



УДК 621.313.333.2

ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В АСИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІ У ФУНКЦІЇ ЖИВЛЯЧОЇ НАПРУГИ

Стребков О.А., інженер

Таврійський державний агротехнологічний університет

Тел.: (0619)42-32-63

Анотація – проведені дослідження втрат активної потужності в електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження та рівня живлячої напруги.

Ключові слова: активна потужність, втрати потужності, живляча напруга, коефіцієнт втрат.

Постановка проблеми. Робочі машини фермерських господарств у більшості випадків обладнані застарілими приводними електродвигунами та пускозахисної апаратурою, а питанню модернізації обладнання майже не приділяється уваги, через його високу вартість.

Внаслідок цього, через відсутність засобів регулювання режимів роботи електродвигунів при змінному завантаженні робочих машин спостерігається нераціональне споживання електричної енергії.

Тому необхідні науково-технічні рішення в сфері енергозбереження і тому дослідження втрат електричної енергії в електродвигунах є актуальними.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз робіт в цьому напрямку показує, що це питання частково вирішено, наприклад, для електродвигуна, працюючого з перевантаженням, взявши за основу показники номінального режиму його роботи [1].

Проведено дослідження енергозбереження в асинхронних електродвигунах з позиції конструктивного виконання активних частин останнього [2], методів оптимізації втрат електричної енергії в асинхронному електродвигуні [3, 4], запропоновано новий метод мінімізації втрат в асинхронному електродвигуні [5].

Однак залишаються недослідженими до кінця експлуатаційні режими електродвигуна при відхиленнях від номінального режиму роботи: підвищення напруги, зниження напруги, змінне завантаження на його валу.

Формулювання цілей статті. Тому метою статті є аналітичне дослідження електромеханічних та теплових процесів при змінному



навантаженні асинхронних електродвигунів, та при різному рівні живлячої напруги.

Основна частина. Представимо Г-подібну схему заміщення асинхронного електродвигуна (рис. 1):

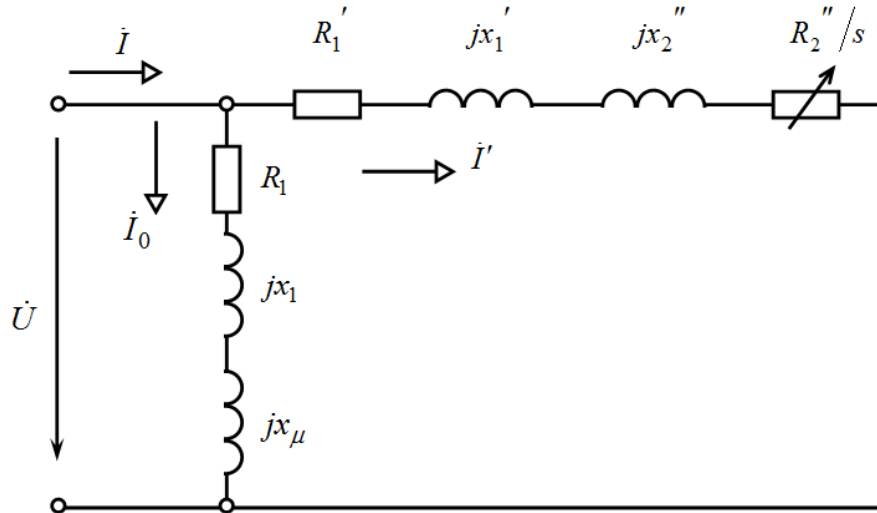


Рис. 1. Г-подібна схема заміщення асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором

Активна потужність, яку споживає асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором, перетворюється в механічну $P_{\text{мх}}$, яка складається з механічної потужності P_2 , яка передається через вал робочій машині, втрат активної потужності в механічній системі електродвигуна на тертя $\Delta P_{\text{тр}}$, та втрат активної потужності, які умовно відносяться до механічної і враховують додаткові втрати в електродвигуні $\Delta P_{\text{дод}}$, тобто

$$P_{\text{мх}} = P_2 + \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{дод}}. \quad (1)$$

Механічна потужність $P_{\text{мх}}$ може бути визначена таким чином

$$P_{\text{мх}} = 3R_2'' \frac{1-s}{s} I'^2, \quad (2)$$

де R_2'' – приведений активний опір фази ротора, Ом;

I' – діюче значення сили електричного струму в колі схеми заміщення однієї фази електродвигуна, А;

s – відносне ковзання обертового магнітного поля електродвигуна.

Механічна потужність P_2 , яка передається робочій машині, залежить від моменту опору робочої машини M_c та кутової швидкості обертання її валу ω , тобто



$$P_2 = M_c \cdot \omega. \quad (3)$$

Додаткові втрати активної потужності в електродвигуні через достатню складність їх розрахунку, згідно стандарту приймаються рівними 0,5% від активної потужності P_1 , що споживається електродвигуном і можуть бути знайдені наступним чином

$$\Delta P_{\text{доо}} = 0,005P_1. \quad (4)$$

Втрати механічної потужності на тертя $\Delta P_{\text{тр}}$, залежать від моменту тертя механічної системи електродвигуна $M_{\text{тр}}$ та кутової швидкості обертання його валу ω , тобто

$$\Delta P_{\text{мп}} = M_{\text{мп}} \cdot \omega, \quad (5)$$

або з іншого боку

$$\Delta P_{\text{мп}} = P_{\text{мх}} - P_2 - \Delta P_{\text{доо}}. \quad (6)$$

Інші сумарні втрати активної потужності P_{Σ} можуть бути визначені, використовуючи схему заміщення асинхронного електродвигуна

$$P_{\Sigma} = 3(R'_1 + R''_2)I'^2 + 3R_1I_0^2, \quad (7)$$

де R'_1, R''_2, R_1 – параметри схеми заміщення одної фази асинхронного електродвигуна, Ом;

I', I_0 – діючі значення сил електричних струмів контурів схеми заміщення одної фази електродвигуна, А.

Перевіримо справедливість викладеного вище на прикладі асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором типорозміру 4A100S2Y3 з наступними каталожними даними: $P_{2n} = 4\text{кВт}$; $\eta_n = 0,865$; $\cos \varphi_n = 0,89$; $R'_1 = 1,509\text{Ом}$; $x'_1 = 1,537\text{Ом}$; $R''_2 = 1,006\text{Ом}$; $x''_2 = 2,767\text{Ом}$; $R_1 = 1,485\text{Ом}$; $x_1 = 1,513\text{Ом}$; $x_{\mu} = 95\text{Ом}$; $U_n = 220\text{В}$; $s_n = 0,033$; $s_k = 0,28$; $s_m = 0,8$; $\mu_n = 2,0$; $\mu_k = 2,5$; $\mu_m = 1,6$.

Аналіз проведемо для номінального режиму.

Визначаємо механічну потужність електродвигуна в номінальному режимі $P_{\text{мхн}}$ таким чином



$$P_{\text{мхн}} = 3R_2'' \frac{1-s_n}{s_n} I_n'^2, \quad (8)$$

де s_n – номінальне ковзання магнітного поля електродвигуна відносно його ротора;

I_n' – номінальна сила електричного струму в контурі схеми заміщення асинхронного електродвигуна, А.

Останню знаходимо, користуючись схемою заміщення асинхронного електродвигуна

$$I_n' = \frac{U_n}{\sqrt{(R_1' + R_2''/s_n)^2 + (x_1' + x_2'')^2}}, \quad (9)$$

де U_n – номінальна фазна напруга електродвигуна, В.

Підставивши в (8) та (9) значення параметрів та фізичних величин, знаходимо

$$P_{\text{мхн}} = 4107 \text{ Вт}.$$

Знаходимо сумарні втрати активної потужності в механічній системі електродвигуна $\Delta P_{\text{тр.н}}$ та додаткові $\Delta P_{\text{дод.н}}$ в номінальному режимі

$$\Delta P_{\text{тр.н}} + \Delta P_{\text{дод.н}} = P_{\text{мхн}} - P_{2\text{н}}. \quad (10)$$

де $P_{2\text{н}}$ – номінальна активна потужність, яка передається робочій машині з валу електродвигуна, Вт.

Підставивши значення потужностей, отримаємо

$$\Delta P_{\text{тр.н}} + \Delta P_{\text{дод.н}} = 4107 - 4000 = 107 \text{ Вт}.$$

Знаходимо інші сумарні втрати активної потужності

$$P_{\Sigma_n} = 3(R_1' + R_2'') I_n'^2 + 3R_1 I_0^2, \quad (11)$$

де

$$I_0 = \frac{U_n}{\sqrt{R_1^2 + (x_1' + x_\mu)'^2}}. \quad (12)$$

Підставивши значення параметрів і фізичних величин в (11) та (12), отримаємо

$$P_{\Sigma_n} = 3(1,529 + 1,006) 6,815^2 + 3 \cdot 1,485 \cdot 2,28^2 = 350 + 23 = 373 \text{ Вт}.$$



Загальні сумарні втрати активної потужності в асинхронному електродвигуні при номінальному режимі роботи

$$\Delta P'_n = P_{\Sigma n} + P_{тр.н} + P_{доод.н}. \quad (12)$$

Підставивши значення потужностей, отримаємо

$$\Delta P'_n = 373 + 107 = 480 \text{ Вт.}$$

Визначимо ці втрати за каталожними даними

$$\Delta P_n = \frac{P_{2н}}{\eta_n} - P_{2н}. \quad (13)$$

Підставивши значення потужності та к.к.д., отримаємо

$$\Delta P_n = \frac{4000}{0,865} - 4000 = 624 \text{ Вт.}$$

Як видно з розрахунків, використовуючи каталожні дані, отримаємо втрати активної потужності, значення яких перевищує отримані втрати розрахунковим шляхом. Це пов'язано з тим, що Г-подібна схема заміщення не враховує втрати в магнітопроводі. Тому знаходимо втрати на гістерезис та вихрові струми, як різницю значень втрат активної потужності, отриманої за каталожними даними, та розрахованих за параметрами схеми заміщення

$$\Delta P_{м.н} = \Delta P_n - \Delta P'_n = 624 - 480 = 144 \text{ Вт.} \quad (14)$$

На підставі викладеного вище, приймаємо наступну методику аналітичного дослідження коефіцієнта втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні, під яким будемо розуміти відношення втрат активної потужності до активної потужності на його валу у функції коефіцієнта завантаження робочої машини, тобто $k_n = f(k_3)$ з урахуванням рівня живлячої напруги.

1) Задаємось значенням коефіцієнта завантаження робочої машини та рівня живлячої напруги;

2) Визначаємо ковзання асинхронного електродвигуна при заданих значеннях k_3 та k_n з урахуванням типу робочої машини. Для робочої машини з незалежною від швидкості механічною характеристикою ($x = 0$) ця залежність буде наступною



$$s = \frac{k_3}{k_U^2} \cdot s_H \quad (15)$$

Для робочої машини з лінійно-зростаючою механічною характеристикою ($x = 1$) ця залежність буде наступною

$$s = \frac{m_0 + \frac{1-m_0}{1-s_H}}{\frac{k_U^2}{k_3 \cdot s_H} + \frac{1-m_0}{1-s_H}} \quad (16)$$

Для робочої машини з нелінійно-зростаючою (параболічною) механічною характеристикою ($x = 2$) ця залежність буде наступною

$$s = \frac{-K_2 \pm \sqrt{K_2^2 - 4 \cdot K_1 \cdot K_3}}{2 \cdot K_1} \quad (17)$$

де $K_1 = k_3 \cdot s_H \cdot (1 - m_0)$;

$K_2 = -2 \cdot K_1 - k_U^2 \cdot (1 - s_H)^2$;

$K_3 = k_3 \cdot s_H \cdot (1 - m_0 + m_0 (1 - s_H)^2)$.

Для робочої машини з нелінійно-спадаючою (гіперболічною) механічною характеристикою ($x = -1$) ця залежність буде наступною

$$s = \frac{\frac{k_U^2}{s_H} + m_0 - \sqrt{\left(\frac{k_U^2}{s_H} + m_0\right)^2 - 4 \frac{k_U^2}{s_H} (m_0 + (k_3 - m_0)(1 - s_H))}}{2 \cdot \frac{k_U^2}{s_H}} \quad (18)$$

3) Визначаємо силу електричного струму в контурі схеми заміщення асинхронного електродвигуна

$$I' = \frac{\kappa_u U_H}{\sqrt{(R_1' + R_2''/s)^2 + (x_1' + x_2'')^2}}, \quad (19)$$

4) Визначаємо механічну потужність електродвигуна

$$P_{mx} = 3R_2'' \frac{1-s}{s} I'^2, \quad (20)$$

5) Визначаємо додаткові втрати активної потужності в електродвигуні



$$\Delta P_{\text{доо}} = \frac{I'}{I'_n} \Delta P_{\text{доо.н}}, \quad (21)$$

де

$$\Delta P_{\text{доо.н}} = 0,005 \frac{P_{2н}}{\eta_n}. \quad (22)$$

6) Визначаємо втрати активної потужності в механічній системі електродвигуна

$$\Delta P_{\text{тр}} = \Delta P_{\text{тр.н}} \left(\frac{1-s}{1-s_n} \right)^2, \quad (23)$$

де

$$\Delta P_{\text{тр.н}} = P_{\text{мх.н}} - P_{2н} - \Delta P_{\text{доо.н}}. \quad (24)$$

7) Визначаємо інші сумарні втрати активної потужності P_{Σ} , використовуючи схему заміщення асинхронного електродвигуна

$$P_{\Sigma_n} = 3(R'_1 + R''_2) I'^2 + 3R_1 I_0^2, \quad (25)$$

де

$$I_0 = \frac{\kappa_u U_n}{\sqrt{R_1^2 + (x'_1 + x_\mu)^2}}. \quad (26)$$

8) Визначаємо втрати активної потужності в електродвигуні без урахування втрат в магнітопроводі

$$\Delta P' = \Delta P_{\Sigma_n} + \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{доо}}. \quad (27)$$

9) Визначаємо втрати активної потужності в магнітопроводі

$$\Delta P_m = \kappa_u^2 \Delta P_{\text{м.н}}. \quad (28)$$

10) Визначаємо загальні втрати активної потужності в електродвигуні

$$\Delta P = \Delta P' + \Delta P_m. \quad (29)$$

11) Визначаємо механічну потужність, яка передається на вал робочій машині

$$P_2 = P_{мх} - \Delta P_{тр} - \Delta P_{дод}. \quad (30)$$

12) Визначаємо коефіцієнт втрат активної потужності

$$\kappa_n = \frac{\Delta P}{P_2}. \quad (31)$$

За методикою, викладеною вище, проведемо кількісний аналіз коефіцієнта втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні у функції коефіцієнта завантаження робочої машини, з урахуванням рівня живлячої напруги.

Кількісний аналіз проведемо на прикладі електродвигуна типу-розміру 4А100S2У3.

Приймаємо значення коефіцієнта прикладеної напруги κ_u в межах від 1,1 до 0,8; значення коефіцієнта завантаження κ_z від 0 до 1,2. Розраховуємо коефіцієнт втрат активної потужності електродвигуна, працюючого з різними типами робочих машин. Результати представляємо графічно (рис. 2 – 5).

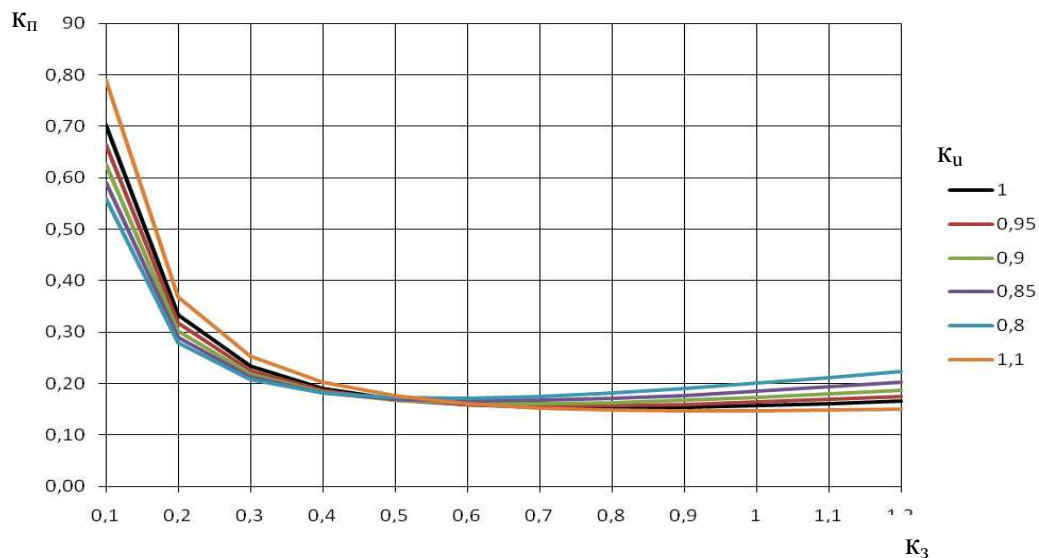


Рис. 2. Залежності коефіцієнта втрат електродвигуна від його завантаження, працюючого в парі з робочою машиною з незалежною від швидкості механічною характеристикою ($x=0$)

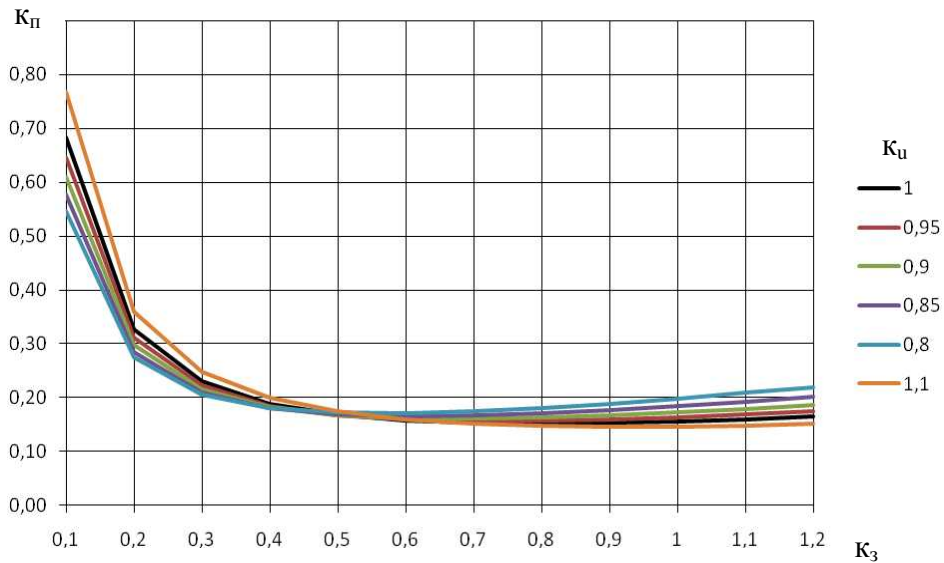


Рис. 3. Залежності коефіцієнта втрат електродвигуна від його завантаження, працюючого в парі з робочою машиною з лінійно-зростаючою механічною характеристикою ($x=1$)

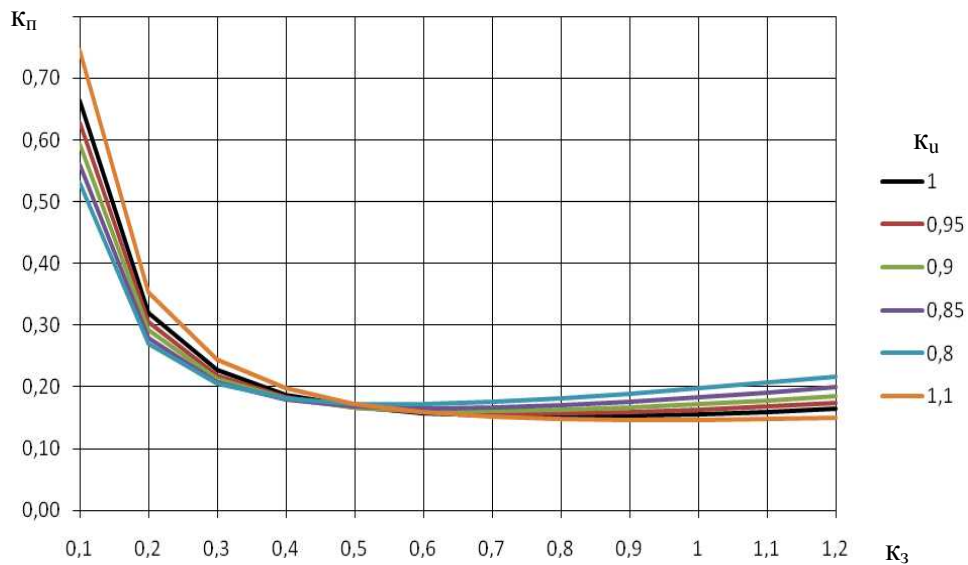


Рис. 4. Залежності коефіцієнта втрат електродвигуна від його завантаження, працюючого в парі з робочою машиною з нелінійно-зростаючою механічною характеристикою ($x=2$)

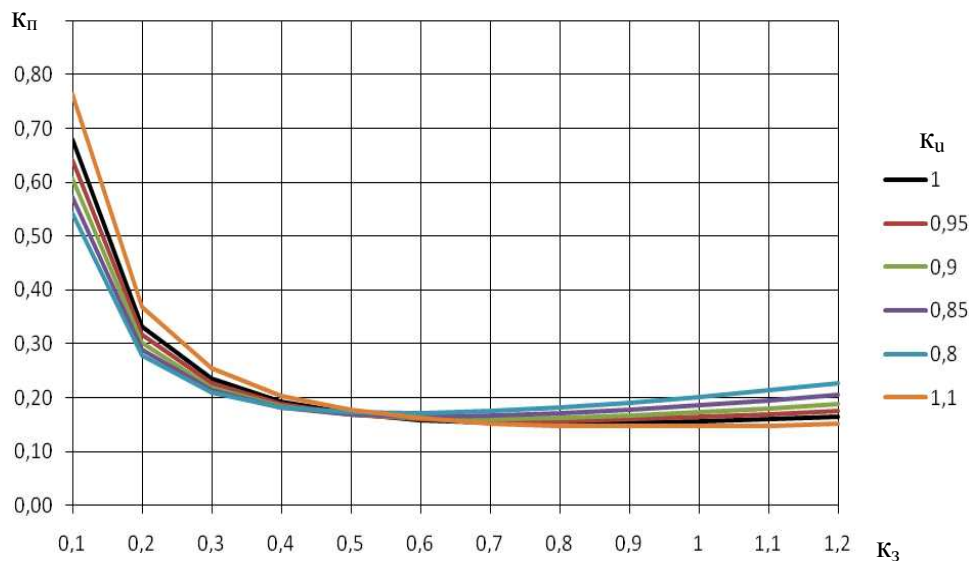


Рис. 5. Залежності коефіцієнта втрат електродвигуна від його завантаження, працюючого в парі з робочою машиною з нелінійно-спадаючою механічною характеристикою ($x=-1$)

Аналіз залежностей коефіцієнта втрат активної потужності електродвигуна типорозміру 4A100S2Y3 в залежності від його завантаження показав, що незалежно від типу робочої машини при зниженні напруги на затискачах електродвигуна відбувається зменшення коефіцієнта втрат активної потужності в ньому в діапазоні завантаження до 50%. При завантаженні електродвигуна на 50-70% коефіцієнт втрат є мінімальним при значенні напруги близькому до номінальної, а в діапазоні від 70% і вище коефіцієнт втрат буде зменшуватись при збільшенні напруги живлення.

Висновки.

1. Розроблена методика аналітичного дослідження втрат активної потужності в асинхронному електродвигуні з короткозамкненим ротором у функції коефіцієнта його завантаження та рівня живлячої напруги.

2. Аналіз отриманої залежності коефіцієнта втрат активної потужності показує, що вона носить нелінійний екстремальний характер і її використання дозволяє забезпечити енергозберігаючий експлуатаційний режим роботи асинхронного електродвигуна шляхом визначення оптимального рівня живлячої напруги при змінному завантаженні останнього.

Список використаних джерел

1. Овчаров С. В. Исследование потерь активной энергии в асинхронном электродвигателе в эксплуатационных условиях /



С. В. Овчаров, А. А. Стребков. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 2, N 8(74). - С. 22-28.

2. *Sun, D. S. Research on Voltage-Chopping and Energy-Saving Controlling Technology for Three-Phase AC Asynchronous Motor [Text] / D. S. Sun // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 433-440. – P. 1033–1037. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.433-440.1033*

3. *Hung, N. T. Optimization of Electric Energy in Three-Phase Induction Motor by Balancing of Torque and Flux Dependent Losses [Text] / N. T. Hung, N. C. Thien, T. P. Nguyen, V. S. Le, D. A. Tuan. – Lecture Notes in Electrical Engineering, 2014. – P. 497–507. doi: 10.1007/978-3-642-41968-3_50*

4. *Grouni, S. Novel Loss Optimization in Induction Machines with Optimum Rotor Flux Control [Text] / S. Grouni, R. Ibtouen, M. Kidouche, O. Touhami // International Journal of Systems Control. – 2010. – Vol. 1, Issue 4. – P. 163–169.*

5. *Dhaoui, M. A New Method for Losses Minimization in IFOC Induction Motor Drives [Text] / M. Dhaoui, L. Sbita // International Journal of Systems Control. – 2010. – Vol. 1, Issue 2. – P. 93–99.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В АСИНХРОННОМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ В ФУНКЦИИ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Стребков А.А.

Аннотация – проведены исследования потерь активной мощности в электродвигателе в функции коэффициента загрузки и уровня питающего напряжения.

A STUDY OF ACTIVE POWER LOSSES IN THE ASYNCHRONOUS MOTOR IN FUNCTION OF THE SUPPLY VOLTAGE

O. Strebkov

Summary

Active power losses in the motor as a function of the load factor and the level of the supply voltage is investigated.