

ВПЛИВ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГИ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДРОБАРОК

О. Ю. Синявський, кандидат технічних наук, доцент

В. В. Савченко, кандидат технічних наук, доцент

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.

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 кутова швидкість двигуна, що призводить до зниження їх продуктивності. Проте відсутні дослідження з впливу несиметрії напруги на енергетичні характеристики дробарок.

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 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 дробарках.

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 встановлено, що показниками якості електроенергії, які найбільш часто виходять за встановлені межі, є відхилення напруги (68 %) та коефіцієнт несиметрії за нульовою послідовністю (38 %) [1].

Внаслідок несиметрії напруги змінюються енергетичні характеристик робочих машин, оскільки зростають втрати в двигуні та змінюється продуктивність робочих машин.

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].

Несиметрія напруги викликає зміну кутової швидкості двигуна, яка, в свою чергу, обумовлює зміну технологічних характеристик робочих машин.

У результаті проведених проф. І.І. Ревенком експериментальних досліджень встановлено, що швидкість молотків є найсуттєвішим фактором подрібнення у молотковій дробарці [7]. Підвищення кутової швидкості дробильного ротора підвищує інтенсивність подрібнення внаслідок збільшення швидкості деформування і руйнування частинок перероблюваного матеріалу, які зі зростанням деформації поведуть себе як більш крихкі тіла. Однак практичне застосування підвищення інтенсивності подрібнення за рахунок збільшення швидкості дробильного ротора обмежується пропускною здатністю встановлених решет.

Тому у дії кутової швидкості дробильного ротора на процес подрібнення можна виділити три характерні періоди [7]. У початковий період зростання швидкості обумовлює підвищення подрібнення і зростання продуктивності. У найвигідніший для робочого процесу період, який відповідає зміні швидкості у межах від мінімального значення енергоємності до моменту максимальної продуктивності дробарки, дробарка працює з високою продуктивністю, забезпечуючи добру якість подрібнення. Але на пропускну спроможність решет

починає впливати швидкість руху шару перероблюваного матеріалу поверхнею дробильної камери, що впливає на продуктивність і викликає зростання витрати енергії на подрібнення матеріалу. У третій, критичний період затрати енергії на подальше підвищення швидкості не призводять до збільшення продуктивності і достатнього зростання ступеня подрібнення, а викликають надлишкове перетирання продукту.

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 вентиляторів 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 [8]:

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

де M_{δ} – момент двигуна, Н·м; $\beta_{\delta a}$ – 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:

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

де β_{δ} – 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.

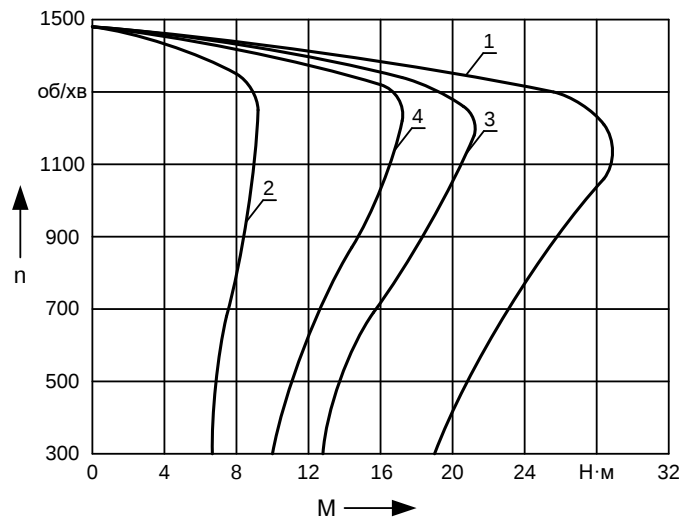


Рис. Механічні характеристики трифазного асинхронного електродвигуна:
1 – природна; 2 – при зниженій напрузі в $\sqrt{3}$ раз; 3 – при коефіцієнті несиметрії напруги 0,86; 4 – при коефіцієнті несиметрії напруги 0,8

Механічна характеристика дробарок має вигляд [8]:

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

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, $\text{кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$, 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]:

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

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.

У вентиляторів початковий момент невеликий, тому їм можна знехтувати. Оскільки

$$M_{сн} = K_3 M_{\phi n}, \quad (8)$$

де K_3 – коефіцієнт завантаження двигуна,

то вираз (5) можна записати так:

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

де ω_n – номінальна кутова швидкість двигуна, с^{-1} .

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

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

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

Тоді змінні втрати потужності можна записати у вигляді:

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

або

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

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

У відносних одиницях вираз (6) запишеться у вигляді:

$$q_* = \frac{P_2 + \Delta P_c + \Delta P_v}{P_{2H} + \Delta P_{cH} + \Delta P_{vH}} \cdot \frac{Q_H}{Q} = \frac{P_2 + \Delta P_{vH}(\alpha + \Delta P_v / \Delta P_{vH})}{P_{2H} + \Delta P_{vH}(\alpha + 1)} \cdot \frac{Q_H}{Q}, \quad (13)$$

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

У дробарки продуктивність

$$Q = Q_H \omega_*^a, \quad (14)$$

де a – коефіцієнт, отриманий при апроксимації технологічної характеристики дробарки.

Тоді

$$\omega = \sqrt[a]{Q_*}. \quad (15)$$

Потужність дробарки приблизно пропорційна кубу кутової швидкості:

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

Номінальні змінні втрати потужності можна визначити через ККД електродвигуна:

$$\Delta P_{vH} = \frac{\Delta P}{(\alpha + 1)} = \frac{P_{2H}(1 - \eta_H)}{\eta_H(\alpha + 1)}. \quad (17)$$

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

$$q_* = \eta_H^a \sqrt[a]{Q_*^{3-a}} + \frac{1 - \eta_H}{(\alpha + 1)} \cdot \left(\frac{\alpha}{\beta_{\partial a^*}} + \frac{\sqrt[a]{Q_*^{4-a}}}{\beta_{\partial a^*}} \right). \quad (18)$$

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

$$q_* = \eta_H^a \sqrt[a]{Q_*^{3-a}} + \frac{(1 - \eta_H) \sqrt[a]{Q_*^{4-a}}}{\beta_{\partial a^*}}. \quad (19)$$

Якщо $a \approx 2$, то вираз (19) запишеться так:

$$q_* = \eta_H \sqrt{Q_*} + \frac{(1 - \eta_H) Q_*}{\beta_{\partial a^*}}. \quad (20)$$

Із залежностей (18) – (20) випливає, що несиметрія напруги викликає зростання питомої витрати електроенергії в дробарках.

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 дробарках.

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. Ревенко И.И. Исследование влияния основных параметров молотковой дробилки на процесс измельчения стебельчатых материалов: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 410 «механизация сельскохозяйственного производства». К.: 1968. 17 с.
8. 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, Chaiyapon, 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., Zalizny, R. (2021). Influence of electricity quality on technological characteristics of agricultural machines. Przegląd Elektrotechniczny, 97(8), 84–87.

8. Revenko, I. I. (1968). Issledovaniye vliyaniya osnovnykh parametrov molotkovoy drobilki na protsess izmel'cheniya stebel'chatykh materialov [Study of the influence of the main parameters of a hammer crusher on the process of grinding stalk materials]: avtoref. dis. na soiskaniye uchenoy stepeni kand. tekhn. nauk: spets. 410 «mekhanizatsiya sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva». Kyiv, 17.

9. 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 ASYMMETRY ON THE ENERGY CHARACTERISTICS OF CRUSHERS

O. Sinyavsky, V. Savchenko

Abstract. *As the conducted studies show, deviations and voltage 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 effect of voltage asymmetry on the technological characteristics of working machines and mechanisms have shown that with voltage asymmetry, the angular speed of the motor decreases, which will lead to a decrease in their productivity. However, there are no studies on the influence of voltage asymmetry on the energy characteristics of crushers.

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 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 due to voltage asymmetry, is obtained. It was established that slippage and power losses increase with voltage asymmetry. As a result, the specific consumption of electricity in crushers increases.

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