

Чайковська Є. Є.

## РОЗРОБКА МЕТОДУ ПІДТРИМКИ РОЗРЯДУ ҐРУНТУ В ТЕПЛОНАСОСНОМУ ЕНЕРГОПОСТАЧАННІ

*Запропоновано метод підтримки розряду ґрунту на основі прогнозування зміни температури ґрунту при вимірюванні температури розсолу на виході із випарника теплового насоса. Використання здобутої інтегрованої системи оцінки зміни температури ґрунту у складі динамічної системи: ґрунтовий теплообмінник — випарник теплового насоса надає можливість приймати рішення на зміну витрати розсолу на основі зміни частоти обертання електродвигуна циркуляційного насоса та встановлювати точний термін розряду ґрунту.*

**Ключові слова:** теплонасосна установка, ґрунтовий теплообмінник, математичне та логічне моделювання, прийняття рішень.

### 1. Вступ

Використання ґрунту як низькопотенційного джерела енергії для теплонасосного енергопостачання щодо економії природного палива та зменшення шкідливих викидів в атмосферу є перспективним у зв'язку із природною релаксацією ґрунту у неопалювальний період [1, 2]. Закриті контури відбору теплоти з ґрунту на основі ґрунтових теплообмінників дозволяють, використовуючи горизонтальні чи вертикальні теплообмінники, забезпечити заряд розсолу — 30 % розчину етиленгліколю, що подається у випарник теплового насоса. Ґрунтовий горизонтальний колектор — теплообмінник, горизонтально укладений під шаром ґрунту. Головна перевага горизонтального колектора — простота монтажу. Недолік — значна площа під ґрунтовий колектор, що досягає 50 м<sup>2</sup> на 1 кВт потужності теплового насоса. Але, у зв'язку з тим, що температура ґрунту на глибині 40–150 м складає близько 8–10 °С, вертикальні колектори є найбільш спроможними забезпечити відбір теплоти в межах 30–100 Вт на один метр довжини вертикального теплообмінника в залежності від типу ґрунту. Тепловий насос — ґрунт-вода з використанням вертикального теплообмінника потребує меншу площу, але вимагає додаткових капіталовкладень щодо буріння свердловин. Зазвичай, конструкцією вертикального теплообмінника є труба в трубі, при якій, розсіл після виходу з випарника теплового насоса подається циркуляційним насосом вниз по одній лінії, а по другій лінії тим же насосом піднімається вгору до випарника теплового насоса. Використання розсолу як нетрадиційного джерела енергії у теплонасосному енергопостачанні потребує недопущення переохолодження ґрунту щодо можливості його релаксації в неопалювальний період. Вимірювання ж температури ґрунту мають не завжди достовірне використання у зв'язку із значною тепловою акумулюючою ємністю ґрунту та ускладнюють підтримку ґрунтового розряду теплоти. З метою енергозбереження підтримка функціонування системи: ґрунтовий теплообмінник — випарник теплового насоса повинна відбуватись на основі прогнозування зміни температури ґрунту в умовах зміни споживання теплоти

та охолодження ґрунту. Цим обґрунтовується актуальність даної роботи.

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

Об'єктом дослідження є теплонасосне опалення.

Район використання теплонасосного опалення — м. Київ. Опалювальна площа приміщення,  $F_o = 100$  м<sup>2</sup>; питоме теплове навантаження опалення,  $q_o = 60$  Вт/м<sup>2</sup>; розрахункове теплове навантаження опалення,  $Q_o = 6$  кВт; розрахункова температура зовнішнього повітря,  $t_{30} = -21$  °С; середня температура зовнішнього повітря,  $t_{30}^{ср.} = -1,1$  °С; розрахункова температура внутрішнього повітря,  $t_{вр.} = 18$  °С; тривалість опалювального періоду,  $n_o = 4448$  годин; річний відпуск теплоти на опалення,  $Q_{орічн.} = 47$  ГДж/рік. Для забезпечення теплового навантаження опалення обрано тепловий насос вітчизняного виробництва типу VDE TH-6, розсіл — вода, спеціально розроблений та адаптований до вітчизняних умов експлуатації. Тепловий насос типу VDE TH-6 має наступні технічні характеристики: теплопродуктивність,  $Q_r = 6,3$  кВт; споживана електрична потужність  $Q_e = 1,6$  кВт; коефіцієнт перетворення, COP = 3,94; максимальна температура води на виході із конденсатора для опалення,  $t_{вих.} = 55$  °С. Для розробки методу підтримки розряду ґрунту запропоновано використання ґрунтового теплообмінника вертикального типу для відбору теплоти ґрунту, що має наступні конструктивні характеристики: тип — труба в трубі; зовнішній діаметр теплообмінника,  $d_3 = 0,219$  м; внутрішній діаметр теплообмінника,  $d_b = 0,180$  м; довжина теплообмінника,  $L = 94,5$  м.

Обладнання теплового насоса типу VDE TH-6 спіральним компресором типу Copeland Scroll надає можливість гнучкого регулювання температури місцевої води в залежності від споживання теплоти та температури ґрунту на основі прогнозування зміни температури ґрунту. Можливість оновлення програмного забезпечення щодо впровадження новітніх енергозберігаючих технологій дозволяє удосконалити систему підтримки функціонування теплонасосного енергопостачання в умовах

недопущення переохолодження ґрунту з використанням підтримки функціонування системи: ґрунтовий теплообмінник – випарник теплового насосу.

### 3. Мета та задачі дослідження

*Мета роботи* – розробити метод підтримки розряду ґрунту у складі динамічної системи: ґрунтовий теплообмінник – випарник теплового насоса.

Поставлена мета буде досягнута при виконанні таких задач:

- обґрунтувати необхідність прогнозування зміни температури ґрунту, вимірюючи температуру розсолу на виході з випарника теплового насосу, для прийняття рішень на зміну витрати розсолу на основі зміни частоти обертання електродвигуна циркуляційного насосу та встановити точний початковий та кінцевий термін розряду ґрунту;
- розробити структурну схему комплексного математичного та логічного моделювання у складі динамічної системи: ґрунтовий теплообмінник – випарник теплового насоса щодо здобуття еталонної та функціональної оцінки зміни температури ґрунту;
- розробити структурну схему підтримки функціонування динамічної системи: ґрунтовий теплообмінник – випарник теплового насоса щодо прийняття рішень на зміну витрати розсолу на основі зміни частоти обертання електродвигуна циркуляційного насосу, встановлення точного початкового та кінцевого терміну розряду ґрунту та підтвердження прийнятих рішень;
- запропонувати інтегровану систему оцінки зміни температури ґрунту щодо забезпечення функціонування динамічної системи: ґрунтовий теплообмінник – випарник теплового насоса.
- оцінити практичну значущість здобутих результатів.

### 4. Аналіз літературних даних

Удосконалення засобів ґрунтового розряду теплоти у теплонасосному енергопостачанні базується як на інтенсифікації процесів теплообміну в ґрунтовому теплообміннику, так і у системі: ґрунтовий теплообмінник – тепловий насос. В роботі [3], наприклад, представлено метод визначення теплових властивостей ґрунту та передачі теплоти для вертикальної свердловини ґрунтового джерела теплового насоса, що заснований на чисельних та експериментальних дослідженнях. Доказана адекватність експериментальних даних оцінки параметрів теплообміну в теплообміннику результатам чисельного моделювання, але при вимірюванні температури ґрунту. В роботі [4] запропонована теорія теплового балансу ґрунту, в якій на основі теоретичних та експериментальних досліджень визначено можливості використання додаткових джерел енергії впродовж року, але при вимірюванні температури ґрунту. Робота [5], наприклад, присвячена визначенню впливу конструктивних та режимних параметрів вертикального ґрунтового теплообмінника на параметри теплообміну щодо підігріву розсолу. Встановлено перевагу використання спіральних трубок у порівнянні із стандартними. В роботі [6] визначені конструкційні можливості горизонтального теплообмінника щодо передачі акумульованої в ґрунті теплоти. В роботі [7]

на основі чисельно-аналітичного моделювання системи: ґрунтовий масив – тепловий насос встановлено зв'язок процесів енергообміну між ґрунтом та розсолу, але в стаціонарному режимі. В роботі [8] визначена необхідність використання додаткового обладнання – градирні на основі визначення різниці між температурою повітря та температурою ґрунту, але без узгодження температурного режиму розряду ґрунту та споживання теплоти та при вимірюванні температури ґрунту. Для недопущення охолодження ґрунту щодо узгодження розряду ґрунту та заряду розсолу необхідно прогнозувати зміну температури ґрунту, вимірюючи температуру розсолу на виході із випарника теплового насоса, та впливати на зміну витрати розсолу на основі зміни частоти обертання електродвигуна циркуляційного насоса, встановлюючи точний початковий та кінцевий термін розряду ґрунту.

### 5. Матеріали та методи дослідження

З використанням методологічного та математичного обґрунтування архітектури технологічних систем, методології математичного опису динаміки енергетичних систем, метода графа причинно-наслідкових зв'язків [9, 10] запропоновано математичне обґрунтування підтримки функціонування енергетичних систем на основі прогнозування зміни параметрів технологічного процесу:

$$SOPS = \left\{ \begin{array}{l} (D(P(\tau), MM(z, \tau), AI(\tau), C(\tau), LC(\tau)) \\ \langle x_0(\tau), x_1(\tau), x_2(\tau), f(\tau), K(\tau), y(\tau), d(\tau), FI(\tau) \rangle, \\ LMD(\tau), MD(\tau), NC(\tau), S(\tau), LS(\tau) \\ \langle f(\tau), K(\tau), y(\tau), d(\tau), FI(\tau) \rangle \\ P(\tau)), R(\tau), (P_i(\tau) \langle x_1(\tau), f_i(\tau), K_i(\tau), y_i(\tau) \rangle), \end{array} \right\} \quad (1)$$

де *SOPS* – підтримка функціонування енергетичних систем; *D* – динамічна підсистема – енергетична система; *P* – властивості елементів *SOPS*; *MM* – математичне моделювання динаміки; *AI* – еталонна інформація; *C* – контроль працездатності; *MD* – прийняття рішення; *S* – ідентифікація стану; *LC*, *LMD*, *LS* – логічні відносини в *C*, *MD*, *S*, відповідно; *FI* – функціональна результуюча інформація; *NC* – нові умови функціонування; *x* – впливи; *f* – параметри, що діагностуються; *K* – коефіцієнти математичного опису; *y* – вихідні параметри; *d* – динамічні параметри; *z* – координата довжини, м;  $\tau$  – час, с. Індеси: *i* – число елементів *SOPS*; 0, 1, 2 – початковий режим, зовнішній, внутрішній характер впливів.

Згідно формули (1) запропоновано прогнозування зміни температури ґрунту при вимірюванні температури розсолу на виході із випарника теплового насосу. З цією ціллю розроблена математична модель динаміки динамічної системи: ґрунтовий теплообмінник – випарник теплового насоса. Передатна функція за каналом: «температура ґрунту – витрата розсолу», що здобута в результаті рішення системи нелінійних диференціальних рівнянь, дозволяє оцінювати зміну температури ґрунту як у часі, так і вздовж довжини теплообмінника, прокладеного в ґрунті, при зміні витрати розсолу:

$$W_{t-Gs1} = \frac{K_3 \varepsilon (1 - L_3^*)}{(T_B S + 1) \beta - 1} (1 - e^{-\tau \xi}), \quad (2)$$

де

$$K_3 = \frac{m(\theta_0 - \sigma_0)}{G_{30}}; \quad \varepsilon = \frac{\alpha_{в0}h_{в0}}{\alpha_{30}h_{30}}; \quad L_3^* = \frac{1}{L_3 + 1};$$

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

$$\xi = \frac{z}{L_3}; \quad T_B = \frac{g_B C_B}{\alpha_{30} h_{30}}; \quad \beta = T_M S + \varepsilon^* + 1; \quad T_M = \frac{g_M C_M}{\alpha_{30} h_{30}},$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, кВт/(м<sup>2</sup>·К);  $C$  – питома теплоємність, кДж/(кг·К);  $G$  – витрата речовини, кг/с;  $g$  – питома маса речовини, кг/м;  $h$  – питома поверхня, м<sup>2</sup>/м;  $t, \theta, \sigma$  – температура ґрунту, розподіляючої стінки, розсолу, К;  $z$  – координата довжини теплообмінника, м;  $T_B, T_M$  – постійні часу, що характеризують теплову акумулюючу здатність ґрунту, металу, с;  $m$  – показник залежності коефіцієнта тепловіддачі від витрати;  $\tau$  – час, с.  $S$  – параметр перетворення Лапласа;  $S = \omega j$ ;  $\omega$  – частота, 1/с. Індекси: 0 – вихідний стаціонарний режим; 1 – вхід в теплообмінник; в – внутрішній потік – ґрунт; м – металева стінка; з – зовнішній потік – розсіл.

Виділено дійсну частину передатної функції  $O(\omega)$ :

$$O(\omega) = \frac{(L_1 A_1) + (M_1 B_1) K_3 \varepsilon (1 - L_3^*)}{(A_1^2 + B_1^2)}. \quad (3)$$

До складу коефіцієнта  $K_3$  входить температура поділяючої стінки  $\theta$ :

$$\theta = \left( \alpha_B \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{A(t_1 + t_2)}{2} \right) / (\alpha_B + A), \quad (4)$$

де  $\sigma_1, \sigma_2$  – температура розсолу на вході, та на виході з теплообмінника, К, відповідно;  $A = 1 / (\delta_m / \lambda_m + 1 / \alpha_3)$ , де  $\delta$  – товщина стінки теплообмінника, м;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, кВт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda$  – теплопровідність металу стінки теплообмінника, кВт/(м·К);  $t_1, t_2$  – температура ґрунту на вході та на виході з теплообмінника, К, відповідно. Індекси: з – зовнішній потік – розсіл; в – внутрішній потік – ґрунт.

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

$$A_1 = \varepsilon^* - T_B T_M \omega^2; \quad A_2 = \varepsilon^* + 1; \quad B_1 = T_B \varepsilon \omega + T_B \omega + T_M \omega;$$

$$B_2 = T_M \omega; \quad C_1 = \frac{A_1 A_2 + B_1 B_2}{A_2^2 + B_2^2}; \quad D_1 = \frac{A_2 B_1 - A_1 B_2}{A_2^2 + B_2^2};$$

$$L_1 = 1 - e^{-\xi C_1} \cos(-\xi D_1); \quad M_1 = -e^{-\xi C_1} \sin(-\xi D_1).$$

З використанням інтеграла переходу з частотної області до області часу зміна температури ґрунту як

за часом, так і вздовж просторової координати осі теплообмінника визначена так:

$$t(\tau, z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty O(\omega) \sin(\tau\omega/\omega) d\omega. \quad (5)$$

З використанням формули (1) для здобуття етапної та функціональної оцінки зміни температури ґрунту розроблено структурну схему (рис. 1), згідно якої встановлено наступні рівні функціонування динамічної системи: ґрунтовий теплообмінник – випарник теплового насосу щодо зміни температури розсолу на вході в теплообмінник та на виході з теплообмінника, відповідно: перший рівень – (-15)–(-10) °С; другий рівень – (-10)–(-5) °С; третій рівень – (-5)–0 °С; четвертий рівень – 0–5 °С.

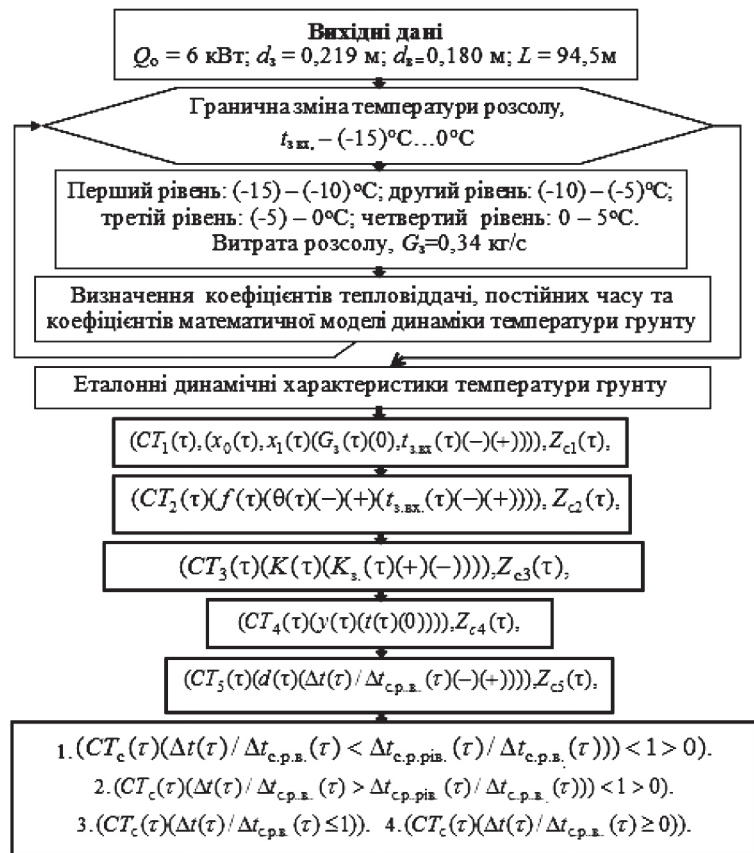


Рис. 1. Структурна схема комплексного математичного та логічного моделювання у складі динамічної системи: ґрунтовий теплообмінник – випарник теплового насосу

На рис. 1:  $Q_o$  – розрахункове теплове навантаження опалення, кВт;  $d_3, d_B$  – зовнішній, внутрішній діаметр ґрунтового теплообмінника, відповідно, м;  $L$  – довжина теплообмінника, м;  $t_{3,вх}$  – температура розсолу на вході в теплообмінник, К;  $CT$  – контроль події;  $Z$  – логічні відносини;  $d$  – динамічні параметри;  $t$  – температура ґрунту, К;  $x$  – впливи;  $f$  – параметри, що діагностуються;  $y$  – вихідні параметри;  $K$  – коефіцієнти математичного опису;  $K_3 = \frac{m(\theta_0 - t_{3,вх.0})}{G_{30}}$  – коефіцієнт математичної моделі динаміки ґрунтового теплообмінника, де  $\theta$  –

температура стінки теплообмінника, К, відповідно;  $G_3$  – витрата розсолу, кг/с. Індокси:  $s$  – контроль працездатності;  $s. p. v.$ ,  $s. p. r. v.$  – сталі розрахункові значення параметра верхнього рівня функціонування, рівня функціонування, відповідно; 0, 1, 2 – початковий стаціонарний режим, зовнішні, внутрішні параметри; 3 – коефіцієнти рівнянь динаміки; 4 – суттєві параметри, що діагностуються; 5 – динамічні параметри.

Згідно з запропонованою структурною схемою (рис. 1) в табл. 1 представлені результати математичного моделювання динаміки системи: ґрунтовий теплообмінник – випарник теплового насосу щодо підтримки зміни температури ґрунту на рівні 8–10 °С.

Так, використання логічної структури в межах циклу дозволяє приймати рішення на основі інформаційних оцінок (1), (2) на збільшення чи зменшення витрати розсолу, відповідно, з використанням зміни частоти обертання електродвигуна циркуляційного насосу. Встановлено наступні рівні витрат розсолу: 0,34 кг/с, 0,233 кг/с, 0,18 кг/с, 0,148 кг/с, що відповідають четвертому, третьому, другому та першому рівням функціонування, відповідно. Здобуття ж результуючої інформації (3) свідчить про завершення розряду ґрунту та потребує відключення системи опалення. Здобуття інформації (3) відповідає досягненню температури розсолу на вході в ґрунтовий теплообмінник гранично низького рівня – (–1,5)°С.

Таблиця 1

Параметри теплообміну, значення постійних часу та коефіцієнтів математичної моделі динаміки системи: ґрунтовий теплообмінник – випарник теплового насосу

Рівні функціонування	$\alpha_s, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$T_v, \text{с}$	$T_m, \text{с}$	$\epsilon$	$L_s, \text{м}$	$L_s^*$	$\epsilon^*$	$\zeta$
Перший рівень	32,43	4389,08	643,56	0,0182	53,56	0,018	0,0178	1,76
Другий рівень	32,60	4366,19	640,21	0,0181	53,08	0,018	0,0178	1,77
Третій рівень	32,65	4359,5	639,23	0,0181	53,0	0,018	0,0179	1,77
Четвертий рівень	34,49	4196,93	605,12	0,0172	50,17	0,019	0,0169	1,87

Примітка:  $\alpha_s$  – коефіцієнт тепловіддачі від стінки теплообмінника до розсолу,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

З використанням логічної моделі контролю працездатності динамічної системи: ґрунтовий теплообмінник – випарник теплового насосу (рис. 1) при безперервному вимірюванні температури розсолу на вході в ґрунтовий теплообмінник отримано функціональну результуючу інформацію (1)–(4) щодо прийняття рішень на підтримку ґрунтового акумулювання теплоти

Згідно формули (1) запропоновано підтримувати функціонування динамічної системи: ґрунтовий теплообмінник – випарник теплового насосу при порівнянні вимірюваної температури розсолу на вході в ґрунтовий теплообмінник з еталонним значенням рівня функціонування (рис. 2).

На рис. 2:  $t_{3.вх.}$ ,  $t_{3е.вх.}$  – функціональна та еталонна температура розсолу на вході в ґрунтовий теплообмінник, К;  $G_3$  – витрата розсолу, кг/с;  $i$  – число рівнів функціонування;  $ST$  – ідентифікація стану;  $P$  – властивості ґрунтового теплообмінника;  $Z$  – логічні відносини;  $d$  – динамічні параметри;  $f$  – параметри, що діагностуються;  $y$  – вихідні параметри;  $K$  – коефіцієнти математичного

$$\text{опису; } K_3 = \frac{m(\theta_0 - t_{3.вх.0})}{G_{30}} \text{ – коефіцієнт мате-}$$

матичної моделі динаміки ґрунтового теплообмінника, де,  $\theta$  – температура стінки теплообмінника, К, відповідно;  $G_3$  – витрата розсолу, кг/с. Індокси:  $s$  – стан;  $n. p.$  – новий рівень функціонування;  $s. p. v.$  – сталі, розрахункові значення параметра першого рівня функціонування; 2 – внутрішні параметри, що діагностуються; 3 – коефіцієнти рівнянь динаміки; 4 – суттєві параметри, що діагностуються; 5 – динамічні параметри;  $\tau$  – час, с.

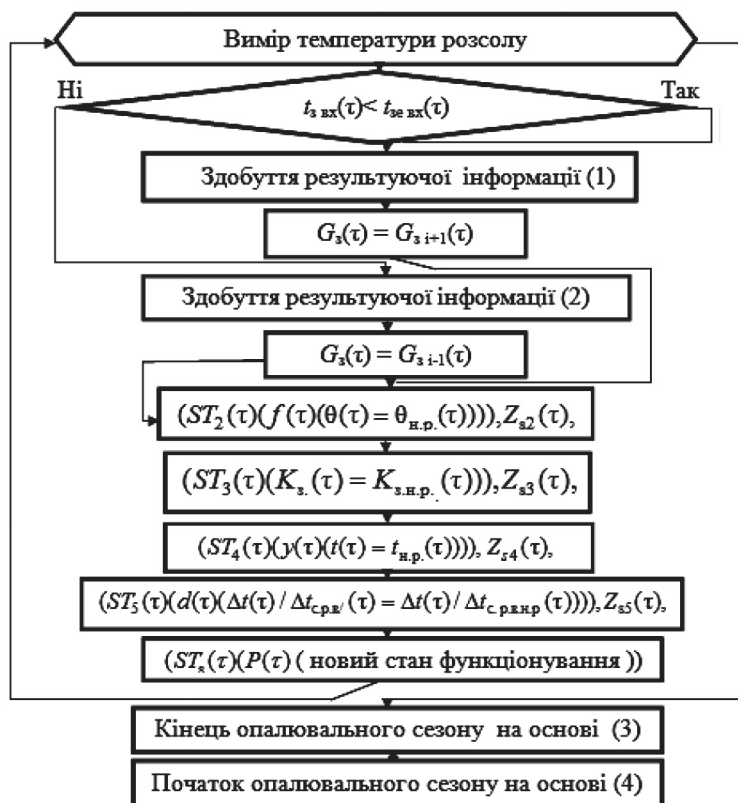


Рис. 2. Структурна схема підтримки функціонування та ідентифікації стану системи: ґрунтовий теплообмінник – випарник теплового насосу

Подача ж 0,34 кг/с розсолу підтверджена здобуттям результуючої інформації (4) щодо входження в допуск четвертого рівня функціонування системи: ґрунтовий теплообмінник – випарник теплового насосу на початку опалювального сезону. Згідно формули (1) підтвердження

правильності прийнятих рішень виконано на основі ідентифікаційної частини структурної схеми, що розроблена на основі графа причинно-наслідкових зв'язків.

## 6. Результати дослідження

На основі запропонованого математичного обґрунтування підтримки функціонування енергетичних систем на рівні прийняття рішень (1) з використанням розроблених структурних схем (рис. 1, 2), розроблено інтегровану систему підтримки розряду ґрунту (табл. 2, рис. 3), що надає можливість приймати рішення на зміну витрати розсолу на основі зміні частоти обертання електродвигуна циркуляційного насосу при безперервному вимірюванні температури розсолу на виході із випарника теплового насосу та встановлювати точний початковий та кінцевий термін розряду ґрунту.

Таблиця 2

Інтегрована система підтримки розряду ґрунту продовж опалювального сезону

Час, $\tau$ , $10^5$ с	Зміна температури ґрунту	$\Delta t(\tau)/\Delta t_{\text{с.р.в.}}(\tau)$	$t(\tau)$ , °C
0	Початок опалювального сезону. $G_3 = 0,34$ кг/с. Розряд ґрунту: $t_{3,\text{вх}} = 5$ °C; $t_{3,\text{вих}} = 5$ °C	0	10
500	$G_3 = 0,34$ кг/с. Розряд ґрунту: $t_{3,\text{вх}} = 5$ °C; $t_{3,\text{вих}} = 5$ °C	0,0678	9,88
10,5	$G_3 = 0,34$ кг/с. Розряд ґрунту: $t_{3,\text{вх}} = 5$ °C; $t_{3,\text{вих}} = 5$ °C	0,1692	9,66
21	$G_3 = 0,34$ кг/с. Розряд ґрунту: $t_{3,\text{вх}} = 3$ °C; $t_{3,\text{вих}} = 5$ °C	0,2547	9,49
31,5	$G_3 = 0,34$ кг/с. Розряд ґрунту: $t_{3,\text{вх}} = 2,5$ °C; $t_{3,\text{вих}} = 5$ °C	0,2761	9,45
42	$G_3 = 0,34$ кг/с. Розряд ґрунту: $t_{3,\text{вх}} = 2$ °C; $t_{3,\text{вих}} = 5$ °C	0,2974	9,41
52,5	$G_3 = 0,34$ кг/с. Розряд ґрунту: $t_{3,\text{вх}} = 1,5$ °C; $t_{3,\text{вих}} = 5$ °C	0,3188	9,37
63	$G_3 = 0,34$ кг/с. Розряд ґрунту: $t_{3,\text{вх}} = 1$ °C; $t_{3,\text{вих}} = 5$ °C	0,3402	9,33
73,5	$G_3 = 0,34$ кг/с. Розряд ґрунту: $t_{3,\text{вх}} = 0,5$ °C; $t_{3,\text{вих}} = 5$ °C	0,3616	9,29
84	$G_3 = 0,34$ кг/с. Розряд ґрунту: $t_{3,\text{вх}} = 0$ °C; $t_{3,\text{вих}} = 5$ °C	0,3830	9,25
94,5	Розряд ґрунту: $t_{3,\text{вх}} = -0,5$ °C. Прийняття рішення на подачу. $G_3 = 0,233$ кг/с; $t_{3,\text{вих}} = 5$ °C	0,4043	9,21
105	Ідентифікація нових умов функціонування. $G_3 = 0,233$ кг/с; $t_{3,\text{вх}} = -0,5$ °C; $t_{3,\text{вих}} = 5$ °C	0,5884	8,84
115,5	$G_3 = 0,233$ кг/с. Розряд ґрунту: $t_{3,\text{вх}} = -1$ °C; $t_{3,\text{вих}} = 5$ °C. Прийняття рішення на подачу. $G_3 = 0,18$ кг/с	0,6150	8,79
126	Ідентифікація нових умов функціонування. $G_3 = 0,18$ кг/с; $t_{3,\text{вх}} = -1$ °C; $t_{3,\text{вих}} = 5$ °C	0,7908	8,44
136,5	Розряд ґрунту. $G_3 = 0,18$ кг/с; $t_{3,\text{вх}} = -1,3$ °C; $t_{3,\text{вих}} = 5$ °C	0,8200	8,38

Закінчення табл. 2

Час, $\tau$ , $10^5$ с	Зміна температури ґрунту	$\Delta t(\tau)/\Delta t_{\text{с.р.в.}}(\tau)$	$t(\tau)$ , °C
147	Розряд ґрунту. $G_3 = 0,18$ кг/с. Прийняття рішення на подачу. $G_3 = 0,148$ кг/с; $t_{3,\text{вх}} = -1,5$ °C; $t_{3,\text{вих}} = 5$ °C	0,8360	8,35
157,5	Ідентифікація нових умов функціонування. $G_3 = 0,148$ кг/с; $t_{3,\text{вх}} = -1,5$ °C; $t_{3,\text{вих}} = 5$ °C	0,9860	8,05
161,6	Закінчення опалювального сезону. $G_3 = 0,148$ кг/с; $t_{3,\text{вх}} = -1,5$ °C; $t_{3,\text{вих}} = 5$ °C	1	8

**Примітка:**  $t_{3,\text{вх}}$ ,  $t_{3,\text{вих}}$  — температура розсолу на вході в ґрунтовий теплообмінник та на виході з теплообмінника, відповідно, °C;  $t$  — температура ґрунту, °C;  $G_3$  — витрата розсолу, кг/с. Індекс: с. р. в. — стали, розрахункове значення параметра першого рівня функціонування

Температуру ґрунту у встановлений термін часу визначено так:

$$t_{i+1}(\tau) = t_i - ((\Delta t_{i+1}(\tau) / \Delta t_{\text{с.р.в.}}(\tau) - \Delta t_i(\tau) / \Delta t_{\text{с.р.в.}}(\tau))(t_1 - t_2)), \quad (6)$$

де  $t$  — температура ґрунту, °C;  $t_1$ ,  $t_2$  — температура ґрунту на вході в теплообмінник та на виході з теплообмінника, °C, відповідно;  $i$  — число рівнів підтримки ґрунтового акумулювання теплоти;  $\tau$  — час, с. Індекс: с. р. в. — стали, розрахункове значення параметра першого рівня функціонування.

Так, наприклад, в термін часу  $84 \cdot 10^5$  с (2333,3 години) після початку опалювального сезону встановлено, що температура розсолу на виході із випарника теплового насосу знизилась до  $(-0,5)$  °C. В цей термін часу прийнято рішення на зменшення витрати розсолу на 31,5 %, тобто до рівня 0,233 кг/с щодо підтримки зміни споживання теплоти та зміни температури ґрунту.

Абсолютне значення температури ґрунту в цей термін часу встановлено наступним чином:

$$9,25 \text{ °C} = 9,29 \text{ °C} - ((0,6150 - 0,3616)(10 - 8)) \text{ °C}.$$

В термін часу, наприклад,  $115,5 \cdot 10^5$  с (3208,3 години), контролюючи температуру розсолу на вході в теплообмінник, що становить  $-1$  °C необхідно зменшити потужність циркуляційного насоса подачі розсолу ще на 22,7 %, тобто до рівня 0,18 кг/с, та забезпечити подальшу підтримку розряду ґрунту до температури 8,79 °C, що розрахована так:

$$8,79 \text{ °C} = 8,84 \text{ °C} - ((0,6150 - 0,5884)(10 - 8)) \text{ °C}.$$

Встановлення граничної зміни температури ґрунту — 8 °C повідомляє про завершення опалювального сезону.

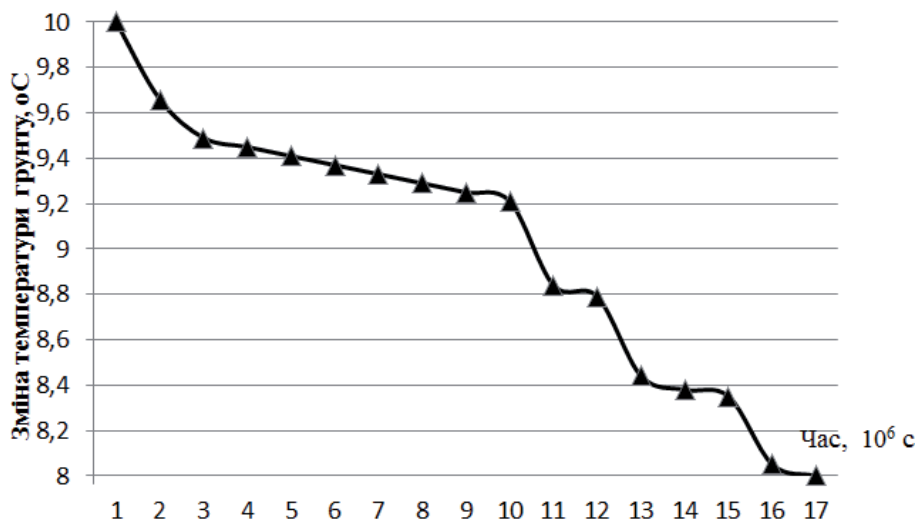


Рис. 3. Графічна залежність зміни температури ґрунту від часу впродовж опалювального сезону

## 7. Аналіз результатів дослідження

В результаті проведених досліджень розроблена інтегрована система підтримки розряду ґрунту щодо прийняття рішень на зміну витрати розсолу з використанням зміни частоти обертання електродвигуна циркуляційного насоса та встановлює точний початковий та кінцевий термін розряду ґрунту.

В зв'язку із складністю виміру температури ґрунту здобута аналітична оцінка зміни температури ґрунту як у часі, так і вздовж довжини ґрунтового теплообмінника. Запропоновано вимірювання температури розсолу на виході із випарника теплового насоса для прийняття упереджених рішень на зміну витрати розсолу щодо забезпечення підтримки розряду ґрунту. Це надає можливість упереджено оцінювати зміну температури ґрунту впродовж опалювального сезону щодо недопущення переохолодження ґрунту та забезпечити релаксацію ґрунту в період неопалювального сезону. Визначено термін ґрунтового розряду теплоти, що відповідає закінченню опалювального сезону.

Використання частотного регулювання електродвигуна циркуляційного насоса щодо підтримки розряду ґрунту дозволяє знизити собівартість виробництва теплоти, термін окупності теплонасосної системи та здобути економію електричної енергії, що в грошовому еквіваленті складає до 30 % від загальної економії, що забезпечена заміщенням природного газу.

Представлені результати дослідження є продовженням роботи в напрямку узгодження виробництва та споживання енергії [9, 10]. Заплановано дослідження в умовах комплексного функціонування системи: випарник — компресор, компресор — конденсатор теплового насоса з використанням запропонованого методу розряду ґрунту.

## 8. Висновки

1. Для недопущення переохолодження ґрунту та забезпечення релаксації ґрунту в неопалювальний період необхідно прогнозувати зміну температури ґрунту, вимірюючи температуру розсолу на виході з випарника теплового насоса, та приймати рішення на зміну витрати розсолу на основі зміни частоти обертання електродвигуна цир-

куляційного насоса та встановлювати точний початковий та кінцевий термін розряду ґрунту.

2. Запропоновано структурну схему комплексного математичного та логічного моделювання динамічної системи: ґрунтовий теплообмінник — випарник теплового насоса, що надає можливість визначити допуски на зміну температури ґрунту для встановлених рівнів функціонування. Здобуття резульгуючої інформації щодо прийняття рішень відбувається за принципом причинно-наслідкових зв'язків з використанням наступних блоків: оцінки зміни температури розсолу на виході з випарника теплового насоса, що вимірюється, зміни температури стінки

теплообмінника, коефіцієнта математичної моделі динаміки,  $K_z$ , температури ґрунту, динамічних параметрів зміни температури ґрунту, контролю працездатності.

3. Запропоновано структурну схему підтримки функціонування та ідентифікації стану динамічної системи: ґрунтовий теплообмінник — випарник теплового насоса для прийняття рішень на зміну витрати розсолу, визначення терміну розряду ґрунту та підтвердження прийняття рішень. Особливістю цієї схеми є порівняння температури розсолу на виході із випарника теплового насоса, що вимірюється, з еталонним значенням та визначення резульгуючої інформації щодо прийняття рішень на зміну витрати розсолу чи встановлення терміну розряду ґрунту. Підтвердження прийняття рішень відбувається на основі наступних блоків: зміни температури стінки теплообмінника, коефіцієнта математичної моделі динаміки,  $K_z$ , температури ґрунту, динамічних параметрів зміни температури ґрунту та дозволяє встановити новий стан функціонування динамічної системи: ґрунтовий теплообмінник — випарник теплового насоса.

4. Запропоновано інтегровану систему підтримки розряду ґрунту впродовж опалювального сезону при забезпеченні температурного режиму випарника теплового насоса, що дозволяє виконувати зміну витрати розсолу на основі зміни частоти обертання електродвигуна циркуляційного насоса при вимірюванні температури розсолу на виході із випарника теплового насоса та встановлювати точний початковий та кінцевий термін розряду ґрунту.

5. Підтримка розряду ґрунту на основі прогнозування зміни температури ґрунту надає можливість, наприклад, при виробництві 47 ГДж/рік теплоти знизити собівартість виробництва теплоти та термін окупності теплонасосної системи в межах 15–25 % щодо економії електричної енергії за рахунок частотного регулювання електродвигуна циркуляційного насоса, що в грошовому еквіваленті складає до 30 % від загальної економії, що забезпечена заміщенням природного газу.

## Література

1. Sarbu, I. Ground-Source Heat Pump Systems [Text] / I. Sarbu, C. Sebarchievici // Ground-Source Heat Pumps. Fundamentals, Experiments and Applications. — Elsevier BV, 2016. — P. 71–128. doi:10.1016/b978-0-12-804220-5.00005-9

2. Rees, S. J. An introduction ground – source heat pump technology [Text] / S. J. Rees // *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*. – Elsevier BV, 2016. – P. 1–25. doi:10.1016/b978-0-08-100311-4.00001-7
3. Dong, X. A New Method to Determine the Thermal Properties of Soil for Vertical-Borehole Ground-Source Heat Pump Systems [Text] / X. Dong, B. Gu // *Heat Transfer Research*. – 2015. – Vol. 46, № 5. – P. 417–427. doi:10.1615/heattransres.2014007228
4. Lü, C. Research on Soil Heat Balance Theory of Ground Coupled Heat Pump System [Text] / C. Lü, F. Yu, M. Zheng, J. Zhong // *Geo-Informatics in Resource Management and Sustainable Ecosystem*. – Springer Science + Business Media, 2016. – P. 855–861. doi:10.1007/978-3-662-49155-3\_88
5. Haddada, J. Thermal Performance and Characteristics of Spiral-Tube Ground Heat Exchanger for Ground-Source Heat Pump [Text] / J. Haddada, A. Miyara // *Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference*. – 2014. – 14 p. doi:10.1615/ihtc15.hex.009412
6. Rees, S. J. Horizontal and compact ground heat exchangers [Text] / S. J. Rees // *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*. – Elsevier BV, 2016. – P. 117–156. doi:10.1016/b978-0-08-100311-4.00005-4
7. Кордас, О. Моделирование энергетических характеристик геотермальных систем [Текст] / О. Кордас, Е. И. Никифорович // *Прикладна гідромеханіка*. – 2014. – Т. 16, № 1. – С. 42–52.
8. Zhou, S. Feasibility study on two schemes for alleviating the underground heat accumulation of the ground source heat pump [Text] / S. Zhou, W. Cui, Z. Li, X. Liu // *Sustainable Cities and Society*. – 2016. – Vol. 24. – P. 1–9. doi:10.1016/j.scs.2016.03.014
9. Чайковская, Е. Е. Согласование производства и потребления энергии на основе интеллектуального управления тепло-массообменными процессами [Текст] / Е. Е. Чайковская // XV Минский международный форум по теплообмену. Секция 8. Теплоассоуперенос в энергетических процессах и оборудовании. Энергосбережение, 23-26 мая 2016 г. – Минск: Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2016. – С. 1–12.
10. Чайковська, Є. Є. Інформаційні технології підтримки функціонування енергетичних систем на рівні прийняття рішень [Текст] / Є. Є. Чайковська // *Збірник тез доповідей IV Українсько-німецької конференції «Інформатика. Культура. Техніка». Інформаційні системи та технології*. – Одеса, 2016. – С. 32–33.

#### РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОДДЕРЖАНИЯ РАЗРЯДА ГРУНТА В ТЕПЛОНАСОСНОМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИИ

Предложен метод поддержания разряда грунта на основе прогнозирования изменения температуры грунта при измерении температуры рассола на выходе из испарителя теплового насоса. Использование полученной интегрированной системы оценки изменения температуры грунта в составе динамической системы: грунтовый теплообменник – испаритель теплового насоса позволяет принимать решения на изменение расхода рассола на основе изменения частоты вращения электродвигателя циркуляционного насоса и устанавливать точный срок разряда грунта.

**Ключевые слова:** теплонасосная установка, грунтовой теплообменник, математическое и логическое моделирование, принятие решений.

*Чайковська Євгенія Євстафіївна, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент, кафедра теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики, Одеський національний політехнічний університет, Україна, e-mail: eechaikovskaya@gmail.com.*

*Чайковская Евгения Евстафьевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент, кафедра теоретической, общей и нетрадиционной энергетики, Одесский национальный политехнический университет, Украина.*

*Chaikovskaya Eugene, Odessa National Polytechnic University, Ukraine, e-mail: eechaikovskaya@gmail.com*

УДК 621.365

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.74755

Левченко С. А.

## ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ЕГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

*Предложено использовать для автономных источников горячего водоснабжения электрический теплоаккумулирующий преобразователь, принцип действия которого основан на прямом нагреве теплоаккумулирующего вещества протекающим через него током. Получены зависимости между геометрическими размерами и электротепловыми характеристиками преобразователя. Рассмотрена методика определения оптимальных основных конструктивных параметров электрического теплоаккумулирующего преобразователя для систем солнечного теплоснабжения с использованием предложенной математической модели.*

**Ключевые слова:** прямой нагрев, электрический теплоаккумулирующий преобразователь, метод вторичных источников, математическая модель.

### 1. Введение

В составе гелиоустановок горячего водоснабжения и отопления обязательно присутствуют аккумуляторы

тепла (в простейшем случае – бак для горячей воды). Необходимость накопления тепловой энергии в таких установках вызвана, прежде всего, тем, что период прихода солнечного излучения на коллектор, как правило,