

ВПЛИВ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГИ НА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗМІШУВАЧІВ КОРМІВ

О. Ю. Синявський, кандидат технічних наук, доцент

В. В. Савченко, кандидат технічних наук, доцент

О. С. Корба, студент магістратури

І. С. Буцик, студент магістратури

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: sinyavsky2008@ukr.net

Анотація. *Проведені дослідження показали, що відхилення та несиметрія наруги мають найбільший вплив на електроприводи виробничих машин і механізмів.*

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 змішувачів кормів.

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

Енергетичну оцінку електропривода змішувачів кормів проводили за питомою витратою електроенергії.

Проведено дослідження впливу несиметрії напруги на енергетичні характеристики змішувачів кормів. 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 витрата електроенергії в електроприводах змішувачів кормів.

Ключові слова: *змішувач кормів, несиметрія напруги, потужність, продуктивність змішувача, питома витрата електроенергії*

Актуальність. *Найбільший вплив на електроприводи виробничих машин і механізмів мають відхилення та несиметрія наруги. 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 %).*

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.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Несиметрія напруги призводить до зменшення моменту асинхронного двигуна та зростання втрат енергії [1]. Струм зворотної послідовності спричиняє додаткове нагрівання ротора і статора, що призводить до швидкого старіння ізоляції і зменшення потужності двигуна [2, 3].

Переміщення компонентів кормів всередині змішувальної місткості у більшості типів змішувачів пов'язане з використанням сил тертя між робочим органом і змішуваним матеріалом. Продуктивність таких установок прямо пропорційна швидкості руху робочого органу до того моменту, коли сили тертя робочого органу не зрівняються з силами тертя між компонентами корму. Після цього продуктивність починає зменшуватися, а енергоємність процесу зростає. Тому залежно від в'язкості перемішуваної маси рекомендована певна швидкість робочого органу [4].

Момент статичних опорів при запуску змішувачів без навантаження зумовлюється силами тертя в підшипниках та передачах (рис., крива 1) [4].

У більшості випадків змішувачі, особливо порційні, запускаються під навантаженням. Наприклад, згідно з технологічною картою, мішалки змішувача С-12 треба пускати після завантаження корпусу на $1/3$ його місткості. У цьому випадку момент статичних опорів зменшується із зростанням кутової швидкості (крива 2). Технологією приготування вологих сумішей із запарюваннях у змішувачах типу СКО-Ф передбачається запуск мішалки після заливання в корпус визначеної кількості води. У такому випадку механічна характеристика (крива 3) має вентиляторний характер. Таким чином, вигляд механічної характеристики змішувачів при їх нормальному запуску залежить від організації технологічного процесу машини. Момент статичних опорів шнекових змішувачів та пастовиготовлювачів не залежить від частоти обертання.

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

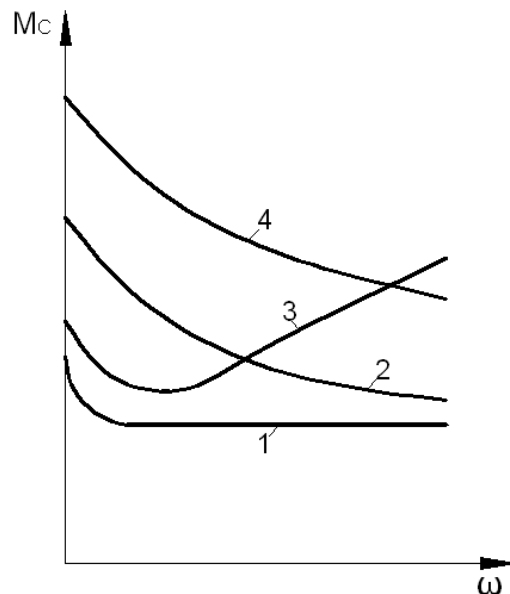


Рисунок. Загальний вигляд механічних характеристик змішувачів кормів:
1 – при пуску вхолосту; 2 – при пуску змішувача С-12; 3 – при пуску змішувача СКО-Ф; 4 – при пуску повністю завантаженого змішувача

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 змішувачів кормів.

Мета дослідження – встановлення впливу несиметрії напруги на енергетичні характеристики електропривода змішувачів кормів.

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 змішувачів кормів та застосуванням математичного моделювання.

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.

Як показали проведені експериментальні дослідження, при несиметрії напруги зменшується жорсткість механічної характеристики електродвигуна.

Якщо момент статичних опорів змішувача не залежить від кутової швидкості, то механічна характеристика

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

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

Тоді в усталеному режимі роботи

$$\beta_{\partial} \beta_{\partial a^*} (\omega_0 - \omega) = M_{cn}, \quad (4)$$

звідки кутова швидкість

$$\omega = \omega_0 - \frac{M_{cn}}{\beta_{\partial} \beta_{\partial a^*}}. \quad (5)$$

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

При зменшенні кутової швидкості продуктивність змішувача зменшується прямо пропорційно кутовій швидкості, тому

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

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

Таким чином, несиметрія напруги призводить до зменшення кутової швидкості і продуктивності змішувачів.

Питома витрата електроенергії змішувача кормів, 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 змішувача кормів.

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 несиметрії 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:

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

або

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

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

У відносних одиницях вираз (8) запишеться у вигляді:

$$q_* = \frac{P_2 + \Delta P_c + \Delta P_v}{P_{2h} + \Delta P_{ch} + \Delta P_{vh}} \cdot \frac{Q_h}{Q} = \frac{P_2 + \Delta P_{vh}(\alpha + \Delta P_v / \Delta P_{vh})}{P_{2h} + \Delta P_{vh}(\alpha + 1)} \cdot \frac{Q_h}{Q}, \quad (15)$$

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.

Можна вважати, що у змішувача кормів при незмінному моменті статичних опорів потужність прямо пропорційні кутовій швидкості

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

Номінальні змінні втрати потужності можна визначити через ККД електродвигуна:

$$\Delta P_{vh} = \frac{\Delta P_{2h}}{(\alpha + 1)} = \frac{P_{2h}(1 - \eta_h)}{\eta_h(\alpha + 1)}. \quad (17)$$

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

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

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

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

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

Якщо момент статичних опорів змішувача прямо пропорційний квадрату кутової швидкості (вентиляторна механічна характеристика), тоді

$$\beta_{\partial} \beta_{\partial a^*} (\omega_0 - \omega) = M_{ch} \omega_*^2 = K_3 \beta_{\partial} (\omega_0 - \omega_h) \omega_*^2. \quad (20)$$

З виразу (20) отримаємо залежність ковзання двигуна від несиметрії напруги:

$$s = \frac{K_3 s_h \omega_*^2}{\beta_{\partial a^*}}. \quad (21)$$

Тоді змінні втрати потужності можна записати у вигляді:

$$\Delta P_v = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \beta_\partial \beta_{a^* \partial} \omega_0^2 s^2 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \frac{\beta_\partial \omega_0^2 K_3^2 s_n^2 \omega_*^4}{\beta_{\partial a^*}}, \quad (22)$$

або

$$\Delta P_v = \Delta P_{vH} \omega_*^4 / \beta_{\partial a^*}. \quad (23)$$

Після перетворень отримаємо:

$$q_* = \eta_n Q_*^2 + \frac{1 - \eta_n}{(\alpha_n + 1)} \cdot \frac{(\alpha_a + Q_*^4 / \beta_{\partial a^*})}{Q_*}. \quad (24)$$

Якщо знехтувати постійними втратами в електродвигуні, то вираз (24) набуде вигляду:

$$q_* = \eta_n Q_*^2 + \frac{(1 - \eta_n) Q_*^3}{\beta_{\partial a^*}}. \quad (25)$$

Якщо момент статичних опорів змішувача кормів гіперболічно залежить від кутової швидкості, тоді в усталеному режимі роботи

$$\beta_\partial \beta_{\partial a^*} (\omega_0 - \omega) = M_0 + (M_{сн} - M_0) \left(\frac{\omega_n}{\omega} \right), \quad (26)$$

або

$$\beta_\partial \beta_{\partial a^*} (\omega_0 - \omega_n \omega_*) = M_0 + (M_{сн} - M_0) / \omega. \quad (27)$$

У змішувача кормів початковим моментом можна знехтувати. Тоді вираз (27) можна записати так:

$$\beta_\partial \beta_{\partial a^*} (\omega_0 - \omega) = M_{сн} / \omega_* = K_3 \beta_\partial (\omega_0 - \omega_n) / \omega_*. \quad (28)$$

З виразу (28) отримаємо залежність ковзання двигуна від несиметрії напруги:

$$s = \frac{K_3 s_n}{\beta_{\partial a^*} \omega_*}. \quad (29)$$

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:

$$\Delta P_v = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \beta_\partial \beta_{a^* \partial} \omega_0^2 s^2 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2'}\right) \frac{\beta_\partial \omega_0^2 K_3^2 s_n^2}{\beta_{\partial a^*} \omega_*}, \quad (30)$$

або

$$\Delta P_v = \Delta P_{vh} / \beta_{\alpha^*} \omega_*, \quad (31)$$

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

Потужність змішувача кормів у цьому випадку залишається незмінною.

Підставивши вирази (17) та (31) у вираз (15), після перетворень отримаємо:

$$q_* = \frac{\eta_n}{Q_*} + \frac{1-\eta_n}{(\alpha+1)} \cdot \frac{(\alpha_n+1/\beta_{\alpha^*}Q_*)}{Q_*}. \quad (32)$$

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

$$q_* = \frac{\eta_n}{Q_*} + \frac{1-\eta_n}{\beta_{\alpha^*}Q_*^2}. \quad (33)$$

Із залежностей (32) та (33) випливає, що несиметрія напруги викликає зростання питомої витрати електроенергії в змішувачах кормів.

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 змішувачах кормів.

Список використаних джерел

1. Адамова С. Аналіз впливу якості електроенергії на роботу струмоприймачів. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2018. Вип. 8, т. 2. С. 1-10.
2. 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.
3. 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.
4. Синявський О. Ю., Савченко В. В., Лавріненко Ю. М., Войтюк Д. Г., Бунько В. Я., Рамш В. Ю. Електропривод виробничих машин і механізмів. К.:ФОРМ Ямчинський О.В., 2020. 444 с.
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. 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.

2. 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.

3. 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.

4. Sinyavsky, O. Yu., Savchenko, V. V., Lavrinenko, Yu. M., Voitiuk, D. H., Bunko, V. Ya., Ramsh, V.Yu. (2020). Elektropyvod vyrobnychkh mashyn i mekhanizmiv [Electric drive of production machines and mechanisms]. Kyiv: FOP Yamchynskiy O.V., 444.

5. Sinyavsky A. Yu., Horobets V. H. (2010). Vplyv yakosti elektroenerhii na enerhetyku elektropyvodiv 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.

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). Elektropyvod i avtomatyzatsiia [Electric drive and automation]. Kyiv: FOP Yamchynskiy O. V., 619.

INFLUENCE OF VOLTAGE ASYMMETRY ON THE ENERGY CHARACTERISTICS OF FEED MIXERS

O. Sinyavsky, V. Savchenko, O. Korba, I. Butsyk

Abstract. *The conducted studies have shown that deviations and asymmetry of the output have the greatest impact on the electric drives of production machines and mechanisms.*

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 working machines.

The purpose of the study is to establish the influence of voltage asymmetry on the energy characteristics of feed mixers.

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 feed mixers was carried out by specific electricity consumption.

A study of the influence of voltage asymmetry on the energy characteristics of feed mixers was conducted. 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 has been established that with voltage asymmetry, slip and power losses increase. As a result, the specific power loss in the electric drives of feed mixers increases.

Key words: *feed mixer, voltage asymmetry, power, mixer performance, specific power consumption*