



ПОПОВИЧ О.М., докт. техн. наук,
ГОЛОВАНЬ І.В., канд. техн. наук,
 Інститут електродинаміки НАН України, Київ,
ШЕВЧУК С.П., докт. техн. наук,
ПОЛІЩУК В.О., ст.викладач, ІЕЕ НТУУ "КПІ", Київ

КОМПЛЕКСНЕ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ВОДОСХОВИЩ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Отримані залежності та досліджено енергоефективність систем комплексного використання енергетичного потенціалу водосховищ, як джерел потенційної механічної та теплової енергії води. Обґрунтовано доцільність розробки і застосування спеціалізованого електромеханічного обладнання із корисним використанням його теплових втрат і приводом теплових насосів від гідротурбін. Досліджено величину ступеня збільшення доходу енергопостачальника, яка у десятки разів більша, порівняно з реалізацією тільки електричної енергії.

К л ю ч о в і с л о в а: гідроенергетика, енергоефективність, тепловий потенціал, суміщене електромеханічне обладнання.

Дніпровський каскад ГЕС створювався для забезпечення резерву води на потреби виробництва та комунального господарства, вільного судноплавства і як джерело електричної енергії. Валові обсяги виробництва електроенергії ГЕС порівняно невеликі, але їх вклад важливий для забезпечення пікових потреб енергосистеми. На сучасному етапі, в умовах гострого дефіциту енергетичних ресурсів, стрімко зростає значення поновлювальних джерел енергії, зокрема низькопотенційної теплової. Її використання забезпечує потреби у тепловій енергії при суттєвому зменшенні використання органічного палива і теплового забруднення середовища. Підвищення теплового потенціалу до рівня систем теплопостачання здійснюється тепловими насосами, які на одиницю спожитої електричної енергії виробляють у 3...7 рази більше теплової. Ефективне використання низькопотенційної теплової енергії потребує близькості розташування її джерел і споживачів. Наприклад, для теплопостачання Стокгольму використовується станція теплових насосів з потужністю 180 МВт. В якості джерела теплоти використовується морська вода [5].

Потужним джерелом низькопотенційної теплової енергії в умовах України є вода водосховищ Дніпровського каскаду ГЕС, які розміщені біля великих міст і їх систем теплопостачання. Для розробки заходів з використання цього потенціалу слід спиратись на засоби оцінки техніко-економічної ефективності, що дозволить визначити оптимальні співвідношення конструктивних параметрів систем використання низькопотенційної теплової енергії води водосховищ та раціональні конструктивні схеми електромеханічного та теплоенергетичного обладнання.

Комплексні підходи до проектування та формування експлуатаційних режимів технічних систем, до використання сировинних та енергетичних ресурсів часто дозволяють суттєво покращити ефективність виробничого обладнання. Так, у

роботі [2] при інтеграції до єдиного комплексу електромеханічного обладнання вітроенергетичних установок і гідроелектростанцій показано можливість збільшити енергоефективність систем утилізації енергії вітру в 1.6 рази, при значному здешевленні, порівняно із системами на основі вітроелектростанцій і гідроакмулюючих електростанцій за рахунок: перетворення енергії вітру до потенційної енергії стовпа води водосховища без втрат енергоефективності при стабілізації частоти обертання вітротурбіни поворотом лопаток робочих коліс; зменшення кількості етапів взаємного перетворення механічної і електричної енергій; використання наявних потужностей водосховищ та гідрогенераторів.

Метою даної роботи є порівняльна оцінка енергетичних ресурсів водосховищ ГЕС, як джерел електричної і низькопотенційної теплової енергії та аналіз варіантів комплексного використання енергетичного потенціалу водосховищ.

Оцінка енергетичного потенціалу виконується для умов роботи в опалювальний сезон при наявності споживачів теплової енергії. Будемо вважати, що увесь потік води проходить через гідротурбіни. При цьому механічна потужність на валу турбіни становить:

$$P_{m.m} = \frac{dV}{dt} \rho g H \eta_m, \quad (1)$$

де V — об'єм води, що проходить крізь турбіну за одиницю часу t ; ρ — густина води; g — прискорення вільного падіння; H — корисний напір; η_m — ККД турбіни.

Потік води може забезпечити наступну потужність відбору теплової енергії Q_2 :

$$P_{m2} = \frac{dQ_2}{dt} = \frac{dV}{dt} \rho c \Delta T, \quad (2)$$

де $c = 4190$ Дж/(кг·К) — питома теплоємність води, що проходить крізь турбіну за одиницю часу t ;



ΔT – зменшення температури потоку води внаслідок тепловідбору.

Потенціал потоку теплової енергії, яка відбирається від води, можна збільшити тепловим насосом до необхідного рівня. Величина енергії з високим тепловим потенціалом на виході теплового насоса Q_1 при ідеальних процесах дорівнює сумі теплової енергії і механічної $W_{м.т.н}$ на його вході. При цьому між ними існує відоме співвідношення [4]:

$$W_{м.т.н} = Q_2(T_1 - T_2)/T_2, \quad (3)$$

де T_1, T_2 – температури на виході і вході теплового насоса у градусах Кельвіна.

Для порівняльної оцінки енергетичного потенціалу з урахуванням виразів (1)–(3) визначимо питомі потужності, які віднесено до одиниці масової продуктивності потоку води ГЕС. Питома механічна потужність турбіни:

$$P'_{м.т} = gH\eta_m. \quad (4)$$

Питома потужність відбору теплової енергії від потоку води:

$$P'_{m2} = c\Delta T. \quad (5)$$

Питома потужність споживання механічної енергії тепловим насосом:

$$P'_{м.т.н} = c\Delta T(T_1 - T_2)/T_2. \quad (6)$$

Питома потужність теплової енергії на виході теплового насоса:

$$P'_{m1} = c\Delta T(T_1/T_2)\eta_{pe}, \quad (7)$$

де η_{pe} – співвідношення ККД реального та ідеального теплового насосів.

Відповідно до (4), (5), співставлення величин механічної і теплової енергій, які можна отримати від потоку води з масовою продуктивністю 1 кг/с показує, що при зниженні температури на 1 градус тепла потужність становить 4190 Вт, а для отримання механічної потужності такої ж величини потрібен корисний напір 475 м (за умови $\eta_m = 0,9$). Для даних умов, відповідно до виразів (6), (7), робота теплового насоса з підвищення теплового потенціалу з $T_2 = 10^\circ\text{C}$ до $T_1 = 80^\circ\text{C}$ потребує споживання 1036 Вт механічної потужності і забезпечує отримання 4442 Вт теплової потужності високого потенціалу (за умови $\eta_{pe} = 0,85$). Це еквівалентно спалюванню за секунду 0,156 дм^3 природного газу (теплотворна здатність газу – $C = 33500$ кДж/ м^3 , ККД спалювання – 0,85).

Для продуктивності 100 $\text{м}^3/\text{с}$ (менше четвертої частини стоку Дніпра біля Києва восени) при зниженні теплового потенціалу води на 1 градус можна отримати за місяць обсяг тепла, який

еквівалентний спалюванню 41,6 млн. м^3 газу (на рівні 1% місячного споживання газу Україною у опалювальний сезон). Необхідна для цього вихідна тепла потужність теплового насоса – 444 МВт, механічна потужність на вході теплового насоса – 104 МВт. Механічна потужність (4) при напорі 11,5 м (Київське водосховище) становить 10,2 МВт (прийнято, що 5% напору витрачається на подолання гідравлічних втрат).

Порівняльна оцінка систем з використанням енергетичного потенціалу водосховищ, у тому числі, як джерел низькопотенційної теплової енергії, повинна здійснюватись за загальним для всіх цих систем критерієм. У якості такого критерію прийнято величину коефіцієнта енергоефективності, як співвідношення корисної дії системи до спожитої нею енергії. Корисну дію доцільно оцінити за вартістю доставлених споживачу енергетичних ресурсів, спожиту енергію оцінимо за потенційною енергією води з водосховища. Аналогічно коефіцієнт енергоефективності можна визначити за питомими потужностями, як (4)–(7). Коефіцієнт енергоефективності при використанні лише механічної енергії води:

$$K_{еef}^M = C_e g H_B \eta_{зидр} \eta_m \eta_{зен} \eta_{ем} / g H_B = \\ = C_e \eta_{зидр} \eta_m \eta_{зен} \eta_{ем}, \quad (8)$$

де $H_B = H/\eta_{зидр}$ – різниця висот стовпів води верхнього і нижнього б'єфів водосховища; $\eta_{зидр}$ – ККД, що враховує втрату енергії потоку внаслідок тертя; $\eta_{ем}$ – ККД електрогенератора; $\eta_{зен}$ – ККД електричної мережі; C_e – вартість електричної енергії з урахуванням зонності тарифу.

Оцінка енергоефективності за вартістю доставлених споживачу енергетичних ресурсів повинна проводитись з урахуванням втрат енергії на циркуляцію води у системі тепlopостачання. Потужність тепловідбору (2), яка змінюється на виході теплового насоса відповідно до (7), дорівнює потужності теплової мережі, яка також визначається виразом (2) за умови використання перепаду температур прямої і зворотної труб теплової мережі ΔT_M та її продуктивності $(dT/dt)_{LM}$:

$$\frac{dV}{dt} \rho c \Delta T \frac{T_1}{T_2} \eta_{pe} = \left(\frac{dV}{dt} \right)_{LM} \rho c \Delta T_M. \quad (9)$$

Визначивши з (9) об'ємну продуктивність теплової мережі можна отримати вираз питомої потужності споживання електричної енергії двигуном циркуляційного насоса теплової мережі:

$$P'_H = \frac{T_1 \Delta T \eta_{pe} g H_{LM}}{T_2 \Delta T_{LM} \eta_H \eta_{дн}}. \quad (10)$$



де H_{LM} – втрата напору у тепловій мережі; $\eta_{\partial n}$, η_n – ККД двигуна та насоса теплової мережі.

При визначенні коефіцієнту енергоефективності для випадку використання механічної і теплової енергії води, вираз (8) корегується: додаванням до чисельника вартості питомої теплової енергії у споживача з виходу теплового насосу, яка визначається з використанням виразу (7); відніманням від чисельника вартості питомої електричної енергії, яка споживається з електромережі для живлення двигуна компресора теплового насосу і двигуна гідравлічного насосу системи тепlopостачання споживача. Ці енергії визначаються з використанням виразів (6), (10) відповідно. Після перетворень отримаємо:

$$K_{eff1}^{M,t} = C_e \eta_{zidp} \eta_m \eta_{zen} \eta_{em} + (c\Delta T \frac{T_1}{T_2} \eta_{pe} \eta_{lm} C_t - c\Delta T \frac{T_1 - T_2}{T_2 \eta_{\partial k} \eta_k} C_e - \frac{T_1 \Delta T \eta_{pe} g H_{LM}}{T_2 \Delta T_{lm} \eta_n \eta_{\partial n}} C_e) / g H_B \quad (11)$$

де η_{em} – ККД теплової мережі; C_t – вартість теплової енергії; $\eta_{\partial k}$, η_k – ККД двигуна та компресора теплового насосу.

Ефективність системи використання низькопотенційної теплової енергії води водосховища можна підвищити за умови, якщо механічну енергію для роботи теплового насоса отримати з валу гідравлічної турбіни. При цьому відбувається оптимізація енергетичних потоків – зменшуються втрати внаслідок оберненого перетворення механічної і електричної енергій.

Частка енергії з виходу турбіни у споживанні механічної енергії тепловим насосом залежить від величини напору, теплової енергії води. Для такої системи вираз коефіцієнта енергоефективності порівняно з (11) змінюється частковою взаємною компенсацією механічних потужностей із першої та третьої складових у (11):

$$K_{eff2}^{M,t} = \frac{c\Delta T T_1}{g H_B T_2} \eta_{pe} \eta_{lm} C_t - (c\Delta T \frac{T_1 - T_2}{T_2 g H_B} - \eta_{zidp} \eta_m \eta_k) \frac{C_e}{\eta_{\partial k} \eta_k} - \frac{T_1 \Delta T \eta_{pe} C_e H_{LM}}{T_2 \Delta T_{lm} \eta_n \eta_{\partial n} H_B}, \quad (12)$$

у

даному виразі добуток характеризує частку механічної потужності з валу турбіни, яка перетворюється у корисну механічну потужність на вході у тепловий насос.

Розглянуті варіанти системи, ефективність яких оцінюється виразами (11), (12), передбача-

ють використання серійних компресорних та насосних установок з відводом теплових втрат у навколишнє середовище. Утилізація таких теплових втрат у технологічному процесі дозволяє підвищити енергоефективність [1, 3]. Це досягається розробкою і використанням суміщених перетворювачів енергії, які вбудовано до технологічної установки для ефективно передачі теплових втрат середовищу, що обробляється. Вираз для оцінки ефективності таких систем отримано додаванням до другої складової (11) теплових втрат насосної і компресорної установок:

$$K_{eff3}^{M,t} = ((c\Delta T \frac{T_1}{T_2} \eta_{pe} + \frac{1 - \eta_{\partial k} \eta_k}{\eta_{\partial k} \eta_k} c\Delta T \frac{T_1 - T_2}{T_2} + \frac{1 - \eta_n \eta_{\partial n}}{\eta_n \eta_{\partial n}} \cdot \frac{T_1 \Delta T \eta_{pe} g H_{LM}}{T_2 \Delta T_{lm}}) \eta_{lm} C_t - c\Delta T \frac{T_1 - T_2}{T_2 \eta_{\partial k} \eta_k} C_e - \frac{T_1 \Delta T \eta_{pe} g H_{LM}}{T_2 \Delta T_{lm} \eta_n \eta_{\partial n}} C_e) / g H_B + C_e \eta_{zidp} \eta_m \eta_{zen} \eta_{em}. \quad (13)$$

Об'єднання перелічених способів підвищення ефективності систем використання низькопотенційної теплової енергії води водосховища дозволяє ще збільшити корисну дію системи, але слід враховувати, що теплові втрати двигуна компресорної установки зменшуються із зменшенням його потужності внаслідок прямого використання механічної енергії з валу турбіни:

$$K_{eff4}^{M,t} = \left(\frac{c\Delta T T_1}{T_2 g H_B} \eta_{pe} + \frac{1 - \eta_{\partial k} \eta_k}{\eta_{\partial k} \eta_k} c\Delta T \frac{T_1 - T_2}{T_2 g H_B} - \frac{1 - \eta_{\partial k} \eta_k}{\eta_{\partial k} \eta_k} \eta_{zidp} \eta_m + \frac{1 - \eta_n \eta_{\partial n}}{\eta_n \eta_{\partial n}} \frac{T_1 \Delta T \eta_{pe} H_{LM}}{T_2 \Delta T_{lm} H_B} \right) \eta_{lm} C_t - \left(c\Delta T \frac{T_1 - T_2}{T_2 g H_B} - \eta_{zidp} \eta_m \eta_k \right) \frac{C_e}{\eta_{\partial k} \eta_k} - \frac{T_1 \Delta T \eta_{pe} C_e H_{LM}}{T_2 \Delta T_{lm} \eta_n \eta_{\partial n} H_B}. \quad (14)$$

Отримані залежності (8), (11)–(14) дозволяють визначити співвідношення вартості енергії, яку доставлено споживачу і потенційної енергії води. Залежності дозволяють провести дослідження при варіюванні величиною напору ГЕС, умовами та рівнями теплопереносу, співвідношеннями ціни на електричну і теплову енергію (з урахуванням зонності тарифу), енергоефективністю роботи перетворювачів енергії системи.

Для досягнення поставленої мети порівняльної оцінки ефективності варіантів використання енергетичних ресурсів водосховища дослідимо співвідношення виразів (11)–(14) і (8). Вони показують ступінь зміни грошового доходу постачальника енергоресурсів при використанні теплового потенціалу води у порівнянні із використан-

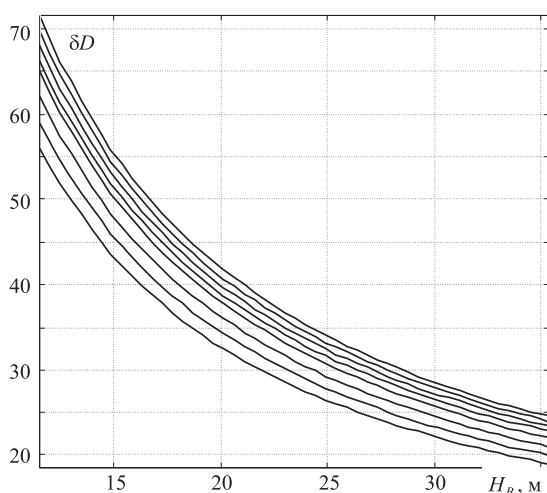


Рис. 1. Ступінь збільшення грошового доходу при використанні теплового потенціалу води

ням лише її потенційної енергії. На Рис. 1 наведено залежності:

$$\delta D_1 = K_{\text{еф}1}^{M,t} / K_{\text{еф}}^M; \delta D_4 = K_{\text{еф}4}^{M,t} / K_{\text{еф}}^M, \quad (15)$$

у функції величини напору водосховища для варіанту використання серійного електромеханічного обладнання, δD_1 (нижні чотири графіки) і спеціалізованого, δD_4 (верхні чотири графіки). Кожне сімейство чотирьох графічних залежностей отримано при варіюванні величиною високої температури на виході теплового насоса, відповідно зверху до низу у градусах Цельсія: 50, 60, 70, 80. Нижня межа зміни напору (11,5 м) відповідає Київський ГЕС, верхня (35,4 м) – ДніпроГЕСу. Розрахунки проведено при наступних вихідних умовах: $\eta_{\text{зідр}} = 0,85$; $\eta_{\text{зен}} = 0,92$; $\eta_{\text{ем}} = 0,9$; $\eta_m = 0,9$; $\eta_{\text{тм}} = 0,8$; $\eta_{\text{пе}} = 0,85$; $\eta_{\text{дк}} = 0,9$; $\eta_k = 0,8$; $\eta_{\text{дн}} = 0,9$; $\eta_n = 0,85$; $C_e = 1$; $C_t = 1$; $H_{\text{тм}} = 60$ м; $T_1 = 50, 60, 70, 80^\circ\text{C}$; $T_2 = 10^\circ\text{C}$; $\Delta T = 2^\circ$; $\Delta T_{\text{тм}} = 5^\circ$.

Врахування особливостей пікового режиму ГЕС при оцінці комплексного використання енергетичних ресурсів водосховищ здійснюється зміною співвідношення вартості електричної (у період максимуму) і теплової енергій у виразах коефіцієнтів енергоефективності. Двократне збільшення пікової вартості електроенергії відповідно зменшить ступінь збільшення грошового доходу при використанні теплового потенціалу води, але залишить його на дуже високому рівні (Рис. 1). Крім того слід відзначити, що при піковому режимі ГЕС доцільно застосовувати додаткову ємність – тепловий акумулятор у системі циркуляції теплоносія.

Висновки.

1. Отримані залежності зміни величини коефіцієнтів енергоефективності використання енергетичного потенціалу води водосховищ показу-

ють, що використання теплового потенціалу води водосховищ Дніпровського каскаду у опалювальний період дозволяє збільшити грошовий дохід енергопостачальника у діапазоні 20...70 разів.

2. Для умов м. Києва обсяги низькопотенційної теплової енергії води Дніпра можуть бути достатніми для припинення використання газу на потреби опалення.

3. Використання спеціалізованого електромеханічного обладнання систем утилізації теплового потенціалу води водосховищ підвищує ефективність цих систем до 20% за рахунок корисного використання теплових втрат обладнання і оптимізації енергетичних потоків (зменшення втрат внаслідок оберненого перетворення механічної і електричної енергій) при отриманні механічної енергії для роботи теплового насоса з валу гідравлічної турбіни. Розробка такого спеціалізованого обладнання є актуальною задачею.

4. Отримані вирази коефіцієнтів енергоефективності використання енергетичного потенціалу води водосховищ враховують структуру і величини параметрів даних систем і можуть бути використаними при їх оптимальному проектуванні.

5. Ефективність систем утилізації теплового потенціалу води водосховищ підвищується із зниженням відстані до споживача теплової енергії і із зниженням температури теплоносія системи опалення. Дану особливість слід враховувати при виборі об'єктів для пілотних проектів таких систем, наприклад, для тепличних господарств біля водосховищ.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Заблудский Н.Н.* Полифункциональные электромеханические преобразователи технологического назначения: [монография] / Заблудский Н.Н. – Алчевск: ДонГТУ, 2008. – 340 с.
2. *Мазуренко Л.І.* Підвищення енергоефективності систем утилізації енергії вітру при інтеграції вітроенергетичних установок і гідроелектростанцій / Мазуренко Л.І., Попович О.М., Шевчук С.П., Поліщук В.О. // *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 2014. – № 1(35). – С. 21–26.
3. *Пат.* на корисну модель 77357 Україна, МПК H02K 17/00, H05B 6/10. Мотор-насос трансформаторно-асинхронної системи для транспортування та нагрівання рідини / О.М.Попович, А.П.Вербовий, І.В.Головань; заявл. 01.08.2012; опубл. 11.02.2013, Бюл. № 3.
4. *Шевчук С.П.* Насосні, вентиляторні та пневматичні установки: [підруч. для студ. вищ. навч. закл.] / Шевчук С.П., Попович О.М., Світлицький В.М. – К.: НТУУ "КПІ", 2010. – 308 с.
5. *Zogg M.* History of Heat Pumps. Swiss Contributions and International Milestones. – Oberburg: Process and Energy Engineering CH-3414, Switzerland. 2008. – 114 p.