

І. ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.3

А. Г. Лохматов канд. техн. наук, П. В. Стрижак

Запорожская государственная инженерная академия

Порівняння способів керування продуктивністю насосних установок сільськогосподарського призначення

Запропоновано розрахунки споживаної потужності насосних установок сільськогосподарського призначення для трьох різних способів керування даними установками: з дроселюванням, з водонапірною баштою та частотним керуванням електричного двигуна насоса. Виконано кількісні порівняння енергетичних та економічних показників розглянутих варіантів.

водопостачання, енергозбереження, насосна установка, продуктивність насоса, дроселювання, водонапірна башта, частотно-керований привод, споживана потужність

Із загостренням проблем енергозбереження стає актуальною та затребуваною практикою підвищення енергоефективності насосних установок (НУ), які широко використовуються в усіх сферах людської діяльності. Особливістю роботи НУ сільськогосподарського призначення є різко нерівномірний відбір води споживачами, що коливається протягом доби та залежно від сезону (літній чи зимовий, розрізняють ще весняно-літній та осінньо-зимовий). Водночас насосна станція, виходячи з графіка водоспоживання, в кожну годину доби повинна не тільки забезпечити відповідне значення подачі для покриття потреб води, але й подати її під належним напором. Для забезпечення узгодженої роботи мережі водопостачання та насосної станції витрата повинна дорівнювати сумарній подачі води насосів при належному значенні тиску на її виході. Це досягається керуванням продуктивності станції.

Найчастіше для керування НУ застосовують такі засоби: дроселювання та системи з напірно-регулюючою ємністю [1, 2], а в останні роки, в зв'язку з успіхами перетворювальної техніки, стали використовувати частотні перетворювачі (ЧП) [3, 4]. Тому має значний інтерес порівняння названих способів керування НУ та оцінка їх ефективності з енергетичної та економічної точок зору, оскільки до цього часу в науково-технічному світі недостатньо розглянуто зіставлення запропонованих способів.

Метою статті є порівняння найбільш розповсюджених варіантів керування продуктивністю насосів та визначення найбільш ефективного на прикладі насосної станції садового кооперативу.

1. Керування продуктивністю НУ за допомогою дроселювання

Найпростішим способом керування продуктивністю з точки зору реалізації є дроселювання, до того ж воно потребує мінімальних капітальних затрат. Цей © А. Г. Лохматов, П. В. Стрижак 2010 р.

спосіб полягає у частковому закритті засувки на напірному трубопроводі насоса. При дроселюванні насос і електричний двигун обираються, виходячи з максимальної продуктивності [3]. Однак значну частину доби НУ працюють зі зменшеною подачею, що обумовлюється зміною витрати в різні періоди часу. Такі системи водопостачання не забезпечують помітного зниження споживаної потужності при зменшенні витрати води.

На рис. 1 зображена характеристика продуктивності відцентрового насоса при дросельному регулюванні. Крива 1 характеризує роботу насоса на номінальній частоті обертання, крива 2 характеризує роботу магістралі при повністю відкритій засувці. Витрати й напір води наведені у відносних одиницях. Як базові були прийняті значення номінальної витрати $Q_{ном}$ і номінального напору $H_{ном}$. При номінальній витраті й напорі насос працює в точці А, а потужність, споживана насосом,

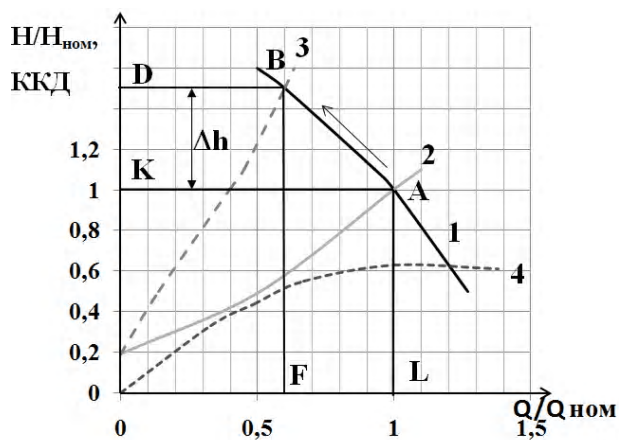


Рис. 1. Характеристика продуктивності відцентрового насоса при дросельному регулюванні

пропорційна площі прямокутника OKAL. Зі зменшенням витрати при даному способі керування (на рис. 1 для прикладу показана витрата води, що становить $0,6 Q_{\text{ном}}$) відбувається зміна опору магістралі (крива 3). Насос працює в точці В кривої 1, що приводить до зростання напору, який стає більше номінального. Потужність насоса пропорційна площі прямокутника ODBF і мало відрізняється від потужності, споживаної при номінальній витраті, отже, енергоспоживання при дросельному регулюванні несуттєво змінюється зі зменшенням витрат води [5].

При цьому різниця ординат крапок В і А – Δh є зайвим напором, що зменшується за допомогою засувки до значення $H_{\text{ном}}$. Потужність, що втрачається при цьому регулюванні, визначається відношенням

$$\Delta P = \frac{Q_B \Delta h g \rho}{\eta_B}, \quad (1)$$

де ΔP – потужність, що втрачається, Вт; Q_B – подача води в точці В, м³/с; Δh – напір, що втрачається в засувці при дроселюванні, м; g – прискорення вільного падіння, м/с²; ρ – щільність рідкого середовища, кг/м³; η_B – ККД насоса, що відповідає подачі Q_B .

ККД насосної установки (крива 4) при дроселюванні можна вирахувати за формулою [6]

$$\eta_n = \eta_{\text{ном}} \frac{H_c}{H_n}, \quad (2)$$

де $\eta_{\text{ном}}$ – номінальний ККД насоса; H_c – напір в системі; H_n – напір, створюваний насосом.

При дросельному керуванні ККД двигуна залишається постійним, рівним номінальному. Це дозволяє розрахувати потужність насоса за формулою [2]

$$P = \frac{QHg\rho}{\eta_n \eta_{\text{дв}}}, \quad (3)$$

де P – споживана потужність, Вт; Q – подача, м³/с; H – напір, м; $\eta_{\text{дв}}$ – ККД двигуна при дроселюванні.

2. Керування водопостачанням при застосуванні водонапірної башти

Використання водонапірної башти (ВБ) з метою керування подачею води перевірено часом. У системі з ВБ розрізняють схеми з одностороннім (мережа із прохідною вежею), двостороннім (мережа з контррезервуаром) та комбінованим живленням мережі [1]. В усіх розглянутих випадках бак башти є регулюючою ємністю. Залежно від співвідношення кількості води, яка подається насосом та тієї, що забирається споживачами, він може бути або нефіксованим відбором, або другим джерелом із заданим напором. Тобто при малому споживанні насос працює на башту, при великому – до подачі насоса додається потік води, що йде з башти.

Включення в мережу водопостачання ВБ дозволяє

насосу й споживачам води діяти за своїми графіками (рис. 2), причому насос завжди працює в ідеальній розрахунковій точці ($Q_{\text{ном}}, H_{\text{ном}}$), в найбільш вигідному режимі при нерівномірній витраті води споживачами.

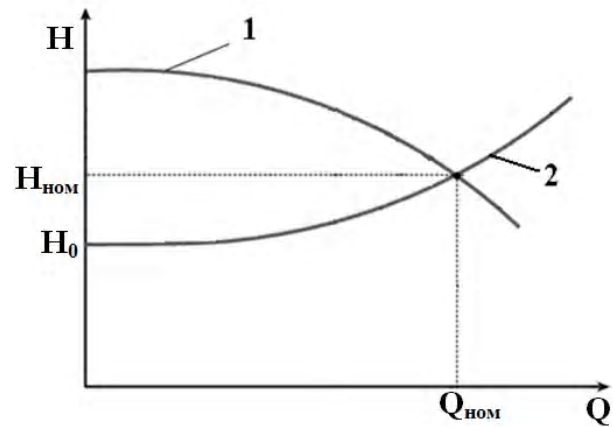


Рис. 2. Характеристика продуктивності відцентрового насоса при роботі з баштою: 1 – напірна характеристика насоса; 2 – напірна характеристика магістралі

ККД насоса та двигуна практично не змінюються, отже, потужність привода насоса при регулюванні витрати за допомогою ВБ можна визначити співвідношенням

$$P = \frac{QHg\rho}{\eta'_n \eta_{\text{дв}}}, \quad (4)$$

де η'_n – ККД насоса для варіанту з ВБ, знаходиться за паспортними даними; $\eta_{\text{дв}}$ – номінальний ККД двигуна для варіанту з ВБ.

Напір, який розвиває насос, повинен бути більшим, ніж при розводці по горизонтальному трубопроводу через втрати при піднятті води в башту. Також при роботі за схемами з контррезервуаром і комбінованим живленням напір по довжині розвідного трубопроводу втрачається два рази: при накачці башти та при її спустошенні [1].

3. Керування продуктивністю насосної установки за допомогою перетворювача частоти

На даний час почав широко застосовуватись частотний спосіб керування електродвигунами НУ, який має переваги щодо економії споживаної енергії та вдосконалення технологічного процесу.

Можливості енергозбереження при даному регулюванні швидкості електропривода НУ ілюструються рис. 3. Крива 1 характеризує роботу електропривода на номінальній частоті, де потужність, спожита насосом, пропорційна прямокутнику OKAL. При зменшенні витрати до рівня $0,6$ від $Q_{\text{ном}}$ за рахунок зменшення швидкості насос працює в точці С на кривій 3 при незмінній характеристиці магістралі (крива 2). Потужність, яка спожита електроприводом у такому випадку, пропор-

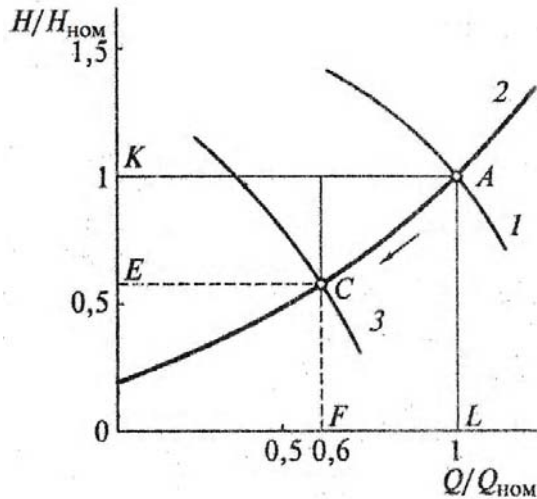


Рис. 3. Характеристика продуктивності відцентрового насоса при частотному регулюванні

ційна площі прямокутника OECF, що ілюструє можливість істотного зниження енергоспоживання при впровадженні керованих електроприводів в порівнянні з некерованими [5].

При зміні частоти обертання вала робоча точка насоса відхиляється від режиму максимального значення ККД. Це відхилення тим більше, чим більша статична складова опору мережі. Характер зміни ККД насоса η , залежно від витрати рідини Q при різних частотах обертання, наведено на рис. 4 [7].

При регулюванні частоти обертання ККД насоса визначається як відношення корисної потужності до механічної потужності на його валу [8]

$$\eta_n = \frac{\rho}{102} \frac{A_2 n_{pez}^2 Q + B_2 n_{pez} Q^2 + C_2 Q^3}{A_3 n_{pez}^2 Q + B_3 n_{pez} Q^2 + D_3 n_{pez}^3}, \quad (5)$$

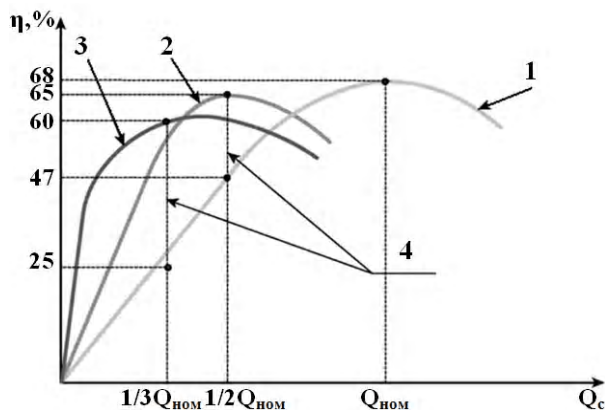


Рис. 4. Зміна ККД насосного агрегата із частотним регулюванням при зміні продуктивності: 1 – характеристика ККД насоса при 1500 об/хв; 2 – характеристика ККД насоса при 1400 об/хв; 3 – характеристика ККД насоса при 1300 об/хв; 4 – підвищення значення ККД насоса при частотному регулюванні порівняно з дроселюванням

де $A_2, B_2, C_2, A_3, B_3, D_3$ – постійні коефіцієнти, які визначаються при апроксимуванні, залежать від конструктивних особливостей турбомеханізму, можуть бути визначені за паспортними даними; n_{pez} – частота обертання насоса, для поточного значення витрати, при якій забезпечується постійне значення напору.

ККД двигуна можна визначити із системи [9]

$$\eta = \left[1 + A_p \left(\frac{\mu_c}{\alpha} + a_1 \frac{\alpha}{\mu_c} + a_2 \alpha^{0,5} + \frac{a_3}{\alpha} \right) \right]^{-1}, \quad (6)$$

$$A_p = \frac{\Delta P_{змін.ном}}{P_{ном}},$$

$$\mu_c = \frac{M_c}{M_{с.ном}},$$

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1ном}},$$

$$a_1 = \frac{\Delta P_{мех.ном}}{\Delta P_{змін.ном}},$$

$$a_2 = \frac{\Delta P_{ст.ном}}{\Delta P_{змін.ном}},$$

$$a_3 = \frac{\Delta P_{\mu.ном}}{\Delta P_{змін.ном}},$$

де $\Delta P_{змін.ном}$ – змінні номінальні втрати потужності в АД; $P_{ном}$ – номінальне значення потужності АД; M_c , $M_{с.ном}$ – поточне та номінальне значення статичного моменту; $f_1, f_{1ном}$ – поточне й номінальне значення частоти; $\Delta P_{мех.ном}$, $\Delta P_{ст.ном}$, $\Delta P_{\mu.ном}$ – номінальне значення механічних втрат, втрат в сталі та втрат в обмотці статора від проходження номінального току намагнічування.

На рис. 5 наведено зміну ККД двигуна типу 4А315S4 потужністю 160 кВт при частотному регулюванні в залежності від частоти f напруги, якою живиться асинх-

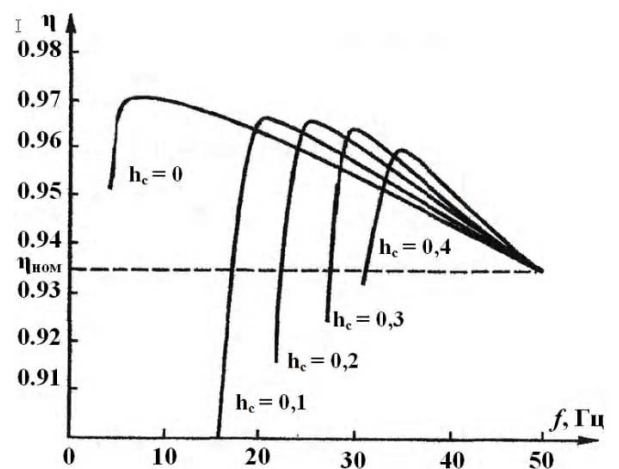


Рис. 5. Залежність ККД від відносної частоти для АД типу 4А315S4 при різних значеннях статичного напору h_c

ронний двигун. В робочому діапазоні частот $f_{\min} < f < 50$ значення ККД двигуна вище номінального. З підвищенням напору в системі водопостачання максимум ККД зміщується в сторону високих частот, а його значення зменшується [9]. На зображеному рисунку h_c – відносний статичний напір, що визначається як

$$h_c = \frac{H_c}{H_0}, \quad (7)$$

де H_c – напір в системі; H_0 – напір турбомеханізму при $Q=0$.

Втрати потужності у вентилях ПЧ можна визначити із системи [5]

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{пч} &= \kappa_1 I^2 + \kappa_2 I + \kappa_3, \\ I &= \sqrt{I_{xx}^2 + (cM)^2}, \\ M &= \frac{P}{\omega}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

де I – струм статора асинхронного двигуна; I_{xx} – струм холостого ходу; $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, c$ – коефіцієнти, які визначаються при апроксимації, розраховуються за паспортними даними; M, P – момент та потужність на валу двигуна; ω – частота обертання вала двигуна.

Графічно функція $\Delta P_{пч} = f(\omega)$ для ПЧ потужністю 15 кВт зображена на рис. 6.

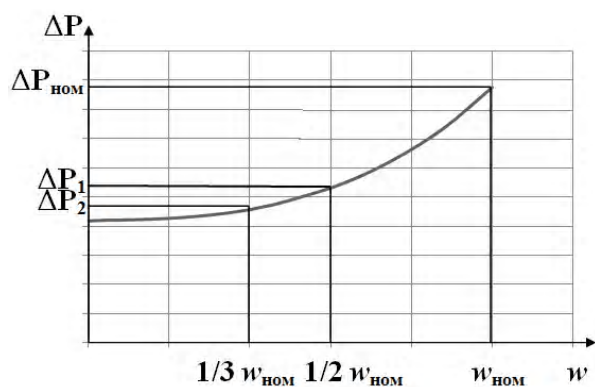


Рис. 6. Залежність втрат в ПЧ від частоти обертання вала двигуна

Потужність привода насоса при частотному регулюванні розраховується за формулою

$$P = \frac{QHg\rho}{\eta_n \eta_{ос}} + \Delta P_{пч}, \quad (9)$$

де η_n – ККД насоса при частотному регулюванні, $\eta_{ос}$ – ККД двигуна при частотному регулюванні.

В табл. 1 приведено результати розрахунків спожитої енергії W за рік, потужності двигуна, капітальних

витрат K , а також простого терміну окупності $T_{ок}$, в порівнянні з найдешевшим варіантом (дроселюванням), отримані на підставі залежностей (3), (4), (9) для розглянутих варіантів керування витратою НУ дачного кооперативу, за таких умов:

- вода використовується для поливу територій загальною площею 5 га;
 - згідно з графіком водоспоживання (рис. 7) водопостачання здійснюється 12 годин на добу, 180 днів на рік;
 - приймаємо, що добова витрата води впродовж року не змінюється та складає 400 м³;
 - геодезична висота площ поливу 20 метрів;
 - розрахунки проведені згідно тарифу на електроенергію станом на листопад 2009 року для населених пунктів у сільській місцевості (0,22 гривні за 1кВт·год).
- До капітальних витрат входить вартість двигунів, водонапірної башти і перетворювача частоти. Всі інші елементи системи однакові, включно з насосом (тому для порівняння в табл. 1 не показані).

Таблиця 1. Порівняння варіантів керування витратою НУ

	W , кВт·год/рік	Потужність двигуна, кВт	K , грн	$T_{ок}$, років
Дроселювання	23702,4	15	4957	–
Система з водонапірною вежею	19927,8	11	53378	58
Частотне регулювання	20032,2	15	13757	11

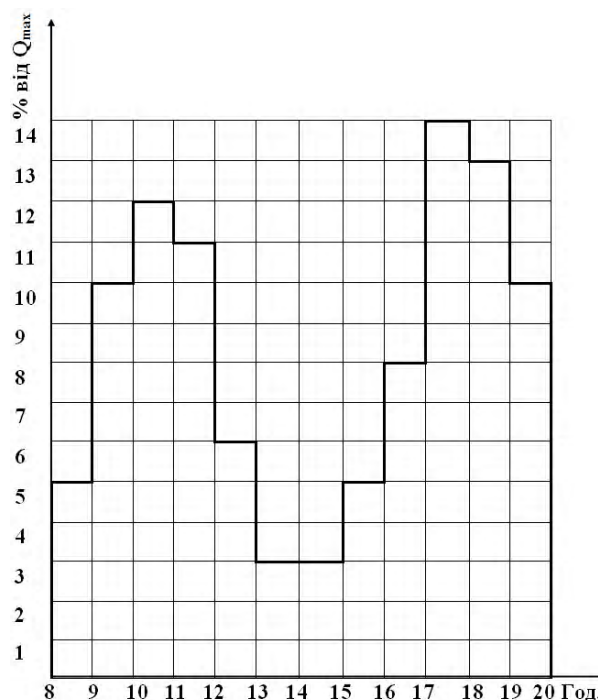


Рис. 7. Добовий графік водоспоживання підприємством поливання

Висновки

1. Із проведених розрахунків видно, що найменша кількість електричної енергії споживається при керуванні за допомогою водонапірної башти. Однак такий спосіб потребує найбільших капітальних витрат і відповідно характеризується найдовшим терміном окупності. В свою чергу, використання частотного керування є дещо менш енергоефективним, але має припустимий термін окупності, що складає 11 років. При цьому варто звернути увагу на те, що при розглянутих варіантах водопостачання ведеться лише півроку по 12 годин на добу, до того ж сільськогосподарським підприємствам поливання продаж електричної енергії здійснюється за заниженими цінами. Дроселювання має найгірші енергетичні показники, але завдяки мінімальним капітальним витратам в даному випадку також має право на реалізацію.

2. Результати додаткових розрахунків показали, що якби водопостачання здійснювалось протягом цілого року 24 години на добу, а закупівельна ціна електричної енергії складала б 0,61 гривні за 1 кВт·год (як для промислових підприємств України), то терміни окупності для розглянутих варіантів могли б скоротитись більш ніж у 8 разів.

3. Кожен із запропонованих варіантів має позитивні й негативні сторони. Вибір того чи іншого варіанту повинен детально розглядатися відносно конкретних умов водоспоживання та водопостачання з енергетичної та економічної точки зору.

Список літератури

1. Журба М. Г. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: издание второе, переработанное и дополненное. Учебное пособие / М. Г. Журба, Л. И. Соколов, Ж. Б. Говорова. – М. : Издатель-

ство АСВ, 2004. – 256 с.

2. Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры / В. М. Черкасский. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 420 с.
3. Chen et al., Y.C. Optimized Operation of Water Supply Systems Containing a Mixture of Fixed and Variable Speed Pumps, IEEE / Y. C. Chen et al. – International Conference on Control 1991, Mar. 1991. – P. 1200–1205.
4. Минскер Ф. Е. Экономические и технологические аспекты энергоресурсосбережения за счет широкомасштабного внедрения регулируемого электропривода отечественного производства / Ф. Е. Минскер // Экологические системы. – 2005. – № 6.
5. Браславский И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод : Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М. : Академия, 2004. – 256 с.
6. Зимицкий В. А. Лопастные насосы: Справочник / В. А. Зимицкий, А. В. Каплун, А. Н. Папир, В. А. Умов. – Л. : Машиностроение. Ленинградское отд-ние, 1986. – 334 с.
7. Козлов М. Эффективность внедрения систем с частотно-регулируемым приводом / М. Козлов, А. Чистяков // В записную книжку инженера. – 2004. – С. 76–82.
8. Мягков Ф. Н. Моделирование насосов с регулируемой частотой вращения / Ф. Н. Мягков, М. Л. Костырев, Л. И. Дубаев, Н. В. Мотовилов // Электрические станции. – 2009. – №6. – С. 54–58.
9. Фираго Б. И. Регулируемые электроприводы переменного тока / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Мн. : Техноперспектива, 2006. – 363 с.

Поступила в редакцию 04.12.09 г.

После доработки 21.12.09 г.

Лохматов А. Г., Стрижак П. В. Сравнение способов управления продуктивностью насосных установок сельскохозяйственного назначения.

Рассчитана потребляемая мощность насосных установок сельскохозяйственного назначения для трех различных способов управления данными установками: с дросселированием, с водонапорной башней и частотным управлением электрического двигателя насоса. Выполнено сравнение энергетических и экономических показателей этих вариантов.

водоснабжение; энергосбережение; насосная установка; производительность насоса; дросселирование; водонапорная башня; частотно-управляемый привод; потребляемая мощность

Lohmatov A. G., Strizhak P. V. Comparison of agricultural pumping plants efficiency control methods. *Calculations of watt-hour energy usage by agricultural pump plants are offered for three different control techniques: with throttling, with a water-tower, and with a frequency-controlled pump electric drive. Power and economic indexes of these variants are compared.*

water-supply; energy-saving; pumping installation; pump capacity; throttling; water-tower; variable frequency drive; power input