

**ВПЛИВ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГИ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ДРОБАРОК**

О. Ю. Синявський, кандидат технічних наук, доцент

В. В. Савченко, кандидат технічних наук, доцент

Н. Д. Пруднікова, кандидат технічних наук, старший викладач

А. М. Онищук, студент магістратури

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: sinyavsky2008@ukr.net

Анотація. Як показують проведені дослідження, найбільший вплив на електроприводи виробничих машин і механізмів мають відхилення та несиметрія напруги. .

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 апруги на енергетичні характеристики робочих машин.

Мета дослідження – встановлення впливу несиметрії напруги на енергетичні характеристики дробарок.

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

Запропоновано проводити енергетичну оцінку електропривода дробарок за питомою витратою електроенергії.

Проведено дослідження впливу несиметрії напруги на енергетичні характеристики дробарок. 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 електроприводі дробарок.

Ключові слова: дробарка, несиметрія напруги, потужність, продуктивність дробарки, питома витрата електроенергії

Актуальність. Нині встановлено, що найбільший вплив на електроприводи виробничих машин і механізмів мають відхилення та несиметрія напруги. У ході обробки даних понад 170 експериментів визначено, що показниками якості електроенергії, які найбільш часто виходять за встановлені межі, є відхилення напруги (68 %) та коефіцієнт несиметрії за нульовою послідовністю (38 %) [1].

Дробарки потребують незмінної кутової швидкості барабана. Проте внаслідок несиметрії напруги змінюється кутова швидкість двигуна, яка в свою чергу обумовлює зміну кутової швидкості дробарки, що призводить до зміни її продуктивності та втрат енергії в електроприводі. Тому дослідження зміни енергетичних характеристик дробарок при несиметрії напруги має теоретичне і практичне значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Несиметрія напруги 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 напруги та втрат енергії в усталених режимах роботи при номінальних параметрах живлячої мережі [5].

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

Проте не проводилися дослідження з впливу несиметрії напруги на енергетичні характеристики робочих машин, зокрема, дробарок.

Мета дослідження – встановлення впливу несиметрії напруги на енергетичні характеристики дробарок.

Матеріали і методи дослідження. Аналіз зміни кутової швидкості електропривода при несиметрії напруги проведений з використанням положень теорії електропривода, які стосуються електромеханічних властивостей асинхронних електродвигунів, приводних характеристик дробарок 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_{∂} – момент двигуна, Н·м; $\beta_{\partial a}$ – жорсткість механічної характеристики електродвигуна при несиметрії напруги, Н·м·с; ω_0 – синхронна кутова швидкість, с⁻¹; ω – задана кутова швидкість, с⁻¹.

У відносних одиницях жорсткість механічної характеристики двигуна:

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

де β_{∂} – 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).

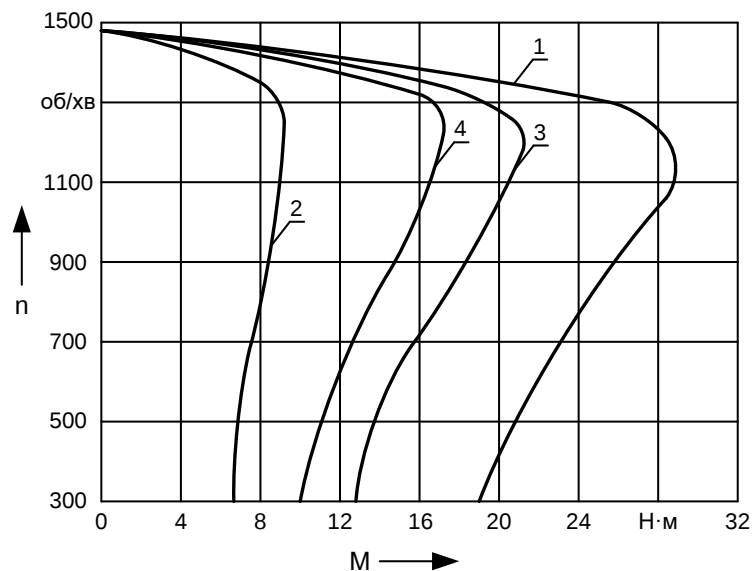


Рис. Механічні характеристики трифазного асинхронного електродвигуна:
1 – природна; 2 – при зниженій напрузі в $\sqrt{3}$ раз; 3 – при коефіцієнті несиметрії напруги 0,86; 4 – при коефіцієнті несиметрії напруги 0,8

Механічна характеристика дробарок має вентиляторний вигляд [8]:

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

де M_c – момент статичних опорів дробарки, Н·м, при заданій кутовій швидкості; M_0 – початковий момент, Н·м; $M_{сн}$ – момент статичних опорів, Н·м, при номінальній кутовій швидкості; ω і ω_n – задане і номінальне значення кутової швидкості, с⁻¹.

Тоді в усталеному режимі роботи

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

або

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

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

Питома витрата електроенергії дробарки, кВт·год/м³, визначається за формулою:

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

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

При несиметрії напруги змінюються постійні і змінні втрати потужності в електродвигуні дробарки.

Змінні втрати потужності асинхронного електродвигуна визначаються за формулою [8]:

$$\Delta P_v = \Delta P_{v2} + \Delta P_{v1} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) M_o \omega_o s, \quad (7)$$

де ΔP_{v2} , ΔP_{v1} – змінні втрати потужності в колах ротора і статора, Вт; R_1 – активний опір обмотки ротора, Ом; R_2' – опір обмотки ротора, зведений до обмотки статора, Ом; s – ковзання двигуна.

Якщо знехтувати початковим моментом дробарки і враховуючи, що

$$M_{сн} = K_z M_{oH}, \quad (8)$$

де K_z – коефіцієнт завантаження двигуна,

то вираз (5) можна записати так:

$$\beta_o \beta_{oa*} (\omega_0 - \omega) = M_{сн} \omega_*^2 = K_z \beta_o (\omega_0 - \omega_n) \omega_*^2, \quad (9)$$

де ω_n – номінальна кутова швидкість двигуна, с⁻¹.

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

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

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:

$$\Delta P_v = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \beta_0 \beta_{a^*} \omega_0^2 s^2 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \frac{\beta_0 \omega_0^2 K_3^2 s_n^2 \omega_*^4}{\beta_{\partial a^*}}, \quad (11)$$

або

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

де ΔP_{vh} – змінні втрати потужності при номінальній симетричній напрузі.

У відносних одиницях вираз (6) запишеться у вигляді:

$$q_* = \frac{P_2 + \Delta P_c + \Delta P_v}{P_{2n} + \Delta P_{cn} + \Delta P_{vn}} \cdot \frac{Q_n}{Q} = \frac{P_2 + \Delta P_{vh} (\alpha + \Delta P_v / \Delta P_{vh})}{P_{2n} + \Delta P_{vn} (\alpha + 1)} \cdot \frac{Q_n}{Q}, \quad (13)$$

де P_{2n} і P_2 – відповідно потужність на валу двигуна при номінальній симетричній напрузі і несиметрії напруги, Вт; ΔP_{cn} і ΔP_c – постійні втрати потужності, Вт; ΔP_{vn} і ΔP_v – змінні втрати потужності, Вт; α – коефіцієнт втрат.

Можна вважати, що в дробарок продуктивність залежить від квадрата кутової швидкості:

$$Q_* = \omega_*^2. \quad (15)$$

Потужність дробарок пропорційна кубу кутової швидкості:

$$P_2 = P_{2n} \omega_*^3. \quad (16)$$

Номінальні змінні втрати потужності можна визначити через ККД електродвигуна:

$$\Delta P_{vh} = \frac{\Delta P}{(\alpha + 1)} = \frac{P_{2n} (1 - \eta_n)}{\eta_n (\alpha + 1)}. \quad (17)$$

Підставивши вирази (15) – (17) у вираз (13), після перетворень отримаємо:

$$q_* = \eta_n \sqrt{Q_*} + \frac{1 - \eta_n}{(\alpha + 1)} \cdot \frac{(\alpha_a + Q_*^2 / \beta_{\partial a^*})}{Q_*}. \quad (18)$$

Якщо знехтувати постійними втратами в електродвигуні, то вираз (18) набуде вигляду:

$$q_* = \eta_n \sqrt{Q_*} + \frac{(1 - \eta_n) Q_*}{\beta_{\partial a^*}}. \quad (19)$$

Із залежностей (18) та (19) випливає, що несиметрія напруги викликає зростання питомої витрати електроенергії в електроприводі дробарки.

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 електроприводах дробарок.

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. Pakkawee Hayamin, 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 pokazateley 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.

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

5. 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.

6. 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.

7. 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.

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

INFLUENCE OF VOLTAGE USYMMETRY ON ENERGY CHARACTERISTICS OF CRUSHERS

O. Sinyavsky, V. Savchenko, N. Prudnikova, M. Onischuk

Abstract. *As the conducted studies show, deviations of voltage asymmetry have the greatest impact on the electric drives of production machines and mechanisms. .*

Studies on the effect of voltage asymmetry on the technological characteristics of working machines and mechanisms have shown that their productivity decreases with voltage asymmetry. However, there are no studies on the influence of spring asymmetry on the energy characteristics of working machines.

The purpose of the research is to determine the influence of voltage asymmetry on the energy characteristics of crushers.

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

It is proposed to carry out an energy assessment of the electric drive of crushers based on the specific consumption of electricity.

The influence of voltage asymmetry on the energy characteristics of crushers was studied. The dependence of the specific power consumption on the change in stiffness of the mechanical characteristics of the electric motor, which is caused by voltage asymmetry, is obtained. It was established that stiffness and power losses increase with voltage asymmetry. As a result, specific losses of electricity in the crushers electric drive increase.

Key words: *crusher, voltage asymmetry, power, crusher productivity, specific power consumption*