

## ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Вовк О.Ю., к.т.н., Квітка С.О., к.т.н., Безменнікова Л.М., к.т.н.  
Таврійський державний агротехнологічний університет  
Тел. (0619) 42-32-63

**Анотація** – Робота присвячена обґрунтуванню параметрів функціонального стану асинхронних електродвигунів при періодичному контролі.

**Ключові слова** – асинхронний електродвигун, пошкодження вузлів, втрати потужності, коефіцієнти функціонального стану.

*Постановка проблеми.* У процесі експлуатації асинхронних електродвигунів, встановлених у господарствах агропромислового комплексу, відмови відбуваються головним чином по двох причинах: ушкодження обмотки статора (85 – 95 % відмов); ушкодження підшипників (5 – 8 % відмов) [1]. У той же час асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором, що відмовили, мають ослаблення перетину стрижнів обмотки ротора (6,8 % – одного стрижня, 10,5 % – двох стрижнів і 26,3 % – трьох і більше стрижнів) і повітряний зазор, що перевищує своє номінальне значення (68 % двигунів, що відмовили) [2]. На підставі цих даних можна зробити висновок, що до ушкоджень обмотки статора приводять не тільки несправності в самій обмотці, але й несправності в інших елементах електродвигуна.

*Аналіз останніх досліджень.* Існуючі методи послідовного функціонального аналізу засновано на послідовному визначенні показників роботоздатності основних вузлів асинхронного електродвигуна (обмоток статора і ротора, магнітопроводу і підшипників. По відхиленню поточних значень обраних показників від припустимих значень визначають несправний вузол електродвигуна. Найчастіше контроль починають з обмотки статора, як вузла двигуна, що найбільш пошкоджується, і закінчують магнітопроводом. Тому перед тим, як визначити несправність у магнітній системі електродвигуна, необхідно виконати значну кількість операцій щодо контролю інших вузлів асинхронного електродвигуна, а це призводить до нераціонального використання обладнання і часу, який відведено для діагностування електродвигуна [3].

*Формулювання цілей статті (постановка завдання).* Згідно [4] більшість несправностей окремих вузлів електродвигуна супроводжуються підвищенням виділенням тепла в несправному вузлі в порівнянні з номінальним станом: виткові або міжфазні замикання в обмотці статора приводять до збільшення її нагрівання; руйнування міжфазової ізоляції осердя статора призводить до його підвищеного нагрівання; обрив стрижня обмотки ротора приводить до зростання її нагрівання; руйнування сепаратора, кульок або роликів у підшипниках кочення приводить до збільшення сили тертя й, як наслідок, до зростання нагрівання підшипників і т.д. Тому в роботі поставлене завдання обґрунтувати параметри періодичного контролю функціонального стану асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором.

*Основна частина.* Втрати активної потужності, які виділяються в електродвигуні, обумовлені різними фізичними процесами. Кожний вид втрат локалізований у визначених ділянках об'єму асинхронного двигуна: в обмотці статора, в обмотці ротора, у магнітопроводі, у підшипниках. Тому зміни окремих втрат активної потужності в порівнянні з базовими значеннями є коефіцієнтами функціонального стану тих вузлів електродвигуна, де вони локалізовані.

Обмотка статора – коефіцієнт функціонального стану обмотки статора (коефіцієнт  $\delta_{E1}$ ):

$$\delta_{A1} = \frac{P_1}{P_{1B}}, \quad (1)$$

де  $P_1$  – поточні електричні втрати в обмотці статора при роботі електродвигуна в контрольному режимі, *Вт*;  $P_{1B}$  – базові електричні втрати в обмотці статора при роботі електродвигуна в контрольному режимі, *Вт*.

Електричні втрати в обмотці статора дорівнюють:

$$P_1 = m_1 I_1^2 r_1; \quad (2)$$

$$P_{1B} = m_1 I_{1B}^2 r_{1B}, \quad (3)$$

де  $I_1$  – поточне значення сили струму у фазі обмотки статора при роботі електродвигуна в контрольному режимі, *А*;  $I_{1B}$  – базове значення сили струму у фазі обмотки статора при роботі електродвигуна в контрольному режимі, *А*;  $r_1$  – поточне значення активного опору фази обмотки статора, приведене до розрахункової робочої температури, *Ом*;  $r_{1B}$  – базове значення активного опору фази обмотки статора, приведене до розрахункової робочої температури, *Ом*.

Отже, коефіцієнт  $\delta_{E1}$  дорівнює:

$$\delta_{E1} = \left( \frac{I_1}{I_{1B}} \right)^2 \frac{r_1}{r_{1B}} = \delta_{I1}^2 \cdot \delta_{R1}, \quad (4)$$

де  $\delta_{l1}$  – коефіцієнт зміни сили струму у фазі обмотки статора при роботі електродвигуна в контрольному режимі внаслідок несправності;  $\delta_{r1}$  – коефіцієнт зміни активного опору фази обмотки статора внаслідок несправності.

Проаналізуємо зміну активного опору обмотки статора внаслідок її несправності, що виникла в процесі експлуатації, для чого розглянемо конструкцію обмотки статора. Матеріалом провідників обмотки статора є мідний м'який дріт круглого або прямокутного перетину з малим змістом домішок. Найпростішим елементом обмотки є виток, що складається із двох напіввитків (рис.1).

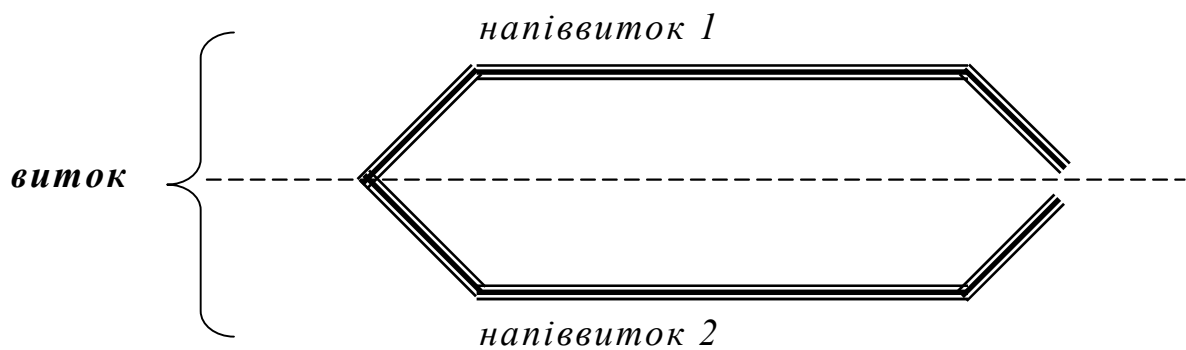


Рис.1. Виток обмотки статора.

Тому схему фази обмотки статора, на якій враховуються активні опори напіввитків, можна представити у вигляді, показаному на ри.2.

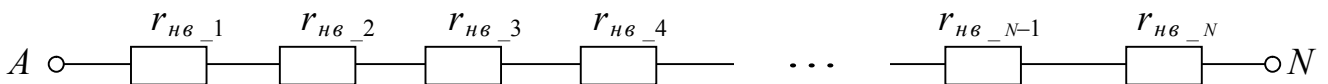


Рис.2.3. Схема фази обмотки статора, на якій враховуються активні опори її напіввитків.

На схемі (рис.2)  $r_{нв_1} \dots r_{нв_N}$  являють собою активні опори напіввитків фази обмотки статора. З показаної схеми випливає, що активний опір фази обмотки статора при температурі  $t$  буде дорівнювати:

$$r_{1t} = \frac{1}{a} \cdot 2 \cdot \sum_{i=1}^{w_1} r_{(нв_i)t} \quad (5)$$

де  $r_{1t}$  – активний опір фази обмотки статора при температурі  $t$ , Ом;  $w_1$  – кількість витків фази обмотки статора;  $r_{(нв_i)t}$  – активний опір  $i$ -го напіввитка фази обмотки статора при температурі  $t$ , Ом;  $a$  – число паралельних розгалужень.

Якщо прийняти, що напіввитки обмотки статора однакові, то активні опори напіввитків будуть однакові. Тому схема фази обмотки статора буде мати вигляд, представлений на рис.3.

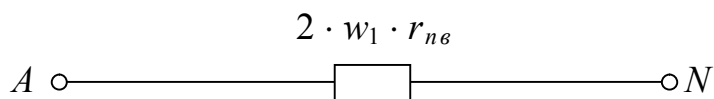


Рис.3. Схема фази обмотки статора, на якій враховуються активні опори її напіввитків.

З даної схеми (рис.3) і (5) випливає, що активний опір фази обмотки статора при температурі  $t$  дорівнює:

$$r_{1t} = \frac{1}{a} \cdot 2 \cdot r_{(нв)t} \cdot w_1 \quad (6)$$

При виникненні в процесі експлуатації виткового замикання (замикання між собою двох або більше напіввитків фази обмотки, що знаходяться в одному пази) довжина з'єднання активних напіввитків зменшиться приблизно на число замкнених накоротко й напіввитків, що знаходяться між ними (рис.4).

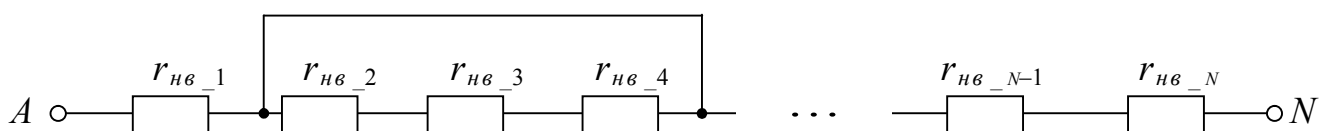


Рис.4. Схема фази обмотки статора, на якій враховуються активні опори її напіввитків, при виникненні виткового короткого замикання.

У випадку, показаному на рис.4, кількість замкнених накоротко напіввитків дорівнює трьом.

Вважаючи, що інші величини виразу (6) при витковом замиканні не змінюються, можемо записати:

$$\delta_{R1} = \frac{2 \cdot w_1 - w_{1КЗ}}{2 \cdot w_1} = 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{w_{1КЗ}}{w_1} = 1 - 0,5 \cdot \frac{w_{1КЗ}}{w_1} \quad (7)$$

де  $w_{1КЗ}$  – кількість напіввитків, замкнених накоротко.

Отже, при збільшенні замкнених накоротко напіввитків активний опір обмотки статора зменшується: якщо  $w_{1КЗ} \geq 1$ , то  $\delta_{R1} < 1$ .

При експлуатації можливо погіршення контактних з'єднань в обмотці (зменшення перетину паяних з'єднань котушок або інших елементів обмотки). В результаті цього активний опір обмотки статора збільшиться ( $\delta_{R1} > 1$ ), тому що зменшиться середній перетин провідників, з яких складається обмотка.

Отже, при виникненні несправності в обмотці статора змінюється її активний опір ( $\delta_{R1} \neq 1$ ), а споживаний у контрольному режимі електродвигуном струм збільшиться ( $\delta_{I1} > 1$ ), тобто навантаження на двигун зросте. Тому в процесі експлуатації можливі наступні варіанти значень коефіцієнта функціонального стану обмотки статора (коефіцієнта  $\delta_{E1}$ ):

- номінальний функціональний стан:  $\delta_{E1} = 1$  ;
  - неномінальний функціональний стан:  $\delta_{E1} > 1$
- (при цьому  $\delta_{R1} \neq 1$ ).

Обмотка ротора – коефіцієнт функціонального стану обмотки ротора (коефіцієнт  $\delta_{E2}$ ):

$$\delta_{\text{Э2}} = \frac{P_2}{P_{2Б}}, \quad (8)$$

де  $P_2$  – поточні електричні втрати в обмотці ротора при роботі електродвигуна в контрольному режимі, *Вт*;  $P_{2Б}$  – базові електричні втрати в обмотці ротора при роботі електродвигуна в контрольному режимі, *Вт*.

Електричні втрати в обмотці ротора дорівнюють:

$$P_2 = m_2 I_2^2 r_2; \quad (9)$$

$$P_{2Б} = m_2 I_{2Б}^2 r_{2Б}, \quad (10)$$

де  $m_2$  – кількість фаз обмотки ротора;  $I_2$  – поточне значення сили струму у фазі обмотки ротора при роботі електродвигуна в контрольному режимі, *А*;  $I_{2Б}$  – базове значення сили струму у фазі обмотки ротора при роботі електродвигуна в контрольному режимі, *А*;  $r_2$  – поточне значення активного опору фази обмотки ротора, приведене до розрахункової робочої температури, *Ом*;  $r_{2Б}$  – базове значення активного опору фази обмотки ротора, приведене до розрахункової робочої температури, *Ом*.

Отже, коефіцієнт  $\delta_{E2}$  дорівнює:

$$\delta_{\text{Э2}} = \left( \frac{I_2}{I_{2Б}} \right)^2 \frac{r_2}{r_{2Б}} = \delta_{I2}^2 \cdot \delta_{R2}, \quad (11)$$

де  $\delta_{I2}$  – коефіцієнт зміни сили струму у фазі обмотки ротора при роботі електродвигуна в контрольному режимі внаслідок несправності;  $\delta_{R2}$  – коефіцієнт зміни активного опору фази обмотки ротора внаслідок несправності.

Проаналізуємо зміну активного опору обмотки ротора внаслідок її несправності, що виникла в процесі експлуатації, для чого розглянемо конструкцію обмотки ротора. Схему обмотки ротора, на якій враховуються активні опори стрижнів і кілець, можна представити у вигляді, показаному на рис.5.

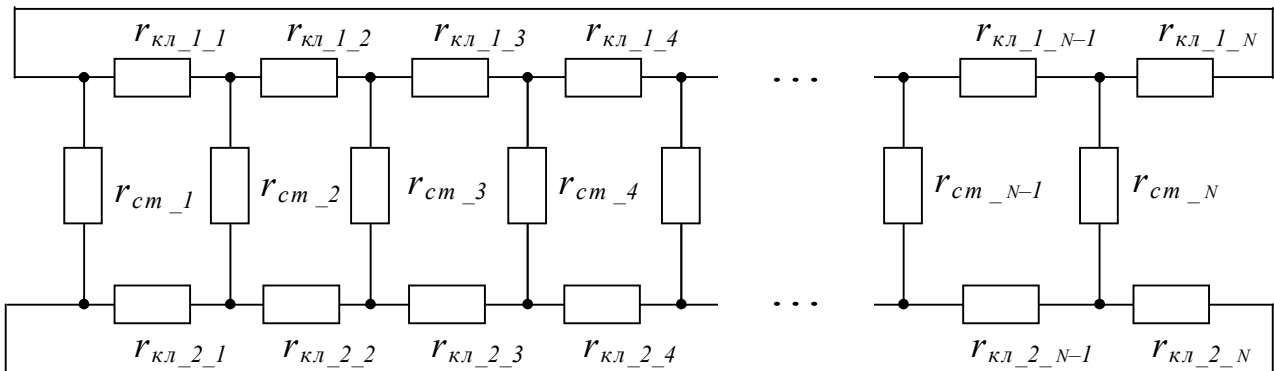


Рис.5. Схема обмотки ротора, на якій враховуються активні опори стрижнів і кілець.

На схемі (рис.5) наведені наступні позначення:  $r_{cm\_1} \dots r_{cm\_N}$  – активні опори стрижнів обмотки ротора,  $Om$ ;  $r_{кл\_1\_1} \dots r_{кл\_1\_N}$ ,  $r_{кл\_2\_1} \dots r_{кл\_2\_N}$  – активні опори ділянок замикаючих кілець обмотки ротора,  $Om$ .

Перетворимо цю схему обмотки ротора (рис.5) у наступний вид, показаний на рис.6.

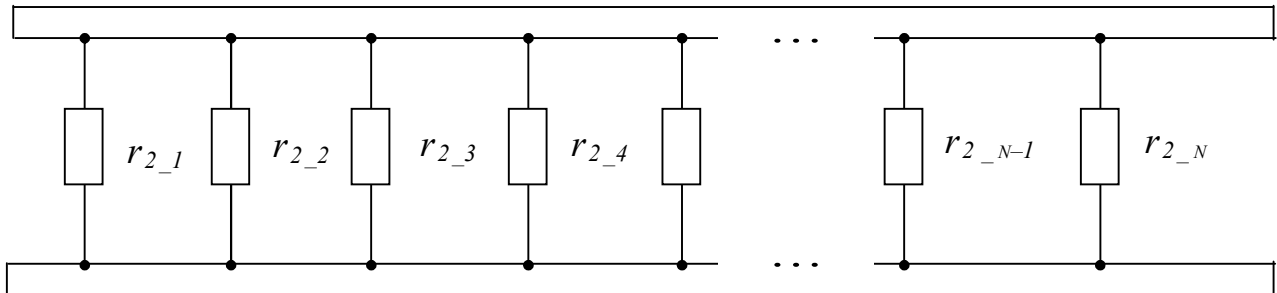


Рис.6. Схема обмотки ротора, на якій враховуються активні опори стрижнів і кілець.

На даній схемі (рис.6) наведені наступні позначення:  $r_{2\_1} \dots r_{2\_N}$  – сумарні активні опори стрижнів і прилягаючих до них двох ділянок замикаючих кілець обмотки ротора,  $Om$ .

Опір фази обмотки ротора пропорційно кількості стрижнів обмотки ротора:  $r_2 \sim n_{cm}$ . Тому при обриві стрижня, вважаючи, що інші величини, які визначають опір фази обмотки ротора, при обриві стрижня не змінюються, можемо записати:

$$\delta_{R2} \approx \frac{n_{cm} - n'_{cm}}{n_{cm}} \approx 1 - \frac{n'_{cm}}{n_{cm}}, \quad (12)$$

де  $n'_{cm}$  – кількість стрижнів обмотки ротора, що відірвалися.

Отже, при обриві одного або більше стрижнів активний опір обмотки ротора зменшується: якщо  $n'_{cm} \geq 1$ , то  $\delta_{R2} < 1$ .

При експлуатації можливий не тільки обрив стрижня, але й погіршення контактних з'єднань в обмотці ротора (зменшення перетинів з'єднань стрижнів із замикаючими кільцями). У результаті цього активний опір обмотки збільшиться ( $\delta_{R2} > 1$ ), тому що зменшиться середній перетин провідників (стрижнів), з яких складається обмотка.

Отже, при виникненні несправності в обмотці ротора зміниться її активний опір ( $\delta_{R2} \neq 1$ ), а споживаний у контрольному режимі електродвигуном струм збільшиться ( $\delta_2 > 1$ ), тобто навантаження на двигун зросте. Тому в процесі експлуатації можливі наступні варіанти значень коефіцієнта функціонального стану обмотки ротора (коефіцієнта  $\delta_{E2}$ ):

- номінальний функціональний стан:  $\delta_{E2} = 1$   
(при цьому  $\delta_{R2} = 1$ );
- неномінальний функціональний стан:  $\delta_{E2} > 1$   
(при цьому  $\delta_{R2} \neq 1$ ).

Магнітопровід – коефіцієнт функціонального стану магнітопроводу (коефіцієнт  $\delta_{MG}$ ):

$$\delta_{MG} = \frac{P_{MG}}{P_{MG.B}}, \quad (13)$$

де  $P_{MG}$  – поточні втрати в магнітопроводі при роботі електродвигуна в контрольному режимі,  $Вт$ ;  $P_{MG.B}$  – базові втрати в магнітопроводі при роботі електродвигуна в контрольному режимі,  $Вт$ .

При експлуатації початкові дефекти в магнітопроводі (технологічного походження) прогресують: збільшується площа контактних з'єднань, що виникли між окремими листами магнітопроводу при запресовуванні; під впливом вологи відбувається корозія активної сталі електродвигуна; а пил, пісок і інші абразивні частки в повітряному зазорі прискорюють зношування ізоляції магнітопроводу. На зношування магнітопроводу впливають несправності інших вузлів асинхронного електродвигуна: замикання в обмотці статора, обрив стрижня обмотки ротора або інші несправності даних вузлів приводять до збільшення вібрації електродвигуна, а також спричиняють підвищене нагрівання магнітопроводу, у результаті чого його ізоляція руйнується, і утворюються додаткові короткозамкнені контури для вихрових струмів; зношування підшипників або вигин вала приводять до появи контакту між активною сталлю ротора й статора, у цьому місці ізоляція магнітопроводу руйнується, і вихрові струми збільшуються.

У результаті втрати в магнітопроводі електродвигуна при його роботі в контрольному режимі зростають ( $\delta_{MG} > 1$ ).

У тому випадку, коли магнітопровід справний, а в іншому вузлі асинхронного електродвигуна (обмотці статора або ротора) виникла несправність, то картина зміни втрат активної потужності в магнітопроводі електродвигуна буде наступною. Якщо  $\delta_{E1} > 1$  або  $\delta_{E2} > 1$ , то навантаження на асинхронний електродвигун у контрольному режимі збільшиться ( $\delta_{I1} > 1$  або  $\delta_{I2} > 1$ ). У результаті зменшиться основний магнітний потік, що приведе до зниження втрат у магнітопроводі  $P_{MG}$ .

Інакше кажучи, якщо  $\delta_{E1} > 1$  або  $\delta_{E2} > 1$ , то при справному магнітопроводі повинне бути  $\delta_{MG} < 1$ ; зворотне, тобто  $\delta_{MG} \geq 1$ , означає погіршення стану магнітопроводу. Тому причину (дефект або несправність), яка призвела до цього наслідку (зниження роботоздатності електродвигуна), треба шукати в цьому вузлі електродвигуна.

Таким чином, у процесі експлуатації можливі наступні варіанти значень коефіцієнта функціонального стану магнітопроводу (коефіцієнта  $\delta_{MG}$ ):

– номінальний функціональний стан:

$$\delta_{MG} = 1 \quad (\text{при } \delta_{E1} = 1 \text{ і } \delta_{E2} = 1);$$

$$\delta_{MG} < 1 \quad (\text{при } \delta_{E1} > 1 \text{ і } \delta_{E2} > 1);$$

– неномінальний функціональний стан:

$$\delta_{MG} > 1 \quad (\text{при } \delta_{E1} = 1 \text{ і } \delta_{E2} = 1);$$

$$\delta_{MG} \geq 1 \quad (\text{при } \delta_{E1} > 1 \text{ і } \delta_{E2} > 1).$$

Підшипники – коефіцієнт функціонального стану підшипників (коефіцієнт  $\delta_{MX}$ ):

$$\delta_{MX} = \frac{P_{MX}}{P_{MX.B}}, \quad (14)$$

де  $P_{MX}$  – поточні механічні втрати при роботі електродвигуна в контрольному режимі, *Вт*;  $P_{MX.B}$  – базові механічні втрати при роботі електродвигуна в контрольному режимі, *Вт*.

При експлуатації початкові дефекти підшипників (технологічного походження) прогресують: неправильна посадка на вал приводить до защемлення тіл кочення, підвищеному нагріванню й вигорянню змащення, а вплив навколишнього середовища (пил, абразивні частки) прискорюють зношування підшипника. Фактором, що прискорює цей процес, є вібрація, яка може виникнути в результаті ушкоджень обмоток електродвигуна (замикання, обриву).

У результаті механічні втрати в електродвигуні при його роботі в контрольному режимі зростають ( $\delta_{MX} > 1$ ).

У тому випадку, коли підшипники справні, а в іншому вузлі асинхронного електродвигуна (обмотці статора або ротора) виникла несправність, то картина зміни механічних втрат буде наступною. Якщо  $\delta_{E1} > 1$  або  $\delta_{E2} > 1$ , то навантаження на асинхронний електродвигун у контрольному режимі збільшиться ( $\delta_1 > 1$  або  $\delta_2 > 1$ ). У результаті зменшиться швидкість обертання ротора, що приведе до зниження механічних втрат  $P_{MX}$ .

Інакше кажучи, якщо  $\delta_{E1} > 1$  або  $\delta_{E2} > 1$ , то при справних підшипниках повинне бути  $\delta_{MX} < 1$ ; зворотне, тобто  $\delta_{MX} \geq 1$ , означає погіршення стану підшипників. Тому причину (дефект або несправність), яка призвела до цього наслідку (зниження роботоздатності електродвигуна), треба шукати в цьому вузлі електродвигуна.

Таким чином, у процесі експлуатації можливі наступні варіанти значень коефіцієнта функціонального стану підшипників (коефіцієнта  $\delta_{MX}$ ):

– номінальний функціональний стан:

$$\delta_{MX} = 1 \quad (\text{при } \delta_{E1} = 1 \text{ і } \delta_{E2} = 1);$$

$$\delta_{MX} < 1 \quad (\text{при } \delta_{E1} > 1 \text{ і } \delta_{E2} > 1);$$



– неномінальний функціональний стан:

$$\delta_{MX} > 1 \quad (\text{при } \delta_{E1} = 1 \text{ і } \delta_{E2} = 1);$$

$$\delta_{MX} \geq 1 \quad (\text{при } \delta_{E1} > 1 \text{ і } \delta_{E2} > 1).$$

*Висновки.* Таким чином, обґрунтовано показники, які характеризують функціональний стан вузлів асинхронного електродвигуна та можуть бути використані при періодичному контролі.

Література.

1. Єрмолаєв С.О., Мунтян В.О., Яковлев В.Ф. Експлуатація енергообладнання та засобів автоматизації в системі АПК / За ред. С. О. Єрмолаєва. – К.: Мета, 2003. – 534с.
2. Таран В.П. Диагностирование электрооборудования. – К.: Техніка, 1983. – 200с.
3. Рассказчиков А.В., Назарычев А.Н. Современное состояние диагностики электродвигателей // Ивановский энергетический институт. – Иваново, 1989. – 14с. Деп. в Информэлектро 29.12.1989г., № 264 – эт89.
4. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин / Под ред. Р. Б. Уманцева. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 336с.

## MOTIVATION PARAMETER FUNCTIONAL CONDITION OF THE ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS

O. Vovk, S. Kvitka, L. Bezmennikova

### *Summary*

**The activity is dedicated to motivation parameter functional condition of the asynchronous electric motors under periodic checking**