

ВПЛИВ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГИ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТКИ ВАКУУМ-НАСОСІВ

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. 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 робочих машин.

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

При несиметрії напруги змінюються постійні і змінні втрати в асинхронному електродвигуні, які спричинюють зростання енергетичних втрат в асинхронному електроприводі.

Енергетичну оцінку електропривода вакуум-насоса проводили за питомою витратою електроенергії.

Проведено дослідження впливу несиметрії напруги на енергетичні характеристики вакуум-насосів. 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 зростає питома втрата електроенергії в електроприводі вакуум-насосів.

Ключові слова: вакуум-насос, несиметрія напруги, потужність, продуктивність вакуум-насоса, питома витрата електроенергії

Актуальність. Найбільший вплив на електроприводи виробничих машин і механізмів мають відхилення та несиметрія напруги. 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.

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 [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 електропривода вакуум-насосів.

Мета дослідження – встановлення впливу несиметрії напруги на енергетичні характеристики електропривода вакуум-насосів.

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 вакуум-насосів та застосуванням математичного моделювання.

При експериментальних дослідженнях із впливу несиметрії напруги на механічну характеристику асинхронного електродвигуна знімали залежності частоти обертання двигуна від 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 асинхронного 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 при несиметрії напруги:

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

де β_{∂} – жорсткість механічної характеристики електродвигуна при номінальній симетричній напрузі, Н·м·с.

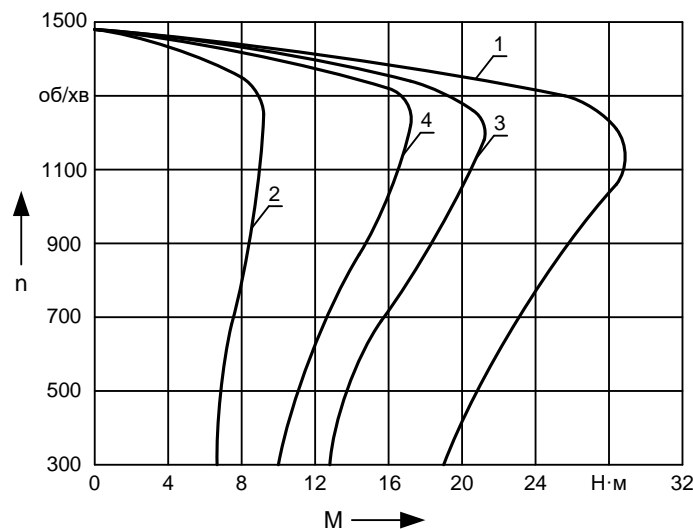


Рис. Механічні характеристики трифазного асинхронного електродвигуна:

1 – природна; 2 – при зниженій напрузі в $\sqrt{3}$ раз; 3 – при коефіцієнті несиметрії напруги 0,86; 4 – при коефіцієнті несиметрії напруги 0,8

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 вакуум-насосів має мало виражений вентиляторний вигляд, тому можна вважати, що

$$M_c = M_{cn}, \quad (3)$$

де M_c – момент статичних опорів вакуум-насоса, Н·м, при заданій кутовій швидкості; M_{cn} – момент статичних опорів, Н·м, при номінальній кутовій швидкості [8].

Тоді в усталеному режимі роботи

$$\beta_d \beta_{da*} (\omega_0 - \omega) = M_{cn}, \quad (4)$$

звідки кутова швидкість

$$\omega = \omega_0 - \frac{M_{cn}}{\beta_d \beta_{da*}}. \quad (5)$$

Із формули (5) випливає, що несиметрія напруги призводить до зменшення кутової швидкості вакуум-насоса.

Оскільки продуктивність вакуум-насоса прямо пропорційна кутовій швидкості, то

$$Q = Q_n \omega_*, \quad (7)$$

де Q – продуктивність вакуум-насоса, м³/с; $\omega_* = \omega/\omega_n$ – кутова швидкість у відносних одиницях, ω_n – номінальна кутова швидкість двигуна, с⁻¹.

Таким чином, несиметрія напруги призводить до зменшення кутової швидкості і продуктивності вакуум-насосів.

Питома витрата електроенергії вакуум-насоса, кВт·год/м³, визначається за формулою:

$$q = P_1 / Q, \quad (8)$$

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

При відхиленні напруги змінюються постійні і змінні втрати потужності в електроприводі вакуум-насоса.

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

$$\Delta P_v = \Delta P_{v2} + \Delta P_{v1} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) M_\delta \omega_0 s, \quad (9)$$

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.

Оскільки

$$M_{сн} = K_3 M_{\delta n}, \quad (10)$$

де K_3 – коефіцієнт завантаження двигуна,

то вираз (4) можна записати так:

$$\beta_\delta \beta_{\delta a^*} (\omega_0 - \omega) = M_{сн} = K_3 \beta_\delta (\omega_0 - \omega_n), \quad (11)$$

З виразу (11) отримаємо залежність ковзання двигуна від напруги:

$$s = \frac{K_3 s_n}{\beta_{\delta a^*}}. \quad (12)$$

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:

$$\Delta P_v = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \beta_\delta \beta_{\delta a^*} \omega_0^2 s^2 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \frac{\beta_\delta \omega_0^2 K_3^2 s_n^2}{\beta_{\delta a^*}}, \quad (13)$$

або

$$\Delta P_v = \Delta P_{vн} / \beta_{\delta a^*}, \quad (14)$$

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

У відносних одиницях вираз (8) запишеться у вигляді:

$$q_* = \frac{P_2 + \Delta P_c + \Delta P_v}{P_{2н} + \Delta P_{сн} + \Delta P_{вн}} \cdot \frac{Q_n}{Q} = \frac{P_2 + \Delta P_{вн} (\alpha + \Delta P_v / \Delta P_{вн})}{P_{2н} + \Delta P_{вн} (\alpha + 1)} \cdot \frac{Q_n}{Q}, \quad (15)$$

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

Можна вважати, що у вакуум-насоса потужність прямо пропорційні кутовій швидкості

$$P_2 = P_{2n} \cdot \omega_* \quad (16)$$

Номінальні змінні втрати потужності можна визначити через ККД електродвигуна:

$$\Delta P_{\text{вн}} = \frac{\Delta P_{2n}}{(\alpha + 1)} = \frac{P_{2n}(1 - \eta_n)}{\eta_n(\alpha + 1)} \quad (17)$$

Підставивши вирази (16) – (17) у вираз (15), після перетворень отримаємо:

$$q_* = \eta_n + \frac{1 - \eta_n}{(\alpha + 1)} \cdot \frac{(\alpha_a + 1 / \beta_{\text{да}^*})}{Q_*} \quad (18)$$

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

$$q_* = \eta_n + \frac{1 - \eta_n}{\beta_{\text{да}^*} Q_*} \quad (19)$$

Із залежностей (18) та (19) випливає, що несиметрія напруги викликає зростання питомої витрати електроенергії в електроприводі вакуум-насоса, оскільки зменшується жорсткість механічної характеристики електродвигуна.

Висновки і перспективи. При несиметрії напруги зменшується жорсткість механічної характеристики електродвигуна. При цьому зростає ковзання та втрати потужності. Внаслідок цього зменшується продуктивність та зростає питома втрата електроенергії в вакуум-насосах.

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. 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.

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.

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

INFLUENCE OF VOLTAGE UNSYMMETRY ON ENERGY CHARACTERISTICS OF VACUUM PUMP

O. Sinyavsky, V. Savchenko

Abstract. *Deviation and asymmetry of the voltage have the greatest impact on 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 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 power characteristics of vacuum pumps.

With voltage asymmetry, constant and variable losses in an asynchronous electric motor change, which cause an increase in energy losses in an asynchronous electric drive.

The energy assessment of the electric drive of the vacuum pump was carried out according to the specific consumption of electricity.

The influence of voltage asymmetry on the power characteristics of vacuum pumps 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 loss increase with voltage asymmetry. As a result, the specific loss of electricity in the electric drive of vacuum pumps increases.

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