

УДК 621.327.539

ВПЛИВ ВІДХИЛЕННЯ НАПРУГИ І ЧАСТОТИ СТРУМУ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ

В.В. Савченко, кандидат технічних наук

Проведені дослідження впливу відхилення напруги на кутову швидкість і технологічні характеристики відцентрових насосів. Встановлено залежності подачі, напору, потужності насосів та питомої витрати електроенергії від напруги.

Насос, електропривод, відхилення напруги, подача, напір, потужність насоса, питома витрата електроенергії.

Відхилення напруги від нормованих значень обумовлює збитки для споживачів електричної енергії, які мають електромагнітну і технологічну складову. Електромагнітна складова визначається втратою активної потужності і зміною терміну служби ізоляції електрообладнання. Технологічна складова збитків обумовлена впливом якості електричної енергії на продуктивність технологічних установок та собівартість продукції, що випускається [1].

Нині діапазон зміни напруги в електромережах України складає 15–28 % від номінального, що значно перевищує допустиме значення [5]. Внаслідок відхилення напруги змінюється кутова швидкість двигуна, яка, в свою чергу, обумовлює зміну технологічних і енергетичних характеристик робочих машин.

Мета досліджень – встановити вплив відхилення напруги на технологічні і енергетичні характеристики відцентрових насосів.

Матеріали і методика досліджень. Аналіз зміни кутової швидкості електроприводів насосів та втрат енергії при відхиленні напруги проводився з використанням положень теорії електропривода, які стосуються електромеханічних властивостей асинхронних електродвигунів, характеристик приводу робочих машин і механізмів, енергетики усталених режимів електроприводів, та застосуванням математичного моделювання.

При експериментальних дослідженнях напругу на двигуні насоса змінювали за допомогою автотрансформатора і визначали кутову швидкість, подачу, напір та потужність насоса і розраховували питому витрату електроенергії.

Результати досліджень. При відхиленні напруги механічна характеристика електродвигуна на робочій ділянці описується рівнянням [2]:

$$M_{\omega} = \beta_{\omega} U_*^2 (\omega_0 - \omega), \quad (1)$$

де M_0 – момент двигуна, Н·м; β_δ – жорсткість механічної характеристики електродвигуна, Н·м·с; ω_0 – синхронна кутова швидкість, с⁻¹; ω – задана кутова швидкість, с⁻¹; $U_* = U/U_n$ – напруга у відносних одиницях.

Механічна характеристика відцентрових насосів має вигляд [3,4]:

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

де M_c – момент статичних опорів насоса, 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.

В усталеному режимі роботи

$$\beta_\delta U_*^2 (\omega_0 - \omega) = M_0 + (M_{сн} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2, \quad (3)$$

або

$$\beta_\delta U_*^2 (\omega_0 - \omega_n \omega_*) = M_0 + (M_{сн} - M_0) \omega_*^2, \quad (4)$$

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

Після перетворень отримаємо:

$$U_* = \sqrt{\frac{M_0 + (M_{сн} - M_0) \omega_*^2}{\beta_\delta (\omega_0 - \omega_n \omega_*)}}. \quad (5)$$

Для насосів подача

$$Q_* = \omega_*, \quad (6)$$

напір

$$H_* = \omega_*^2, \quad (7)$$

потужність

$$P_* = \omega_*^3. \quad (8)$$

Тоді закони зміни цих величин при відхиленні напруги запишуться у вигляді:

для подачі насоса

$$U_* = \sqrt{\frac{M_0 + (M_{сн} - M_0) Q_*^2}{\beta_\delta (\omega_0 - \omega_n Q_*)}}, \quad (9)$$

напору

$$U_* = \sqrt{\frac{M_0 + (M_{сн} - M_0) H_*}{\beta_\delta (\omega_0 - \omega_n \sqrt{H_*})}}, \quad (10)$$

потужності

$$U_* = \sqrt{\frac{M_0 + (M_{сн} - M_0)P_*^{2/3}}{\beta_o(\omega_0 - \omega_n \sqrt[3]{P})}}. \quad (11)$$

Результати експериментальних досліджень зміни подачі, напору та потужності відцентрового насоса К8/18 при відхиленні напруги представлені на рис. 1. Як впливає із наведених залежностей, при відхиленні напруги подача, напір та потужність відцентрових насосів змінюються за складними алгоритмами.

Важливою енергетичною характеристикою насоса є питомі витрати електроенергії, кВт·год/м³, які визначаються як:

$$q = P_1 / Q, \quad (12)$$

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

Відхилення напруги викликає зміну постійних втрат, до яких відносять механічні і втрати на перемагнічування та гістерезис, а також змінних втрат.

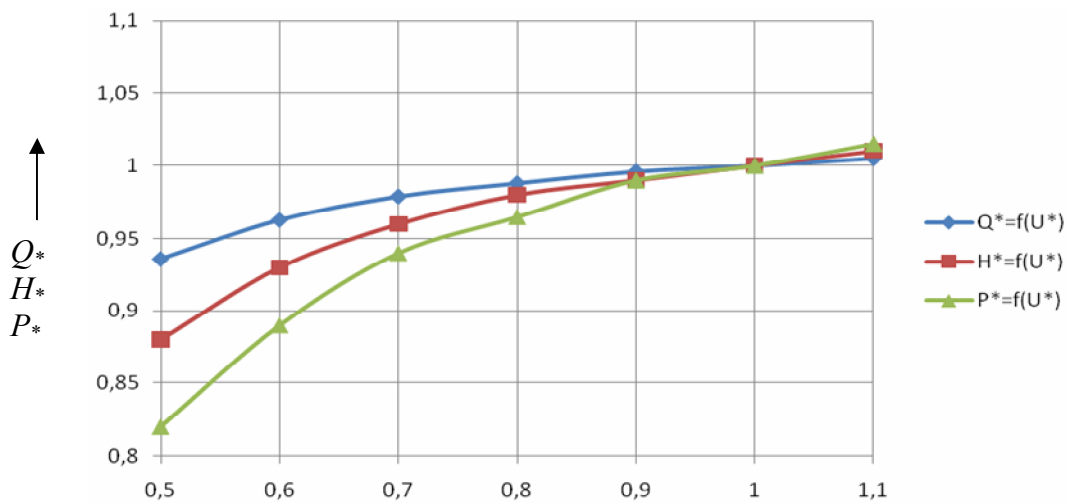


Рис.1. Залежності подачі (Q), напору (H) і потужності (P) насоса К8/18 від напруги у відносних одиницях

Механічні втрати визначаються за формулою [2]:

$$\Delta P_m = \Delta P_{m,n} \omega_*^2, \quad (13)$$

де $\Delta P_{m,n}$ – механічні втрати при номінальній кутовій швидкості.

Втрати в сталі від вихрових струмів і гістерезису при відхиленні напруги визначаються як:

$$\Delta P_{cm} \approx \Delta P_{cm1n} U_*^2 (1 + s^{1,3}) \quad (14)$$

де ΔP_{cm1n} – втрати в сталі статора при номінальній напрузі живлення.

Оскільки електродвигун насоса має жорстку механічну характеристику, то ковзання електродвигуна і діапазон зміни кутової швидкості при відхиленні напруги невеликі, тому механічними втратами і втратами в сталі ротора можна знехтувати і вважати, що постійні втрати

$$\Delta P_c = \Delta P_{cn} U_*^2. \quad (15)$$

Змінні втрати потужності при зміні напруги живлення асинхронного електродвигуна визначаються за формулою [2]:

$$\Delta P_v = \Delta P_{v2} + \Delta P_{v1} = \left(1 + \frac{R_1}{R'_2}\right) M_\delta \omega_0 s, \quad (16)$$

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; M_δ – момент двигуна, Н·м; ω_0 – синхронна кутова швидкість, с⁻¹; s – ковзання двигуна.

У відцентрових насосів початковий момент невеликий, тому їм можна знехтувати. Оскільки

$$M_{cn} = K_3 M_{\delta n}, \quad (17)$$

де K_3 – коефіцієнт завантаження двигуна, то згідно (1)

$$\beta_\delta U_*^2 (\omega_0 - \omega) = M_{cn} \omega_*^2 = K_3 \beta_\delta (\omega_0 - \omega_n) \omega_*^2, \quad (18)$$

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

Тоді

$$s = \frac{K_3 s_n \omega_*^2}{U_*^2}. \quad (19)$$

Вираз (16) з урахуванням (1) і (19) можна записати у вигляді:

$$\Delta P_v = \left(1 + \frac{R_1}{R'_2}\right) \beta_\delta U_*^2 \omega_0^2 s^2 = \left(1 + \frac{R_1}{R'_2}\right) \frac{\beta_\delta \omega_0^2 K_3^2 s_n^2 \omega_*^4}{U_*^4}, \quad (18)$$

або

$$\Delta P_v = \Delta P_{vh} \omega_*^4 / U_*^4, \quad (19)$$

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

У відносних одиницях вираз (12) має вигляд:

$$q_* = \frac{P_2 + \Delta P_c + \Delta P_v}{P_{2h} + \Delta P_{ch} + \Delta P_{vh}} \cdot \frac{Q_h}{Q} = \frac{P_2 + \Delta P_{vh} (\alpha + \Delta P_v / \Delta P_{vh})}{P_{2h} + \Delta P_{vh} (\alpha + 1)} \cdot \frac{Q_h}{Q}, \quad (14)$$

де P_{2h} и P_2 – відповідно потужність на валу двигуна при номінальній і відмінній від номінальної напрузі; ΔP_{ch} і ΔP_c – постійні втрати; ΔP_{vh} і ΔP_v – змінні втрати; α – коефіцієнт втрат.

Розділивши чисельник і знаменник виразу (14) на P_{2h} та враховуючи те, що

$$P_2 / P_{2h} = M_{ch} \omega_*^2 \omega / M_{ch} \omega_h = \omega_*^3, \quad (15)$$

$$\Delta P_{vh} = P_{2h} \frac{1 - \eta_h}{\eta_h} = \Delta P_{vh} (\alpha + 1), \quad (16)$$

де η_h – ККД двигуна при номінальній напрузі, отримаємо

$$q_* = \frac{\omega_*^3 + \frac{1 - \eta_h}{\eta_h} \cdot \frac{(\alpha U_*^2 + \omega_*^4 / U_*^4)}{(\alpha + 1)}}{\omega_* \left(1 + \frac{1 - \eta_h}{\eta_h} \right)} = \eta_h \omega_*^2 + \frac{1 - \eta_h}{(\alpha + 1)} \cdot \frac{(\alpha U_*^2 + \omega_*^4 / U_*^4)}{\omega_*}. \quad (17)$$

Таким чином, зниження напруги викликає зростання питомої витрати електроенергії у відцентрових насосах, а її підвищення – невелике зниження (рис. 2).

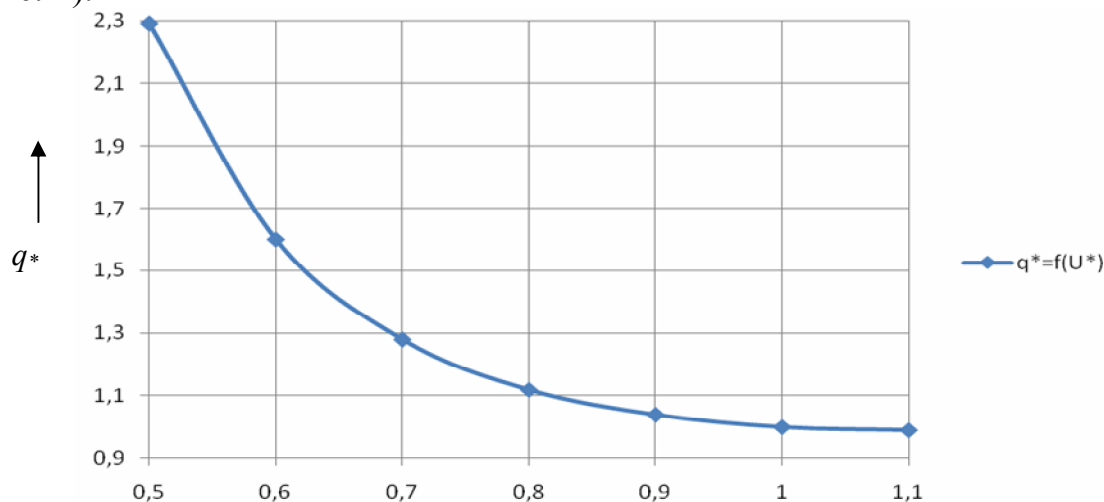


Рис. 2. Залежність питомої витрати електроенергії від напруги для відцентрового насоса К8/18

$U_* \longrightarrow$

Висновки

При відхиленні напруги змінюється кутова швидкість, подача, напір і потужність відцентрового насоса за складним алгоритмом.

У результаті проведених досліджень встановлено, що при зниженні напруги на 20 % подача і напір відцентрового насоса знижується до 2 %, потужність – до 4 %, а питома витрата електроенергії зростає на 12 %.

Список літератури

1. Аванесов В.М. Анализ структуры потерь электрической энергии в электроустановках при отклонении напряжения от оптимального значения / В.М. Аванесов, Е.В. Садков // Энергобезопасность в документах и фактах. – 2005. – №4. – С. 19–21.
2. Електропривод / [Лавріненко Ю.М., Марченко О.С., Савченко П.І. та ін.]; за ред. Ю.М. Лавріненка. – К.: Ліра-К, 2009. – 504 с.
3. Електропривод сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній / [Жулай Є.Л., Зайцев Б.В., Лавріненко Ю.М. та ін.]; за ред. Є.Л. Жулая. – К.: Вища освіта, 2001. – 288 с.
4. Механізація і та автоматизація у тваринництві і птахівництві / [Марченко О.С., Дацішин О.В., Лавріненко Ю.М. та ін.]; за ред. О.С. Марченка. – К.: Урожай, 1995. – 416 с.
5. Перова М.Б. Качество сельского электроснабжения: комплексный подход / Перова М.Б. – Вологда: Вологодский государственный технический университет, 1999. – 72 с.

Проведены исследования влияния отклонения напряжения на угловую скорость и технологические характеристики центробежных насосов. Установлены зависимости подачи, напора, мощности насосов и удельных затрат электроэнергии от напряжения.

Насос, електропривод, відхилення напруги, подача, напір, потужність насоса, удельні витрати електроенергії.

The researches of influence of a voltage deviation and current frequency for angular speed and technical characteristics of centrifugal pumps are carried out. The dependences of productivity, pressure and capacity of pumps and the unit cost of electricity from the voltage are established.

Pump, electric drive, voltage deviation, current frequency, productivity, pressure, capacity of the pump, the unit cost of electricity.