

Ю. О. Білецький

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,  
yurii.o.biletskyi@lpnu.ua

Q

## ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ ВОДОПОМПОВОЇ УСТАНОВКИ НА ОСНОВІ ТЕРМОДИНАМІЧНОГО АНАЛІЗУ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ У ВІДЦЕНТРОВІЙ ПОМПІ

<https://doi.org/>

© Юрій Білецький, 2024

Одним із перспективних способів використання сонячної енергії є автономні фотоелектричні сонячні установки для pompування води, які призначені для зрошення та міського/сільського водопостачання замість електричних під’єднаних до мережі або дизельних водопомпових систем. Найпростішими і найпоширенішими серед таких установок є системи прямого привода, які не потребують дорогих і ненадійних акумуляторних батарей. Проте в них у зв’язку з немінучими сезонними, добовими та погодними зменшеннями інтенсивності падаючої сонячної радіації пропорційно знижується частота обертання електродвигуна, що приводить в рух помпу, причому гідравлічна продуктивність останньої знижується вже в кубічній залежності її швидкості. Все це призводить як до звуження приблизно наполовину робочого діапазону інтенсивності сонячної радіації, так і до стрімкого зниження ККД помпи. З метою обґрунтування раціональних параметрів відцентрової помпи в цій статті остання розглянута як механо-гідравлічний перетворювач потужності. Для опису роботи такого перетворювача застосовано положення лінійної нерівноважної термодинаміки, причому нелінійні статичні характеристики “напір – витрата” лінеаризувалися в робочих точках помпи. Такий підхід дав змогу отримати універсальну характеристику перетворювача потужності – залежність енергетичної ефективності помпи, її ККД від відносного параметра режиму роботи. Оптимальна точка максимальної ефективності перетворювача залежить від безрозмірного ступеня спряження між його входом та виходом. Дослідження, проведені для реальної помпи, яка працює в реальній гідравлічній системі, показали, що зі зниженням частоти її обертання змінюються всі вказані параметри помпи: зменшується ступінь спряження, знижується ККД, а робоча точка поступово переміщується з лівої на праву ділянку спадаючих частин термодинамічної ефективності. Для оперативного обчислення вказаних безрозмірних параметрів та побудови відповідних безрозмірних характеристик перетворювача потужності розроблено програму в середовищі MathCad. З її використанням проведено низку досліджень щодо впливу основних параметрів гідравлічної системи на ККД помпи за різних частот її обертання. У результаті проведених досліджень показано, що для розширення робочого діапазону інтенсивності сонячної радіації та суттєвого підвищення енергетичної ефективності відцентрової помпи в автономних установках прямого привода доцільно

застосовувати помпи з номінальною висотою підйому води, вищою ніж задана в конкретній гідравлічній системі.

*Ключові слова: помпування води, сонячна установка, автономна система, відцентрова помпа, енергетична ефективність, лінійна нерівноважна термодинаміка, перетворювач потужності.*

### Вступ

Генерування електричної енергії з відновлюваних джерел енергії, насамперед сонця і вітру, вже давно набуло масштабного і незворотного розвитку, сприяючи вирішенню екологічної та енергетичної проблем у світі [1]. Проте стохастичність процесу генерування, зумовлена добовими, сезонними та погодними умовами, стає певним викликом на шляху розвитку відновлюваної енергетики. Разом зі зростанням потужностей маневрових станій, які дають змогу швидко збільшувати генерацію в умовах дефіциту генерування та балансувати електричні мережі, розвивається складніший, проте перспективніший напрям – нагромадження енергії [2]. Крім великої енергетики, він містить й малу, яка має переваги в своїй розосередженості, зменшуючи перетоки електричної енергії та, відповідно, її втрати. До технологій малої відновлюваної енергетики, яка містить нагромадження енергії у вигляді запасу води, можна зарахувати низку конфігурацій фотоелектричних сонячних установок для помпування води (СУПВ) [3].

СУПВ поділяються на мережеві та автономні [4]. Мережеві установки насамперед зменшують споживання електроенергії на помпування води, роблячи свій вклад у декарбонізацію енергетики, а також можуть вирішувати низку інших задач: забезпечувати живлення інших побутових споживачів, віддавати надлишкову енергію в мережу тощо [5–7]. Основне призначення автономних СУПВ – забезпечувати водою людей, а також окремі технологічні процеси і сільськогосподарські роботи в місцях відсутності або віддаленості від електричних мереж. Проте останнім часом завдяки зниженню вартості сонячних фотоелектричних панелей (ФЕП) автономні установки почали застосовувати і в електрифікованих місцях з економічною та екологічною метою [3, 4].

### Огляд літератури

В оглядовій статті [4] автономні СУПВ розділяють на дві групи – прямого привода (direct driven) та привода від акумуляторної батареї (battery driven). У першій групі генерована від сонця протягом дня електрична енергія безпосередньо перетворюється в потенціальну енергію наповненої в бак води, причому з метою максимального використання енергії від сонця бак має мати значний об'єм і слугувати нагромаджувачем енергії [3, 8]. У другій групі для нагромадження надлишкової генерованої ФЕП електричної енергії застосовуються електрохімічні батареї, які дають змогу рівномірніше помпувати воду, навіть у нічний час, що виключає необхідність нагромадження води [8, 9]. Крім того, СУПВ з приводом від акумуляторної батареї можуть забезпечувати й додаткове електричне живлення інших споживачів, наприклад, здійснювати електропідігрівання води для побутових чи виробничих потреб [9]. Однак, зважаючи на високу вартість та малий термін служби батарей, установки з приводом від акумуляторної батареї є значно дорожчими, а також складнішими щодо енергетичного менеджменту [10]. В автономних СУПВ замість нагромадження енергії можна застосувати додаткове джерело генерування електроенергії, наприклад дизель-генераторну установку.

Ця стаття присвячена автономним СУПВ прямого привода, зокрема підвищенню їх енергетичної ефективності. У таких установках найчастіше застосовують відцентрову помпу (ВП), що приводиться в рух електричним двигуном, найчастіше асинхронним двигуном (АД) чи безщітковим двигуном постійного струму [11, 12]. Традиційними найпоширенішими конфігураціями автономних СУПВ прямого привода є система з безпосереднім з'єднанням модуля ФЕП з DC-мережею електропривода ВП та аналогічна система, але з проміжним DC-DC перетворювачем, який виконує функцію пошуку точки максимальної потужності (MPPT) ФЕП [3] (рис. 1). Друга система

має енергетичні переваги над першою завдяки постійній роботі панелей в точці максимальної потужності з максимальним ККД за зміни основних факторів, що впливають на робочу точку ФЕП – рівня інтенсивності падаючої сонячної радіації  $G$  і температури панелей  $\theta$  [3, 4]. Проте найслабшою ланкою обох конфігурації щодо ефективності перетворення енергії є ФЕП, ефективність яких для сучасних зразків досягає 0,21. Більш ефективні панелі третьої генерації на основі multy-junction solar cells, ККД яких сягає 45 % [13], сьогодні ще перебувають на стадії досліджень.

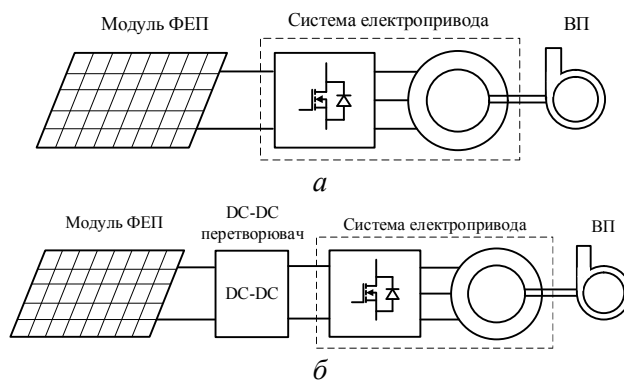


Рис. 1. Найпоширеніші конфігурації автономних СУПВ прямого привода:  
а – з безпосереднім з'єднанням модуля ФЕП з DC-мережею електропривода ВП;  
б – з проміжним DC-DC перетворювачем

Багато досліджень спрямовано на підвищення сумарної ефективності електротехнічної частини СУПВ. У цих працях досліджено оптимальне реконфігурування PVPs при зміні інсоляції [14], застосовано нові способи МРРТ [15], різні топології DC-DC перетворювачів, які виконують силову функцію МРРТ [16], використано різні типи електричних двигунів для привода pomp [17], різні стратегії керування цими приводами, наприклад оптимальне векторне керування потоком АД з метою мінімізації його втрат [18] чи навіть одностадійне векторне керування АД, за якого відсутній DC-DC перетворювач, а інвертор напруги одночасно виконує функції МРРТ і мінімізації втрат енергії в системі електропривода [19], застосовано нові системи оптимального та інтелектуального керування [20, 21]. Проте усі ці дослідження проводять здебільшого електротехніки, які й спрямовують свої зусилля на підвищення ефективності саме електротехнічної частини СУПВ, забуваючи, що другим після ФЕП критичним щодо енергетичної ефективності перетворювачем потужності є сама ВП. Так, найпоширеніша помпа в реальній гідравлічній системі помпування води має номінальний ККД на рівні 0,5–0,6, а зі зниження частоти обертання помпи він стрімко знижується. У розглянутих традиційних конфігураціях автономних СУПВ прямого привода за зниження інтенсивності падаючої сонячної радіації неодмінно знижуватиметься й частота обертання та потужність помпи, що призводить до стрімкого зниження ККД помпи до величини 0,3 та обмеження її робоздатності вже за досить високих значень  $G$ , наприклад  $500 \text{ Вт/м}^2$  [20]. А величина  $G$  змінюється в широких межах протягом року, часу дня, а також з погодними умовами. Все це значно знижує загальну ефективність установок прямого привода.

Деякого покращення роботи ВП в ширшому діапазоні зміни інсоляції можна досягнути шляхом застосування двох чи більше pomp зі своїми електроприводами, які при цьому працюють в різних комбінаціях [22], проте це підвищує вартість СУПВ та ускладнює її роботу.

### Мета статті

Мета статті – математичний опис роботи циркуляційної помпи як нелінійного перетворювача потужності на основі підходів лінійної термодинаміки нерівноважних процесів (ЛТДНП) та обґрунтування раціональних параметрів цієї помпи для автономної СВПУ прямого привода з метою підвищення її загальної енергетичної ефективності.

## Виклад основного матеріалу

## Математичний опис роботи ЦП як нелінійного механо-гідравлічного ПП на основі підходів лінійної нерівноважної термодинаміки

*Показники ефективності роботи ПП відповідно до лінійної нерівноважної термодинаміки*

Дієвим підходом для вирішення задачі підвищення енергетичної ефективності різних об'єктів, в роботі яких поєднуються фізичні явища різної природи, може бути застосування методів ЛТДНП. Особливістю цього підходу є спроможність описати складні, зокрема й нелінійні, усталені процеси роботи різноманітних фізичних, хімічних, біологічних систем за універсальним принципом лінеаризації взаємозв'язку між вхідними та вихідними координатами потужності в конкретних робочих точках. Водночас система розглядається як перетворювач потужності (ПП) з певною кількістю входів та виходів, проте найпростіше та найчастіше з одним входом та одним виходом. Для останнього випадку розроблено універсальний метод опису ПП системою безрозмірних параметрів та характеристик ефективності його роботи [22, 23]. Найважливішим показником ПЕ є ступінь спряження між його входом та виходом, який однозначно визначає максимальні значення показників ефективності роботи перетворювача, а також робочі точки, за яких досягаються ці максимальні значення. Це дає змогу оптимізувати режими роботи ПП залежно від прийнятих критеріїв оптимізації [23]. Вказаний універсальний метод знайшов найбільше застосування в біоенергетиці для опису перетворень вільної енергії в біосистемах, проте його можна успішно застосовувати для аналізу усталених процесів енергоперетворень у системах будь-якої природи. Наприклад, в [25] його успішно застосовано для аналізу ефективності енергоперетворення в електромеханічному перетворювачі – електричному двигуні, а в [26] – в аеромеханічному перетворювачі – вітроустановці.

Відповідно до ЛТДНП для двох спряжених процесів, до яких належить будь-який ПП, оскільки його вихідні параметри (o – output) визначаються вхідними (i – input), можна записати таку систему рівнянь:

$$\begin{cases} J_i = L_{ii}X_i + L_{io}X_o \\ J_o = L_{oi}X_i + L_{oo}X_o \end{cases}, \quad (1)$$

де  $J$  – термодинамічні потоки;  $X$  – термодинамічні сили;  $L$  – кінетичні або “феноменологічні” коефіцієнти, які знаходять з виразу

$$L_{jk} = \left( \frac{\partial J_j}{\partial X_k} \right)_{X_j = \text{const}}. \quad (2)$$

За визначенням  $X_i$ ,  $X_o$  та  $J_i$  додатні, а  $J_o$  – від’ємний, що означає поглинання енергії на вході і утворення її на виході, тому  $L_{ii}$ ,  $L_{oo}$  та  $-L_{io}$  мають бути додатними.

Відповідно до принципу взаємності Онзагера, який можна називати четвертим законом термодинаміки [23],  $L_{jk} = L_{kj}$ , тобто в околі стану рівноваги лінійна залежність будь-якого потоку  $J_j$  від будь-якої сили  $X_k$  збігється з аналогічною залежністю потоку  $J_k$  від сили  $X_j$ . Співвідношення взаємності Онзагера дають змогу суттєво скоротити число незалежних коефіцієнтів у системах типу (1). Відповідно до другого закону термодинаміки, на допустимі значення кінетичних коефіцієнтів накладаються обмеження – матриця коефіцієнтів  $L$  має бути невід’ємно визначеною, тобто

$$(L_{io})^2 \leq L_{ii}L_{oo}. \quad (3)$$

Описані вище основні положення ЛТДНП покладені в основу теорії термодинамічного аналізу ПП [23, 24].

З аналізу системи (1) зрозуміло, що більш від’ємне значення  $L_{io}$  (порівняно зі значеннями решти коефіцієнтів  $L$ ), то вищий ступінь впливу сили на вході на вихідний потік. Крім того, за більш від’ємних значень  $L_{io}$  збільшується ступінь пригнічення вхідного потоку силою на виході.

Отже, коефіцієнт  $L_{i_0}$  пов'язаний зі ступенем спряження  $q$  між собою вхідного і вихідного процесів у перетворювачі. Для уникнення впливу на  $q$  величин інших кінетичних коефіцієнтів ступінь спряження був визначений як коефіцієнт  $L_{i_0}$ , нормований на коефіцієнти  $L_{ii}$  і  $L_{oo}$  [23]:

$$q = \frac{L_{i_0}}{\sqrt{L_{ii}L_{oo}}} . \quad (4)$$

Відповідно до такого визначення,  $q$  буде від'ємним і набуватиме, зважаючи на (3), значень від -1 до 0.

З метою отримання універсальних характеристик ПЕ у відносних одиницях вводяться ще два показники [23]:

– відношення сил

$$\chi = X_o/X_i ; \quad (5)$$

– феноменологічне співвідношення

$$Z = \sqrt{L_{oo}/L_{ii}} . \quad (6)$$

Пронормувавши вхідний та вихідний потоки на вхідний потік за нульової вихідної сили (коротке замикання), систему рівнянь (1) можна переписати з використанням введених позначень

$$\begin{cases} \frac{J_i}{L_{ii}X_i} = q \cdot (Z\chi) + 1 \\ \frac{J_o}{ZL_{ii}X_i} = (Z\chi) + q \end{cases} , \quad (7)$$

звідки визначається відношення потоків у вигляді

$$j = \frac{J_o}{J_i} = Z \frac{(Z\chi) + q}{q \cdot (Z\chi) + 1} . \quad (8)$$

У виразах (7) та (8) добуток  $(Z\chi)$  є безрозмірною величиною, яка виражає приведені відношення сил. Зміст  $q$  також стає зрозумілим: при  $q = -1$  вихідний потік відрізняється від вхідного завжди в  $-Z$  разів – отже, потоки жорстко (повністю) спряжені. При  $q = 0$  вхідний і вихідний потоки викликаються лише своїми силами і протікають в напрямку їх зменшення, тобто потоки зовсім не спряжені. При значеннях  $q$  від  $-1$  до  $0$  вихідний потік підтримується вхідним потоком у напрямку “під гору”, проте відношення цих потоків змінюється разом зі зміною  $(Z\chi)$ , тобто вхідний та вихідний процеси в цьому випадку частково спряжені.

Важливою характеристикою ПП є термодинамічна ефективність  $\eta$  їх функціонування, тобто відношення швидкості, з якою перетворювач виробляє вихідну вільну енергію, до швидкості, з якою він споживає вхідну вільну енергію. Вираз для  $\eta$  можна легко отримати з (8) та (5) у вигляді

$$\eta = -\frac{J_o X_o}{J_i X_i} = -j\chi = -(Z\chi) \frac{(Z\chi) + q}{q \cdot (Z\chi) + 1} . \quad (9)$$

Графічна залежність (9) при різних значеннях  $q$  наведена на рис. 2. З (9) легко знаходиться оптимальне з погляду термодинамічної ефективності приведені відношення сил

$$(Z\chi)_{\text{opt-}\eta} = -\frac{q}{1 + \sqrt{1 - q^2}} , \quad (10)$$

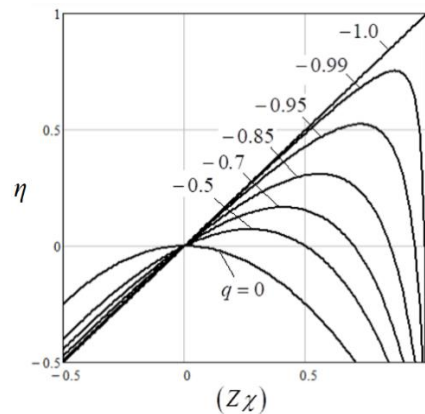


Рис. 2. Залежності ефективності ПП від його нормованого відношення сил при різних значеннях ступеня спряженості  $q$

за якого термодинамічна ефективність має максимальне значення, рівне

$$\eta_{\max} = (Z\chi)_{\text{opt-}\eta}^2. \quad (11)$$

**Математичний опис гідромеханічних закономірностей роботи ЦП як лінійного ПП**

Як відомо, продуктивність помпи залежить від її типу, а також від її робочої швидкості. Продуктивність помпи залежно від її частоти обертання  $n$  можна змоделювати, застосовуючи закони спорідненості, які проявляються в таких рівняннях [4]:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{Q_1}{Q_2} = \lambda, \quad (12)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{Q_1^2}{Q_2^2} = \lambda^2, \quad (13)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{Q_1^3}{Q_2^3} = \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{3/2} = \lambda^3, \quad (14)$$

де  $Q$  – гідравлічна продуктивність помпи ( $\text{м}^3/\text{с}$ );  $H$  – висота стовпа води, яка пропорційна тиску, створюваному помпою ( $\text{м}$ );  $P$  – гідравлічна потужність на виході помпи, число, що виражає відношення двох частот обертання помпи, позначених індексами 1 і 2.

Роботу будь-якої помпи, зокрема й ВП, можна описати залежностями створюваної висоти стовпа води на виході від її продуктивності ( $H - Q$  характеристика) та механічної потужності на її вхідному валі від продуктивності ( $P_m - Q$  характеристика) [3, 4]. Такі характеристики у вигляді експериментально отриманих кривих подають виробники помп зазвичай для номінальної частоти обертання помпи, що й буде використано в цій статті. Ці криві можуть бути добре апроксимовані поліноміальними функціями другого ступеня та показані в таких рівняннях:

$$H(Q) = c_1 + c_2Q + c_3Q^2, \quad (15)$$

$$P_m(Q) = a_1 + a_2Q + a_3Q^2, \quad (16)$$

де  $c$  і  $a$  – коефіцієнти апроксимації.

На основі законів спорідненості (12)–(14) залежності (15) та (16) можна поширити й на інші частоти обертання помпи, як це зроблено в [27]. Якщо позначити відносно порівняно з номінальною кутову швидкість помпи  $\omega_*$ , то отримаємо такі корисні залежності:

$$H(Q, \omega_*) = c_1\omega_*^2 + c_2\omega_*Q + c_3Q^2, \quad (17)$$

$$P_m(Q, \omega_*) = a_1\omega_*^2 + a_2\omega_*Q + a_3Q^2. \quad (18)$$

На рис. 2 криві 1, 2 і 3 показують характер типових залежностей (17) для ВП за зниження її кутової швидкості.

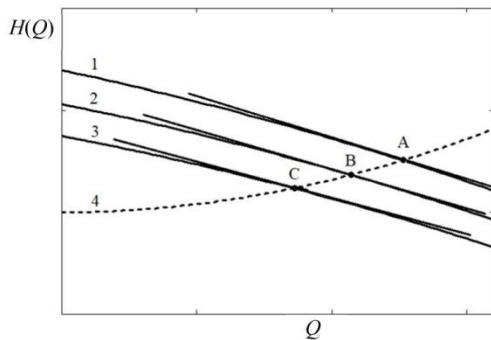


Рис. 3. Типові робочі характеристики гідравлічної системи з ВП

Для отримання робочих точок ВП необхідно побудувати навантажувальну характеристику, яку чинить конкретна гідравлічна мережа, під'єднана до помпи. Типовий вигляд такої характеристики показаний на рис. 3 кривою 4. Точки А, В і С будуть робочими з координатами  $(Q_{\text{оп}}, H_{\text{оп}})$  для навантаженої ВП при зміні її кутової швидкості.

Якщо провести дотичні до кривих  $H(Q, \omega_*)$  в їх робочих точках, як показано на рис. 3, то вони характеризуватимуть лінеаризовану роботу гідравлічної системи в околі цих точок. Лінеаризувавши в цих точках також вхідну характеристику (18), отримуємо лінійний механо-гідравлічний ПП, ха-

характеристики якого мінятимуться зі зміною кутової швидкості ВП. На вході цього перетворювача діє сила у вигляді кутової швидкості вала помпи  $X_i = \omega$ , яка зумовлює вхідний потік у вигляді моменту обертання вала  $J_i = T$ . На виході ПП сила у вигляді створюваного ВП тиску  $p$ , прямо пропорційного до  $H$  ( $p = \rho g H$ , де  $\rho$  – густина води,  $g$  – прискорення вільного падіння) зумовлює об'ємну швидкість потоку води, тобто продуктивність помпи  $Q$ :  $X_o = p$ ,  $J_o = Q$ . Потужності на вході та виході перетворювача рівні  $P_i = \omega T$  та  $P_o = p Q$ .

Аналогічно (1), система лінійних рівнянь, яка описує роботу механо-гідралічного ПП, буде мати такий вигляд:

$$\begin{cases} T = L_{ii}\omega + L_{io}p \\ -Q = L_{oi}\omega + L_{oo}p \end{cases} \quad (19)$$

Визначимо три кінетичні коефіцієнти, які входять до системи рівнянь (19). Для цього запишемо рівняння показаної на рис. 2 дотичної в координатах  $p - Q$ :

$$p = kQ + b, \quad (20)$$

де

$$k = \left. \frac{dp}{dQ} \right|_{Q=Q_{op}} = \rho g \left. \frac{dH}{dQ} \right|_{Q=Q_{op}} = \rho g (a_2\omega_* + 2a_3Q_{op}), \quad (21)$$

$$b = \rho g H_{op} - kQ_{op}. \quad (22)$$

Для  $p = 0$  з другого рівняння системи (19) отримуємо

$$L_{oi} = -\frac{Q|_{p=0}}{\omega}, \quad (23)$$

а з рівняння (20) за цієї умови впливає, що

$$Q|_{p=0} = -\frac{b}{k}. \quad (24)$$

Підставляючи (24) в (23), отримуємо

$$L_{oi} = \frac{b}{k\omega}. \quad (25)$$

Для  $Q = 0$  з рівняння (20) впливає що  $p = b$ . Тоді з другого рівняння системи (19) з врахуванням (25) отримуємо

$$L_{oo} = -L_{oi} \frac{\omega}{p} = -k. \quad (26)$$

Для розрахункової робочої точки з першого рівняння системи (19) отримуємо

$$L_{ii} = \frac{T_{op} - L_{io}p_{op}}{\omega} = \frac{T_{op} - L_{io}\rho g H_{op}}{\omega}, \quad (27)$$

де  $T_{op}$  – значення моменту на валі ВП в робочій точці.

$T_{op}$  можна визначити з характеристики ВП (18):

$$T_{op} = \frac{P_m(Q_{op}, \omega_*)}{\omega} = \frac{a_1}{\omega} \omega_*^2 + \frac{a_2}{\omega} \omega_* Q_{op} + \frac{a_3}{\omega} Q_{op}^2. \quad (28)$$

### Основні показники ефективності роботи дослідної ВП

Для дослідження була взята водопомпова установка, яка має подавати воду зі свердловини у збірник з продуктивністю  $Q = 12 \text{ м}^3/\text{год}$ . Перепад висот від водозабору до збірника становить  $h = 20 \text{ м}$ . Для виконання цього завдання було вибрано водопомпову установку CDX 200/20 фірми EBARA з ВП [28]. Ця установка може комплектуватися однофазним чи трифазним АД, який живиться від промислової електромережі. Основні параметри вибраної помпи наведено у табл. 1.

## Номінальні параметри ВП CDX 200/20

Параметр	Величина
Потужність двигуна, $P_M$ (кВт)	1,5
Частота обертання, $n$ (об/хв)	2800
Гідравлічна продуктивність, $Q$ (м <sup>3</sup> /год)	12
Висота стовпа води, $H$ (м)	20
Діаметр труби, $d$ (дюйм)	1,5

З наведених в [28] експериментальних характеристик цієї ВП шляхом їх апроксимації отримано аналогічні (15) та (16) поліноміальні залежності

$$H(Q) = 33,91 - 0,5528Q - 0,6944 \cdot 10^{-3} Q^2, \quad (29)$$

$$P_m(Q) = 797,5 + 66,58Q - 0,02861Q^2, \quad (30)$$

де змінні мають такі розмірності:  $H$  (м),  $Q$  (м<sup>3</sup>/год),  $P_m$  (Вт).

Гідравлічне навантаження досліджуваної водопомпової системи утворюється зі статичного перепаду висот  $h$  та динамічного перепаду  $h_f$ , що зумовлений гідравлічним тертям води в трубі [10]:

$$H_L = h + h_f. \quad (31)$$

$h_f$  описується таким виразом [10]:

$$h_f = k_f \frac{8L Q^2}{\pi^2 g d^5}, \quad (32)$$

де  $k_f$  – фактор гідравлічного тертя;  $L$  та  $d$  – довжина та діаметр труби, що подає воду.

Для досліджуваної гідравлічної системи прийнято  $L = 20$  м та  $d = 1.5$ " (рекомендовано для даної ВП в [28]). Значення  $k_f = 0.02$  визначено з діаграми Moody [29] для сучасної труби із вказаними параметрами за значень числа Рейнольдса до 120000, що характеризують турбулентний потік води із заданою продуктивністю. У результаті отримано таку навантажувальну характеристику в досліджуваній гідравлічній системі:

$$H_L(Q) = 20 + 0,0318Q^2. \quad (33)$$

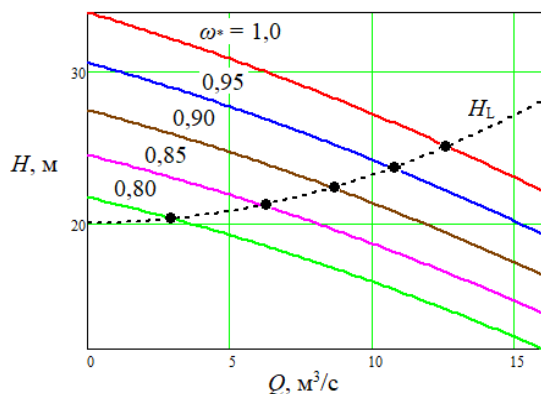


Рис. 4. Розрахункові характеристики досліджуваної гідравлічної системи

На рис. 4 наведено розрахункові характеристики досліджуваної гідравлічної системи, побудовані за залежностями (29), (30), для п'яти значень відносної кутової швидкості ВП  $\omega_*$  (0,80, 0,85, 0,90, 0,95, 1,0) та навантажувальної характеристики (33). У точках перетину робочих характеристик з навантажувальною характеристикою, які позначено на рис. 4 точками, помпа працюватиме в усталених режимах роботи за вказаних кутових швидкостей. Подальше зниження кутової швидкості ВП недоцільне, оскільки ця помпа вже буде нездатна помпувати воду на потрібну висоту. Розрахункова залежність для моменту обертання на валі помпи, отримана за (28), для досліджуваної механо-гідравлічної системи має такий вигляд:

$$T_{op} = 2,7\omega_*^2 + 0,2271\omega_*Q_{op} - 1,626 \cdot 10^{-3} Q_{op}^2. \quad (34)$$

Як видно з рис. 4, в околах робочих точок характеристики  $H(Q)$  мають невеликі відхилення від прямих ліній, тому застосування підходу ЛТДНП до аналізу процесу перетворення потужності в досліджуваній гідравлічній системі є допустимим та достатньо точним. З метою проведення



подальших однотипних числових досліджень, в середовищі MathCad розроблено програму, яка проводить циклічні розрахунки за вищенаведеними виразами (25)–(28) та (4)–(6) і (9). У табл. 2 зібрано розраховані за допомогою цієї програми основні параметри, що характеризують роботу досліджуваного механо-гідралічного ПП в п'яти робочих точках за різних значень відносної кутової швидкості ВП  $\omega_*$ .

Таблиця 2

**Основні параметри досліджуваного механо-гідралічного ПП в п'яти робочих точках за різних кутових швидкостей ВП**

$\omega_*$	$Q_{op}$ м <sup>3</sup> /с	$H_{op}$ Па	$T_{op}$ Н·м	$L_{ii}$ Н·м·с	$L_{oo}$ м <sup>5</sup> /(Н·с)	$L_{io}$ м <sup>3</sup>	$q$	$Z\chi$	$\eta$
1,0	12,64	25,08	5,31	0,0517	$3,35 \cdot 10^{-8}$	$-4,01 \cdot 10^{-5}$	-0,9627	0,6751	0,555
0,95	10,81	23,71	4,58	0,0509	$3,65 \cdot 10^{-8}$	$-4,13 \cdot 10^{-5}$	-0,9573	0,7073	0,546
0,90	8,75	22,43	3,85	0,0504	$4,05 \cdot 10^{-8}$	$-4,29 \cdot 10^{-5}$	-0,9510	0,7470	0,526
0,85	6,18	21,21	3,08	0,0503	$4,62 \cdot 10^{-8}$	$-4,55 \cdot 10^{-5}$	-0,9429	0,8000	0,465
0,80	3,13	20,31	2,28	0,0523	$5,50 \cdot 10^{-8}$	$-5,05 \cdot 10^{-5}$	-0,9379	0,8691	0,323

З наведених в табл. 2 результатів обчислень видно, як змінюються основні вхідні та вихідні параметри ВП ( $Q_{op}$ ,  $H_{op}$  та  $T_{op}$ ) під час зміни відносної кутової швидкості помпи. Це призводить до порівняно невеликих змін величин кінетичних коефіцієнтів  $L_{ii}$  та  $L_{io}$ , тоді як значення  $L_{oo}$  зазнає значніших змін. У кінцевому розрахунку залежності основних безрозмірних параметрів досліджуваного ПП від відносної кутової швидкості помпи простежується чітка закономірність: за зниження  $\omega_*$  ступінь спряження  $q$  знижується, приведені відношення сил  $Z\chi$ , яке визначає робочу точку перетворювача, зростає, а термодинамічна ефективність падає. Усе це добре видно на побудованих за виразом (12) залежностях  $\eta[q, (Z\chi)]$ , які показано на рис. 5, де позначено робочі точки ПП на відповідних кривих  $\eta(Z\chi)$ . З отриманого видно, що зі зниженням кутової швидкості ВП робочі точки зміщуються з лівої спадаючої частини своїх кривих для  $\omega_* = 1,0$  та  $\omega_* = 0,95$  на праву їх частину для  $\omega_* = 0,85$  та  $\omega_* = 0,80$ , і тільки для  $\omega_* = 0,90$  робоча точка є дуже близькою до максимального значення термодинамічної ефективності. Також видно, що за  $\omega_* = 0,80$  тенденція зниження  $\eta$  стрімко зростає, що зумовлює недоцільність роботи ВП вже навіть на цій кутовій швидкості.

Проведені дослідження також показали, що якщо розширити досліджуваний механо-гідралічний ПП, додавши до нього ще й електричний двигун разом зі своїм напівпровідниковим перетворювачем, то в отриманому електрогідралічному ПП отримані закономірності перетворення потужності зберуться. Це пояснюється тим, що втрати потужності в механо-гідралічній системі значно перевищують втрати потужності в електромеханічній системі.

**Дослідження впливу параметрів та режимів роботи ЦП на її енергетичну ефективність**

Отримані вище результати показують важливу особливість досліджуваного механо-гідралічного ПП: як ступінь його спряження  $q$ , так і робоча точка  $Z\chi$ , які безпосередньо визначають термодинамічну ефективність перетворювача, одночасно залежать від параметрів

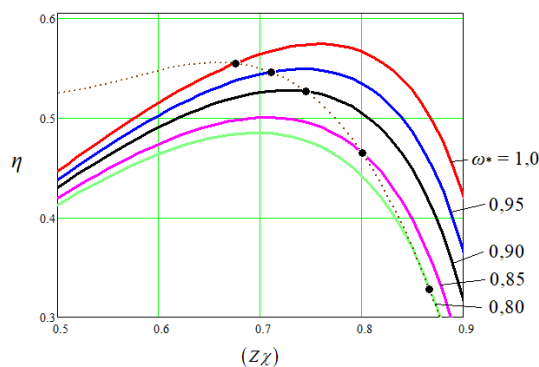


Рис. 5. Залежності  $\eta(Z\chi)$ , отримані для досліджуваної механо-гідралічної системи як ПП, лінеаризованого в точках роботи ВП з різними значеннями відносної кутової швидкості

вибраної ВП та умов її роботи. Тому єдиним способом підвищення енергетичної ефективності роботи ВП в автономній СВПУ прямого привода є обґрунтування вибору помпи з раціональними для заданої задачі параметрами. Для цього необхідно встановити вплив таких параметрів на енергетичну ефективність роботи ВП в гідравлічній системі. Для цього скористаємося досліджуваною в цій праці помпою і дослідимо за допомогою наведеної вище методики, з якими параметрами в гідравлічній системі її доцільно застосувати.

Як показує аналіз, основним параметром гідравлічної системи, в якій має працювати досліджувана ВП із заданою водяною продуктивністю, є гідравлічне навантаження системи (31). На нього впливають два параметри – статичний  $h$  та динамічний  $h_f$  перепади висот підйому води. Останній зумовлений насамперед гідравлічним тертям води в трубі. Отож ми маємо два варіативні параметри гідравлічної системи: статичний перепад висот  $h$  та діаметр труби  $d$ . З використанням створеної програми проведено дослідження впливу цих двох параметрів гідравлічної системи на енергетичну ефективність роботи досліджуваної ВП. Як базовий варіант (base) використано отримані вище результати роботи цієї помпи в гідравлічній системі за  $h = 20$  м та  $d = 1,5''$ . Отримані результати подано на рис. 6.

Як і варто було очікувати, на енергетичну ефективність роботи ВП позитивно впливає як зменшення висоти підйому води, так збільшення діаметра труби, проте ці впливи досить різняться між собою. Як видно з рис. 6, а, зменшення підйому води не лише забезпечує підвищення енергетичної ефективності помпи, а й розширює діапазон робочих швидкостей ВП за заданого мінімального значення цієї ефективності. Так, для досить високого мінімального значення  $\eta_{\min} = 0,4$  для  $h = 23$  м отримуємо  $\omega_{*\min} = 0,89$ , для  $h = 20$  м  $\omega_{*\min} = 0,825$ , а для  $h = 17$  м  $\omega_{*\min} = 0,76$ . Для останнього випадку можна очікувати на розширення роботи автономної СВПУ прямого привода до значень інтенсивності падаючої сонячної радіації в околі 300–350 Вт/м<sup>2</sup>. Збільшення діаметра труби для подачі води не є таким дієвим, як зменшення висоти подачі. Як видно з рис. 6, б, рекомендоване в паспорті для цієї ВП [28] значення  $d = 1,5''$  є доцільним, оскільки його збільшення до величини 1,75" вже не є достатньо дієвим порівняно зі зменшенням до величини 1,25".

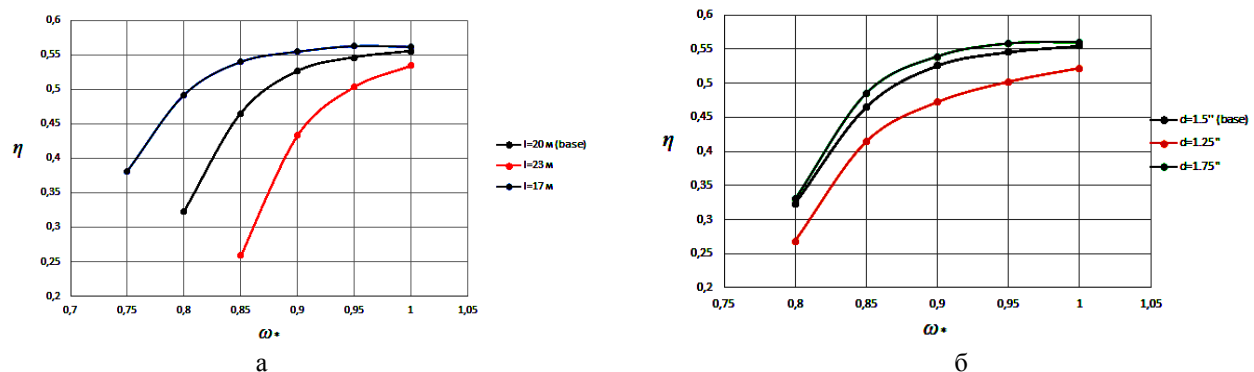


Рис. 6. Залежність енергетичної ефективності роботи досліджуваної ВП від її відносної кутової швидкості в гідравлічній системі з різними параметрами: а – за зміни статичного перепаду висот  $h$ ; б – за зміни діаметра труби  $d$

### Висновки та перспективи подальших досліджень

Перекачування води з використанням сонячної енергії для зрошення та постачання питної води в містах та селах стає дедалі поширенішою технологією не лише для місць з відсутністю або обмеженим постачанням електроенергії, а й для електрифікованих міст і сіл у розвинених країнах. Це пояснюється як бажанням обмежити викиди парникових газів, так і суто економічними мотивами, спричиненими постійним зростанням цін на дизельне паливо та електроенергію. Як показали дослідження, ефективність автономних СУПВ є занадто низькою. По-перше, це пов'язано

з низькою ефективністю самих ФЕП, процес вдосконалення яких постійно триває; однак, з погляду ціна/якість, сподіватися на швидкий прогрес у цьому напрямі не доводиться. По-друге, що менш помітно, ККД самих pomp, що працюють в гідравлічних системах, є невисоким. Різне зниження ефективності ВП особливо помітно в автономних установках прямого привода у випадках зменшення інтенсивності сонячного опромінення.

Розроблена в цій праці на основі ЛТДНП методика математичного моделювання роботи помпи як універсального ПП, що працює в заданій гідравлічній системі, дає змогу побачити робочу точку перетворювача та оцінити можливості підвищення його енергетичної ефективності. Проведені дослідження показали, що найбільш дієвим параметром робочого режиму ВП є висота підйому води. Тому для заданої водяної продуктивності доцільно вибирати помпу, розраховану на вищу, порівняно з номінальним значенням, висоту підйому води. Це не лише безпосередньо збільшить енергетичну ефективність роботи ВП, а й розширить діапазон робочих її швидкостей за неминучого сезонного, добового та погодного зниження інтенсивності сонячної радіації. Все це разом забезпечить значне збільшення річної водяної продуктивності автономних СУПВ прямого привода.

Подальші дослідження в цій тематиці буде спрямовано саме на техніко-економічну оптимізацію автономної СУПВ прямого привода, в якій енергетична ефективність роботи ВП відіграватиме ключову роль.

#### Список літератури

1. Victoria M., Haegel N., Peters I. M., Sinton R., Jäger-Waldau A., del Cañizo C., Breyer C., Stocks M., Blakers A., Kaizuka I., Komoto K., Smets A. Solar photovoltaics is ready to power a sustainable future. *Joule*. 2021. Vol. 5. No. 5. 1041–1056. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.03.005>.
2. Sridhar S., Salkuti S. R. Development and future scope of renewable energy and energy storage systems. *Smart Cities*. 2022. Vol. 5. 668–699. DOI: <https://doi.org/10.3390/smartsities5020035>.
3. Gevorkov L., Domínguez-García J. L., Romero L. T. Review on solar photovoltaic-powered Pumping Systems. *Energies*. 2023. Vol. 16, 94. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16010094>.
4. Sontake V. C., Kalamkar V. R. Solar photovoltaic water pumping system – a comprehensive review, *Renew. Sust. Ener. Reviews*. 2016. Vol. 59. 1038–1067. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.021>.
5. Shukla T., Nikolovski S. A solar photovoltaic array and grid source-fed brushless DC motor drive for water-pumping applications. *Energies*. 2023. Vol. 16. 6133. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16176133>.
6. Mishra A. K., Singh B. Grid interactive single-stage solar powered water pumping system utilizing improved control technique. *IEEE Trans. Sustainable Energy*. 2020. Vol. 11. No. 1. 304–314. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2890670>.
7. Kumar R., Singh B. Brushless DC motor-driven grid-interfaced solar water pumping system. *IET Power Electr.* 2018. Vol. 11. No. 12. 1875–1885. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2017.0812>.
8. Soenen C., Reinbold V., Meunier S., Cherni J. A., Darga A., Dessante P., Quéval L. Comparison of tank and battery storages for photovoltaic water pumping. *Energies*. 2021. Vol. 14. 2483. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14092483>.
9. Shchur I., Lis M., Biletskyi Y. Passivity-based control of water pumping system using BLDC motor drive fed by solar PV array with battery storage system. *Energies*. 2021. Vol. 14. No. 23. 8184. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14238184>.
10. Monís J. I., López-Luque R., Reca J., Martínez J. Multistage bounded evolutionary algorithm to optimize the design of sustainable photovoltaic (PV) pumping irrigation systems with storage. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. No. 3. 1026. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12031026>.
11. Muralidhar K., Rajasekar N. A review of various components of solar water-pumping system: Configuration, characteristics, and performance. *Int. Trans. Electr. Energ. Syst.* 2021. Vol. 31. No. 9. e13002. DOI: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13002>.
12. Mujawar S., Tamboli T., Patel D., Kute S. Solar panel fed BLDC motor for water pumping. *Int. Res. J. Eng. Technol. (IRJET)*. 2020. Vol. 5. 5987–5994. URL: [www.irjet.net](http://www.irjet.net).
13. Kant N., Singh P. Review of next generation photovoltaic solar cell technology and comparative materialistic development. *Mater. Today Proc.* 2021. Vol. 56. No. 6. 3460–3470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.116>.
14. Matam M., Barry V. R., Govind A. R. Optimized reconfigurable PV array based photovoltaic water-pumping system. *Solar Energy*. 2018. Vol. 170. 1063–1073. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.046>.

15. Gupta N., Bhaskar M. S., Kumar S., Almakhlles D. J., Panwar T., Banyal A., Sharma A., Nadda A. Review on classical and emerging maximum power point tracking algorithms for solar photovoltaic systems. *J. Renew. Energy Envir. (JREE)*. 2024. Vol. 11. No. 2. 18–29. DOI: <https://doi.org/10.30501/jree.2024.407775.1650>.
16. Darcy Gnana Jegha A., Subathra M. S. P., Kumar N. M., Ghosh A. Optimally tuned interleaved Luo converter for PV array fed BLDC motor driven centrifugal pumps using whale optimization algorithm – A resilient solution for powering agricultural loads. *Electronics*. 2020. Vol. 9. 1445. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9091445>.
17. Zaky A. A., Ibrahim M. N., Rezk H., Christopoulos E., El Sehiemy R. A., Hristoforou E., Kladas A., Sergeant P., Falaras P. Energy efficiency improvement of water pumping system using synchronous reluctance motor fed by perovskite solar cells. *Int. J. Energy Res.* 2020. Vol. 44. No. 14. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.5788>.
18. Errouha M., Derouich A., Nahid-Mobarakeh B., Motahhir S., El Ghzizal A. Improvement control of photovoltaic based water pumping system without energy storage. *Solar Energy*. 2019. Vol. 190. 319–328. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.024>.
19. Kumar R., Singh B. Single stage solar PV fed brushless DC motor driven water pump. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.* 2017. Vol. 5. No. 3. 1377–1385. DOI: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2017.2699918>.
20. Hilali A., El Ouanjli N., Mahfoud S., Al-Sumaiti A. S., Mossa M. A. Optimization of a solar water pumping system in varying weather conditions by a new hybrid method based on fuzzy logic and incremental conductance. *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 22. 8518. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15228518>.
21. Altımanıa M. R., Elsonbaty N. A., Enany M. A., Gamil M. M., Alzahrani S., Alraddadi M. H., Alsulami R., Alhartomi M., Alghuson M., Alatawi F., Mosaad M. I. Optimal performance of photovoltaic-powered water pumping system. *Mathematics*. 2023. Vol. 11. No. 3. 731. DOI: <https://doi.org/10.3390/math11030731>.
22. Oshurbekov S., Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V., Gevorkov L. Energy consumption comparison of a single variable-speed pump and a system of two pumps: variable-speed and fixed-speed. *Appl. Sci.* 2020. Vol. 10. No. 24. 8820. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10248820>.
23. Westerhoff H. V., van Dam K. Thermodynamics and Control of Biological Free-Energy Transduction. Elsevier, 1987.
24. Demirel Y. Nonequilibrium Thermodynamics: Transport and Rate Processes in Physical, Chemical and Biological Systems, 2nd Edition. Elsevier Science & Technology Books, 2007.
25. Shchur I., Rusek A., Lis M. Optimal frequency control of the induction electric drive based on the thermodynamics of irreversible processes. *Electromechanical and computerized systems*. 2011. No. 3(79). 377–380. URL: <https://eltecs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/751>.
26. Shchur I., Lis M., Biletskyi Y. A non-equilibrium thermodynamic approach for analysis of power conversion efficiency in the wind energy system. *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 13. 5234. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16135234>.
27. Moubarak A., El-Saady G., Ibrahim E.N.A. Variable speed photovoltaic water pumping using affinity laws. *J. Power and Energy Eng.* 2017. Vol. 5. No. 11. 50–71. DOI: <https://doi.org/10.4236/jpee.2017.511005>.
28. Centrifugal Pumps CDX, Pumps catalog and characteristics. URL: <http://ebara-pumpsonline.com/CDX.pdf> (accessed 3 March 2024).
29. de Souza Mendes P. R. A note on the Moody diagram. *Fluids*. 2024. Vol. 9. No. 4. 98. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids9040098>.

### References

1. Victoria, M., Haegel, N., Peters, I. M., Sinton, R., Jäger-Waldau, A., del Cañizo, C., Breyer, C., Stocks, M., Blakers, A., Kaizuka, I., Komoto, K., & Smets, A. (2021). Solar photovoltaics is ready to power a sustainable future. *Joule*, 5, 5, 1041–1056. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.03.005> (in English).
2. Sridhar, S., & Salkuti, S. R. (2022). Development and future scope of renewable energy and energy storage systems. *Smart Cities*, 5, 668–699. DOI: <https://doi.org/10.3390/smartcities5020035> (in English).
3. Gevorkov, L., Domínguez-García, J. L., & Romero, L. T. (2023). Review on solar photovoltaic-powered Pumping Systems. *Energies*, 16, 94. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16010094> (in English).
4. Sontake, V. C., & Kalamkar, V. R. (2016). Solar photovoltaic water pumping system – a comprehensive review, *Renew. Sust. Ener. Reviews*, 59, 1038–1067. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.021> (in English).
5. Shukla, T., & Nikolovski, S. (2023). A solar photovoltaic array and grid source-fed brushless DC motor drive for water-pumping applications. *Energies*, 16, 6133. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16176133> (in English).
6. Mishra, A. K., & Singh, B. (2020). Grid interactive single-stage solar powered water pumping system utilizing improved control technique. *IEEE Trans. Sustainable Energy*, 11, 1, 304–314. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2890670> (in English).

7. Kumar, R., & Singh, B. (2018). Brushless DC motor-driven grid-interfaced solar water pumping system. *IET Power Electr*, 11, 12, 1875–1885. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2017.0812> (in English).
8. Soenen, C., Reinbold, V., Meunier, S., Cherni, J. A., Darga, A., Dessante, P., & Quéval, L. (2021). Comparison of tank and battery storages for photovoltaic water pumping. *Energies*, 14, 2483. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14092483> (in English).
9. Shchur, I., Lis, M., & Biletskyi, Y. (2021). Passivity-based control of water pumping system using BLDC motor drive fed by solar PV array with battery storage system. *Energies*, 14, 23, 8184. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14238184> (in English).
10. Monís, J. I., López-Luque, R., Reca, J., & Martínez, J. (2020). Multistage bounded evolutionary algorithm to optimize the design of sustainable photovoltaic (PV) pumping irrigation systems with storage. *Sustainability*, 12, 3, 1026. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12031026> (in English).
11. Muralidhar, K., & Rajasekar, N. (2021). A review of various components of solar water-pumping system: Configuration, characteristics, and performance. *Int. Trans. Electr. Energ. Syst.*, 31, 9, e13002. DOI: <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13002> (in English).
12. Mujawar, S., Tamboli, T., Patel, D., & Kute, S. (2020). Solar panel fed BLDC motor for water pumping. *Int. Res. J. Eng. Technol. (IRJET)*, 5, 5987–5994. Retrieved from [www.irjet.net](http://www.irjet.net) (in English).
13. Kant, N., & Singh, P. (2021). Review of next generation photovoltaic solar cell technology and comparative materialistic development. *Mater. Today Proc.*, 56, 6, 3460–3470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.116> (in English).
14. Matam, M., Barry, V. R., & Govind, A. R. (2018). Optimized reconfigurable PV array based photovoltaic water-pumping system. *Solar Energy*, 170, 1063–1073. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.046> (in English).
15. Gupta, N., Bhaskar, M. S., Kumar, S., Almakhlés, D. J., Panwar, T., Banyal, A., Sharma, A., & Nadda, A. (2024). Review on classical and emerging maximum power point tracking algorithms for solar photovoltaic systems. *J. Renew. Energy Envir. (JREE)*, 11, 2, 18–29. DOI: <https://doi.org/10.30501/jree.2024.407775.1650> (in English).
16. Darcy Gnana Jegha A., Subathra, M. S. P., Kumar, N. M., & Ghosh, A. (2020). Optimally tuned interleaved Luo converter for PV array fed BLDC motor driven centrifugal pumps using whale optimization algorithm – A resilient solution for powering agricultural loads. *Electronics*, 9, 1445. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9091445> (in English).
17. Zaky, A. A., Ibrahim, M. N., Rezk, H., Christopoulos, E., El Sehiemy, R. A., Hristoforou, E., Kladas, A., Sergeant, P., & Falaras, P. (2020). Energy efficiency improvement of water pumping system using synchronous reluctance motor fed by perovskite solar cells. *Int. J. Energy Res*, 44, 14. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.5788> (in English).
18. Errouha, M., Derouich, A., Nahid-Mobarakeh, B., Motahhir, S., & El Ghzizal, A. (2019). Improvement control of photovoltaic based water pumping system without energy storage. *Solar Energy*, 190, 319–328. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.08.024>.
19. Kumar, R., & Singh, B. (2017). Single stage solar PV fed brushless DC motor driven water pump. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron*, 5, 3, 1377–1385. DOI: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2017.2699918> (in English).
20. Hilali, A., El Ouanjli, N., Mahfoud, S., Al-Sumaiti, A. S., & Mossa, M. A. (2022). Optimization of a solar water pumping system in varying weather conditions by a new hybrid method based on fuzzy logic and incremental conductance. *Energies*, 15, 22, 8518. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15228518> (in English).
21. Altimania, M. R., Elsonbaty, N. A., Enany, M. A., Gamil, M. M., Alzahrani, S., Alraddadi, M. H., Alsulami, R., Alhartomi, M., Alghuson, M., Alatawi, F., & Mosaad, M. I. (2023). Optimal performance of photovoltaic-powered water pumping system. *Mathematics*, 11, 3, 731. DOI: <https://doi.org/10.3390/math11030731> (in English).
22. Oshurbekov, S., Kazakbaev, V., Prakht, V., Dmitrievskii, V., & Gevorkov, L. (2020). Energy consumption comparison of a single variable-speed pump and a system of two pumps: variable-speed and fixed-speed. *Appl. Sci.*, 10, 24, 8820. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10248820> (in English).
23. Westerhoff, H. V., & van Dam, K. (1987). *Thermodynamics and Control of Biological Free-Energy Transduction*. Elsevier (in English).
24. Demirel, Y. (2007). *Nonequilibrium Thermodynamics: Transport and Rate Processes in Physical, Chemical and Biological Systems*, 2nd Edition. Elsevier Science & Technology Books (in English).
25. Shchur, I., Rusek, A., & Lis, M. (2011). Optimal frequency control of the induction electric drive based on the thermodynamics of irreversible processes. *Electromechanical and computerized systems*, 3(79), 377–380. Retrieved from <https://eltecs.op.edu.ua/index.php/journal/article/view/751> (in English).

26. Shchur, I., Lis, M., & Biletskyi, Y. (2023). A non-equilibrium thermodynamic approach for analysis of power conversion efficiency in the wind energy system. *Energies*, 16, 13, 5234. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16135234> (in English).
27. Moubarak, A., El-Saady, G., & Ibrahim, E.N.A. (2017). Variable speed photovoltaic water pumping using affinity laws. *J. Power and Energy Eng.*, 5, 11, 50–71. DOI: <https://doi.org/10.4236/jpee.2017.511005> (in English).
28. Centrifugal Pumps CDX, Pumps catalog and characteristics. URL: <http://ebara-pumpsonline.com/CDX.pdf> (accessed 3 March 2024) (in English).
29. de Souza Mendes, P. R. (2024). A note on the Moody diagram. *Fluids*, 9, 4, 98. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids9040098> (in English).

Yu. O. Biletskyi

Lviv Polytechnic National University,  
Department of Electric Mechatronics and Computerized Electromechanical Systems,  
[yurii.o.biletskyi@lpnu.ua](mailto:yurii.o.biletskyi@lpnu.ua)

#### INCREASING THE EFFICIENCY OF SOLAR WATER PUMPING INSTALLATION BASED ON THE THERMODYNAMIC ANALYSIS OF ENERGY CONVERSION IN A CENTRIFUGAL PUMP

© Biletskyi Yu. O., 2024

One of the promising way to use solar energy is standalone PV solar water pumping systems, which are designed for irrigation and urban/rural water supply instead of grid-connected electric or diesel water pumping systems. The simplest and most common among such solar water pumping systems are direct driven systems that do not require expensive and unreliable storage batteries. However, due to the inevitable seasonal, daily and weather-related reductions in the intensity of incident solar radiation, the frequency of rotation of the electric motor, which drives the pump, decreases, and the hydraulic performance of the pump decreases already in cubic dependence from its speed. All this leads both to the narrowing of the operating range of the intensity of solar radiation by approximately half, and to a sharp decrease in the efficiency of the pump. In order to substantiate the rational parameters of a centrifugal pump, in this paper, the pump is considered as a mechano-hydraulic power converter. To describe the operation of such a converter, the positions of linear non-equilibrium thermodynamics were applied, and the nonlinear static characteristics “head – volumetric flow” were linearized at the operating points of the pump. This approach made it possible to obtain a universal characteristic of the power converter – the dependence of the efficiency of the pump on the dimensionless parameter of the operating mode. The optimal point of maximum efficiency of the converter depends on the dimensionless degree of coupling between its input and output. The research conducted for a real pump operating in a real hydraulic system showed that with a decrease in the frequency of its rotation, all the indicated parameters of the converter change: the degree of coupling decreases, the efficiency decreases, and the operating point gradually moves from the left to the right area of decreasing parts of the thermodynamic efficiency. For the operational calculation of the specified dimensionless parameters and the construction of the corresponding dimensionless characteristics of power converter, a program in the MathCad environment has been developed. With its use, a number of studies were carried out on the influence of the main parameters of the hydraulic system on the efficiency of the centrifugal pump at different frequencies of its rotation. As a result of the conducted research, it is shown that in order to expand the working range of the solar radiation intensity and significantly increase the energy efficiency of the pump in autonomous direct driven solar water pumping systems, it is advisable to use the pump with a nominal height of water rise higher than that set in a specific hydraulic system.

*Keywords: water pumping, solar installation, standalone system, centrifugal pump, efficiency, linear non-equilibrium thermodynamics, power converter.*