net)

*Проведено порівняльний аналіз результатів чисельного дослідження режиму короткого замикання асинхронного двигуна типу 4A132M8, 4A355S8 за методикою ГОСТ 7217-87 з їхніми каталоговими значеннями. Уточнено методику перерахунку обертового моменту і струму короткого замикання фізичного експерименту з пониженої напруги живлення на номінальну за порівняльним аналізом результатів чисельного експерименту режиму роботи короткого замикання серійного асинхронного двигуна і каталоговими даними. Бібл. 4, рис. 4.*

**Ключові слова:** асинхронний двигун, обертовий момент, струм, коротке замикання.

**Вступ.** Пуск асинхронного двигуна (АД) при живленні його від джерела із номінальною напругою супроводжується високою кратністю пускового струму, яка може сягати 7,5. Значний пусковий струм викликає значні термічні навантаження обмотки. Через це визначення обертового моменту і струму короткого замикання (КЗ) при живленні двигуна від джерел з номінальною напругою стає проблематичним. Згідно з ГОСТ 7217-87 [1] значення обертового моменту і струму КЗ АД визначаються з досліду КЗ при живленні двигуна від джерела пониженої напруги шляхом перерахунку. За відповідними виразами [1] отримують значення обертового моменту і струму КЗ. Порівнюючи дані характеристики чисельного експерименту дослідження режиму КЗ АД на номінальну напругу живлення з результатами фізичного експерименту за методикою ГОСТ 7217-87, спотерігаємо їхню розбіжність, яка може бути пов'язана з перерахунком з пониженої на номінальну напругу живлення АД обертового моменту і струму КЗ АД.

**Мета роботи** полягає в уточненні методики перерахунку обертового моменту і струму КЗ фізичного експерименту з пониженої напруги живлення на номінальну за порівняльним аналізом результатів чисельного експерименту режиму роботи КЗ серійного АД і каталоговими даними.

**Основний матеріал та результати досліджень.** Реалізація поставленої мети стала можливою завдяки використанню математичної моделі АД [3], що враховує особливості протікання в ній фізичних процесів у режимі короткого замикання. Висока точність результатів чисельних експериментів за такою моделлю, перш за все, обумовлена використанням отриманих залежностей зміни параметрів у функції струмів і магніторушійної сили (МРС), що сформовані за результатами чисельного польового аналізу АД [4]. Відповідність математичної моделі електричної машини [3] фізичній була підтверджена порівнянням результатів чисельних експериментів дослідження робочого та режиму КЗ для машин з каталоговими даними [4].

Математичне моделювання номінальних режимів серійних АД за параметрами, які визначено з польового аналізу, забезпечує високу збіжність його результатів з каталоговими даними (похибка складає 1-2%). Так як каталогові значення АД отримують з фізичного експерименту при номінальній напрузі живлення, то їхня розбіжність з результатами дослідження АД чисельним шляхом можна віднести до похибки чисельного експерименту. Достовірність каталогових даних режиму КЗ потребує перевірки, що пов'язано з непрямым їхнім визначенням за результатами фізичного експерименту.

Перерахований на номінальну напругу живлення АД обертовий момент і струм КЗ згідно з [1] знаходиться з урахуванням поправки на насичення шляхів потоків розсіювання за виразами [2]

$$I_{kn} = \frac{U_n - U'_k}{U_k - U'_k} I_k, \quad M_{kn} = \left( \frac{I_{kn}}{I_k} \right)^2 M_k, \quad (1,2)$$

де  $U_k, I_k, M_k$  – найбільші напруга, струм і обертовий момент у досліді,  $U_n$  – номінальна напруга,  $U'_k$  – напруга, що відповідає відрізу, який відсікається на вісі абсцис дотичною до кривої, яка зображує залежність струму від напруги, в точці, що відповідає напрузі експерименту.

З метою встановлення величини розбіжності між значеннями обертового моменту і струму КЗ за результатами чисельного експерименту АД на пониженому напругу живлення з наступним перера-

хунком за (1), (2) та каталоговими даними проведемо їхнє порівняння на прикладі АД 4A132M8, 4A355S8.

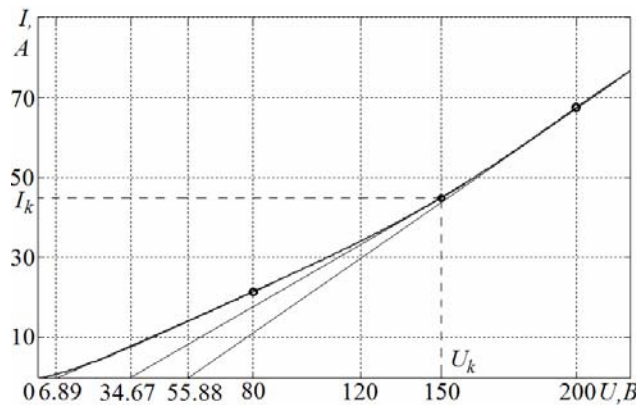


Рис. 1

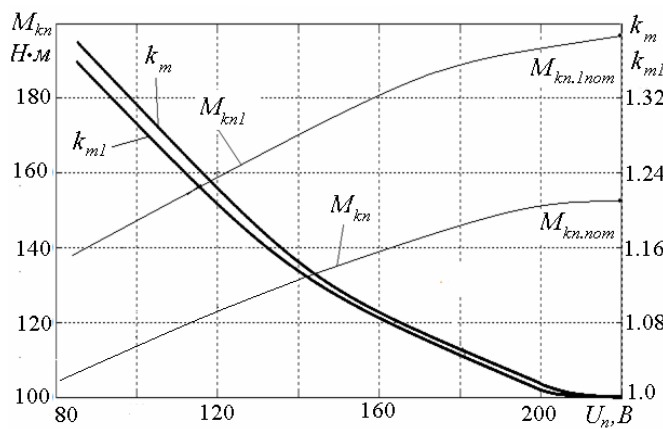


Рис. 2

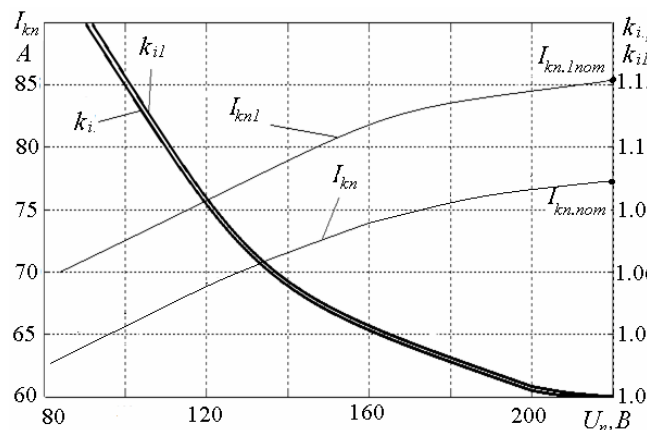


Рис. 3

На рис. 1 за результатами чисельного експерименту АД 4A132M8 побудована крива залежності струму КЗ від напруги живлення. За даною кривою згідно з [1] визначається  $U'_k$

$$U'_k = U_{k+0.5} - I_{k+0.5} \frac{U_{k+0.5} - U_{k-0.5}}{I_{k+0.5} - I_{k-0.5}},$$

де  $U_{k+0.5}$  та  $U_{k-0.5}$  – значення напруг на 0.5% більше та менше від значення  $U_k$  відповідно;  $I_{k+0.5}$  та  $I_{k-0.5}$  значення струмів, що відповідають значенням напруг  $U_{k+0.5}$  та  $U_{k-0.5}$ . Так, наприклад, для  $U_k=150$  В значення  $U'_k=34.67$  В.

На рисунках 2, 3 представлено залежності обертового моменту і струму КЗ ( $M_{kn,1}$ ,  $I_{kn,1}$ ), які відповідають результатам чисельного експерименту дослідження КЗ двигуна 4A132M8 за основною гармонічною складовою МРС після перерахування їх відповідно до (1), (2) у функції напруги живлення, що варіювалася в діапазоні 80÷220 В. Як видно, значення обертового моменту і струму КЗ ( $M_{kn,1}$ ,  $I_{kn,1}$ ), перераховані за методикою [1] на номінальну напругу ( $U_n=220$  В) у діапазоні варіювання напруги живлення  $0.9\div 1.0U_n$ , змінюються в межах 3% у порівнянні з даними, отриманими при живленні АД від номінальної напруги (точки  $M_{kn,1,nom}$ ,  $I_{kn,1,nom}$  на кривих  $M_{kn,1}$ ,  $I_{kn,1}$ ). При зменшенні напруги живлення від  $0.9U_n$  розбіжність зростає. Розбіжність результатів чисельного експерименту дослідження АД при живленні від номінальної напруги (рис. 2, 3, точки  $M_{kn,1,nom}$ ,  $I_{kn,1,nom}$  на кривих  $M_{kn,1}$ ,  $I_{kn,1}$ ) з каталоговими даними ( $M_{n,кат}=140$  Н·м,  $I_{n,кат}=74.6$  А [2]) сягає 40%.

Така розбіжність результатів пов'язана з припущенням відсутності вищих просторових гармонічних складових МРС у структурі розрахункової моделі, що використовується [4]. Підвищення адекватності математичної моделі АД із визначенням параметрів за результатами польового аналізу при врахуванні гармонік МРС реалізовано у модифікації розрахункової моделі [4]. Розбіжність перерахованого обертового моменту і струму КЗ чисельного експерименту з

пониженої напруги живлення на номінальну на основі математичної моделі із врахуванням вищих гармонічних складових МРС (найбільший вклад у величину МРС становлять гармоніки 5,7,11,13 порядків) порівняно з каталоговими значеннями суттєво зменшилася і знаходиться у межах 9% (рис. 2, 3, точки  $M_{kn,nom}$ ,  $I_{kn,nom}$  на кривих  $M_{kn}$ ,  $I_{kn}$ ). При цьому значення обертового моменту і струму КЗ у діапазоні варіювання напруги живлення  $0.9\div 1.0U_n$  майже не змінюються, а у діапазоні  $0.4\div 0.9U_n$  змінюються, зберігаючи подібну тенденцію з розрахунком за основною гармонічною складовою МРС. Згідно з [1] дослід КЗ АД потужністю до 100 кВт може здійснюватися при пониженої напрузі, але не менше  $0.9U_n$ .

Для уточнення перерахунку обертового моменту і струму КЗ за результатами фізичного експерименту із пониженою напругою живлення у діапазоні  $0.4\div 0.9U_n$  введемо в (1), (2) поправкові

коефіцієнти  $k_m, k_i$ , що враховують різницю між значеннями обертового моменту і струму КЗ АД при номінальній і пониженій напрузі живлення

$$k_m = M_{kn.nom} / M_{kn}, \quad k_i = I_{kn.nom} / I_{kn}. \quad (3,4)$$

Вирази для визначення обертового моменту і струму КЗ за результатами фізичного експерименту з урахування коефіцієнтів  $k_m, k_i$  будуть мати вигляд

$$M'_{kn} = \left( \frac{I_{kn}}{I_k} \right)^2 M_k k_m, \quad I'_{kn} = \frac{U_n - U'_k}{U_k - U'_k} I_k k_i. \quad (5,6)$$

Залежності поправкових коефіцієнтів  $k_m, k_i$  у функції значень напруги живлення АД представлені на рис. 2, 3.

Так як криві поправкових коефіцієнтів  $k_m, k_i$  та  $k_{m1}, k_{i1}$  повторюють одна одну з розбіжністю у 2–3% (рис. 2, 3), у виразах (5), (6) можна використовувати  $k_{m1}, k_{i1}$  – поправкові коефіцієнти для перерахунку обертового моменту та струму короткого замикання, що отримані з чисельного експерименту дослідження АД з використанням математичної моделі АД за основною гармонікою МРС. Збіг кривих  $k_m, k_i$  та  $k_{m1}, k_{i1}$  пояснюється сталим співвідношенням перерахованих значень  $M_{kn1}, M_{kn}$  та  $I_{kn1}, I_{kn}$  (паралельність кривих  $M_{kn1}, M_{kn}$  та  $I_{kn1}, I_{kn}$  на рис. 2, 3). Сталість співвідношень даних характеристик обумовлена величиною  $I_{kn}/I_k$ . Струм  $I_k$  за виразом (6) співвідноситься з  $U_k$  відповідно до зміни еквівалентного опору АД (при лінійності цього опору  $U_k/I_k = \text{const}$ ). Нелінійність даного опору у пускових режимах обумовлена насиченням за шляхами розсіювання (за основним полем машина не насичується). Через те, що вплив зміни насичення на струм практично однаковий при врахуванні чи неврахуванні вищих гармонік поля, то співвідношення  $M_{kn1}, M_{kn}$  та  $I_{kn1}, I_{kn}$  при різних значеннях напруги живлення буде сталим. Це буде справедливим для АД з короткозамкненим ротором будь-якої потужності, тому вирази (5), (6) із заміною поправкових коефіцієнтів  $k_m, k_i$  на  $k_{m1}, k_{i1}$  можна використати і для АД потужністю більше 100 кВт.

Таким чином, використання виразів (5), (6) дозволяє отримати з фізичного експерименту дослідження АД значення обертового моменту і струму КЗ на нижчу від  $0.9U_n$  напругу живлення.

Дослідимо залежності перерахованих значень обертового моменту і струму КЗ із зміною напруги живлення двигунів потужністю більше 100 кВт, для яких дослід короткого замикання згідно з методикою [1] проводиться при напрузі, не меншій 40% від номінальної.

На рис. 4 представлено залежності обертового моменту і струму КЗ (криві  $M_{kn.1}, I_{kn.1}$ ), які відповідають результатам чисельного експерименту двигуна 4A132M8 за основною гармонічною складовою МРС, перерахованих за методикою [1] у функції напруги живлення, що варіювалася у діапазоні  $U = 150 \div 380$  В. З рисунку видно, що значення обертового моменту і струму КЗ, перерахованих за методикою [1] (криві  $M_{kn.1}, I_{kn.1}$ ), у порівнянні із значеннями, що отримані з чисельного експерименту дослідження АД при живленні від номінальної напруги (точки  $M_{kn.1nom}, I_{kn.1nom}$  на кривих  $M_{kn1}, I_{kn1}$ ), практично співпадають тільки в діапазоні  $0.85 \div 1.0U_n$  напруги живлення АД. У діапазоні варіювання напруги живлення АД у межах  $0.40 \div 0.85U_n$ , що дозволено ГОСТ 7217-87, розбіжність порівнюваних вище результатів різко зростає і сягає 20%. Для зменшення цієї розбіжності результатів необхідно

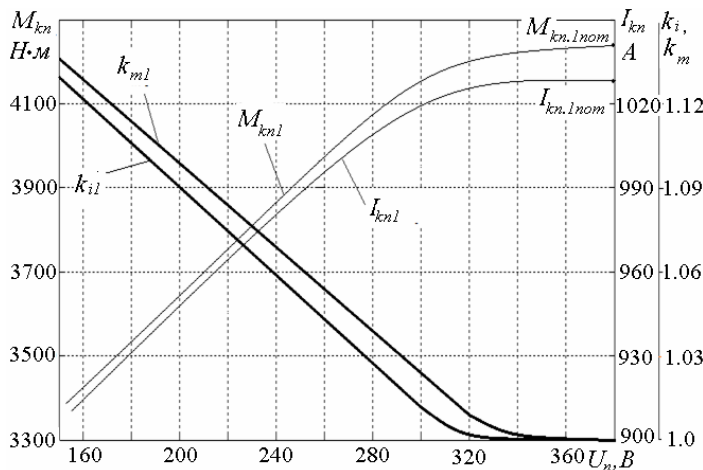


Рис. 4

при визначенні з фізичного експерименту дослідження АД потужністю більше 100 кВт для обертового моменту і струму КЗ використовувати вирази (5), (6).

#### Висновки.

Порівняльний аналіз результатів чисельного дослідження режиму КЗ АД (на прикладі АД 4A132M8, 4A355S8) за методикою ГОСТ 7217-87 з їхніми каталоговими значеннями показав:

– відповідність каталогових значень обертового моменту і струму КЗ АД потужністю до 100 кВт результатам, отриманим з чисельного дослідження режиму КЗ АД із перерахунком згідно з [1] при напругах живлення в межах  $0.9 \div 1.0U_n$ ;

– можливість визначення обертового моменту і струму КЗ АД потужністю до 100 кВт у розширеному діапазоні варіювання напруги живлення АД (нижче  $0.9U_n$ ) завдяки доповненню виразів для перерахунку обертового моменту і струму КЗ методики [1] поправковими коефіцієнтами  $k_{m1}$ ,  $k_{i1}$  ;  
– необхідність уточнення методики ГОСТ 7217-87 при визначенні обертового моменту і струму КЗ АД потужністю більше 100 кВт. Це обумовлено невідповідністю результатів чисельного розрахунку з визначення обертового моменту і струму КЗ за методикою [1] з каталоговими у діапазоні варіювання напруги живлення у межах  $0.40 \div 0.85U_n$ . Уточнення полягає у доповненні виразів для перерахунку обертового моменту і струму КЗ методики [1] поправковими коефіцієнтами  $k_{m1}$ ,  $k_{i1}$ .

1. ГОСТ 7217-87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний.
2. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
3. Попович О.М., Головань І.В. Уточнення аналізу режимів роботи асинхронних двигунів у складі електромеханотронних систем еквівалентуванням їхніх польових моделей коловими // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 5. – С. 113–115.
4. Попович О.М. Математичні моделі, параметри та характеристики асинхронних двигунів електромеханотронних систем: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт.техн.наук: спец. 05.09.01 «Електричні машини і апарати». – К., 2015. – 39 с.

УДК 621.313

#### **УТОЧНЕННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЖИМА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ**

**И.В.Головань**, канд.техн.наук

**Институт электродинамики НАН Украины,**

**пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.**

**E-mail: [golovan\\_1977@ukr.net](mailto:golovan_1977@ukr.net)**

*Проведен сравнительный анализ результатов численного исследования режима короткого замыкания асинхронного двигателя типа 4A132M8, 4A355S8 по методике ГОСТ 7217-87 с их каталоговыми значениями. Уточнена методика перерасчета вращательного момента и тока короткого замыкания (КЗ) физического эксперимента с пониженного напряжения на номинальное по сравнительному анализу результатов численного эксперимента режима работы (КЗ) серийного асинхронного двигателя и каталоговыми данными. Библи. 4, рис. 4.  
**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, вращающий момент, ток, короткое замыкание.*

#### **CLARIFY THE METHODS OF DETERMINING CHARACTERISTICS MODE SHORT CIRCUIT OF INDUCTION MOTORS BASED ON THE TESTING RESULTS**

**I.V.Golovan**

**Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,**

**pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.**

**e-mail: [golovan\\_77@ukr.net](mailto:golovan_77@ukr.net)**

*The comparative analysis of numerical investigation results the mode short circuit of induction motor type 4A132M8, 4A355S8 as described in GOST 7217-87 with its catalogue values was carry out. Clarify the method of torque recalculation and short circuit current of physical experiment with a reduced voltage to the nominal on comparative analysis of numerical experiments results mode short-circuit serial induction motor and catalogue data. References 4, figures 4.  
**Key words:** induction motor, torque, current, short circuit.*

1. GOST 7217-87. Rotating electrical machines. Induction motors. Methods of testing. (Rus)
2. Kravchik A.E., Shlaf M.M., Afonin V.I., Sobolenskaya E.A. Induction motors 4A Series: Guide. – Moskva: Energoizdat, 1982. – 504 p. (Rus)
3. Popovych O.M., Golovan I.V. Clarification analysis modes of induction motors consisting in mechanotronic systems equivalentiation their field models on circular // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2014. – No 5. – Pp. 113–115. (Ukr)
4. Popovych O.M. Mathematical models, parameters and characteristics of induction motors mechanotronic systems: Abstract diss. doct. of technical sciences. – Kyiv, 2015. – 39 p. (Ukr)

Надійшла 29.03.2016  
Остаточний варіант 22.06.2016