

## **ВПЛИВ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГИ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШНЕКОВИХ ТРАНСПОРТЕРІВ**

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

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

*В.В. Ликтей, асистент*

*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.

Вплив несиметрії напруги на технологічні характеристики робочих машин і механізмів проявляється у зменшенні їх продуктивності. Проте відсутні дослідження з впливу несиметрії напруги на енергетичні характеристики робочих машин.

Мета дослідження – встановлення впливу несиметрії напруги на енергетичні характеристики шнекових транспортерів.

Несиметрія напруги призводить до зміни постійних та змінних втрат в асинхронному електродвигуні.

Запропоновано проводити енергетичну оцінку шнекових транспортерів за питомою витратою електроенергії.

Проведено дослідження впливу несиметрії напруги на енергетичні характеристики шнекових транспортерів. 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 в асинхронному електродвигуні. Внаслідок цього зростають питомі втрати електроенергії в шнекових транспортерах.

**Ключові слова:** *шнековий транспортер, несиметрія напруги, потужність, продуктивність шнекового транспортера, питома витрата електроенергії*

**Актуальність.** Відхилення та несиметрія напруги мають найбільший вплив на електроприводи виробничих машин і механізмів. При обробці 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].

Несиметрія напруги 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 напруги на продуктивність технологічних установок та собівартість продукції, що випускається [2].

Внаслідок несиметрії напруги змінюються енергетичні характеристик робочих машин.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Несиметрія напруги призводить до зменшення моменту асинхронного двигуна та зростання втрат енергії [3]. Струм зворотної послідовності спричиняє додаткове нагрівання ротора і статора, що призводить до швидкого старіння ізоляції і зменшення потужності двигуна [4, 5].

Нині отримані аналітичні залежності моменту асинхронного електродвигуна від несиметрії напруги та втрат енергії в усталених режимах роботи при номінальних параметрах живлячої мережі [6].

Проводилися дослідження із впливу несиметрії напруги на технологічні характеристики робочих машин і механізмів. Встановлено, що несиметрія напруги призводить до зменшення їх продуктивності [7].

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

**Мета дослідження** – встановлення впливу несиметрії напруги на енергетичні характеристики шнекових транспортерів.

**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 шнекових транспортерів 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  $M_{\delta}$  – момент двигуна, Н·м;  $\beta_{\delta a}$  – 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:

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

де  $\beta_{\delta}$  – 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 шнекових транспортерів має вигляд [8]:

$$M_c = M_0 + (M_{сн} - M_0) \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^{-1}, \quad (3)$$

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

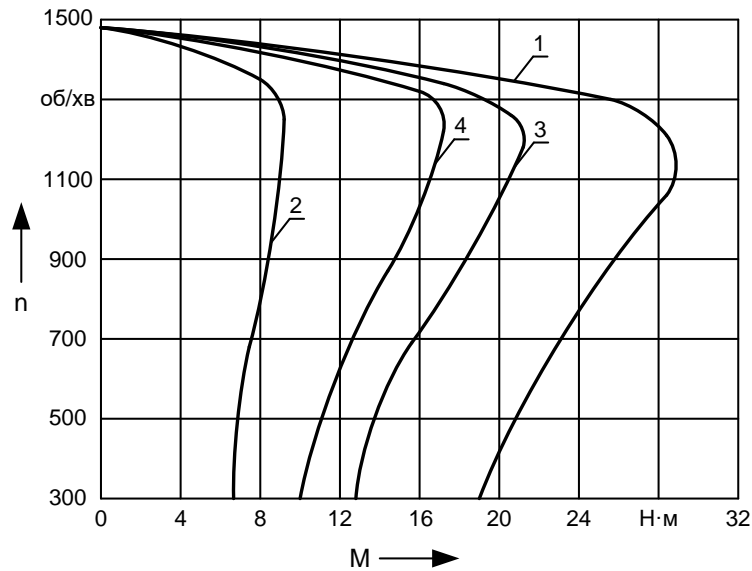
Тоді в усталеному режимі роботи

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

або

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

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



**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

Питома витрата електроенергії шнекового транспортера, кВт·год/м<sup>3</sup>, яка 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 вентилятора.

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

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

де  $\Delta P_{v2}$ ,  $\Delta P_{v1}$  – 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 шнекового транспортера початковим моментом можна знехтувати. Оскільки

$$M_{сн} = K_3 M_{дн}, \quad (8)$$

де  $K_3$  – коефіцієнт завантаження двигуна,

то вираз (5) можна записати так:

$$\beta_{\partial}\beta_{\partial\alpha^*}(\omega_0 - \omega) = M_{сн} / \omega_* = K_3\beta_{\partial}(\omega_0 - \omega_n) / \omega_*, \quad (9)$$

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

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

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

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

Тоді змінні втрати потужності можна записати у вигляді:

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

або

$$\Delta P_v = \Delta P_{vн} / \beta_{\partial\alpha^*} \omega_*, \quad (12)$$

де  $\Delta P_{vн}$  – змінні втрати потужності при номінальній симетричній напрузі.

У відносних одиницях вираз (6) запишеться у вигляді:

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

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

Продуктивність шнекового транспортера можна наближено вважати прямо пропорційною квадрату кутової швидкості

$$Q = Q_n \omega_*^2, \quad (14)$$

а потужність залишається незмінною.

Номінальні змінні втрати потужності можна визначити через ККД електродвигуна:

$$\Delta P_{vн} = \frac{\Delta P}{(\alpha + 1)} = \frac{P_{2н}(1 - \eta_n)}{\eta_n(\alpha + 1)}. \quad (15)$$

Підставивши вирази (14) – (15) у вираз (13), після перетворень отримаємо:

$$q_* = \frac{\eta_n}{Q_*} + \frac{1-\eta_n}{(\alpha+1)} \cdot \frac{(\alpha_a + 1/\beta_{\alpha a^*} \sqrt{Q_*})}{Q_*}. \quad (16)$$

Якщо знехтувати постійними втратами в електродвигуні, то вираз (16) набуде вигляду:

$$q_* = \frac{\eta_n}{Q_*} + \frac{1-\eta_n}{\beta_{\alpha a^*} Q_*^{\frac{3}{2}}}. \quad (17)$$

Із залежностей (16) та (17) випливає, що несиметрія напруги викликає зростання питомої витрати електроенергії в шнекових транспортерах.

**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 шнекових транспортерах.

#### 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. Аванесов В. М., Садков Е. В. Анализ структуры потерь электрической энергии в электроустановках при отклонении напряжения от оптимального значения. Энергобезопасность в документах и фактах. 2005. №4. С. 19–21.
3. Адамова С. Аналіз впливу якості електроенергії на роботу струмоприймачів. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2018. Вип. 8, т. 2. С. 1-10.
4. Pakkaweey 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
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 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. Avanesov, V. M., Sadkov, E. V. (2005). Analiz struktury poter' elektricheskoy energii v elektroustanovkakh pri otklonenii napryazheniya ot optimal'nogo znacheniya [Analysis of the structure of electrical energy losses in electrical installations when the voltage deviates from the optimal value]. Energobezopasnost' v dokumentakh i faktakh, 4, 19–21.
  3. 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 derzhavnogo ahrotekhnolohichnoho universytetu, 8 (2), 1-10.
  4. Pakkawe, 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 ustalenomu 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.
- 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 SCREW CONVEYORS

*O. Sinyavsky, V. Savchenko, V. Liktey*

**Abstract.** *Deviation and asymmetry of the voltage have the greatest impact on electric drives of working machines and mechanisms.*

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

*The effect of voltage asymmetry on the technological characteristics of working machines and mechanisms is manifested in a decrease in their productivity. However, there are no studies on the influence of voltage asymmetry on the energy characteristics of working machines.*

*The purpose of the research is to establish the influence of voltage asymmetry on the energy characteristics of screw conveyors.*

*Voltage asymmetry leads to a change in constant and variable losses in an asynchronous electric motor.*

*It is proposed to carry out an energy assessment of screw conveyors based on the specific consumption of electricity.*

*The influence of voltage asymmetry on the energy characteristics of screw conveyors 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 slippage and power losses in an asynchronous electric motor increase with voltage asymmetry. As a result, specific losses of electricity in screw conveyors increase.*

**Key words:** *screw conveyor, voltage asymmetry, power, screw conveyor performance, specific power consumption*