

УДК 621.31

DOI: 10.15587/2706-5448.2020.220269

## КОМПЛЕКСНЕ МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОАСОСНОГО ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ МЕРЕЖЕВОЇ ВІТРО-СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ

Чайковська Є. Є.

*Об'єктом дослідження є підтримка функціонування теплоасосного енергопостачання на основі мережевої вітро-сонячної електричної системи з використанням гібридних сонячних колекторів.*

*Одним з найбільших проблемних місць є узгодження виробництва та споживання енергії в умовах розподіленої генерації енергії з використанням відновлюваних джерел. Приєднання до Smart Grid технологій дозволить запобігти піковим навантаженням енергетичної системи в умовах регулювання напруги при підключенні теплоасосного енергопостачання.*

*Розроблено інтегровану систему підтримки функціонування теплоасосного енергопостачання на основі прогнозування зміни температури місцевої води при вимірюванні напруги від гібридних сонячних колекторів на вході в мережевий інвертор, напруги на виході із перетворювача частоти та частоти напруги. Прийняття випереджуючих рішень на підтримку температури місцевої води щодо зміни потужності електродвигуна компресора теплового насоса базується на встановленні співвідношення напруги на вході в мережевий інвертор та напруги на виході із перетворювача частоти, що вимірюються. Зміна витрати холодагенту щодо частотного управління електродвигуном компресора теплового насоса відбувається в узгодженні зі зміною теплової потужності низькопотенційного джерела енергії – нижньої секції двосекційного бака-накопичувача, підключеного до гібридних сонячних колекторів. Запропоновано архітектуру, математичне обґрунтування архітектури технологічної системи, математичне обґрунтування підтримки функціонування теплоасосного енергопостачання. Основою технологічної системи є динамічна підсистема, що включає наступні складові: вітроенергетичну установку, фотоелектричні сонячні панелі, гібридні сонячні колектори, мережевий інвертор, двосекційний бак-накопичувач, тепловий насос, перетворювач частоти. Визначено режимні параметри теплоасосної системи, параметри теплообміну в конденсаторі теплового насосу, постійні часу та коефіцієнти математичної моделі динаміки температури місцевої води для встановлених рівнів функціонування щодо узгодження виробництва та споживання енергії.*

**Ключові слова:** вітро-сонячна електрична система, фотоелектричні сонячні панелі, гібридні сонячні колектори, тепловий насос, мережевий інвертор.

## **1. Вступ**

Розподілена генерація електричної енергії з використанням відновлюваних джерел потребує інтелектуальних систем управління потоками електричної енергії та споживанням [1, 2]. Smart Grid технології, системи управління попитом та зберіганням енергії – нові складові щодо інтеграції розподіленої генерації енергії до енергетичної системи. Так, в роботі [3] запропоновано управління споживанням електричної енергії шляхом обміну інформацією в реальному часі. Впровадженню стохастичної оптимізації розподіленої генерації електричної енергії з використанням нечіткої логіки присвячена робота [4]. В роботі [5] запропонована кіберфізична система управління розподіленою генерацією електричної енергії, що базується на теорії консенсусного протоколу. В роботі [6] запропоновано інтелектуальний перетворювач щодо регулювання напруги шляхом поглинання чи подачі реактивної потужності. В роботі [7] представлено модель встановлення пріоритетності чутливості до змін даних, що базується на точному вимірюванні споживання електричної енергії. В плані підключення до інтелектуальних систем управління в роботі [8] запропоновано прогнозування зміни напруги при вимірюванні температури електроліту в об'ємі акумуляторів. Розроблено енергозберігаючу технологію функціонування акумуляторної батареї, що не допускає перезаряд та не допустимий розряд на основі узгодження електрохімічного та дифузійного процесів розряду та заряду. Прогнозуванню зміни параметрів щодо підключення до Smart Grid технологій присвячена робота [9], в якій представлено інтегровану систему підтримки функціонування вітро-сонячної електричної системи на основі прогнозування зміни ємності акумуляторної батареї. Відбувається вимірювання напруги на вході в гібридний контролер заряду та на виході із інвертора. Прийняття випереджуючих рішень на зміну потужності теплоелектроакумулятора базується на встановленні співвідношення напруги на вході в гібридний контролер заряду та на виході із інвертора при вимірюванні частоти напруги. Забезпечено зміну витрати та температури води, що нагрівається, зменшивши термін заряду до 30 %, на основі зміни числа обертів електродвигуна циркуляційного насоса.

Актуальним подальшим розвитком в цьому напрямі є комплексне математичне моделювання теплонасосного енергопостачання щодо прогнозування зміни температури місцевої води у складі мережевої вітро-сонячної електричної системи з використанням гібридних сонячних колекторів.

## **2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит**

*Об'єктом дослідження* є підтримка функціонування теплонасосного енергопостачання на основі мережевої вітро-сонячної електричної системи з використанням гібридних сонячних колекторів. До складу мережевої вітро-сонячної електричної системи потужністю 10 кВт входять наступні складові:

- вітроенергетична установка типу EUROWIND2 (Україна);
- фотоелектричні сонячні панелі та гібридні сонячні панелі типу ATMOSFERA-F2PV (Україна).

Теплонасосна система – Commotherm hybrid tower WW, Split DeLuxe (Австрія) теплопродуктивністю 5,7 кВт обладнана двосекційним баком-накопичувачем, нижня секція якого об'ємом 200 л, використана у якості низькопотенційного джерела енергії, підключеного до гібридних сонячних колекторів. Встановлено наступні рівні функціонування теплонасосної системи щодо зміни температури холодагенту на вході в конденсатор та на виході із конденсатора:

- перший рівень: 45–40,5 °С;
- другий рівень: 50–45,5 °С;
- третій рівень: 55–50,5 °С;
- четвертий рівень: 60–55,5 °С.

Вони відповідають зміні температури місцевої води: 35–40 °С; 40–45 °С; 45–50 °С; 50–55 °С.

Температура низькопотенційного джерела енергії – розчину етиленгліколю на виході із випарника теплового насоса складає: 16,3 °С, 12,3 °С, 8,6 °С, 4,9 °С відповідно встановленим рівням функціонування щодо підігріву до температури 20 °С.

Одним з найбільших проблемних місць є узгодження виробництва та споживання енергії в умовах розподіленої генерації енергії з використанням відновлюваних джерел. Приєднання до Smart Grid технологій дозволить запобігти піковим навантаженням енергетичної системи в умовах регулювання напруги при підключенні теплонасосного енергопостачання.

### **3. Мета та задачі дослідження**

*Мета дослідження* – комплексне математичне моделювання теплонасосного енергопостачання у складі мережевої вітро-сонячної електричної системи з використанням гібридних сонячних колекторів.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Розробити архітектуру технологічної системи та математичне обґрунтування архітектури, основою якої є інтегрована динамічна підсистема.
2. Розробити математичне обґрунтування підтримки функціонування теплонасосного енергопостачання на основі прийняття випереджуючих рішень на зміну потужності електродвигуна компресора теплового насоса щодо підтримки температури місцевої води.
3. Розробити інтегровану систему підтримки зміни температури місцевої води на основі частотного управління теплонасосним енергопостачанням у складі мережевої вітро-сонячної електричної системи.

### **4. Дослідження існуючих рішень проблеми**

Відомі методи удосконалення теплонасосних систем, що базуються на статичному рівні дослідження – економічний, ексергетичний, термoeкономіки – ускладнюють функціонування теплонасосних систем у зв'язку із неможливістю узгодити виробництво та споживання. Так, в роботі [10] на основі порівняльного аналізу енергетичного та ексергетичного методів віддано перевагу ексергетичному

методу. Оцінено вплив витрати холодагенту на потужність компресора. А в роботі [11] виконано математичне моделювання складових теплонасосної системи з метою комплексного моделювання, але без можливості використання в умовах функціонування. В даній роботі започатковано використання динамічного підходу щодо математичного моделювання, але лише з метою стабілізації систем управління. Динамічному підходу щодо оптимізації теплонасосних систем присвячена робота [12]. Встановлено вплив інтенсифікації теплообміну на продуктивність теплонасосної системи, але з використанням математичних моделей із зосередженими параметрами. Оцінка зміни параметрів тільки за часом, не надає якісної оцінки зміни параметрів технологічного процесу. Для можливості зменшення терміну використання зовнішньої електричної мережі щодо функціонування теплонасосних систем автори пропонують підключення, наприклад, сонячних панелей [13]. В цій роботі представлено також статичний рівень дослідження щодо впливу зміни сонячної радіації на підтримку потужності компресора. В роботі [14] запропонована технологічна схема теплонасосного енергопостачання щодо застосування нагрівача теплового насосу від сонячного двигуна. Визначена можливість підняття тиску всмоктування компресора та підвищення ефективності функціонування теплонасосної системи з використанням енергетичних та ексергетичних методів, але також на статичному рівні. Відомі, крім статичних моделей, і такі [15], що ставлять своєю метою керування теплонасосними системами з використанням інтелектуальних мереж, Але запропоновані в цій роботі засоби вимагають вимірювання параметрів процесу. Такий підхід не може бути використаний для прийняття випереджуючих рішень на підтримку функціонування теплонасосних систем. Так, в роботі [16] представлено інтегровану Smart Grid систему, що базується на прогнозуванні зміни коефіцієнта потужності когенераційної системи з використанням теплонасосного енергопостачання біогазової установки, низькопотенційним джерелом енергії для якого є збродене сусли. Запропоновано вимірювати напругу на вході в інвертор, на виході із інвертора та оцінювати їх співвідношення при вимірюванні частоти напруги. Прийняття випереджуючих рішень на зміну потужності теплового насоса та кількості пластин теплообмінника контуру охолодження двигуна дозволяє підтримувати напругу на вході в інвертор та температуру води, що нагрівається.

Існують різні джерела низькопотенційної енергії щодо використання у теплонасосному енергопостачанні. Так, зовнішнє повітря, як низькопотенційне джерело енергії, є достатньо доступним, але зміна температури повітря ускладнює підтримку функціонування теплонасосних систем [17]. Теплові насоси типу ґрунт–вода є найбільш поширені, але їх використання не повинно порушувати природну релаксацією ґрунту в неопалювальний період. Більш того, такі системи потребують спорудження спеціальних ґрунтових теплообмінників щодо підігріву розсолу, що подається у випарник теплового насоса [18]. Інтенсифікації процесу теплообміну, наприклад, присвячена робота [19], в якій представлено спеціально розроблений спіральний теплообмінник та встановлено оптимальні конструктивні параметри: довжину та діаметр.

В цьому напрямі перспективним подальшим розвитком є комплексне моделювання теплонасосного енергопостачання у складі мережевої вітро-сонячної електричної системи з використанням гібридних сонячних колекторів для заряду низькопотенційного джерела енергії – нижньої секції двосекційного бака-накопичувача. Використання гібридних сонячних колекторів для низькопотенційного джерела енергії на основі нижньої секції бака-накопичувача потребує узгодження функціонування динамічних систем: низькопотенційне джерело енергії – випарник, випарник-компресор, компресор-конденсатор на основі прогнозування зміни температури місцевої води. Так, в роботі [20] розроблено інтегровану систему підтримки функціонування теплонасосного енергопостачання на основі прогнозування зміни температури місцевої води. Дана система базується на вимірюванні температури холодагенту на виході із конденсатора у співвідношенні з вимірюваним тиском випаровування, що входять до складу аналітичних визначень витрати холодагенту та числа обертів електродвигуна компресора. Але для даних умов необхідно забезпечити встановлення співвідношення напруги на вході в мережевий інвертор від гібридних сонячних колекторів на напруги на виході із перетворювача частоти при вимірюванні частоти напруги. Це надасть можливість упереджено впливати на зміну температури місцевої води.

## 5. Методи дослідження

З використанням методологічного, математичного та логічного обґрунтування архітектури технологічних систем [16] запропоновано архітектуру та математичне обґрунтування архітектури (1) технологічної системи теплонасосного енергопостачання мережевої вітро-сонячної електричної системи.

$$\begin{aligned}
 WSESHP(\tau) = & \\
 = & \left\{ \left[ \begin{array}{l} IDS(\tau)(PIDS(\tau)\langle x_0(\tau), x_1(\tau), x_2(\tau), f(\tau), K(\tau), y(\tau, z), d(\tau) \rangle), \\ Z(\tau), PIDS(\tau), R(\tau), (PB_i(\tau) \\ \langle x_1(\tau), f_i(\tau), K_i(\tau), y_i(\tau) \rangle), \end{array} \right] \right\}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

де  $WSESHP(\tau)$  – мережева вітро-сонячна електрична система з використанням теплонасосного енергопостачання;  $IDS(\tau)$  – інтегрована динамічна підсистема (вітроенергетична установка, фотоелектричні сонячні панелі, гібридні сонячні колектори, мережевий інвертор, тепловий насос, двосекційний бак-накопичувач, нижня секція двосекційного бака-накопичувача, перетворювач частоти);  $PIDS(\tau)$ ,  $PB(\tau)$  – властивості складових технологічної системи;  $\tau$  – час, с;  $z$  – просторова координата осі конденсатора, що співпадає з напрямком потоку руху середовища, м;  $x(\tau)$  – впливи (зміна сонячної радіації, швидкості вітру, зміна споживання електричної енергії та теплоти);  $f(\tau)$  – параметри, що вимірюються (напруга на вході

в мережевий інвертор від гібридних сонячних колекторів, напруга на виході із перетворювача частоти, частота напруги, тиск випарування, тиск конденсації);  $K(\tau)$  – коефіцієнти математичного опису динаміки температури місцевої води;  $y(\tau, z)$  – вихідні параметри (температура місцевої води);  $d(\tau)$  – динамічні параметри зміни температури місцевої води;  $Z(\tau)$ ,  $R(\tau)$  – логічні відносини в  $IDS(\tau)$ ,  $WSESHP(\tau)$ , відповідно. Індокси:  $i$  – число елементів технологічної системи; 0, 1, 2 – початковий стаціонарний режим, зовнішній, внутрішній характер впливів.

З використанням методологічного, математичного та логічного обґрунтування підтримки функціонування енергетичних систем [16] запропоновано математичне обґрунтування підтримки функціонування теплонасосного енергопостачання (2) у складі мережевої вітро-сонячної електричної системи з використанням гібридних сонячних колекторів.

$$SFHPWSES(\tau) = \left\{ \begin{array}{l} (D(P(\tau), MM(\tau, z), AI(\tau, z), C(\tau), LC(\tau)) \\ \langle x_0(\tau), x_1(\tau), x_2(\tau), f(\tau), K(\tau), y(\tau, z), d(\tau), FI(\tau) \rangle, \\ LMD(\tau), MD(\tau), NC(\tau), S(\tau), LS(\tau) \\ \langle f(\tau), K(\tau), y(\tau), d(\tau), FI(\tau) \rangle \\ (P(\tau)), R(\tau), (P_i(\tau) \langle x_1(\tau), f_i(\tau), K_i(\tau), y_i(\tau) \rangle)) \end{array} \right\}, \quad (2)$$

де  $SFHPWSES(\tau)$  – підтримка функціонування теплонасосного енергопостачання у складі мережевої вітро-сонячної електричної системи;  $D(\tau)$  – інтегрована динамічна підсистема (вітроенергетична установка, фотоелектричні сонячні панелі, гібридні сонячні колектори, мережевий інвертор, двосекційний бак-накопичувач щодо гарячого водопостачання та опалення, теплонасосна система: нижня секція двосекційного бака-накопичувача – випарник щодо використання гібридних сонячних колекторів для заряду низькопотенційного джерела енергії; випарник-компресор; компресор-конденсатор, перетворювач частоти);  $P(\tau)$  – властивості елементів  $SFHPWSES(\tau)$ ;  $MM(\tau, z)$  – комплексне математичне моделювання динаміки зміни температури місцевої води;  $AI(\tau, z)$  – еталонна інформація щодо оцінки зміни температури місцевої води;  $C(\tau)$  – контроль працездатності інтегрованої динамічної системи;  $MD(\tau)$  – прийняття рішень на зміну потужності електродвигуна компресора теплового насоса;  $S(\tau)$  – ідентифікація стану теплонасосної системи;  $LC(\tau)$ ,  $LMD(\tau)$ ,  $LS(\tau)$  – логічні відносини в  $C(\tau)$ ,  $MD(\tau)$ ,  $S(\tau)$ , відповідно;  $FI(\tau)$  – функціональна результуюча інформація щодо прийняття рішень;  $NC(\tau)$  – нові умови функціонування як результат прийняття рішень;  $x(\tau)$  – впливи (зміна сонячної радіації, зміна швидкості вітру, зміна споживання електричної енергії та теплоти);  $f(\tau)$  – параметри, що вимірюються (напруга на вході в мережевий інвертор від гібридних сонячних колекторів, напруга на виході із перетворювача частоти, частота

напруги, тиск випарування, тиск конденсації);  $K(\tau)$  – коефіцієнти математичного опису динаміки зміни температури місцевої води);  $y(\tau, z)$  – вихідний параметр: аналітична оцінка зміни температури місцевої води;  $d(\tau)$  – динамічні параметри зміни температури місцевої води;  $z$  – просторова координата осі конденсатора, що співпадає з напрямком потоку руху середовища, м;  $\tau$  – час, с. Індокси:  $i$  – складові  $SFHPWSES(\tau)$  (блок заряду, блок розряду, блок оцінки функціональної ефективності); 0, 1, 2 – початковий режим, зовнішній, внутрішній характер впливів.

Запропоновано математичне моделювання динаміки температури місцевої води при вимірюванні напруги на вході в мережевий інвертор від гібридних сонячних колекторів, на виході із перетворювача частоти та частоти напруги. Оцінена зміна температури місцевої води як у часі, так і вздовж координати осі конденсатора, що співпадає з напрямком потоку руху середовища. Передатна функція за каналом: «температура місцевої води – витрата холодагенту», що здобута в результаті рішення системи нелінійних диференціальних рівнянь, представлена так:

$$W_{t_b-G_{x1}} = \frac{K_u K_x \varepsilon (1 - L_3^*)}{(T_B S + 1) \beta - 1} (1 - e^{-\gamma \xi}), \quad (3)$$

де

$$K_u = \frac{I(U_1 - U_2)}{(N_e)}; \quad K_x = \frac{m(\theta_0 - \sigma_0)}{G_{30}}; \quad \varepsilon = \frac{\alpha_{30} h_{30}}{\alpha_{B0} h_{B0}};$$

$$L_3^* = \frac{1}{L_3 + 1}; \quad L_3 = \frac{G_3 C_3}{\alpha_{30} h_{30}}; \quad \varepsilon^* = \varepsilon(1 - L_3^*);$$

$$\gamma = \frac{(T_B S + 1) \beta - 1}{\beta}; \quad \xi = \frac{z}{L_B}; \quad T_B = \frac{g_B C_B}{\alpha_{B0} h_{B0}};$$

$$\beta = T_M S + \varepsilon^* + 1; \quad T_M = \frac{g_M C_M}{\alpha_{B0} h_{B0}},$$

де  $N_e$  – потужність вітро-сонячної електричної системи, кВт;  $I$  – струм, А;  $U_1, U_2$  – напруга на вході в мережевий інвертор та на виході із перетворювача частоти, відповідно, В;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі у складі конденсатора, кВт/(м<sup>2</sup>·К);  $C$  – питома теплоємність холодагенту, кДж/(кг·К);  $G$  – витрата холодагенту, кг/с;  $g$  – питома маса води, що нагрівається, кг/м;  $h$  – питома поверхня конденсатора, м<sup>2</sup>/м;  $t_b, \theta, \sigma$  – температура води, що нагрівається, розподіляючої стінки, холодагенту,

$K$ ;  $z$  – координата довжини конденсатора, що співпадає з напрямом потоку руху середовища, м;  $T_B$ ,  $T_M$  – постійні часу, що характеризують теплову акумулюючу ємність місцевої води, металу, с;  $m$  – показник залежності коефіцієнта тепловіддачі від витрати холодагента;  $\tau$  – час, с;  $S$  – параметр перетворення Лапласа;  $S=j\omega$ ;  $\omega$  – частота, 1/с.

Індекси: 0 – вихідний стаціонарний режим; 1 – вхід в конденсатор; в – внутрішній потік – місцева вода; м – металева стінка; з – зовнішній потік – холодагент.

Передатна функція включає коефіцієнт  $K_u$ , що оцінює зміну напруги на вході в мережевий інвертор та на виході із перетворювача частоти, що вимірюються при вимірюванні частоти напруги. Виділено дійсну частину передатної функції (3) щодо оцінки зміни температури місцевої води:

$$O(\omega) = \frac{(L_1 A_1) + (M_1 B_1) K_u K_x \varepsilon (1 - L_3^*)}{(A_1^2 + B_1^2)}. \quad (4)$$

До складу коефіцієнта  $K_x$  входить температура поділяючої стінки  $\theta$ :

$$\theta = \left( \alpha_B \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} + A \frac{(t_1 + t_2)}{2} \right) / (\alpha_B + A), \quad (5)$$

де  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  – температура холодагенту на вході та на виході з конденсатора, К, відповідно;

$$A = \frac{1}{(\delta_m / \lambda_m + 1 / \alpha_z)}, \quad (6)$$

де  $\delta$  – товщина стінки конденсатора, м;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, кВт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda$  – теплопровідність металу стінки конденсатора, кВт/(м·К);  $t_1$ ,  $t_2$  – температура місцевої води на вході та на виході з конденсатора, К, відповідно. Індекси: з – зовнішній потік – холодагент; в – внутрішній потік – місцева вода.

Для використання дійсної частини  $O(\omega)$  здобуто наступні коефіцієнти:

$$A_1 = \varepsilon^* - T_B T_M \omega^2; \quad (7)$$

$$A_2 = \varepsilon^* + 1;$$

$$B_1 = T_B \varepsilon \omega + T_B \omega + T_M \omega; \quad (8)$$

$$B_2 = T_M \omega; \quad (9)$$



$$C_1 = \frac{A_1 A_2 + B_1 B_2}{A_2^2 + B_2^2}; \quad (10)$$

$$D_1 = \frac{A_2 B_1 - A_1 B_2}{A_2^2 + B_2^2}; \quad (11)$$

$$L_1 = 1 - e^{-\zeta C_1} \cos(-\xi D_1); \quad (12)$$

$$M_1 = -e^{-\zeta C_1} \sin(-\xi D_1). \quad (13)$$

З використанням інтеграла переходу з частотної області до області часу зміна температури місцевої води як за часом, так і вздовж просторової координати осі конденсатора визначена так:

$$t(\tau, z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} O(\omega) \sin(\tau\omega/\omega) d\omega. \quad (14)$$

Згідно формулам (1)–(3), представлено результати комплексного математичного моделювання теплонасосного енергопостачання з використанням гібридних сонячних колекторів (табл. 1–3).

**Таблиця 1**

Режимні параметри теплонасосної системи

Рівні функціонування	$G_x$ , кг/с	$N_e$ , кВт	$N_t$ , кВт	$U$ , В	$f$ , Гц	$n$ , об/хв	$COP$
Перший рівень	0,0340	0,705	1,4	194,2	24,28	738,4	8,08
Другий рівень	0,0350	0,923	2,9	254,3	31,78	953,4	6,17
Третій рівень	0,0357	1,185	4,3	326,5	40,81	1224,3	4,80
Четвертий рівень	0,0363	1,452	5,7	400	50	1500	3,92

**Примітка:**  $G_x$  – витрата холодагенту, кг/с;  $N_e$  – потужність електродвигуна компресора, кВт;  $N_t$  – теплова потужність низькопотенційного джерела енергії, кВт;  $U$  – напруга, В;  $f$  – частота напруги, Гц;  $n$  – число обертів електродвигуна компресора, об/хв;  $COP$  – коефіцієнт продуктивності теплонасосної системи

Таблиця 2

Параметри теплообміну в складі комплексного математичного моделювання

Рівні функціонування	Параметр		
	$\alpha_3$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\alpha_B$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$k$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
Перший рівень	1148,9	784,8	459,6
Другий рівень	1192,7	901,2	505,2
Третій рівень	1261,0	1075,9	570,2
Четвертий рівень	1383,5	1371,7	674,3

**Примітка:**  $\alpha_3$  – коефіцієнт конвективного теплообміну від холодагенту до стінки конденсатора, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_B$  – коефіцієнт конвективного теплообміну від стінки конденсатора до місцевої води, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $k$  – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

Таблиця 3

Постійні часу та коефіцієнти математичної моделі динаміки температури місцевої води

Рівні функціонування	$T_{B,}$ с	$T_{M,}$ с	$L_{B,}$ м	$\varepsilon$	$L_{3,}$ м	$L_3^*$	$\varepsilon^*$	$\zeta$
Перший рівень	6,23	2,62	24,61	1,7756	2,50	0,2857	1,2683	0,6811
Другий рівень	5,42	2,28	21,43	1,6014	2,48	0,2874	1,1412	0,6309
Третій рівень	4,54	1,91	17,95	1,4182	2,44	0,2907	1,0059	0,5945
Четвертий рівень	3,56	1,50	14,08	1,2204	2,30	0,3030	0,8506	0,5794

**Примітка:**  $T_{B,}$ ,  $T_{M,}$  – постійні часу, що характеризують теплову акумулюючу ємність місцевої води, металу, с;  $L_{B,}$ ,  $L_{3,}$ ,  $L_3^*$ ,  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon^*$ ,  $\zeta$  – коефіцієнти математичної моделі динаміки температури місцевої води

Представлені в табл. 3 постійні часу та коефіцієнти, що входять до складу математичної моделі динаміки (3), здобуті на основі параметрів теплообміну в складі комплексного математичного моделювання (табл. 2).

## 6. Результати дослідження

Розроблено комплексну інтегровану систему підтримки функціонування теплонасосного енергопостачання (табл. 4). Дана система базується на зміні температури місцевої води, що прогнозується. Відбувається безперервне вимірювання напруги на вході в мережевий інвертор, напруги на виході із перетворювача частоти та частоти напруги. Прийняття випереджуючих рішень на зміну потужності електродвигуна компресора теплового насоса відбувається в узгодженні зі зміною теплової потужності нижньої секції двосекційного бака-накопичувача як низькопотенційного джерела енергії.

Таблиця 4

## Підтримка зміни температури місцевої води

Час, $\tau$ , $10^5$ с	Зміна параметрів технологічного процесу	$\Delta t_B (\tau) / \Delta t_{c.p.n.}$ ( $\tau$ )	$t_B (\tau)$ , $^{\circ}\text{C}$
1	2	3	4
0	Заряд $U_1=84$ В; $U_2=190,7$ В; $f=25,09$ Гц; $G_x=0,0340$ кг/с; $t_{x\text{ ВХ}}=45$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{x\text{ ВИХ.}}=40,5$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВХ}}=35$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВИХ.}}=40$ $^{\circ}\text{C}$	1	35
10,5	$t_{x\text{ ВХ}}=45$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{x\text{ ВИХ.}}=40,5$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВХ}}=35$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВИХ.}}=40$ $^{\circ}\text{C}$ ; $U_1=90$ В; $U_2=190,7$ В	0,9438	36,12
21	$t_{x\text{ ВХ}}=45$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{x\text{ ВИХ.}}=40,5$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВХ}}=35$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВИХ.}}=40$ $^{\circ}\text{C}$ ; $U_1=96$ В; $U_2=190,7$ В	0,8875	37,25
31,5	$t_{x\text{ ВХ}}=45$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{x\text{ ВИХ.}}=40,5$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВХ}}=35$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВИХ.}}=40$ $^{\circ}\text{C}$ ; $U_1=108$ В; $U_2=190,7$ В	0,7751	39,5
42	$t_{x\text{ ВХ}}=45$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{x\text{ ВИХ.}}=40,5$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВХ}}=35$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВИХ.}}=40$ $^{\circ}\text{C}$ ; $U_1=114$ В; $U_2=190,7$ В	0,7188	40,63
52,5	$t_{x\text{ ВХ}}=45$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{x\text{ ВИХ.}}=40,5$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВХ}}=35$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВИХ.}}=40$ $^{\circ}\text{C}$ ; $U_1=126$ В; $U_2=190,7$ В	0,6064	42,88
63	$t_{x\text{ ВХ}}=45$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{x\text{ ВИХ.}}=40,5$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВХ}}=35$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВИХ.}}=40$ $^{\circ}\text{C}$ ; $U_1=130$ В; $U_2=190,7$ В	0,5689	43,63
73,5	$t_{x\text{ ВХ}}=45$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{x\text{ ВИХ.}}=40,5$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВХ}}=35$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВИХ.}}=40$ $^{\circ}\text{C}$ ; $U_1=136$ В; $U_2=190,7$ В	0,5126	44,76
84	$t_{x\text{ ВХ}}=45$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{x\text{ ВИХ.}}=40,5$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВХ}}=35$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВИХ.}}=40$ $^{\circ}\text{C}$ ; $U_1=140$ В; $U_2=190,7$ В	0,4752	45,51
94,5	Прийняття рішення на розряд $U_1=173,96$ В; $U_2=241,56$ В; $f=31,78$ Гц; $G_x=0,035$ кг/с; $t_{x\text{ ВХ}}=50$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{x\text{ ВИХ.}}=45,5$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВХ}}=40$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВИХ.}}=45$ $^{\circ}\text{C}$	0,4783	45,51
105	Заряд $U_1=179,96$ В; $U_2=241,56$ В; $f=31,78$ Гц; $t_{x\text{ ВХ}}=50$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{x\text{ ВИХ.}}=45,5$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВХ}}=40$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВИХ.}}=45$ $^{\circ}\text{C}$	0,4355	46,37
115,5	$t_{x\text{ ВХ}}=50$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{x\text{ ВИХ.}}=45,5$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВХ}}=40$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВИХ.}}=45$ $^{\circ}\text{C}$ ; $U_1=185,96$ В; $U_2=241,56$ В	0,3931	47,22
126	$t_{x\text{ ВХ}}=50$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{x\text{ ВИХ.}}=45,5$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВХ}}=40$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВИХ.}}=45$ $^{\circ}\text{C}$ ; $U_1=191,96$ В; $U_2=241,56$ В	0,3506	48,07
136,5	$t_{x\text{ ВХ}}=50$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{x\text{ ВИХ.}}=45,5$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВХ}}=40$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВИХ.}}=45$ $^{\circ}\text{C}$ ; $U_1=197,96$ В; $U_2=241,56$ В	0,3082	48,92
147	Прийняття рішення на розряд $U_1=257,9$ В; $U_2=310,17$ В; $f=40,81$ Гц; $G_x=0,0357$ кг/с; $t_{x\text{ ВХ}}=55$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{x\text{ ВИХ.}}=50,5$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВХ}}=45$ $^{\circ}\text{C}$ ; $t_{B\text{ ВИХ.}}=50$ $^{\circ}\text{C}$	0,3125	49

Продовження таблиці 4

1	2	3	4
157,5	Заряд $U_1=281,9 \text{ В}; U_2=310,17 \text{ В}; f=40,81 \text{ Гц}; t_{x \text{ ВХ}}=55 \text{ }^\circ\text{C};$ $t_{x \text{ ВИХ.}}=50,5 \text{ }^\circ\text{C}; t_{\text{В ВХ}}=45 \text{ }^\circ\text{C}; t_{\text{В ВИХ.}}=50 \text{ }^\circ\text{C}$	0,1690	51,87
161,6	Прийняття рішення на розряд $U_1=341,93 \text{ В}; U_2=380 \text{ В}; f=50 \text{ Гц}; G_x=0,0363 \text{ кг/с};$ $t_{x \text{ ВХ}}=60 \text{ }^\circ\text{C}; t_{x \text{ ВИХ.}}=55,5 \text{ }^\circ\text{C}; t_{\text{В ВХ}}=50 \text{ }^\circ\text{C}; t_{\text{В ВИХ.}}=55 \text{ }^\circ\text{C}$	0,0690	53,67
161,6	Розряд $U_1=341,93 \text{ В}; U_2=380 \text{ В}; f=50 \text{ Гц}; G_x=0,0363 \text{ кг/с};$ $t_{x \text{ ВХ}}=60 \text{ }^\circ\text{C}; t_{x \text{ ВИХ.}}=55,5 \text{ }^\circ\text{C}; t_{\text{В ВХ}}=50 \text{ }^\circ\text{C}; t_{\text{В ВИХ.}}=55 \text{ }^\circ\text{C}$	0	55

**Примітка:**  $t_{x \text{ ВХ}}, t_{x \text{ ВИХ.}}, t_{\text{вех}}, t_{\text{ввих}}$  – температура холодагенту, температура місцевої води на вході в конденсатор, на виході із конденсатора,  $^\circ\text{C}$ ;  $G_x$  – витрата холодагенту,  $\text{кг/с}$ ;  $f$  – частота напруги,  $\text{Гц}$ ;  $U_1, U_2$  – напруга на вході в мережевий інвертор та на виході із частотного перетворювача,  $\text{В}$ ;  $\tau$  – час,  $\text{с}$ . Індокси: в – внутрішній потік – місцева вода; с.р.н. – сталие, розрахункове значення параметра нижнього рівня функціонування

Температуру місцевої води на виході із конденсатора теплового насосу визначено так:

$$t_{\text{В}i+1}(\tau) = t_{\text{В}i} + \left( \left( \frac{\Delta t_{\text{В}i+1}(\tau)}{\Delta t_{\text{с.р.н.}}(\tau)} - \frac{\Delta t_{\text{В}i}(\tau)}{\Delta t_{\text{с.р.н.}}(\tau)} \right) (t_{\text{В}2} - t_{\text{В}1}) \right), \quad (15)$$

де  $t_{\text{В}}$  – температура місцевої води,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_1, t_2$  – початкове та кінцеве значення температури місцевої води,  $^\circ\text{C}$ , відповідно;  $i$  – число рівнів функціонування;  $\tau$  – час,  $\text{с}$ . Індекс: с. р. н. – сталие, розрахункове значення параметра нижнього рівня функціонування.

Так, наприклад, в термін часу  $94,5 \cdot 10^5 \text{ с}$  (2625 год) від початку опалювального сезону температура місцевої води з використанням формули (15) складає:

$$45,51 \text{ }^\circ\text{C} = 45,51 \text{ }^\circ\text{C} + (0,4783 - 0,4752)(55 \text{ }^\circ\text{C} - 35 \text{ }^\circ\text{C}).$$

В цей термін часу при зміні напруги на вході в мережевий інвертор до рівня 193,6 В, прогножуючи збільшення заряду електричної мережі, необхідно збільшити потужність електродвигуна компресора теплового насоса на основі зміни частоти напруги до 31,78 Гц. Прийняття випереджуючого рішення на збільшення числа обертів електродвигуна компресора дозволяє збільшити витрату холодагенту до рівня 0,035  $\text{кг/с}$  та забезпечити підтримку температури місцевої води на рівні 45,51  $^\circ\text{C}$ . Виконання таких дій дозволить, підтримуючи функціонування теплонасосного енергопостачання, узгодити виробництво та споживання енергії.

## 7. SWOT-аналіз результатів дослідження

*Strengths.* Запропоновано вимірювання напруги на вході в мережевий інвертор від гібридних сонячних колекторів та напруги на виході із перетворювача частоти при вимірюванні частоти напруги. Співвідношення напруги, що вимірюється, входить до складу коефіцієнта  $K_u$  щодо аналітичного визначення температури місцевої води з використанням передатної функції: «температура місцевої води – витрата холодагенту». Так, прогнозуючи збільшення заряду електричної мережі, необхідно прийняти випереджуюче рішення на збільшення потужності електродвигуна компресора теплового насоса на основі зміни частоти напруги. Це дозволить, підтримуючи функціонування теплонасосного енергопостачання, узгодити виробництво та споживання енергії.

*Weaknesses.* Знадобляться додаткові капіталовкладення в теплонасосне енергопостачання, але вони окупляться на 25–30 % раніше за рахунок прийняття випереджуючих рішень, ніж при використанні вимірювання температури місцевої води.

*Opportunities.* Запропоновано узгодження частотного управління потужністю електродвигуна компресора теплового насоса та зміни теплової потужності низькопотенційного джерела енергії. Використання нижньої секції двосекційного бака-накопичувача, підключеного до гібридних сонячних колекторів, дозволяє зменшити собівартість виробництва теплоти, термін окупності теплонасосної системи та збільшити грошову економію щодо споживання електричної енергії до 30 %.

*Threats.* Енергетичною системою може бути встановлено співвідношення виробництва та споживання електричної енергії. Узгодження ж виробництва та споживання потребує приєднання до Smart Grid технологій щодо запобігання піковим навантаженням енергетичної системи в умовах регулювання напруги при підключенні теплонасосного енергопостачання.

## 8. Висновки

1. Забезпечено встановлення співвідношення напруги на вході в мережевий інвертор від гібридних сонячних колекторів на напруги на виході із перетворювача частоти при вимірюванні частоти напруги. Це надає можливість упереджено впливати на зміну температури місцевої води.

2. Виконано комплексне математичне моделювання теплонасосної системи для встановлених рівнів функціонування. Визначення режимних параметрів теплонасосної системи, параметрів теплообміну в конденсаторі, постійних часу та коефіцієнтів математичної моделі динаміки температури місцевої базується на інтегрованій системі підтримки заряду нижньої секції бака-накопичувача. Відбувається узгодження зі зміною теплової потужності низькопотенційного джерела енергії – нижньої секції двосекційного бака-накопичувача, підключеного до гібридних сонячних колекторів.

3. Запропоновано прогнозування зміни температури місцевої води при безперервному вимірюванні напруги на вході в мережевий інвертор від гібридних сонячних колекторів, напруги на виході із перетворювача частоти та частоти

напруги. Інтегрована система підтримки функціонування теплонасосного енергопостачання базується на прийнятті випереджуючих рішень на зміну витрати холодагенту. Частотне управління теплонасосним енергопостачанням надає можливість приймати випереджуючі рішення на зміну витрати холодагенту та на зміну частоти напруги щодо зміни числа обертів електродвигуна компресора теплового насосу.

### Література

1. Bondarchuk, A. (2019). Study into predicted efficiency of the application of hybrid solar collectors to supply energy to multi-apartment buildings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (8 (100)), 69–77. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174502>
2. Shahriari, M., Blumsack, S. (2018). The capacity value of optimal wind and solar portfolios. *Energy*, 148, 992–1005. doi: <http://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.121>
3. Li, Y., Yang, W., He, P., Chen, C., Wang, X. (2019). Design and management of a distributed hybrid energy system through smart contract and blockchain. *Applied Energy*, 248, 390–405. doi: <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.132>
4. Saad, A. A., Faddel, S., Mohammed, O. (2019). A secured distributed control system for future interconnected smart grids. *Applied Energy*, 243, 57–70. doi: <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.185>
5. Perera, A. T. D., Nik, V. M., Wickramasinghe, P. U., Scartezzini, J.-L. (2019). Redefining energy system flexibility for distributed energy system design. *Applied Energy*, 253, 113572. doi: <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113572>
6. Mak, D., Choeum, D., Choi, D.-H. (2020). Sensitivity analysis of volt-VAR optimization to data changes in distribution networks with distributed energy resources. *Applied Energy*, 261, 114331. doi: <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114331>
7. Xiqiao, L., Yukun, L., Xianhong, B. (2019). Smart grid service evaluation system. *Procedia CIRP*, 83, 440–444. doi: <http://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.138>
8. Chaikovskaya, E. (2017). Development of energy-saving technology to support functioning of the lead-acid batteries. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (8 (88)), 56–64. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108578>
9. Chaikovskaya, E. (2019). Development of energy-saving technology to maintain the functioning of a wind-solar electrical system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (8 (100)), 57–68. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.174099>
10. Dincer, I., Rosen, M. A., Ahmadi, P. (2017). Modeling and Optimization of Heat Pump Systems. *Optimization of Energy Systems*, 183–198. doi: <http://doi.org/10.1002/9781118894484.ch6>
11. Underwood, C. P. (2016). Heat pump modelling. *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*, 387–421. doi: <http://doi.org/10.1016/b978-0-08-100311-4.00014-5>
12. Li, Y., Yu, J. (2016). Theoretical analysis on optimal configurations of heat exchanger and compressor in a two-stage compression air source heat pump system. *Applied Thermal Engineering*, 96, 682–689. doi: <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.132>

13. Matuska, T., Sourek, B., Sedlar, J. (2016). Heat Pump System Performance with PV System Adapted Control. *Proceedings of EuroSun2016*. doi: <http://doi.org/10.18086/eurosun.2016.08.06>
14. Yan, G., Bai, T., Yu, J. (2016). Energy and exergy efficiency analysis of solar driven ejector–compressor heat pump cycle. *Solar Energy*, 125, 243–255. doi: <http://doi.org/10.1016/j.solener.2015.12.021>
15. Van Leeuwen, R. P., Gebhardt, I., de Wit, J. B., Smit, G. J. M. (2016). A Predictive Model for Smart Control of a Domestic Heat Pump and Thermal Storage. *Proceedings of the 5th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems*. doi: <http://doi.org/10.5220/0005762201360145>
16. Chaikovskaya, E. (2020). Development of Smart Grid technology for maintaining the functioning of a biogas cogeneration system. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (8 (105)), 56–68. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.205123>
17. Jiang, S. (2017). Air-Source Heat Pump Systems. *Handbook of Energy Systems in Green Buildings*, 1–44. doi: [http://doi.org/10.1007/978-3-662-49088-4\\_2-1](http://doi.org/10.1007/978-3-662-49088-4_2-1)
18. Rees, S. J. (2016). An introduction to ground-source heat pump technology. *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*, 1–25. doi: <http://doi.org/10.1016/b978-0-08-100311-4.00001-7>
19. Suzuki, M., Yoneyama, K., Amemiya, S., Oe, M. (2016). Development of a Spiral Type Heat Exchanger for Ground Source Heat Pump System. *Energy Procedia*, 96, 503–510. doi: <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.091>
20. Chaikovskaya, E. (2018). Development of energy-saving technology for maintaining the functioning of heat pump power supply. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (8 (94)), 13–24. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139473>