

ELECTRICAL ENGINEERING

ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ В НАСОСНИХ УСТАНОВКАХ ВОДОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Семенов А.О.,

*Кандидат фізико-математичних наук,
професор кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавського державного аграрного університету, Україна*

Харак Р.М.,

*Кандидат технічних наук,
доцент кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавського державного аграрного університету, Україна*

Бичков Я.М.,

*Кандидат технічних наук,
доцент кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавського державного аграрного університету, Україна*

Скрипник В.О.

*Доктор технічних наук,
професор кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавського державного аграрного університету, Україна*

THE EFFICIENCY OF THE CONTROLLED ELECTRIC DRIVE IN WATER SUPPLY PUMP INSTALLATIONS

Semenov A.,

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Mechanical and Electrical Engineering at Poltava State Agrarian University, Ukraine

Kharak R.,

Candidate of Technical Sciences, associate Professor of the Department of Mechanical and Electrical Engineering at Poltava State Agrarian University, Ukraine

Bychkov Y.,

Candidate of Technical Sciences, associate Professor of the Department of Mechanical and Electrical Engineering at Poltava State Agrarian University, Ukraine

Skrypnyk V.

Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Mechanical and Electrical Engineering at Poltava State Agrarian University, Ukraine

Анотація

Досліджено ефективність регульованого електроприводу в насосних установках для систем водозабезпечення. Аналізовано вплив регулювання швидкості обертання насосів на продуктивність та надійність системи. Результати досліджень вказують на зниження споживання електроенергії та оптимізацію роботи насосних установок при використанні регульованого електроприводу, що відкриває перспективи для ефективного використання ресурсів у сучасних системах водопостачання та водовідведення.

Abstract

The efficiency of the controlled electric drive in pump installations for water supply systems has been studied. The impact of pump speed regulation on system productivity and reliability has been analyzed. The research results indicate a reduction in electricity consumption and optimization of pump installation operation when using a controlled electric drive, which opens up prospects for efficient resource utilization in modern water supply and drainage systems.

Ключові слова: насосна установка, регульований електропривод, економія енергії.

Keywords: pump installation, controlled electric drive, energy savings.

Аналіз літературних джерел

Сьогодні, в умовах постійного зростання екологічних проблем та підвищення вимог до стандартів довкілля, проблема ефективного управління ресурсами та раціонального використання енергії стає надзвичайно актуальною для агропромислового комплексу (АПК) [1]. Однією з ключових галузей сільського господарства є водопостачання та

водовідведення, яке вимагає значних енергетичних ресурсів [2].

На сьогоднішній день насосні агрегати відіграють ключову роль у процесі перекачування води у сільському господарстві. Інтенсивний розвиток технологій та автоматизації виробництва в АПК вимагає нових підходів до використання насосних систем, діагностування [3] та оптимізації, з метою

підвищення енергоефективності та зменшення витрат електроенергії [4].

На підприємстві ПП «Полтавський ливарно-механічний завод» розроблено методики для оцінки ефективності регульованого електроприводу у системах водопостачання та каналізаційних насосних установках. Ці методики включають у себе аналіз впливу регулювання швидкості обертання на продуктивність і надійність систем, оцінку зниження споживання електроенергії та підвищення ефективності роботи насосних установок за допомогою регульованого електроприводу [5]. Це дозволяє оптимізувати використання ресурсів та забезпечує ефективне функціонування систем водопостачання та каналізаційних насосних установок [6]. Ці методики ґрунтуються на перевірених довголітніми досвідом методах та рекомендаціях [7, 8]. Зокрема, вони розширені показником збереження води, що виникає при зменшенні витоків та непродуктивних витрат завдяки стабілізації тиску у системі водопровідної мережі [9].

Об'єктивна оцінка ефективності регульованого електроприводу (РЕП) стає критичною при прийнятті рішень про виділення коштів для впровадження заходів з енергозбереження та ресурсозбереження, з урахуванням економічного ефекту впровадження. Замовник енергозберігаючих систем повинен мати об'єктивну оцінку, щоб уникнути збитків при оплаті за фактичною ефективністю.

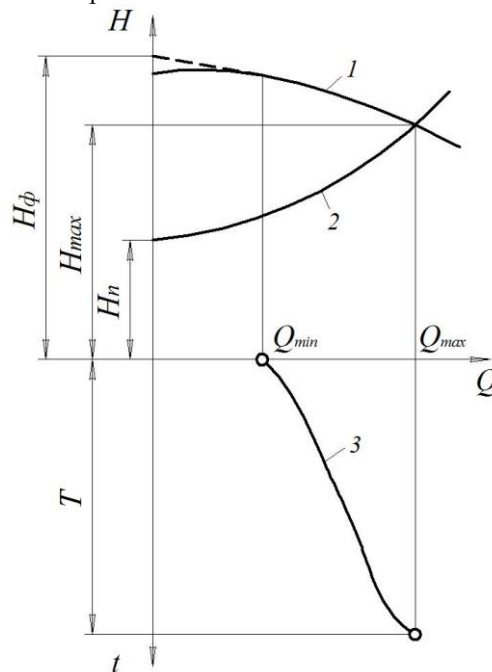


Рис. 1. Графік спільної роботи насоса з трубопроводом, а також впорядкована діаграма подачі води

При роботі насоса з постійною частотою обертання робоча точка насоса, яка розташована на перетині характеристик насоса та трубопроводу, переміщується по характеристиці насоса (крива 1 на рис. 1).

При роботі насоса змінною частотою обертання робоча точка переміщується по характеристиці трубопроводу (крива 2 на рис. 1).

Оцінка включає в себе аналіз витрат на впровадження та очікувані економічні вигоди, розрахунок термінів окупності і планування ефективного використання ресурсів, що дозволяє максимізувати ефективність і вибрати оптимальні рішення з позиції економічної доцільності та енергозбереження.

Ефективність збереження енергії та води в значній мірі залежить від встановлених параметрів регулювання в системі автоматизованого керування (САК) [10]. Найбільша економія енергії в системі водопостачання досягається, коли параметр управління визначається тиском у ключових точках системи подачі та розподілу води (СПРВ). З іншого боку, найменша економія спостерігається, коли стабілізується тиск на виході з насосної станції (у напірному колекторі або на водоводі).

Результати дослідження та обговорення

У системах водовідведення (ССВ) каналізаційних насосних станцій найбільша енергетична ефективність досягається, коли параметр регулювання визначається найвищим (але припустимим) рівнем стоків у приймальному резервуарі. Економія енергії в основному залежить від параметрів насосної установки та СПРВ або ССВ [11].

На рисунку 1 подано графік роботи насоса та трубопроводу, а також впорядковану діаграму значень витрати води протягом розрахункового періоду, наприклад, за рік.

Крива 1 розташована вище кривої 2, тобто при постійній частоті обертання насос працює із більш високим напором, ніж при змінній.

Потужність, споживана насосом, визначається його витратою (Q) та напором (H) і залежить від ККД (η) [1].

$$N = \frac{Q \times H}{\eta} \quad (1)$$

З (1) видно, що для роботи з більш високим напором насосу потрібна підвищена потужність, по-

рівняно з тією, яку він споживає при роботі з низьким напором. Чим довше працює насос з підвищеним напором та потужністю, тим більше енергії (W) він споживає на подачу води, що впливає з виразу:

$$W = N \times T \quad (2)$$

де t – час роботи насосу.

На рис.1 крива 1 – напірна характеристика насосу:

$$H_n = H_\phi - s_\phi Q^2 \quad (3)$$

крива 2 – характеристика трубопроводу:

$$H_c = H_n + sQ^2 \quad (4)$$

крива 3 – упорядкована діаграма водоподачі:

$$Q = Q_{max}(1 - \lambda)^{\frac{t}{T}} + \lambda \quad (5)$$

Регульований електропривід, якщо він обладнаний відповідною автоматикою [2], дозволяє переміщати робочу точку насоса по характеристиці трубопроводу 2, не по характеристиці насоса 1.

Сам по собі регульований електропривід не економить енергію. Збереження енергії забезпечується правильним режимом роботи всієї системи подачі води (водовідведення), зокрема насосної установки, і РЕП є інструментом, за допомогою якого забезпечується належний режим роботи насосної установки, СПРВ або СВО.

Належний режим роботи насосної установки створюється відповідною автоматизованою системою управління. Кількість енергії, яку можна зекономити, залежить від кількох основних технічних параметрів. До них відносяться [2]:

- діапазон зміни подачі протягом розрахункового періоду, який характеризується відношенням:

$$\lambda = \frac{Q_{max}}{Q_{min}} \quad (6)$$

де Q_{max} та Q_{min} - відповідно найбільша та найменша подача протягом розрахункового періоду, наприклад за рік, м³/с.

- крутизна характеристики трубопроводу, характеризується відношенням:

$$H_n^* = \frac{H_n}{H_{max}} \quad (7)$$

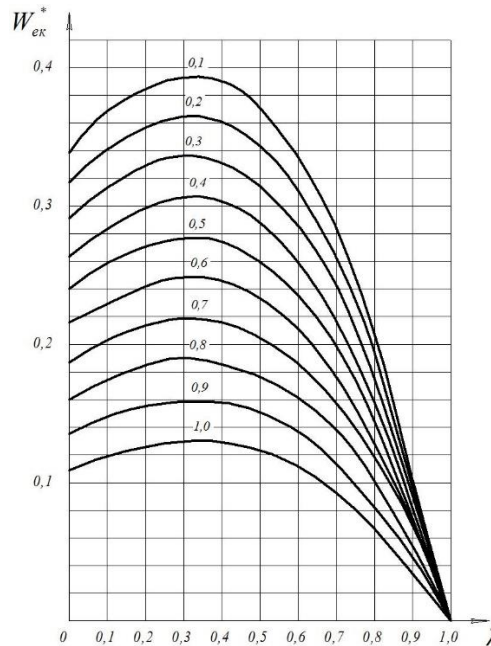


Рис. 2. Розрахункові криві для насосних агрегатів з $H_\phi \approx 1,25$

де H_n - статичний опір системи подачі (водовідведення), мм вод. ст., характеризується різницею геодезичних відміток рівня води в резервуарі, звідки насосна станція забирає воду, і місцем розташування споживача води. Для каналізаційних насосних станцій (КНС) - це різниця геодезичних відміток води в приймальному резервуарі та місцем розташування камери гашення; H_{max} - тиск, відповідний найбільшій подачі Q_{max} , м. При правильно вибраному насосі $H_{max} \approx H_{ном}$, де $H_{ном}$ - номінальний напір насосу;

- крутизна характеристика насосу характеризується відношенням:

$$H_\phi^* = \frac{H_\phi}{H_{max}} \quad (8)$$

де H_ϕ - фіктивна висота підняття води при нульовій подачі насосу.

Для багатьох водопровідних насосів $H_\phi \approx 1,25 H_{ном}$, а для фекальних $H_\phi \approx 1,44 H_{ном}$;

- найбільша споживана потужність насоса, кВт:

$$N_{max} = 9.81 \frac{Q_{max} \times H_{max}}{\eta_n} \quad (9)$$

де η_n - номінальний ККД насоса.

Для водопровідних та каналізаційних насосних установок $T=8760$ годин.

- кількість насосів m , що приймають участь в процесі регулювання до впровадження РЕП:

$$m = 1 + (m_{max} - m_{min}) \quad (10)$$

де m_{max} - кількість насосів, що забезпечують найбільшу подачу; m_{min} - кількість насосів, що забезпечують найменшу подачу.

Формули, за якими визначається економія енергії залежно від названих параметрів, достатньо громіздкі та незручні для практичного використання. Тому в методиці наводяться розрахункові криві $w'_{ек} = f(\lambda, H_n)$, за якими в залежності від значень λ і H визначається відносна економія енергії $w'_{ек}$ для тієї чи іншої установки (рис. 2).

Знаючи відносну економію енергії $w'_{ек}$ можна обчислити прогнозовану економію енергії за розрахунковий період за формулою:

$$W_{ек} = \frac{T_6 T}{\eta_{ед}} [w'_{ек} - (1 + \zeta - \eta_{пр})] \varphi \quad (11)$$

де $\eta_{ед}$ - номінальний ККД електродвигуна, $\eta_{ед} \approx 0,88 \dots 0,9$; $\eta_{пр}$ - номінальний ККД частотного перетворювача, $\eta_{пр} \approx 0,97 \dots 0,98$; ζ - коефіцієнт, що враховує додаткові втрати в електродвигуні $\zeta = 0,02 \dots 0,03$; φ - знижуючий коефіцієнт, що враховує кількість насосів m вибирається відповідно з табл. 1.

У методиках розглядаються варіанти розрахунків економії енергії для різних видів насосних установок (водопровідних, каналізаційних) і видів регульованого електроприводу (з втратами ковзання, без втрат ковзання, з рекуперацією ковзання). Відповідно наводяться розрахункові криві для цих варіантів розрахунку. Розглядаються також окремі випадки застосування РЕП у насосних установках у режимі максимального споживання тощо.

Таблиця 1

Значення знижуючого коефіцієнта в залежності від кількості насосів

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
φ	1	0,75	0,65	0,56	0,51	0,47	0,44	0,42	0,40	0,38

Наразі методику доповнено розділом, присвяченим оцінці економії води за рахунок стабілізації напору в системі водопостачання. Оцінку економії води виконано на тій самій методологічній основі, що й розрахунок економії енергії.

Витрата води, що витікає з отвору під час роботи насоса з постійною частотою обертання, тобто за напору H_n :

$$Q_{н,пер} = \mu \omega \sqrt{2gH_n} \quad (12)$$

Під час роботи насоса зі змінною частотою обертання, тобто за напору H_c , витрата дорівнює:

$$Q_{пер} = \mu \omega \sqrt{2gH_c} \quad (13)$$

Зниження витрати води при використанні РЕП:

$$\Delta q = Q_{н,пер} - Q_{пер} = Q_{н,пер} \left(1 - \sqrt{\frac{H_c}{H_n}}\right) \quad (14)$$

Обсяг води, що витікає з отвору за час t ,

$$\Delta v_t = \Delta q t = Q_{н,пер} \left(1 - \sqrt{\frac{H_c}{H_n}}\right) t \quad (15)$$

Виразивши H_n через його значення з рівняння (3), H_c - через його значення з рівняння (4), а Q - через його значення з рівняння (5) і виконуючи чисельне інтегрування в межах від 0 до T , отримуємо значення зекономленого обсягу води $\Sigma \Delta v_t$ за розрахунковий період T .

Поділивши $\Sigma \Delta v_t$ на обсяг води $V_T = \Sigma Q_{н,пер} t$, поданої за розрахунковий період T , отримуємо відносну економію води для різних значень λ і H_n

$$\Delta V = \frac{\Sigma \Delta v_t}{V_T} \quad (16)$$

Розрахунки виконані у відносних одиницях. Як базисних значень прийнято $Q_\delta = 1$; $H = 1$; $T = 1$. Результати розрахунків представлені у табл. 2

Таблиця 2.

Відносна економія води в залежності від λ і H_n для насосів з $H_\phi = 1,25$

λ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$H_n^* = 0,0$	0,363	0,358	0,342	0,318	0,288	0,252	0,211	0,164	0,115	0,060
$H_n^* = 0,1$	0,316	0,308	0,302	0,281	0,257	0,227	0,191	0,155	0,106	0,055
$H_n^* = 0,2$	0,281	0,275	0,266	0,246	0,229	0,203	0,172	0,136	0,095	0,050
$H_n^* = 0,3$	0,245	0,240	0,234	0,220	0,202	0,181	0,151	0,121	0,085	0,045
$H_n^* = 0,4$	0,212	0,210	0,200	0,193	0,178	0,158	0,125	0,108	0,072	0,038
$H_n^* = 0,5$	0,181	0,180	0,175	0,166	0,152	0,139	0,118	0,093	0,066	0,036
$H_n^* = 0,6$	0,155	0,153	0,149	0,142	0,131	0,119	0,101	0,080	0,057	0,030
$H_n^* = 0,7$	0,129	0,127	0,125	0,116	0,108	0,098	0,084	0,068	0,048	0,027
$H_n^* = 0,8$	0,104	0,102	0,099	0,094	0,088	0,080	0,068	0,055	0,039	0,022
$H_n^* = 0,9$	0,080	0,078	0,075	0,072	0,067	0,060	0,053	0,042	0,030	0,016
$H_n^* = 1,0$	0,057	0,055	0,053	0,051	0,048	0,044	0,037	0,030	0,020	0,012

Розрахунки, виконані для конкретних об'єктів показали, що обсяги заощадженої води, як і економія енергії, насамперед, залежать від характеристик насосів та конструкції (крутизни) системи трубопроводів, від глибини регулювання подачі води та кількості паралельно працюючих насосів. Розрахунки показали, що зазвичай економія води становить 3 ... 5% від обсягу води поданої за розрахунковий період.

Методика містить також розділ, присвячений техніко-економічному обґрунтуванню доцільності застосування РЕП у насосних установках шляхом зіставлення капітальних витрат необхідних для створення енергозберігаючих САУ на основі використання РЕП та експлуатаційних витрат.

Багаторічна практика застосування описаної методики на десятках діючих об'єктів та зіставлення прогнозованої економії енергії з фактичними

показниками дозволяє стверджувати, що реальна економія енергії в насосних установках систем водопостачання при правильно підбраному складі насосного обладнання знаходиться в діапазоні 5-20 %.

У окремих випадках, наприклад, при занижених діаметрах водоводів, економія може сягнути 25...30 % загального енергоспоживання. У каналізаційних насосних установках економія енергії зазвичай перебуває у межах 5...15 %, досягаючи окремих випадках 20...25 %.

Вищі значення економії енергії (40...60 %), що наводяться у рекламі та технічній літературі, якщо вони не обумовлені особливими умовами експлуатації об'єкта, викликають сумніви у достовірності наведених результатів.

Висновки

Тривалий досвід роботи в напрямку визначення ефективності регульованого електроприводу в насосних установках, показав, що економія енергії в 40 ... 60% можлива тільки в тих випадках, коли робочі характеристики насосних агрегатів і трубопровідної мережі не відповідають один одному. Але в цьому випадку, перш за все, чим встановлювати РЕП, треба навести робочі характеристики насосів у відповідність з параметрами системи подачі та розподілу води (СПРВ) або системи водовідведення і лише після цього вирішувати питання про застосування РЕП. Існують різні способи поєднання характеристик насосів та трубопровідних систем. Можна нарізати робоче колесо насоса. Можна замінити приводний електродвигун насоса, іншим іншою частотою обертання та іншою потужністю. Можна комбінувати різноманітні варіанти зміни робочих характеристик насосних агрегатів. За такого підходу економічні показники РЕП буде збільшуватись.

Список літератури

1. Аграрний сектор України на шляху до євро інтеграції: монографія / Авт. кол. Бетлій М. та ін.; за ред. О. М. Бородіної. Ужгород: ІВА, 2006. 496 с.

2. Регульований електропривод: підручник / І.М. Голодний, Ю.М. Лавріненко, В.В. Козирський, Л.С. Червінський, Д.А. Абдураманов, А.В. Торопов, О.В. Санченко; за ред. І.М. Голодного. Київ: ТОВ "ЦП "Компринт", 2015. 509 с.

3. Семенов А. О., Семенова Н. В. Підвищення ефективності насосів для перекачування пульпи цукрових заводів з використанням експрес-діагностики. Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування: матеріали V Всеукр. наук.-практ. Інтернет конференції (Полтава, 21-22 лютого 2023 р.). Полтава: ПДАУ, 2023. 198 с.

4. Котиш А. І., Сіріков О. І., Кубкін М. В., Солдатенко В. П. Розрахунок ефективності впровадження регульованого електроприводу в насосних установках. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. 2012. Вип. 25(2). С. 91-96.

5. Моделювання регульованого електропривода: Підручник / І.М. Голодний, Л.С. Червінський, А.В. Жильцов та ін. – К.: Аграр Медіа Груп, 2019. 266 с.

6. Насоси, агрегати [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://plmz.com.ua/ua/home-ua2/nasosi-agregati> - Полтавський ливарно-механічний завод. – Дата звернення: 21.03.2024.

7. Гарасьова Н. Ю., Величко Т. В. Оцінка ефективності роботи регульованого електроприводу насосу при змінному графіку водоспоживання. Наукові записки зб. наук. пр. нац. техн. ун-т. - Кіровоград КНТУ, 2014. Вип. 15. С. 86-88.

8. Закладний О. М. Закладний О. О. Оцінка енергетичної та економічної ефективності застосування регульованого електроприводу в насосних установках. Наукові записки зб. наук. пр. нац. техн. ун-т. - Кіровоград КНТУ, 2016. Вип. 16. С. 93-100.

9. Метод та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання монографія / В. В. Грабко, М. М. Мошноріз. Вінниця ВНТУ, 2011. 138 с.

10. Шевченко Т. О., Ярошенко, Ю. В. Регулювання роботи насосних станцій систем водопостачання та водовідведення шляхом застосування електроприводу, що регулюється. Коммунальное хозяйство городов. 2013. 107. С. 265-270.

11. Moshnoriz M., Babiy S., Payanok A. et al. Improving the efficiency of distributed water supply systems by means of an adjustable electric drive. Scientific Horizons. 2021. Vol. 24, No. 5. P. 19-34.