

## ВПЛИВ ЧАСТОТИ СТРУМУ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАСОСІВ

*О.Ю. Синявський, В.В. Савченко, кандидати технічних наук  
С.А. Шворов, доктор технічних наук*

*Проведено дослідження впливу частоти струму на кутову швидкість, технологічні та енергетичні характеристики насосів. Встановлено залежності продуктивності, тиску, потужності насосів та питомої витрати електроенергії від частоти струму.*

***Насос, електропривод, частота струму, продуктивність, тиск, потужність насоса, питома витрата електроенергії.***

Відхилення частоти струму від нормованих значень у сільському господарстві викликає порушення нормального ходу технологічних процесів, випуск неякісної продукції, збільшення захворюваності та загибелі рослин і тварин, скорочення строку служби електрообладнання, зростання втрат електроенергії в елементах системи електроспоживання, виникнення аварійних ситуацій, небезпечних для життя людей [1].

Нині набули значного поширення частотно-регульовані електроприводи. При зміні частоти струму змінюється кутова швидкість двигуна, яка, в свою чергу, обумовлює зміну технологічних та енергетичних характеристик робочих машин [2].

**Мета досліджень** – встановлення впливу відхилення частоти струму на технологічні та енергетичні характеристики насосів.

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

При експериментальних дослідженнях частоту струму змінювали за допомогою перетворювача частоти фірми «Mitsubishi» і визначали кутову швидкість, продуктивність, тиск та потужність насоса та розраховували питому витрату електроенергії.

**Результати досліджень.** При зміні частоти струму двигун працює на робочій ділянці механічної характеристики. При цьому можна вважати, що механічна характеристика двигуна на ній лінійна [2], тобто

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

де  $M_0$  – момент двигуна, Н·м;  $\beta_0$  – жорсткість механічної характеристики електродвигуна, Н·м·с;  $\omega_0$  – синхронна кутова швидкість, с<sup>-1</sup>;  $\omega$  – задана кутова швидкість, с<sup>-1</sup>.

Механічна характеристика насосів описується рівнянням [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 робочої машини при заданій кутовій швидкості, Н·м;  $M_0$  – початковий момент, Н·м;  $M_{сн}$  – момент статичних опорів при номінальній кутовій швидкості, Н·м;  $\omega$  і  $\omega_n$  – задане і номінальне значення кутової швидкості, с<sup>-1</sup>.

При зміні частоти струму механічна характеристика двигуна на робочій ділянці має вигляд:

$$M_0 = \beta_0 \left( \frac{2\pi f}{p} - \omega \right), \quad (3)$$

де  $f$  – частота струму, Гц;  $p$  – число пар полюсів.

В усталеному режимі роботи

$$\beta_0 \left( \frac{2\pi f}{p} - \omega \right) = M_0 + (M_{сн} - M_0) \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2, \quad (4)$$

або

$$\beta_0 \left( \frac{2\pi f}{p} - \omega_n \omega_* \right) = M_0 + (M_{сн} - M_0) \omega_*^2. \quad (5)$$

Синхронна кутова швидкість при номінальній частоті струму  $f_n$ :

$$\omega_{0n} = \frac{2\pi f_n}{p}. \quad (6)$$

Тоді рівняння (5) запишеться у вигляді:

$$\beta_0 (\omega_{0n} f_* - \omega_n \omega_*) = M_0 + (M_{сн} - M_0) \omega_*^2, \quad (7)$$

звідки отримаємо

$$f_* = \frac{M_0 + (M_{сн} - M_0) \omega_*^2 + \beta_0 \omega_n \omega_*}{\beta_0 \omega_{0n}}. \quad (8)$$

Якщо знехтувати початковим моментом  $M_0=0$ , то:

$$f_* = \frac{M_{сн} \omega_*^2 + \beta_0 \omega_n \omega_*}{\beta_0 \omega_{0n}}, \quad (9)$$

або

$$f_* = K_3 s_n \omega_*^2 + \frac{\omega_n}{\omega_{0n}} \omega_*, \quad (10)$$

де  $K_3$  – коефіцієнт завантаження двигуна;  $s_n$  – номінальне ковзання двигуна.

Для двигунів з жорсткою механічною характеристикою номінальне ковзання невелике і  $\omega_H \approx \omega_{0H}$ , тому першим доданком у виразі (10) можна знехтувати. Тоді отримуємо:

$$f_* = \omega_* \quad (11)$$

Тому, для продуктивності  $Q$ , тиску  $p$  та потужності  $P$  насосів при зміні частоти струму справедливі такі співвідношення:

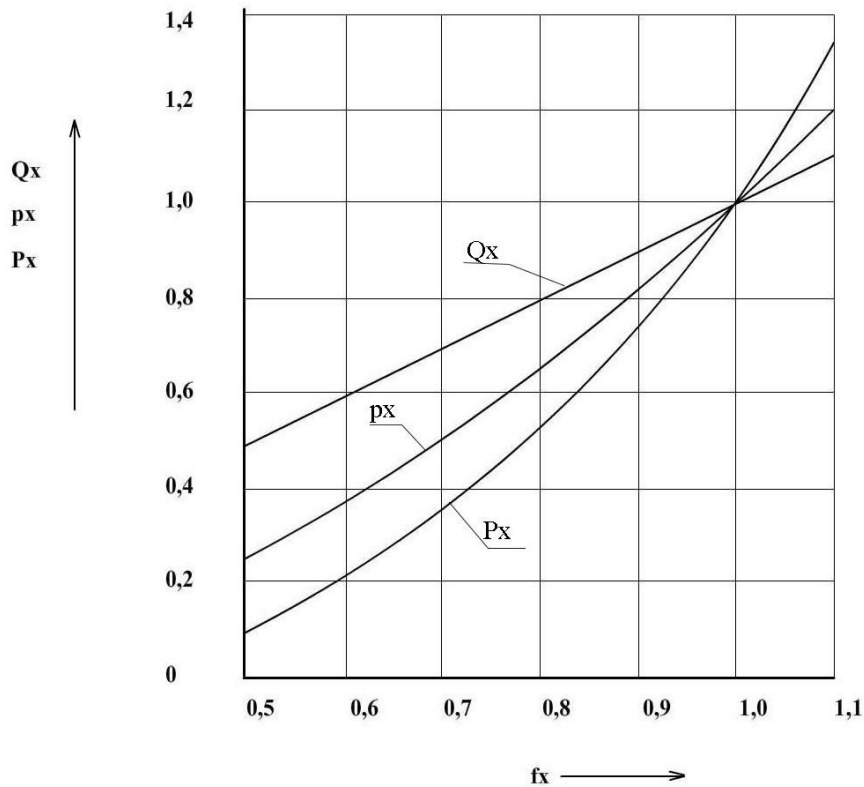
$$Q_* = f_*, \quad (12)$$

$$p_* = f_*^2, \quad (13)$$

$$P_* = f_*^3. \quad (14)$$

Експериментальні залежності зміни продуктивності, тиску і потужності відцентрового насоса К8/18 від частоти струму наведено на рис. 1.

Відхилення частоти струму в асинхронних електроприводах викликає зміну постійних і змінних втрат потужності.



**Рис.1. Залежності продуктивності ( $Q$ ), тиску ( $p$ ) і потужності ( $P$ ) насосів від частоти струму у відносних одиницях**

При відхиленні частоти струму механічні втрати потужності визначаються за формулою [2]:

$$\Delta P_M = \Delta P_{M.H} f_*^2, \quad (15)$$

де  $\Delta P_{M.H}$  – механічні втрати при номінальній кутовій швидкості.

Втрати в сталі асинхронного електродвигуна при зміні частоти струму визначаються за формулою [2]:

$$\Delta P_{cm} = \Delta P_{cm1} \approx \Delta P_{cm1n} \left( \frac{U}{U_n} \right)^2 \left( \frac{f_1}{f_{1n}} \right)^{1,3}, \quad (16)$$

де  $\Delta P_{cm1n}$  – втрати в сталі статора при номінальних значеннях частоти і напруги живлення.

Для насосів закон зміни напруги при зміні частоти струму має вигляд:

$$U_* = f_*^2. \quad (17)$$

Тоді втрати в сталі двигуна

$$\Delta P_{cm} \approx \Delta P_{cm1n} f_*^{3,3}. \quad (18)$$

Змінні втрати потужності визначаються за формулою [2]:

$$\Delta P_v = M_c \omega_0 s \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right), \quad (19)$$

де  $R_1$  – активний опір обмотки статора, Ом;  $R_2'$  – опір обмотки ротора, зведений до обмотки статора, Ом.

У насосів момент статичних опорів нелінійно залежить від кутової швидкості, тому вираз для визначення втрат потужності при зміні частоти струму є досить складним. Оскільки при зміні частоти струму ковзання практично не змінюється, то перепад швидкості буде:

$$\Delta \omega = \omega_0 s \approx \omega_0 s_{ном}. \quad (20)$$

Тоді змінні втрати потужності при відхиленні частоти струму визначатимуться виразом:

$$\Delta P_v \approx M_c \omega_0 s_n \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right) = M_c \frac{2\pi f}{h} s_n \left( 1 + \frac{R_1}{R_2'} \right). \quad (21)$$

Для насосів [3]

$$M_c = M_{cH} \omega_*^2 = M_{cH} f_*^2. \quad (22)$$

Тоді змінні втрати потужності:

$$\Delta P_v \approx \Delta P_{vH} f_*^3. \quad (23)$$

До енергетичних характеристик насоса належить питома витрата електроенергії, кВт·год/м<sup>3</sup>, яка визначається як:

$$q = P_1 / Q, \quad (24)$$

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

У відносних одиницях вираз (24) має вигляд:

$$q_* = \frac{P_2 + \Delta P_c + \Delta P_v}{P_{2H} + \Delta P_{cH} + \Delta P_{vH}} \cdot \frac{Q_n}{Q} = \frac{P_2 + \Delta P_{vH} (\alpha + \Delta P_v / \Delta P_{vH})}{P_{2H} + \Delta P_{vH} (\alpha + 1)} \cdot \frac{Q_n}{Q}, \quad (25)$$

де  $P_{2H}$  і  $P_2$  – відповідно потужність на валу двигуна при номінальній і відмінній від номінальної напрузі, Вт;  $\Delta P_{cH}$  і  $\Delta P_c$  – постійні втрати, Вт;  $\Delta P_{vH}$  і  $\Delta P_v$  – змінні втрати, Вт;  $\alpha$  – коефіцієнт втрат.

Розділивши чисельник і знаменник виразу (21) на  $P_{2H}$  та враховуючи те, що

$$P_2 / P_{2н} = M_{сн} \omega_*^2 \omega / M_{сн} \omega_n = \omega_*^3 = f_*^3, \quad (26)$$

$$\Delta P_n = P_{2н} \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} = \Delta P_{вн} (\alpha + 1), \quad (27)$$

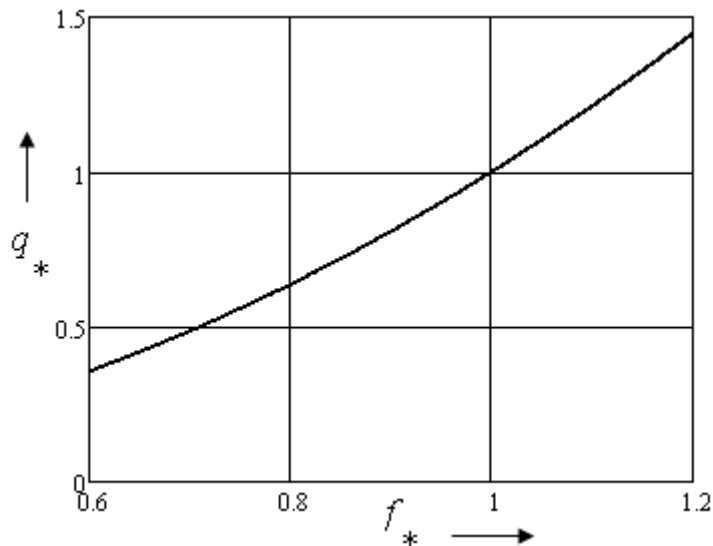
де  $\eta_n$  – ККД двигуна при номінальній напрузі, отримаємо

$$q_* = \frac{f_*^3 + \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \cdot \frac{(\alpha f_*^{3,3} + f_*^3)}{(\alpha + 1)}}{f_* \left( 1 + \frac{1 - \eta_n}{\eta_n} \right)} = f_*^2 \left( \eta_n + \frac{1 - \eta_n}{\alpha + 1} (\alpha f_*^{0,3} + 1) \right). \quad (28)$$

Оскільки  $f_*^{0,3} \approx 1$ , то

$$q_* = f_*^2. \quad (29)$$

Таким чином, зниження частоти струму викликає зменшення питомої витрати електроенергії у насосів, а її підвищення – зростання (рис. 2).



**Рис. 2. Залежність питомої витрати електроенергії від частоти струму для відцентрових насосів**

### Висновки

При зміні частоти струму продуктивність насосів змінюється прямо пропорційно зміні частоти струму, напір – квадрату частоти струму, потужність – кубу частоти струму. При зниженні частоти струму на 2 % продуктивність насосів і вентиляторів змінюється на 2 %, тиск – на 4 %, потужність – на 6 %, а питома витрата електроенергії зменшується на 4 %.

### Список літератури

1. Вплив якості електроенергії на функціонування споживачів у сільському господарстві / Д.Г. Войтюк, В.П. Лисенко, І.І. Мартиненко [та ін.] // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2004. – №1(6). – С. 3–12.
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 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.

*Проведено дослідження впливу частоти току на кутову швидкість, технологічні та енергетичні характеристики насосів. Встановлено залежності продуктивності, тиску, потужності насосів та удільного витрату електроенергії від частоти току.*

**Насос, електропривод, частота току, продуктивність, тиск, потужність насоса, удільний витрат електроенергії.**

*The effect of frequency on the current angular speed, technological and energy characteristics of pumps are carried out. The dependences of capacity, pressure, pump power and specific energy consumption from the current frequency are established.*

**Pump, electric drive, frequency, capacity, pressure, pump capacity, specific energy consumption.**

УДК 621.43.016.7

## **МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЕКСЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ У ВИПУСКНОМУ ТРАКТІ ПОРШНЕВИХ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ**

**В. Г. Горобець, доктор технічних наук  
Національний університет біоресурсів  
і природокористування України  
Ю. О. Богдан, аспірант\***

**Київська державна академія водного транспорту  
ім. гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного**

*Розроблено методику для визначення ексергетичних втрат, ексергетичної ефективності та ексергетичних критеріїв випускного тракту двигунів внутрішнього згоряння, яка дозволяє оцінити ефективність проходження відпрацьованих газів газовим трактом з врахуванням всіх видів втрат.*

**Ексергетичний аналіз, ексергетичні втрати, ексергетична ефективність, ексергетичні критерії, випускний тракт, двигун внутрішнього згоряння.**

---

\* Науковий керівник – доктор технічних наук В.Г. Горобець

© В. Г. Горобець, Ю. О. Богдан, 2014