

## АНАЛІТИЧНЕ ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ УСТАЛЕНОГО ПЕРЕВИЩЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ОБМОТОК СТАТОРА АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Вовк О.Ю. – к.т.н., Квітка С.О. – к.т.н., Яковлев В.Ф. – к.т.н.

**Анотація** – Робота присвячена аналітичному порівнянню методів визначення усталеного перевищення температури обмоток статора трифазного асинхронного електродвигуна в експлуатації.

**Ключові слова** – асинхронний електродвигун, втрати активної потужності, коефіцієнт навантаження, нагрів, перевищення температури, усталений тепловий режим.

**Постановка проблеми.** Еквівалентні теплові схеми асинхронного двигуна, які призначені для аналізу його теплового режиму, мають у своєму складі до 15 тіл та передбачають від 50 до 100 вхідних параметрів [1 – 3]. При використанні зазначених схем в експлуатації для контролю функціонального стану асинхронного двигуна усталене перевищення температури обмотки статора буде відрізнятися одне від одного, тому необхідно порівняти методи визначення зазначеного перевищення температури обмотки статора, щоб визначити з них раціональний з метою його практичного використання в експлуатації.

**Аналіз останніх досліджень.** Існуючі еквівалентні теплові схеми асинхронного електродвигуна умовно можна поділити на такі, що використовуються при проектуванні асинхронного електродвигуна, та на такі, що використовуються при його експлуатації. Експлуатаційні еквівалентні теплові схеми, які існують на цей час, мають у своєму складі одне, два, або три тіла [4 – 6].

**Формулювання цілей статті.** Порівняємо аналітично методи визначення усталеного перевищення температури обмотки статора асинхронного електродвигуна на базі існуючих експлуатаційних еквівалентних теплових схем з метою чисельного порівняння методів, що дозволить з достатньою для практики точністю визначити перевищення температури обмотки статора в експлуатації для цілей діагностування.

**Основна частина.** Розглянемо асинхронний електродвигун у тепловому відношенні як систему, що складається із одного тіла, в якому виділяється сума втрат активної потужності ( $\Delta P_{\Sigma H}$  або  $\Delta P_{\Sigma}$  в залежності від навантаження асинхронного електродвигуна). Усталене перевищення температури обмоток статора асинхронного двигуна в цьому випадку буде дорівнювати [4]:

$$\tau_{1Y} = \tau_{1H} \frac{\Delta P_{\Sigma}}{\Delta P_{\Sigma H}}, \quad (1)$$

де  $\tau_{1Y}$  – усталене перевищення температури обмоток статора при номінальному навантаженні, °C;

$\tau_{1H}$  – усталене перевищення температури обмоток статора при номінальному навантаженні, яке дорівнює довготривало припустимому перевищенню температури обмоток статора, °C;

$\Delta P_{\Sigma}$  – сума втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні при номінальному навантаженні в усталеному режимі роботи, Вт;

$\Delta P_{\Sigma H}$  – сума втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні при номінальному навантаженні в усталеному режимі роботи, Вт.

Введемо наступне позначення:

$$k_p = \frac{\Delta P_{\Sigma}}{\Delta P_{\Sigma H}}, \quad (2)$$

де  $k_p$  – коефіцієнт теплового навантаження асинхронного електродвигуна, та перепишемо рівняння (1) в такому вигляді:

$$\tau_{1Y} = \tau_{1H} \cdot k_p. \quad (3)$$

Розглянемо асинхронний електродвигун у тепловому відношенні як систему, що складається із двох тіл: в одному тілі виділяються змінні втрати активної потужності ( $\Delta P_{VAR}$ ), в другому тілі – постійні втрати активної потужності ( $\Delta P_{CONST}$ ). Усталене перевищення температури обмоток статора асинхронного електродвигуна в цьому випадку буде дорівнювати [5]:

$$\tau_{1Y} = \tau_{1H} \cdot \frac{a + k^2}{1 + a - \alpha \cdot \tau_{1H} \cdot (k^2 - 1)}, \quad (4)$$

де  $a$  – коефіцієнт втрат, який дорівнює відношенню постійних та змінних втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні;

$k$  – кратність струму в обмотках статора;

$\alpha$  – температурний коефіцієнт опору обмоток статора, 1/°C.

Розглянемо асинхронний двигун у тепловому відношенні як систему, що складається із трьох тіл: в одному тілі виділяються втрати активної потужності в обмотках статора та додаткові втрати активної потужності ( $\Delta P_1$ ), в другому тілі – втрати активної потужності в обмотці ротора ( $\Delta P_2$ ), в третьому тілі – постійні втрати активної потужності ( $\Delta P_{CONST}$ ). Усталене перевищення температури обмоток статора асинхронного електродвигуна в цьому випадку буде дорівнювати [6]:

$$\tau_{1Y} = K_1 \cdot \Delta P_1 + K_2 \cdot \Delta P_2 + K_3 \cdot \Delta P_{CONST}, \quad (5)$$

де  $K_1$  – коефіцієнт впливу втрат активної потужності в обмотках статора та додаткових втрат активної потужності на нагрів асинхронного електродвигуна, °C/Вт;

$k_2$  – коефіцієнт впливу втрат активної потужності в обмотках ротора на нагрів асинхронного електродвигуна,  $^{\circ}\text{C}/\text{Vm}$ ;

$k_3$  – коефіцієнт впливу постійних втрат активної потужності на нагрів асинхронного електродвигуна,  $^{\circ}\text{C}/\text{Vm}$ .

Метод визначення указаних коефіцієнтів наводиться в [6], де пропонується їх визначати за допомогою усталених перевищень температур обмоток статора у дослідах холостого ходу, короткого замикання і номінального навантаження.

Введемо наступні позначення:

$$k_{p1} = \frac{\Delta P_1}{\Delta P_{1H}}; \quad k_{p2} = \frac{\Delta P_2}{\Delta P_{2H}}; \quad k_{p3} = \frac{\Delta P_{\text{CONST.H}}}{\Delta P_{\text{CONST.H}}}, \quad (6)$$

$$(7)$$

де  $k_{p1}$  – коефіцієнт теплового навантаження першого тіла,

$\Delta P_{1H}$  – втрати активної потужності в обмотках статора та додаткові втрати активної потужності при номінальному навантаженні,  $\text{Vm}$ ;

$k_{p2}$  – коефіцієнт теплового навантаження другого тіла,

$\Delta P_{2H}$  – втрати активної потужності в обмотці ротора при номінальному навантаженні,  $\text{Vm}$ ;

$k_{p3}$  – коефіцієнт теплового навантаження третього тіла,

$\Delta P_{\text{CONST.H}}$  – постійні втрати активної потужності при номінальному навантаженні,  $\text{Vm}$ ,

та перепишемо рівняння (5) в такому вигляді:

$$\tau_{1Y} = k_1 \cdot \Delta P_{1H} \cdot k_{p1} + k_2 \cdot \Delta P_{2H} \cdot k_{p2} + k_3 \cdot \Delta P_{\text{CONST.H}} \cdot k_{p3}. \quad (9)$$

Зробимо наступні припущення:

$$k_p = k = k_{p1} = k_{p2} = \beta; \quad (10)$$

$$k_{p3} = 1, \quad (11)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт навантаження асинхронного електродвигуна [7],

та перепишемо рівняння (3), (4) і (11) в такому вигляді:

$$\tau_{1Y} = \tau_{1H} \cdot \beta; \quad (12)$$

$$\tau_{1Y} = \tau_{1H} \cdot \frac{a + \beta^2}{1 + a - \alpha \cdot \tau_{1H} \cdot (\beta^2 - 1)}; \quad (13)$$

$$\tau_{1Y} = k_1 \cdot \Delta P_{1H} \cdot \beta + k_2 \cdot \Delta P_{2H} \cdot \beta + k_3 \cdot \Delta P_{\text{CONST.H}}. \quad (14)$$

Використовуючи (12) – (14), аналітично порівняємо методи визначення усталеного перевищення обмоток статора асинхронного електродвигуна в експлуатації. Зробимо це на прикладі асинхронного електродвигуна АИР90L4У3, для чого скористаємось методом розрахункового визначення втрат та коефіцієнта корисної дії асинхронних електродвигунів за паспортними даними [7], а також зазначеними вище методами визначення коефіцієнтів впливу втрат активної потужності на нагрів асинхронного електродвигуна [6].

Визначаємо перевищення температур в дослідах короткого замикання і холостого ходу відповідно до (17), (18):

$$\tau_{1K} = 90 \cdot \frac{409,6}{516} = 71^{\circ}\text{C};$$

Зазначений асинхронний електродвигун має наступні технічні дані:  $P_{2H} = 2200 \text{ Vm}$ ;  $\eta_H = 81 \%$ ;  $\cos \varphi_H = 0,83$ ;  $U_H = 380 \text{ B}$ ;  $I_H/I_H = 6,5$ ;  $\tau_{1H} = 90^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha = 0,004 \text{ 1}/^{\circ}\text{C}$  [8]. Втрати активної потужності в цьому електродвигуні при номінальному навантаженні згідно [7] дорівнюють:

$$\Delta P_{\Sigma H} = 516 \text{ Vm}; \quad \Delta P_{1X} = 172 \text{ Vm};$$

$$\Delta P_{1H} = 246,1 \text{ Vm}; \quad \Delta P_{3H} = 66,4 \text{ Vm};$$

$$\Delta P_{2H} = 161,9 \text{ Vm}; \quad \Delta P_{4H} = 41,3 \text{ Vm}.$$

На підставі цього знаходимо:

$$\Delta P_{\text{VAR.H}} = \Delta P_{1H} + \Delta P_{2H} = 246,1 + 161,9 = 408 \text{ Vm};$$

$$\Delta P_{\text{CONST.H}} = \Delta P_{3H} + \Delta P_{4H} = 66,7 + 41,3 = 108 \text{ Vm};$$

$$\Delta P_{1K.H} = \Delta P_{1H} + \Delta P_{2H} + \Delta P_{3H} / (I_H/I_H)^2 = 246,1 + 161,9 + 1,6 = 409,6 \text{ Vm}.$$

Визначаємо коефіцієнт втрат:

$$a = \frac{\Delta P_{\text{CONST.H}}}{\Delta P_{\text{VAR.H}}} = \frac{108}{408} = 0,265.$$

Використовуючи отримані значення переписемо (12) та (13) в наступному вигляді:

$$\tau_{1Y(1)} = 90 \cdot \beta; \quad (15)$$

$$\tau_{1Y(2)} = 90 \cdot \frac{0,265 + \beta^2}{1,265 - 0,004 \cdot 90 \cdot (\beta^2 - 1)}; \quad (16)$$

де  $\tau_{1Y(1)}$  – усталене перевищення температури обмоток статора при одноелементній тепловій моделі асинхронного електродвигуна,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\tau_{1Y(2)}$  – усталене перевищення температури обмоток статора при двоелементній тепловій моделі асинхронного електродвигуна,  $^{\circ}\text{C}$ .

При номінальному навантаженні ( $\beta = 1$ ) отримаємо:

$$\tau_{1Y(1)} = \tau_{1Y(2)} = 90^{\circ}\text{C}.$$

Для аналітичного визначення окремих складових коефіцієнтів впливу втрат активної потужності у (14), а саме – перевищення температур обмоток статора в дослідах короткого замикання і холостого ходу, скористаємось (1):

$$\tau_{1K} = \tau_{1H} \frac{\Delta P_{1K}}{\Delta P_{\Sigma H}}; \quad (17)$$

$$\tau_{1X} = \tau_{1H} \frac{\Delta P_{1X}}{\Delta P_{\Sigma H}}; \quad (18)$$

де  $\tau_{1K}$  – усталене перевищення температури обмоток статора в досліді короткого замикання,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\Delta P_{1K}$  – сума втрат активної потужності в досліді короткого замикання,  $\text{Vm}$ ;

$\tau_{1X}$  – усталене перевищення температури обмотки статора в досліді холостого ходу,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\Delta P_{1X}$  – сума втрат активної потужності в досліді холостого ходу,  $\text{Vm}$ .

$$\tau_{1X} = 90 \cdot \frac{172}{516} = 30^{\circ}\text{C}.$$

На підставі цього знаходимо коефіцієнти впливу втрат:

$$k_1 = 0,06^{\circ}\text{C}/\text{Vm}; \quad k_2 = 0,35^{\circ}\text{C}/\text{Vm}; \quad k_3 = 0,28^{\circ}\text{C}/\text{Vm}.$$

Використовуючи отримані значення переписемо (14) в такому вигляді:

$$\tau_{1y_{(3)}} = 14,8 \cdot \beta + 56,7 \cdot \beta + 30,2, \quad (17)$$

де  $\tau_{1y_{(3)}}$  – усталене перевищення температури обмоток статора при трьохелементній тепловій моделі асинхронного електродвигуна, °С.

При номінальному навантаженні ( $\beta = 1$ ) отримаємо:

$$\tau_{1y_{(3)}} = 101,7 \text{ °С.}$$

Різниця між отриманим результатом і номінальним значенням становить 11,7 °С, тобто одноелементна теплова модель не дозволяє отримати коректний результат. Тому, використовуючи чисельний аналіз [9, для визначення чисел у (17) зменшимо їх у 101,7 / 90 рази, в результаті чого отримаємо:

$$\tau_{1y_{(3)}} = 13,1 \cdot \beta + 50,2 \cdot \beta + 26,7. \quad (18)$$

При номінальному навантаженні ( $\beta = 1$ )

$$\tau_{1y_{(3)}} = 90 \text{ °С,}$$

тобто отримане рівняння (18) є вірним.

Використовуючи рівняння (15), (16) і (19), дослідимо усталене перевищення температури обмоток статора в різних теплових моделях асинхронного електродвигуна, які мають у своєму складі різну кількість тіл: одне, два, три. Результати дослідження наведено та на рисунку 1.

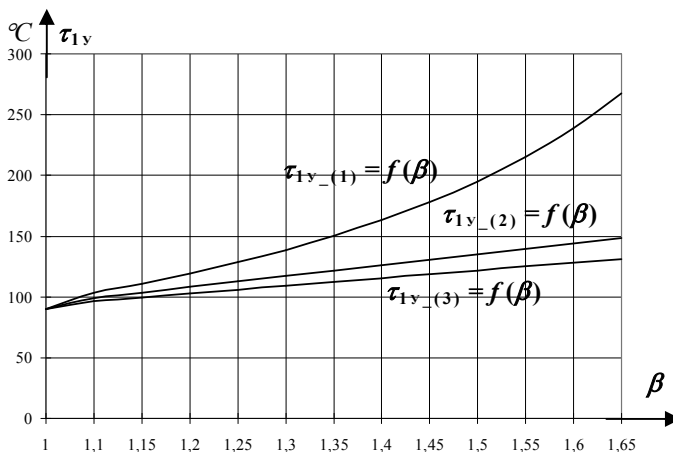


Рис. 1. Залежність  $\tau_{1y_{(i)}} = f(\beta)$ .

**Висновки.** Таким чином, на підставі досліджень можна зробити наступні висновки: по-перше, припущення (10) відносно (4) не є коректним; по-друге, при збільшенні тіл в тепловій моделі електродвигуна усталене перевищення температури обмоток статора, яке визначається за допомогою моделі, зменшується; по-третє, при перевантаженні асинхронного електродвигуна на 15 % понад номінальне значення ( $\beta = 1,15$ ), коли пристрій захисту (наприклад, теплове реле) не спрацьовує, усталене перевищення температури обмоток статора електродвигуна при використанні теплової моделі з одним тілом становить 99 °С, при використанні теплової моделі з трьома тілами становить 96,33 °С, що необхідно враховувати при проектуванні пристроїв діагностування та захисту.

### Література.

1. Электротехнический справочник: В 3-х т. Т. 2. Электротехнические изделия и устройства / Под общ. ред. профессором МЭИ: И. Н. Орлова (гл. ред.) и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 712с.
2. Унифицированная серия асинхронных двигателей ИНТЕРЭЛЕКТРО / Радин В.И., Лондидий И., Розенкоп В.Д. и др. / Под ред. В. И. Радина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 416с.
3. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко Я.С. Проектирование электрических машин / Под ред. О. Д. Гольдберга. – М.: Высшая школа, 2001. – 430с.
4. Коварский Е.М., Янко Ю.И. Испытание электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320с.
5. Овчаров В.В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве. – К.: УСХА, 1990. – 168с.
6. Вовк О.Ю. Сталий процес нагрівання асинхронного електродвигуна // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. – Мелітополь: ТДАТА. – Вип.5. – 2002. – С.62 – 66.
7. Назарьян Г.Н. Метод расчётного определения потерь и к.п.д. асинхронных двигателей по паспортным данным // Праці / Таврійська державна агротехнічна академія. – Мелітополь: ТДАТА. – Вип.45. – 2006. – С.76 – 82.
8. Справочник по электрическим машинам: В 2-х т., Т.1 / Под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.
9. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Пер. со 2-го американского перераб. изд. – М.: Наука, 1973. – 832с.
10. Хорольский В.Я. Теоретические основы эксплуатации электрооборудования сельскохозяйственных предприятий. – Ставрополь: Ставропольский сельскохозяйственный институт, 1992. – 149с.
11. Таран В.П. Диагностирование электрооборудования. – К.: Техніка, 1983. – 200с.