

**ВПЛИВ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГИ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЛОЧНИХ НАСОСІВ**

***О. Ю. Синявський, кандидат технічних наук, доцент***

***В. В. Савченко, кандидат технічних наук, доцент***

***Н. Д. Пруднікова, кандидат технічних наук, доцент***

***В. М. Федосейкін, студент магістратури***

***Національний університет біоресурсів і природокористування України***

*E-mail: [sinyavsky2008@ukr.net](mailto:sinyavsky2008@ukr.net)*

**Анотація.** Відхилення та несиметрія напруги мають найбільший вплив на електроприводи виробничих машин і механізмів.

Несиметрія напруги призводить до збитків, які мають електромагнітну і технологічну складову.

Дослідження із впливу несиметрії напруги на технологічні характеристики робочих машин і механізмів показали, що при несиметрії напруги зменшується їх продуктивність. Проте відсутні дослідження з впливу несиметрії напруги на енергетичні характеристики молочних насосів.

Мета дослідження – встановлення впливу несиметрії напруги на енергетичні характеристики молочних насосів.

При несиметрії напруги змінюються постійні і змінні втрати в асинхронному електродвигуні.

Проводити енергетичну оцінку електропривода молочного насоса доцільно за питомою витратою електроенергії.

Проведено дослідження впливу несиметрії напруги на енергетичні характеристики відцентрованого молочного насоса. Отримана залежність питомої витрати електроенергії від зміни жорсткості механічної характеристики електродвигуна, яка обумовлена несиметрією напруги. Встановлено, що при несиметрії напруги зростають ковзання та втрати потужності. Внаслідок цього зростають питомі втрати електроенергії в молочних насосах.

**Ключові слова:** *молочний насос, несиметрія напруги, потужність, продуктивність насоса, питома витрата електроенергії*

**Актуальність.** Нині для перекачування молока найбільшого поширення набули відцентрові насоси. Режим роботи насоса впливає на якість молока та ведення технологічного процесу.

Найбільший вплив на електроприводи насосів мають відхилення та несиметрія наруги. У ході обробки даних понад 170 експериментів встановлено, що показниками якості електроенергії, які найбільш часто виходять за встановлені межі, є відхилення наруги (68 %) та коефіцієнт несиметрії за нульовою послідовністю (38 %) [1].

Несиметрія наруги призводить до збитків, які мають електромагнітну і технологічну складову. Електромагнітна складова визначається втратою активної потужності і зміною терміну служби ізоляції електрообладнання. Технологічна складова збитків обумовлена впливом несиметрії наруги на продуктивність технологічних установок та собівартість продукції, що випускається.

Внаслідок несиметрії наруги змінюються енергетичні характеристики технологічні та енергетичні характеристики молочних насосів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Несиметрія наруги призводить до зменшення моменту асинхронного двигуна та зростання втрат енергії [2]. Струм зворотної послідовності спричиняє додаткове нагрівання ротора і статора, що призводить до швидкого старіння ізоляції і зменшення потужності двигуна [3, 4].

Нині отримані аналітичні залежності моменту асинхронного електродвигуна від несиметрії наруги та втрат енергії в усталених режимах роботи при номінальних параметрах живлячої мережі [5].

Проводилися дослідження із впливу несиметрії наруги на технологічні характеристики робочих машин і механізмів. Встановлено, що несиметрія наруги призводить до зменшення їх продуктивності [6].

Проте не проводилися дослідження з впливу несиметрії наруги на енергетичні характеристики робочих машин, зокрема, відцентрових молочних насосів.

**Мета дослідження** – встановлення впливу несиметрії наруги на енергетичні характеристики відцентрових молочних насосів.

**Матеріали і методи дослідження.** Аналіз зміни кутової швидкості електропривода при несиметрії наруги проведений з використанням положень теорії електропривода, які стосуються електромеханічних властивостей

асинхронних електродвигунів, приводних характеристик молочних насосів та застосуванням математичного моделювання.

При експериментальних дослідженнях із впливу несиметрії напруги на механічну характеристику асинхронного електродвигуна знімали залежності частоти обертання двигуна від електромагнітного моменту при вмиканні в одну із фаз статора реостата. Залежності частоти обертання двигуна від моменту досліджували при різних значеннях опору реостата в фазі статора.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Механічна характеристика електродвигуна на робочій ділянці при несиметрії напруги описується залежністю [7]:

$$M_{\partial} = \beta_{\partial a} (\omega_0 - \omega), \quad (1)$$

де  $M_{\partial}$  – момент двигуна, Н·м;  $\beta_{\partial a}$  – жорсткість механічної характеристики електродвигуна при несиметрії напруги, Н·м·с;  $\omega_0$  – синхронна кутова швидкість, с<sup>-1</sup>;  $\omega$  – задана кутова швидкість, с<sup>-1</sup>.

У відносних одиницях жорсткість механічної характеристики двигуна:

$$\beta_{\partial a^*} = \frac{\beta_{\partial a}}{\beta_{\partial}}, \quad (2)$$

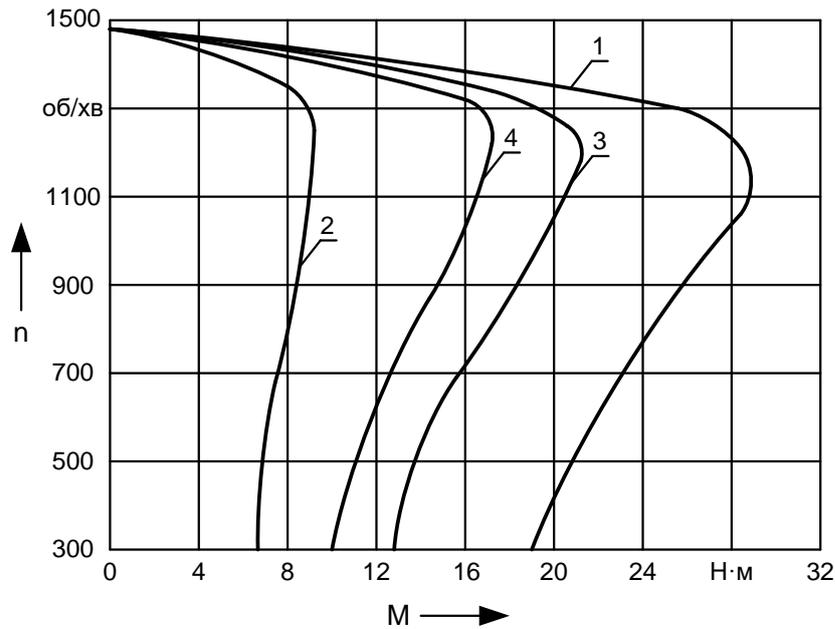
де  $\beta_{\partial}$  – жорсткість механічної характеристики електродвигуна при номінальній симетричній напрузі, Н·м·с.

Як показали проведені експериментальні дослідження, при несиметрії напруги зменшується жорсткість механічної характеристики електродвигуна (рисунок). Тому жорсткість механічної характеристики електродвигуна при несиметрії напруги у відносних одиницях менша одиниці.

Механічна характеристика відцентрових молочних насосів має вигляд [7]:

$$M_c = M_0 + (M_{cn} - M_0) \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2, \quad (3)$$

де  $M_c$  – момент статичних опорів насоса, Н·м, при заданій кутовій швидкості;  $M_0$  – початковий момент, Н·м;  $M_{cn}$  – момент статичних опорів, Н·м, при номінальній кутовій швидкості;  $\omega$  і  $\omega_n$  – задане і номінальне значення кутової швидкості, с<sup>-1</sup>.



**Рис. 1. Механічні характеристики трифазного асинхронного електродвигуна:**  
 1 – природна; 2 – при зниженій напрузі в  $\sqrt{3}$  раз; 3 – при коефіцієнті несиметрії напруги 0,86; 4 – при коефіцієнті несиметрії напруги 0,8

Тоді в усталеному режимі роботи

$$\beta_{\delta}\beta_{\delta a^*}(\omega_0 - \omega) = M_0 + (M_{сн} - M_0)\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2, \quad (4)$$

або

$$\beta_{\delta}\beta_{\delta a^*}(\omega_0 - \omega_n\omega_*) = M_0 + (M_{сн} - M_0)\omega_*^2, \quad (5)$$

де  $\omega_* = \omega/\omega_n$  – кутова швидкість у відносних одиницях.

Питома витрата електроенергії відцентрового молочного насоса, кВт·год/м<sup>3</sup>, визначається за формулою:

$$q = P_1 / Q, \quad (6)$$

де  $P_1$  – потужність, споживана двигуном з мережі, кВт.

При відхиленні напруги змінюються постійні і змінні втрати потужності в електродвигуні молочного насоса.

Змінні втрати потужності асинхронного електродвигуна визначаються за формулою [7]:

$$\Delta P_v = \Delta P_{v2} + \Delta P_{v1} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) M_{\delta} \omega_0 s, \quad (7)$$

де  $\Delta P_{V2}$ ,  $\Delta P_{V1}$  – змінні втрати потужності в колах ротора і статора, Вт;  $R_l$  – активний опір обмотки ротора, Ом;  $R'_2$  – опір обмотки ротора, зведений до обмотки статора, Ом;  $s$  – ковзання двигуна.

У відцентрових насосів початковий момент невеликий, тому їм можна знехтувати. Оскільки

$$M_{сн} = K_3 M_{дн}, \quad (8)$$

де  $K_3$  – коефіцієнт завантаження двигуна,

тоді вираз (5) можна записати так:

$$\beta_\delta \beta_{\delta a^*} (\omega_0 - \omega) = M_{сн} \omega_*^2 = K_3 \beta_\delta (\omega_0 - \omega_n) \omega_*^2, \quad (9)$$

де  $\omega_n$  – номінальна кутова швидкість двигуна,  $c^{-1}$ .

З виразу (9) отримаємо залежність ковзання двигуна від напруги:

$$s = \frac{K_3 s_n \omega_*^2}{\beta_{\delta a^*}}. \quad (10)$$

При несиметрії напруги відносна жорсткість механічної характеристики двигуна зменшується, тому зростає ковзання і, відповідно втрати в двигуні.

Тоді змінні втрати потужності можна записати у вигляді:

$$\Delta P_v = \left(1 + \frac{R_l}{R'_2}\right) \beta_\delta \beta_{a^*} \omega_0^2 s^2 = \left(1 + \frac{R_l}{R'_2}\right) \frac{\beta_\delta \omega_0^2 K_3^2 s_n^2 \omega_*^4}{\beta_{\delta a^*}}, \quad (11)$$

або

$$\Delta P_v = \Delta P_{вн} \omega_*^4 / \beta_{\delta a^*}, \quad (12)$$

де  $\Delta P_{вн}$  – змінні втрати потужності при номінальній симетричній нарузі.

У відносних одиницях вираз (6) запишеться у вигляді:

$$q_* = \frac{P_2 + \Delta P_c + \Delta P_v}{P_{2н} + \Delta P_{сн} + \Delta P_{вн}} \cdot \frac{Q_n}{Q} = \frac{P_2 + \Delta P_{вн} (\alpha + \Delta P_v / \Delta P_{вн})}{P_{2н} + \Delta P_{вн} (\alpha + 1)} \cdot \frac{Q_n}{Q}, \quad (13)$$

де  $P_{2н}$  і  $P_2$  – відповідно потужність на валу двигуна при номінальній симетричній нарузі і несиметрії напруги, Вт;  $\Delta P_{сн}$  і  $\Delta P_c$  – постійні втрати, Вт;  $\Delta P_{вн}$  і  $\Delta P_v$  – змінні втрати, Вт;  $\alpha$  – коефіцієнт втрат.

У насоса продуктивність прямо пропорційна кутовій швидкості

$$Q = Q_n \omega_*, \quad (14)$$

а потужність пропорційна кубу кутової швидкості:

$$P_2 = P_{2н} \cdot \omega_*^3. \quad (15)$$

Номінальні змінні втрати потужності можна визначити через ККД електродвигуна:

$$\Delta P_{вн} = \frac{\Delta P}{(\alpha + 1)} = \frac{P_{2н}(1 - \eta_n)}{\eta_n(\alpha + 1)}. \quad (16)$$

Підставивши вирази (14) – (16) у вираз (13), після перетворень отримаємо:

$$q_* = \eta_n Q_*^2 + \frac{1 - \eta_n}{(\alpha + 1)} \cdot \frac{(\alpha_a + Q_*^4 / \beta_{\alpha a^*})}{Q_*}. \quad (17)$$

Якщо знехтувати постійними втратами в електродвигуні, то вираз (17) набуде вигляду:

$$q_* = \eta_n Q_*^2 + \frac{(1 - \eta_n) Q_*^3}{\beta_{\alpha a^*}}. \quad (18)$$

Із залежностей (17) та (18) випливає, що несиметрія напруги викликає зростання питомої витрати електроенергії в електроприводі відцентрових молочних насосів

### **Висновки і перспективи.**

При несиметрії напруги зменшується жорсткість механічної характеристики електродвигуна. При цьому зростає ковзання та втрати потужності. Внаслідок цього зростають питомі втрати електроенергії в електроприводі молочних насосів.

### **Список використаних джерел**

1. Дед А. В., Сикорский С. П., Смирнов П. С. Результаты измерений показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения предприятий и организаций. Омский научный вестник. 2018. №2 (158). С. 60 – 63.
2. Адамова С. Аналіз впливу якості електроенергії на роботу струмоприймачів. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2018. Вип. 8, т. 2. С. 1-10.
3. Pakkawe Nuyamin, Chaiyapon Thongchaisuratkrul. Effects of Induction Motor Using Unbalance Voltage. International Journal of the Computer, the Internet and Management. 2018, Vol. 26, No. 3, pp. 98-103.
4. Patil R. U., Chaudhari H. B. Behavior of Induction Motor at Voltage Unbalanced. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2015. Vol. 4. Issue 05, pp. 1344 – 1348.

5. Синявський О. Ю., Горобець В. Г. Вплив якості електроенергії на енергетику електроприводів в усталеному режимі. Науковий вісник НУБіП України. 2010. Вип. 153. С. 133 – 138.

6. Sinyavsky O., Savchenko V., Solomko N., Kisten V., Zalozny R. Influence of electricity quality on technological characteristics of agricultural machines | Wpływ jakości energii elektrycznej na charakterystyki technologiczne maszyn rolniczych. Przegląd Elektrotechniczny. 2021. Vol. 97(8). P. 84–87.

7. Синявський О. Ю., Савченко В. В., Козирський В. В. та ін. Електропривод і автоматизація. К.: ФОП Ямчинський О. В., 2019. 619 с.

### References

1. Ded, A. V., Sikorskiy, S. P., Smirnov P. S. (2018). Rezul'taty izmereniy pokazately kachestva elektroenergii v sistemakh elektrosnabzheniya predpriyatiy i organizatsiy [Results of measurements of power quality indicators in power supply systems of enterprises and organizations]. Omskiy nauchnyy vestnik, 2 (158), 60 – 63.

2. Adamova, S. (2018). Analiz vplyvu yakosti elektroenerhii na robotu strumopryimachiv [Analysis of the impact of electricity quality on the operation of current collectors]. Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu, 8 (2), 1-10.

3. Pakkawee, Hayamin, Chaiyapon, Thongchaisuratkrul (2018). Effects of Induction Motor Using Unbalance Voltage. International Journal of the Computer, the Internet and Management, 26 (3), 98-103.

4. Patil, R. U., Chaudhari, H. B. (2015). Behavior of Induction Motor at Voltage Unbalanced. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 4 (5), 1344 – 1348.

5. Sinyavsky A. Yu., Horobets V. H. (2010). Vplyv yakosti elektroenerhii na enerhetyku elektropryvodiv v ustalennomu rezhymi [The influence of electricity quality on the energy of electric drives in the steady state]. Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy, 153, 133 – 138.

6. Sinyavsky, O., Savchenko, V., Solomko, N., Kisten, V., Zalozny, R. (2021). Influence of electricity quality on technological characteristics of agricultural machines. Przegląd Elektrotechniczny, 97(8), 84–87.

7. Sinyavsky, A. Yu., Savchenko, V. V., Kozyrskiy V. V. (2019). Elektropryvod i avtomatyzatsiia [Electric drive and automation]. Kyiv: FOP Yamchynskiy O. V., 619.

### INFLUENCE OF VOLTAGE ASYMMETRY ON ENERGY CHARACTERISTICS OF MILK PUMPS

*O. Sinyavsky, V. Savchenko, N. Prudnikova V. Fedoseykin*

**Abstract.** *Voltage deviations and asymmetry have the greatest impact on the electric drives of production machines and mechanisms.*

*Voltage asymmetry leads to losses that have an electromagnetic and technological component.*

*Studies on the influence of voltage asymmetry on the technological characteristics of working machines and mechanisms have shown that with voltage asymmetry their*

*productivity decreases. However, there are no studies on the influence of voltage asymmetry on the energy characteristics of milk pumps.*

*The purpose of the study is to establish the influence of voltage asymmetry on the energy characteristics of milk pumps.*

*With voltage asymmetry, constant and variable losses in an asynchronous electric motor change.*

*It is advisable to conduct an energy assessment of the electric drive of a milk pump based on specific electricity consumption.*

*The influence of voltage asymmetry on the energy characteristics of a centrifugal milk pump was studied. The dependence of the specific electricity consumption on the change in the rigidity of the mechanical characteristic of the electric motor, which is due to voltage asymmetry, was obtained. It was established that with voltage asymmetry, slip and power losses increase. As a result, specific electricity losses in milk pumps increase.*

**Key words:** *milk pump, voltage asymmetry, power, pump performance, specific electricity consumption*