



УДК 621.313.333.004.58

ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В АСИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІ

Квітка С.О.^{*}, к.т.н.,

Вовк О.Ю.^{*}, к.т.н.

Квітка О.С.^{**}

^{*}Таврійський державний агротехнологічний університет

^{**}Філія м. Миколаєва Центрального округу ПАТ «Миколаївобленерго»

Тел.: 0619-42-31-59

Анотація – представлені результати дослідження втрат активної потужності у вузлах і активних елементах асинхронного електродвигуна при зміні струму в обмотці статора та відхиленні напруги на затискачах електродвигуна при визначенні його теплового стану.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, елементи конструкції, втрати активної потужності, тепловий стан електродвигуна.

Постановка проблеми. Перетворення енергії в асинхронному електродвигуні (АД) супроводжується незворотними втратами, що проявляються у вигляді теплоти, виділення якої відбувається в елементах конструкції. Джерелами теплоти в асинхронному електродвигуні, головним чином, є активні частини (обмотки, осердя) і підшипники. Тому, дослідження і визначення втрат активної потужності у вузлах та активних елементах асинхронного електродвигуна є важливим при визначенні його теплового стану.

Аналіз останніх досліджень. Під час дослідження теплових процесів асинхронних електродвигунів у багатьох роботах [1, 3, 4] велика увага приділяється визначенню втрат активної потужності і їх розподілу в окремих вузлах і активних елементах електродвигуна. Однак, вони не в повній мірі дозволяють враховувати вплив зміни струму в обмотці статора та відхилення напруги на затискачах електродвигуна при визначенні теплових втрат.

Формулювання цілей статті. Завданням є дослідження втрат активної потужності у вузлах і активних елементах асинхронного електродвигуна при зміні струму в обмотці статора та відхиленні напруги на затискачах при визначенні теплового стану АД.



Основні матеріали дослідження (основна частина). Точність теплового стану асинхронного електродвигуна в результаті теплового розрахунку багато в чому залежить від точності обліку всіх гріючих втрат. Велике значення має розподіл теплових втрат в окремих вузлах і активних елементах електродвигуна. Втрати в обмотці статора ΔP_{12} розподілені між тілами 1 (ΔP_1) і 2 (ΔP_2) [2] пропорційно довжині лобової (l_l) і пазової (l_n) частин обмотки статора відповідно. Потужність ΔP_3 представляє собою суму основних втрат в сталі ΔP_C і половини додаткових втрат $\Delta P_{ДОБ}$; потужність ΔP_5 – суму електричних втрат в обмотці ротора $\Delta P_{ЕЛ.2}$ і половини додаткових втрат $\Delta P_{ДОБ}$. Потужність ΔP_4 представляє собою частину механічних втрат $\Delta P_{МЕХ}$, витрачених на внутрішню вентиляцію; потужність ΔP_6 – частину механічних втрат $\Delta P_{МЕХ}$, витрачених на тертя в підшипниках. Передбачається, що інша частина механічних втрат витрачається в зовнішньому вентиляторі і не бере участі в підвищенні температури внутрішніх частин двигуна [1].

Втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні знайдемо виходячи з Γ - подібної схеми заміщення.

Електричні втрати в лобовій і пазовій частинах обмотки [1]:

$$\Delta P_1 = \Delta P_{12} \cdot \frac{l_l}{l_l + l_n}; \quad (1)$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_{12} - \Delta P_1, \quad (2)$$

де $\Delta P_{12} = \Delta P_{ЕЛ.1}$ - електричні втрати в обмотці статора, Вт;

l_l - довжина лобової частини обмотки, м;

l_n - довжина пазової частини обмотки, м.

$$\Delta P_{ЕЛ.1} = 3 \cdot r_{1\theta} \cdot I_1^2, \quad (3)$$

де r_1 - активний опір фази обмотки статора при температурі θ , Ом;

I_1 - діюче значення сили струму в обмотці статора, А.

Втрати в осерді статора [1]

$$\Delta P_3 = \Delta P_C + 0,5\Delta P_{ДОБ}, \quad (4)$$

де ΔP_C - втрати в сталі осердя статора, Вт;

$\Delta P_{ДОБ}$ - додаткові втрати активної потужності, Вт.

Додаткові втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні [1]

$$\Delta P_{ДОБ} = 0,005P_{1Н}, \quad (5)$$

де $P_{1Н}$ - номінальна споживана потужність, Вт.



Втрати в роторі [1]

$$\Delta P_5 = \Delta P_{\text{ЕЛ.2}} + 0,5\Delta P_{\text{ДОБ}}, \quad (6)$$

де $\Delta P_{\text{ЕЛ.2}}$ - втрати активної потужності в обмотці ротора, Ом.

$$\Delta P_{\text{ЕЛ.2}} = 3 \cdot r_{2\theta}'' \cdot (I_2'')^2, \quad (7)$$

де $r_{2\theta}''$ - приведений активний опір фази обмотки ротора при температурі θ , Ом;

I_2'' - приведений струм електродвигуна, А.

Запишемо вираз комплексу діючого значення сили струму в обмотці статора на робочій ділянці механічної характеристики електродвигуна виходячи з Γ - подібної схеми заміщення [4]:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{00} + (-\dot{I}_2''), \quad (8)$$

$$\dot{I}_{00} = \frac{\dot{U}_1}{r_{1\theta} + j(x_1 + x_\mu)}, \quad (9)$$

$$-\dot{I}_2'' = \frac{\dot{U}_1}{\left(r_{1\theta}' + \frac{r_{2\theta}''}{s}\right) + j(x_1' + x_2'')}. \quad (10)$$

Поза робочою ділянкою механічної характеристики електродвигуна при дії надструму ($k > 3$) приймемо припущення, що приведений струм дорівнює струму статора [4]

$$I_2'' = I_1. \quad (11)$$

Таким чином, сила струму в обмотці статора залежить від конструктивних параметрів електродвигуна ($r_{1\theta}$, x_1 , $r_{1\theta}'$, x_1' , x_μ , $r_{2\theta}''$, x_2''), прикладеної напруги (U_1) і ковзання (s).

Внутрішні вентиляційні втрати і втрати на тертя в підшипниках [1]

$$\Delta P_4 = \Delta P_6 = \Delta P_{\text{МЕХ}}/4, \quad (12)$$

де $\Delta P_{\text{МЕХ}}$ - механічні втрати активної потужності в електродвигуні, Ом.

$$\Delta P_{\text{МЕХ}} = K_T \cdot \left(\frac{n_1}{10}\right)^2 \cdot D_a^4, \quad (13)$$

де K_T - коефіцієнт тертя; $K_T = 1$ для двигунів при $2p = 2$ і $K_T = 1,3(1 - D_a)$ при $2p \geq 4$ [4];

D_a - зовнішній діаметр осердя статора, м.



Сумарні втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні

$$\sum \Delta P = \Delta P_{ЕЛ.1} + \Delta P_{ЕЛ.2} + \Delta P_C + \Delta P_{ДОБ} + \Delta P_{МЕХ}. \quad (14)$$

Тоді сумарні втрати активної потужності в елементах електродвигуна згідно еквівалентної теплової схеми (наведена в [2])

$$\sum_{i=1}^6 \Delta P_i = \sum \Delta P - 0,5 \Delta P_{МЕХ}. \quad (15)$$

Для проведення досліджень був вибраний асинхронний електродвигун 4АМ112М4У3 із ступенем захисту ІР44.

Результати розрахунків втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні в номінальному режимі: $\Delta P_{ЕЛ.1} = 468$ Вт; $\Delta P_{ЕЛ.2} = 266$ Вт; $\Delta P_C = 135,5$ Вт; $\Delta P_{ДОБ} = 32$ Вт; $\Delta P_{МЕХ} = 31,5$ Вт.

Результати розрахунків потужності джерел теплоти згідно еквівалентної теплової схеми [2]:

- електричні втрати в лобовій і пазовій частинах обмотки
 $\Delta P_1 = 263,5$ Вт; $\Delta P_2 = 204,5$ Вт;
- втрати в осерді статора $\Delta P_3 = 151,5$ Вт;
- втрати в роторі $\Delta P_5 = 281,7$ Вт;
- внутрішні вентиляційні втрати і втрати на тертя в підшипниках
 $\Delta P_4 = \Delta P_6 = 7,9$ Вт;
- сумарні втрати активної потужності в електродвигуні
 $\sum \Delta P_H = 933$ Вт;
- сумарні втрати активної потужності в елементах електродвигуна згідно еквівалентної теплової схеми $\sum \Delta P_i = 917$ Вт.

Значення активних опорів в схемі заміщення наводяться при розрахунковій температурі нагріву обмотки θ_P , значення якої для класу нагрівостійкості ізоляції «В» приймається 75 °С і класу «F» – 115 °С. Активні опори r_θ при температурі, яка відрізняється від розрахункової, визначаємо за формулою

$$r_\theta = r \left(\frac{\frac{1}{\alpha} + \theta}{\frac{1}{\alpha} + \theta_P} \right), \quad (16)$$

де r - активний опір при розрахунковій температурі, Ом;

θ_P - розрахункова температура, °С;

α - температурний коефіцієнт опору матеріалу.



Практичний інтерес представляють залежності втрат активної потужності у функції кратності сили струму і відхиленні напруги на затискачах асинхронного електродвигуна.

Втрати в сталі осердя статора

$$\Delta P_C = \Delta P_{C.H} \cdot \left(\frac{U_1}{U_{1H}} \right)^2, \quad (17)$$

де $\Delta P_{C.H}$ - втрати активної потужності в сталі осердя статора при номінальній напрузі, Вт.

Коефіцієнт, який враховує відхилення напруги живлячої мережі

$$k_U = \frac{U_1}{U_{1H}}, \quad (18)$$

де U_1 - діюче значення напруги на затискачах асинхронного електродвигуна, В;

U_{1H} - діюче значення номінальної напруги на затискачах асинхронного електродвигуна, В.

Номінальні втрати активної потужності в сталі осердя статора

$$\Delta P_{C.H} = \sum \Delta P_H - \Delta P_{EЛ.1H} - \Delta P_{EЛ.2H} - \Delta P_{MEХ.H} - \Delta P_{ДОБ.H},$$

(19)

де $\sum \Delta P_H$ - сумарні втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні у номінальному режимі, Вт;

$\Delta P_{EЛ.1H}$ - втрати активної потужності в обмотці статора у номінальному режимі, Вт;

$\Delta P_{EЛ.2H}$ - втрати активної потужності в обмотці ротора у номінальному режимі, Вт;

$\Delta P_{MEХ.H}$ - механічні втрати активної потужності в електродвигуні у номінальному режимі, Вт;

$\Delta P_{ДОБ.H}$ - додаткові втрати активної потужності в електродвигуні у номінальному режимі, Вт.

Сумарні втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні у номінальному режимі [4]

$$\sum \Delta P_H = P_H \frac{1 - \eta_H}{\eta_H}, \quad (20)$$

де P_H - номінальна активна потужність електродвигуна, Вт;

η_H - номінальний коефіцієнт корисної дії електродвигуна.

Відповідно до [4] величина механічних втрат пропорційна квадрату швидкості обертання ротора. Тому можна записати



$$\Delta P_{MEH} = \Delta P_{MEH.H} \left(\frac{1-s}{1-s_H} \right)^2, \quad (21)$$

Додаткові втрати, відповідно до [4], дорівнюють

$$\Delta P_{ДОБ} = \Delta P_{ДОБ.H} \left(\frac{I_1}{I_{1H}} \right)^2. \quad (22)$$

Кратність сили струму в обмотці статора

$$k_i = \frac{I_1}{I_{1H}}, \quad (23)$$

де I_1 - діюче значення сили струму в обмотці статора, А;

I_{1H} - номінальне діюче значення сили струму в обмотці статора, А.

Запишемо вираз квадрата кратності струму асинхронного електродвигуна, використовуючи його Г- подібну схему заміщення при номінальній напрузі [3]

$$k_i^2 = \frac{(r'_{1\theta} + r''_{2\theta}/s_H)^2 + (x'_1 + x''_2)^2}{(r'_{1\theta} + r''_{2\theta}/s)^2 + (x'_1 + x''_2)^2}, \quad (24)$$

де s_H - номінальне ковзання електродвигуна;

s - поточне ковзання електродвигуна.

Вирішимо рівняння (24) відносно величини ковзання s при відомій прикладеній напрузі U_1 , силі струму I_1 , ковзанні s_H , параметрах схеми заміщення електродвигуна $r_{1\theta}$, x_1 , $r''_{1\theta}$, x'_1 , $r''_{2\theta}$, x''_2 і отримаємо

$$s = \frac{r''_{2\theta}}{-r'_{1\theta} + \sqrt{-(x'_1 + x''_2)^2 + \frac{1}{k_i^2} \left((r'_{1\theta} + r''_{2\theta}/s_H)^2 + (x'_1 + x''_2)^2 \right)}}. \quad (25)$$

На підставі отриманого значення ковзання s визначаємо механічні втрати ΔP_{MEH} в асинхронному електродвигуні, діюче значення приведеної сили струму ротора I''_2 і втрати активної потужності у вузлах електродвигуна.

Графічні залежності втрат активної потужності у вузлах і активних елементах АД при зміні струму в обмотці статора та відхиленні напруги на затискачах наведені на рис. 1 - рис. 3.

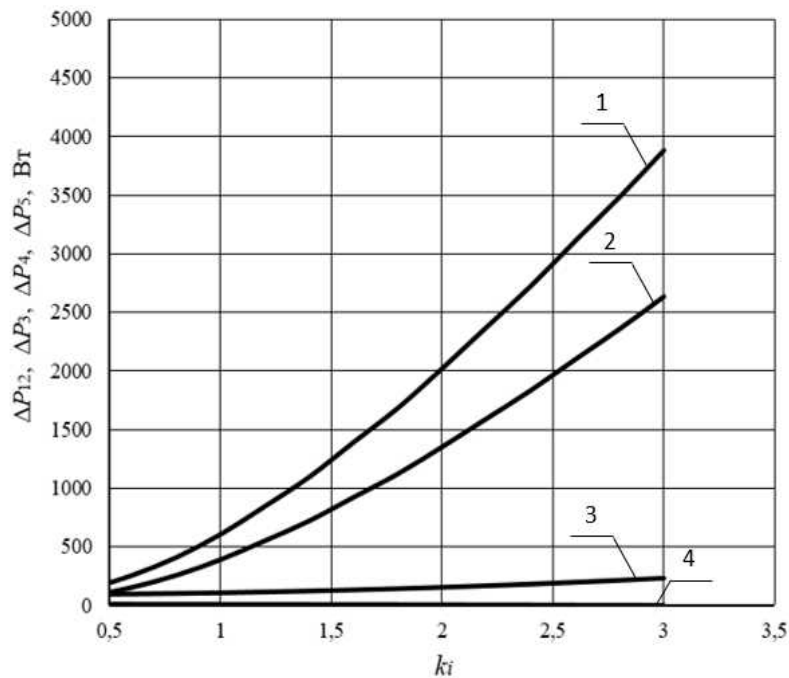


Рис. 1. Залежності втрат активної потужності в обмотці статора (1), роторі (2), осерді статора (3) і внутрішньому повітрі (4) електродвигуна 4AM112M4У3 у функції кратності сили струму при $k_U = 0,8$ і розрахунковій температурі 75°C

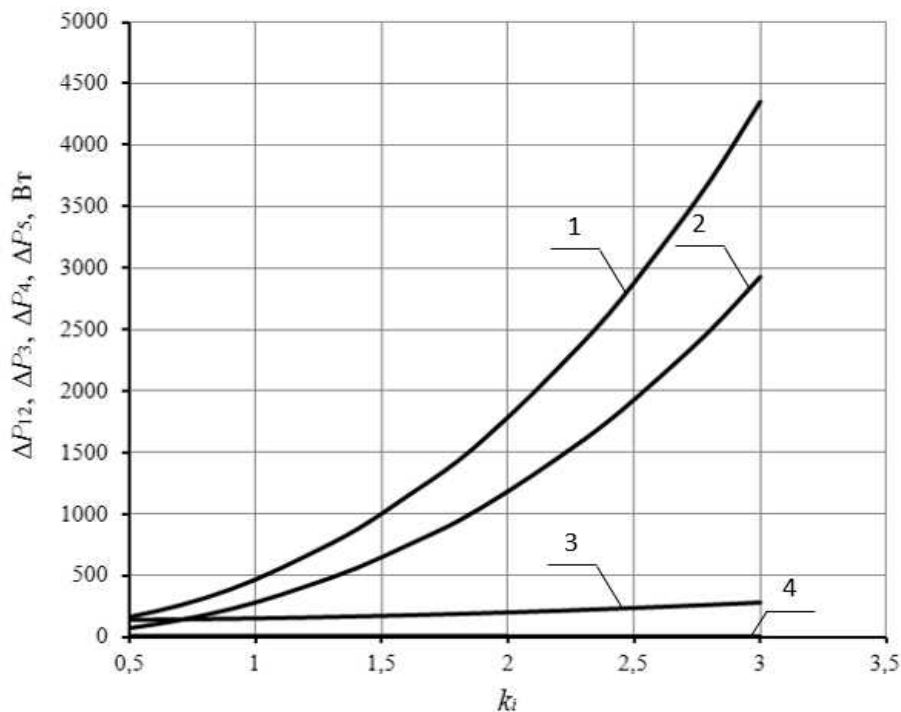


Рис. 2. Залежності втрат активної потужності в обмотці статора (1), роторі (2), осерді статора (3) і внутрішньому повітрі (4) електродвигуна 4AM112M4У3 у функції кратності сили струму при $k_U = 1,0$ і розрахунковій температурі 75°C

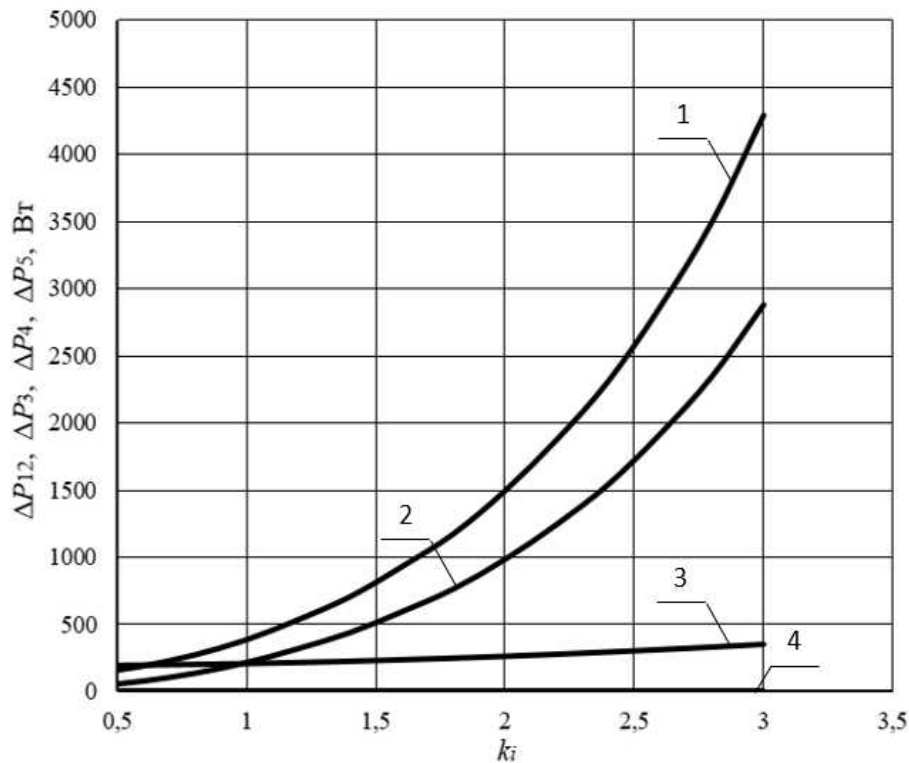


Рис. 3. Залежності втрат активної потужності в обмотці статора (1), роторі (2), осерді статора (3) і внутрішньому повітрі (4) електродвигуна 4AM112M4У3 у функції кратності сили струму при $k_U = 1,2$ і розрахунковій температурі $75\text{ }^\circ\text{C}$

Висновок. На підставі проведених досліджень можна зробити наступний висновок: втрати активної потужності при збільшенні величини кратності сили струму суттєво зростають в обмотці статора та роторі електродвигуна, не суттєво зростають в осерді статора, і практично не змінюються на внутрішню вентиляцію. При відхиленні напруги на затискачах асинхронного електродвигуна змінювання втрат активної потужності відбувається більш суттєво при зменшенні напруги по відношенню до номінальної, ніж при її збільшенні.

Список використаних джерел.

1. Сипайлов Г.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах : учеб. для вузов / Г.А. Сипайлов, Д.И. Санников, В.А. Жадан. – М. : Высш. шк., 1989. – 239 с.
2. Квітка С.О. Математична модель теплового стану асинхронного електродвигуна у нестационарних режимах / С.О. Квітка, О.Ю. Вовк, О.С. Квітка // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. – Вип. 175. – Харків : ХНТУСГ, 2016. – С. 140-142.
3. Вовк О.Ю. Вплив відхилення напруги живлячої мережі на втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні / О.Ю. Вовк, С.О. Квітка, О.С. Квітка // Вісник Харківського національного технічного



університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. – Вип. 164. – Харків : ХНТУСГ, 2015. – С. 121-123.

4. Конструкция и расчет трехфазных асинхронных электродвигателей : учеб. пособие к курсовому и дипломному проектированию / В.А. Потапкин, Р.В. Ротыч, Г.А. Назикян, В.И. Рожков ; Юж.– Рос. гос. техн. ун-т. – Новочеркасск : ЮРГТУ(НПИ), 2009. – 171с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ

Квитка С.А., Вовк А.Ю., Квитка А.С.

Аннотация – представлены результаты исследования потерь активной мощности в узлах и активных элементах асинхронного электродвигателя при изменении тока в обмотке статора и отклонении напряжения на зажимах электродвигателя при определении его теплового состояния.

RESEARCH OF LOSSES OF THE ACTIVE POWER IN THE ASYNCHRONOUS ELECTROMOTOR

S. Kvitka, O. Vovk, A. Kvitka

Summary

Results of a research of losses of the active power in nodes and the active elements of the asynchronous electromotor in case of change of current in a winding of the stator and a voltage deviation on electromotor jumpers in case of determination of its thermal status are provided.