

Є. Є. Чайковська, канд. техн. наук;
В. В. Стефанюк, асп.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОНАСОСНИМ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯМ

Запропоновано управління теплонасосним енергопостачанням на основі інформації як міри відтворення співвідношення виробництва та споживання енергії в єдиному інформаційному просторі.

Вступ

В сучасних умовах енергозбереження використання низькопотенційних джерел енергії в теплонасосному енергопостачанні займає пріоритетне місце. Існуючі системи управління на основі інерційних вимірювань температури теплоносіїв у конденсаторі та випарнику теплового насоса не завжди здатні узгоджувати виробництво та споживання енергії в складних умовах зміни теплового навантаження та температури низькопотенційного джерела енергії. Тому найчастіше підтримка функціонування теплонасосного енергопостачання відбувається на рівні включення чи відключення теплових насосів та потребує додаткових витрат як на додаткові теплові насоси щодо глибокого охолодження низькопотенційного джерела енергії, так і на електроенергію щодо стиску пари холодагента у компресорі. Відомі ж методи оптимізації як економічний, ексергетичний, термoeкономіки дають можливість визначити оптимальні умови використання теплонасосних систем на статичному рівні [1—6, 13—14].

Запропоновано новий інтелектуальний підхід щодо підтримки функціонування теплонасосного енергопостачання на основі синергетичної інформації як міри відтворення співвідношення між виробництвом та споживанням енергії. Реалізовано інтелектуальну систему управління енергопостачанням на основі експертної системи конденсатора теплового насоса без вимірювання температури місцевої води, що нагрівається в конденсаторі теплового насоса. З цією метою подано архітектуру експертної системи, що ґрунтується на синергетичному принципі. Основою експертної системи є конденсатор теплового насоса у якості динамічної системи (її назва в експертній системі — динамічна підсистема). Інші задіяні модулі з відповідним математичним описом — блоки зміни режиму, заряду та розряду. На основі запропонованої експертної системи можна: встановлювати межі працездатності теплонасосної системи щодо вибору холодагента; узгоджувати рівень споживання теплоти з рівнем продуктивності теплового насоса; використовувати теплову ємність місцевої води в повній мірі [7—12].

Постановка задачі

На основі аналізу впливу температури низькопотенційного джерела енергії на теплообмін у випарнику теплового насоса (рис. 1) виявлена необхідність прийняття рішень на зміну витрати холодагента, що подається у випарник, в залежності від температури низькопотенційного джерела енергії з метою його повного випаровування та економного стиску пари у компресорі.

Інерційні ж вимірювання параметрів робочого тіла у випарнику та конденсаторі теплового насоса не дають можливості прогнозувати рівень зміни витрати холодагента в залежності від температури низькопотенційного джерела енергії [1—6, 13—14].

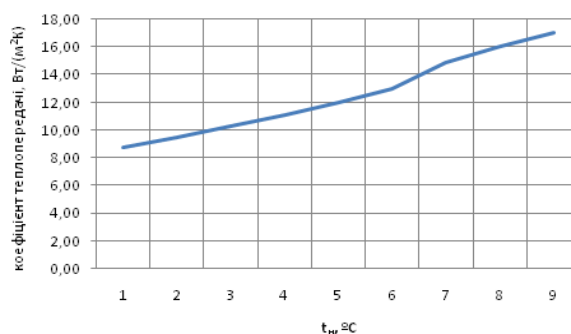


Рис. 1. Зміна коефіцієнта теплопередачі у випарнику теплового насоса в залежності від температури низькопотенційного джерела енергії

Система підтримки функціонування теплонасосного енергопостачання потребує узгодження зміни витрати холодагента через випарник теплового насоса в залежності від температури низькопотенційного джерела енергії зі зміною витрати пари у конденсаторі теплового насоса під час стиску пари у компресорі, рівень витрати якого визначено у випарнику.

Таким чином, система підтримки функціонування теплонасосного енергопостачання потребує інтегрованої інтелектуальної інформації як міри відтворення співвідношення виробництва та споживання енергії в інформаційному просторі: випарник — компресор та компресор — конденсатор без використання інерційних сигналів як регулювальних.

Розв'язання задачі

З цією метою розширено реалізовану експертну систему конденсатора теплового насоса за рахунок нових динамічних підсистем — випарника теплового насоса та компресора. Отримано нові передатні функції за каналами: «паровміст холодагента—витрата пари холодагента», «витрата пари холодагента—тиск пари холодагента» [12], що разом з передатною функцією за каналом «температура місцевої води—витрата пари холодагента» [10] для конденсатора теплового насоса, дає можливість отримати інтегровану діагностичну інформацію як еталонно-ідентифікаційну, так і функціональну.

Додатково розроблено математичну модель випарника теплового насоса щодо обраного на основі експертних знань істотного параметра, що діагностується — паровмісту холодагента у якості визначального для підтримки процесу заряду випарника та компресора. Система диференціальних рівнянь включає рівняння стану як оцінку фізичної моделі випарника; рівняння енергії передавального середовища й того, що сприймає; рівняння теплового балансу стінки випарника теплового насоса. Рівняння енергії середовища, що сприймає, враховує зміни істотного параметра, що діагностується, не тільки в часі, але й уздовж просторової координати осі теплообмінника, що збігається з напрямком руху потоку середовища. На основі системи нелінійних диференціальних рівнянь отримана передатна функція за каналом: «паровміст робочого тіла — витрата робочого тіла», що має такий вигляд:

$$W_{x-G_{xл}} = \frac{K_{xл}(\beta - 1)}{L_{xл}K_x\beta\gamma} (1 - e^{-\gamma 1\xi}),$$

де

$$K_{xл} = \frac{m(\theta_0 - t_0)}{G_{xл0}}; \quad \beta = T_M S + \varepsilon^* + 1; \quad T_M = \frac{g_M C_M}{\alpha_{30} h_{30}} \varepsilon^* = \varepsilon (1 - L_{нд}^*); \quad \varepsilon = \frac{\alpha_{в0} h_{в0}}{\alpha_{30} h_{30}}; \quad L_{нд}^* = \frac{1}{L_{нд} + 1};$$

$$L_{нд} = \frac{G_{нд} C_{нд}}{\alpha_{в0} h_{в0}}; \quad \gamma_1 = T_{xл} S; \quad T_{xл} = \frac{g_{xл} C_{xл}}{\alpha_{30} h_{30}}; \quad \xi = \frac{z}{L_{xл}}; \quad L_{xл} = \frac{G_{xл} C_{xл}}{\alpha_{30} h_{30}}; \quad K_x = \frac{\partial i}{\partial x} / \frac{\partial i}{\partial t}; \quad \gamma = \frac{T_{xл} S}{L_{xл}},$$

де i — ентальпія робочого тіла, кДж/кг; C — питома теплоємність, кДж/кгК; G — витрата речовини, кг/с; S — параметр перетворення Лапласа; $T_{xл}$, T_M — постійні часу, що характеризують теплову здатність робочого тіла, металу, що акумулюють, с; g — питома маса речовини, кг/м; h — питома поверхня, м²/м; m — показник залежності коефіцієнта тепловіддачі від витрати; t — температура робочого тіла, К; x — паровміст робочого тіла; z — координата довжини теплообмінника, м; α — коефіцієнт тепловіддачі, кВт/(м²К); θ — температура розподільної стінки, К.

Індекси: $xл$ — холодагент; $нд$ — низько потенційне джерело енергії; $м$ — металева стінка; $0, 1$ — початковий стаціонарний режим; $в, з$ — внутрішній, зовнішній потоки.

На основі метода графа причинно-наслідкових зв'язків [7—12] (рис. 2) додатково розроблена логічна модель управління випарником на рівні прийняття рішень. Динамічна підсистема як основа експертної системи виконує функції контролю працездатності як основи управління й ідентифікатора стану випарника.

Виходячи з графа причинно-наслідкових зв'язків блок контролю впливів CT_1 отримує повідомлення про зміни початкових умов функціонування випарника теплонасосної системи, зумовлених появою збурювальних впливів. Так, за незмінною витратою теплоносіїв змінюється температура низькопотенційного джерела енергії:

$$ES = DP(\tau) \left(CT_1(\tau), (x_0(\tau), x_1(1)(G_{нд}(\tau)(0), G_{xл}(\tau)(0), t_{нд}(\tau)(-)(+))) \right), Z_{c1}(\tau),$$

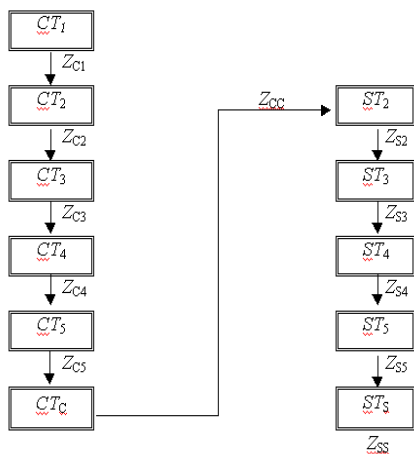


Рис. 2. Граф причинно-наслідкових зв'язків динамічної підсистеми: *CT* — контроль події; *Z* — логічні відносини; *ST* — ідентифікація події. Індекси: 1 — впливи; 2 — внутрішні параметри, що діагностуються; 3 — коефіцієнти рівнянь динаміки; 4 — істотні параметри, що діагностуються; 5 — динамічні параметри; *c* — контроль працездатності; *s* — стан

Інформація, що надходить від блока контролю *CT*₁, забезпечує отримання інформації від блока контролю *CT*₂ про зміну внутрішнього параметра, що діагностується — температуру стінки випарника теплового насоса. Інформація, отримана від блока *CT*₂ про зміну температури стінки є наслідком отримання попередньої інформації від блока контролю *CT*₁.

$$\left(CT_2(\tau) \left(f(\tau) (\theta(\tau) (-)(+)) (t_{нд}(\tau) (-)(+)) \right) \right), Z_{c2}(\tau).$$

Інформаційне повідомлення блока контролю *CT*₂ про зміну температури стінки забезпечує отримання інформації від блока контролю *CT*₃ щодо зміни коефіцієнта передатної функції *K*_{хл}, в склад якого входить змінене значення температури стінки. Тобто ця генерована блоком *CT*₃ інформація є наслідком попереднього інформаційного повідомлення від блока контролю *CT*₂.

$$\left(CT_3(\tau) \left(K(\tau) (K_{хл}(\tau) (-)(+)) \right) \right), Z_{c3}(\tau).$$

Інформаційне повідомлення з блока контролю *CT*₃ про зміну коефіцієнта передатної функції *K*_{хл}, забезпечує отримання інформації від блока контролю *CT*₄ про зміну істотного параметра, що діагностується — паровмісту холодагента:

$$\left(CT_4(\tau) \left(y(\tau) (\Delta x(\tau) (-)(+)) \right) \right), Z_{c4}(\tau).$$

Отримання інформації від блока контролю *CT*₅ про зміну динамічних параметрів є наслідком отримання попередньої інформації:

$$\left(CT_5(\tau) \left(d(\tau) (\Delta x(\tau) / \Delta x_{ст.розр}(\tau) (+)(-)) \right) \right), Z_{c5}(\tau).$$

Інформація від блока контролю *CT*₅ забезпечує отримання такої підсумкової інформації від блока контролю *CT*_c

$$\left(CT_c(\tau) \left(\Delta x(\tau) / \Delta x_{ст.розр}(\tau) > \Delta x_{розр.рів}(\tau) / \Delta x_{ст.розр}(\tau) \right) \right);$$

$$\left(CT_c(\tau) \left(\Delta x(\tau) / \Delta x_{ст.розр}(\tau) < \Delta x_{розр.рів}(\tau) / \Delta x_{ст.розр}(\tau) \right) \right),$$

що дає можливість змінювати рівень подачі холодагента через випарник теплового насоса для його повного випаровування:

$$\left(P(\tau) (G_{хл}(\tau) (+)(-)) \right), Z_{cc}(\tau).$$

Процес функціонального діагностування випарника теплового насоса завершує ідентифікація нового рівня функціонування з використанням ідентифікаційної частини графа причинно-наслідкових зв'язків:

$$\left(ST_2(\tau) \left(f(\tau) (\theta(\tau) = \theta_{нов.рів}(\tau)) \right) \right), Z_{s2}(\tau);$$

$$\left(ST_3(\tau) \left(K_{хл}(\tau) = K_{хлнов.рів}(\tau) \right) \right), Z_{s3}(\tau);$$

$$\left(ST_4(\tau) \left(y(\tau) (\Delta x(\tau) = \Delta x_{нов.рів}(\tau)) \right) \right), Z_{s4}(\tau);$$

$$\left(ST_5(\tau) \left(d(\tau) (\Delta x(\tau) / \Delta x_{ст.розр}(\tau) = \Delta x_{нов.рів}(\tau) / \Delta x_{ст.розр}(\tau)) \right) \right), Z_{s5}(\tau), \left(ST_{ss}(\tau) (P(\tau)) \right),$$

де ES — експертна система; D — динамічна підсистема; P — властивості елементів експертної системи; Z — логічні відносини; CT — контроль події; ST — ідентифікація події; x — впливи; f — параметри, що діагностуються; K — коефіцієнти математичного опису; y — вихідні параметри; d — динамічні параметри; t — час, с. Індeksi: 0, 1, 2 — початковий стан, зовнішній, внутрішній характер впливів; 3 — коефіцієнти рівнянь динаміки; 4 — суттєві параметри, що діагностуються; 5 — динамічні параметри; c — контроль працездатності; s — стан; ст. розр. — стале розрахункове значення параметра; рів. — рівень функціонування; нов. — новий рівень функціонування.

Так, наприклад, у разі зниження температури низькопотенційного джерела енергії на основі контролю працездатності випарника теплового насоса можна отримати таку підсумкову інформацію:

$$\left(CT_c(\tau) \left(\Delta x(\tau) / \Delta x_{\text{ст. розр.}}(\tau) > \Delta x_{\text{розр. рів.}}(\tau) / \Delta x_{\text{ст. розр.}}(\tau) \right) \right),$$

яка зумовлює прийняття рішення про збільшення подачі холодагента у випарник теплового насоса для його повного випаровування (рис. 3, 4):

$$\left(P(\tau) \left(G_{\text{хл}}(\tau)(+) \right) \right), Z_{cc}(\tau).$$

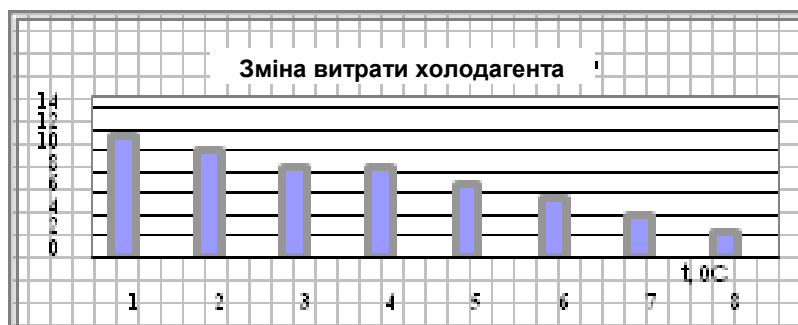


Рис. 3. Зміна витрати холодагента щодо повного випаровування у випарнику теплового насоса в залежності від температури низькопотенційного джерела енергії



Рис. 4. Підтримка функціонування системи випарник—компресор на рівні прийняття рішень:
1 — гранично допустима працездатність випарника та ідентифікація прийняття рішення;
2 — діагностування збільшення витрати холодагента

Отримання ж інформації на основі контролю працездатності компресора теплового насоса [12]:

$$\left(CT_c(\tau), \left(\Delta G(\tau) / \Delta G_{\text{макс. розр. верх}}(\tau) < \Delta G_{\text{розр.}}(\tau) / \Delta G_{\text{макс. розр. верх}}(\tau) \right) \right)$$

дає можливість забезпечити стиск збільшеної витрати пари (табл., рис. 5)

$$\left(P(\tau) \left(G(\tau)(-) \right) \right), Z_{cc}(\tau),$$

де індeksi: макс. розр. верх. — максимальне розрахункове значення параметра верхнього рівня функціонування; розр. — розрахункове значення параметра.

Контроль працездатності компресора теплового насоса в умовах зміни температури низькопотенційного джерела енергії

Час, с	Низький рівень функціонування, зменшення витрати пари	Верхній рівень функціонування, зменшення витрати пари	Низький рівень функціонування, збільшення витрати пари	Верхній рівень функціонування, збільшення витрати пари
0	0	0	0	0
20	0,5846	—	0,6301	—
40	0,8270	—	0,8914	—
60	0,9351	—	1	—
80	0,9847	—	1,0615	—
100	1	—	1,0850	—
200	1,08	—	1,0652	—
300	0,9882	—	1,0147	—
400	0,9401	—	1,0141	—
500	0,8750	—	0,9432	—
600	0,8092	—	0,8723	—
700	0,7434	—	0,8014	—
800	0,6777	—	0,7304	—
900	0,6119	—	0,6595	—
1000	—	0,5461	—	0,5886
1100	—	0,4803	—	0,5177
1200	—	0,4145	—	0,4468
1300	—	0,3487	—	0,3759
1400	—	0,2829	—	0,3050
1500	—	0,2171	—	0,2340
1600	—	0,1513	—	0,1631
1700	—	0,0855	—	0,0922
1800	—	0,0197	—	0,0213

Прийняття рішень (рис. 3—5, табл.) та використання підсумкової інформації на основі контролю працездатності конденсатора теплового насоса [10]

$$\left(CT_c(\tau) \left(\Delta t(\tau) / \Delta t_{ст. розр. низ.}(\tau) < \Delta t_{розр. рів.}(\tau) / \Delta t_{ст. розр. низ.}(\tau) < 0 \right) \right)$$

забезпечують працездатність системи компресор—конденсатор щодо збільшення перепуску пари у конденсатор теплового насоса з метою збільшення ємності місцевої води, що акумулює (рис. 6).

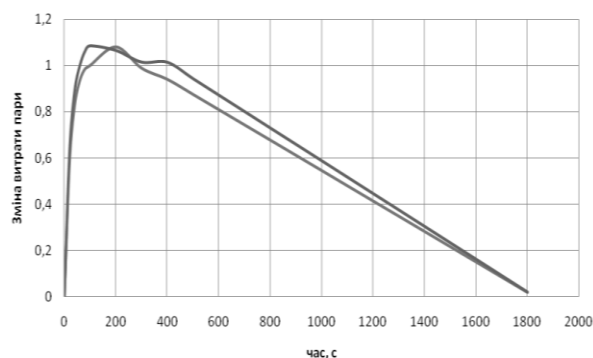


Рис. 5. Підтримка функціонування системи випарник—компресор та компресор — конденсатор на рівні прийняття рішень:
1 — діагностування зменшення витрати пари;
2 — діагностування збільшення витрати пари

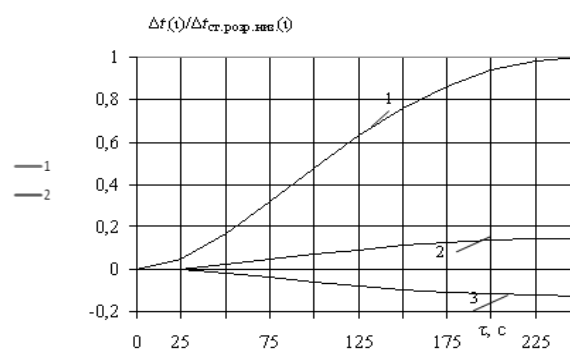


Рис. 6. Підтримка функціонування системи компресор—конденсатор на рівні прийняття рішень: 1 — гранично допустима працездатність підігріву місцевої води; 2, 3 — прийняття рішення та його ідентифікація щодо діагностування збільшення витрати холодагента

Підвищуючи температуру низькопотенційного джерела енергії на основі контролю працездатності випарника теплового насоса, можна отримати таку підсумкову інформацію:

$$\left(CT_c(\tau) \left(\Delta x(\tau) / \Delta x_{\text{ст. розр.}}(\tau) < \Delta x_{\text{розр. рів.}}(\tau) / \Delta x_{\text{ст. розр.}}(\tau) \right) \right),$$

що потребує прийняття рішення про зменшення подачі холодагента у випарник та компресор теплового насоса для його повного випаровування та економного стиску (рис. 3, 5, 7, табл.):

$$\left(P(\tau) (G_{\text{хл}}(\tau) (-)), Z_{\text{cc}}(\tau) \right).$$

Прийняття рішень (рис. 3, 5, 7, табл.) та використання підсумкової інформації на основі контролю працездатності конденсатора теплового насоса [10]:

$$\left(CT_c(\tau) \left(\Delta t(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. низ.}}(\tau) < \Delta t_{\text{розр. рів.}}(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. низ.}}(\tau) > 0 \right) \right),$$

забезпечують працездатність системи компресор—конденсатор щодо зменшення пропуску пари у конденсатор теплового насоса для зменшення ємності місцевої води, що акумулює (рис. 8).

$$\left(P(\tau) (G_{\text{хл}}(\tau) (-)), Z_{\text{cc}}(\tau) \right).$$

Прийняття таких рішень дозволяє зберегти допустимі межі працездатності низького рівня функціонування теплонасосного енергопостачання для подальшого підігріву місцевої води без додаткового теплового насоса для економії електроенергії [10].

Отримання на основі контролю працездатності конденсатора теплового насоса такої підсумкової інформації [10]:

$$\left(CT_c(\tau) \left(\Delta t(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. низ.}}(\tau) < \Delta t_{\text{розр. рів.}}(\tau) / \Delta t_{\text{ст. розр. низ.}}(\tau) > 0 \right) \right)$$

дозволяє, використовуючи розряд ємності місцевої води низького рівня підігріву, приймати рішення про включення секції компресора теплового насоса для верхнього рівня підігріву місцевої води також без додаткового теплового насоса.

Висновки

Для використання інтегрованої інформації щодо підтримки функціонування теплонасосного енергопостачання запропоновано оптимізувати систему управління на основі змінення витрати холодагента та потужності компресора в залежності від температури зворотної води, але на основі встановлення оптимального закону регулювання з використанням інерційного вимірювання температури води, що нагрівається в конденсаторі теплового насоса [13, 14].

На основі запропонованої інтелектуальної системи управління теплонасосним енергопостачанням з використанням інтегрованої інтелектуальної інформації як міри відтворення співвідношення виробництва та споживання енергії в інформаційному просторі випарник—компресор та компресор—конденсатор можливо:

1. Не використовувати інерційні вимірювання параметрів теплоносіїв у випарнику та конденсаторі теплового насоса для підтримки функціонування теплонасосного енергопостачання.

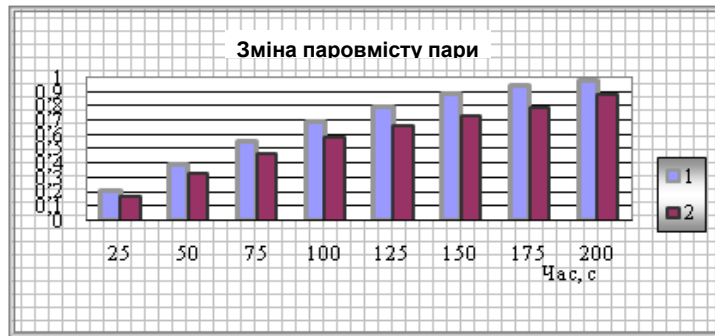


Рис. 7. Підтримка функціонування системи випарник—компресор на рівні прийняття рішень: 1 — гранично допустима працездатність випарника та ідентифікація прийняття рішення;

2 — діагностування зменшення витрати холодагента

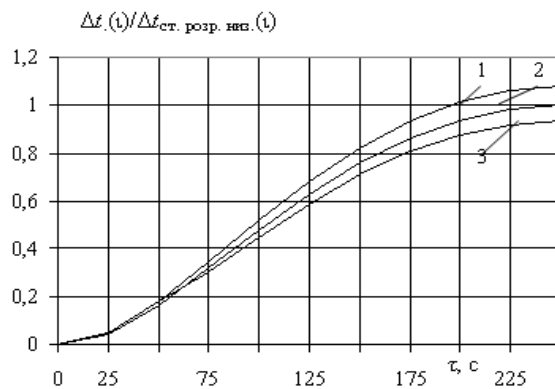


Рис. 8. Підтримка функціонування системи компресор—конденсатор на рівні прийняття рішень:

1, 3 — прийняття рішення та його ідентифікація щодо зменшення ємності місцевої води, що акумулює;

2 — гранично допустима працездатність підігріву місцевої води

2. Приймати рішення про зміни витрати холодагента у випарнику теплового насоса в залежності від температури низькопотенційного джерела енергії щодо його повного випаровування та забезпечення надійності компресора.

3. Узгоджувати рівень витрати холодагента у випарнику теплового насоса із рівнем потужності компресора теплового насоса щодо економного стиску пари.

4. Узгоджувати рівень подачі пари у конденсатор теплового насоса із рівнем подачі пари у випарник теплового насоса у разі використання ємності води, що нагрівається, в повній мірі.

5. Не використовувати додаткові теплові насоси для глибокого охолодження низькопотенційного джерела енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мацевитый Ю. М. Термозкономический анализ теплонасосной системы теплоснабжения / Ю. М. Мацевитый, Н. Б. Чиркин, М. А. Кузнецов // Проблемы машиностроения. — 2010. — Т. 13, № 1. — С. 42—51.
2. Долинский А. А. Тепловые насосы в теплоснабжении / А. А. Долинский, Е. Т. Базеев, А. И. Чайка // Промышленная теплотехника. — 2006. — Т. 28, № 2. — С. 99—105.
3. Басок Б. И. Перспективные когенерационные теплонасосные схемы геотермальной энергетики / Б. И. Басок, Т. А. Резакова, Д. М. Чалаев // Промышленная теплотехника. — 2006. — Т. 28, № 2. — С. 36—40.
4. Бутузов В. А. Геотермальная система теплоснабжения с использованием солнечной энергии и тепловых насосов / В. А. Бутузов, Г. В. Томаров, В. Х. Шетов // Промышленная энергетика. — 2008. — № 9. — С. 39—43.
5. Редько А. А. Исследование термодинамических режимов геотермальных теплонасосных установок / А. А. Редько, Д. Х. Харлампиди // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. — 2009. — № 2(76). — С. 86—98.
6. Баласанян Г. А. Оценка эффективности системы теплоснабжения с геотермальным источником тепла / Г. А. Баласанян, А. С. Стадниченко, А. С. Головатюк // Труды Одесского политехнического университета. — 2009. — Вып. 1(31). — С. 57—61.
7. Чайковська Є. Є. Інтелектуальне управління функціонуванням енергетичних систем на основі контролю їх працездатності / Є. Є. Чайковська // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2006. — № 3/2(21). — С. 48—52.
8. Чайковская Е. Е. Управление согласованием производства и потребления теплоты на уровне принятия решений / Е. Е. Чайковская // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2007. — № 2/3(26). — С. 16—20.
9. Чайковская Е. Е. Поддержание функционирования энергетических систем на основе интеллектуального управления тепломассобменными процессами / Е. Е. Чайковская // 6-й Минский Международный Форум по тепломассобмену : труды. — ИТМО им. А.В. Лыкова НАНБ, 8-05, — Минск, 2008. — С. 1—10.
10. Чайковська Є. Є. Управління теплонасосним теплопостачанням на основі синергетичної інформації / Є. Є. Чайковська, В. В. Стефанюк, О. С. Кореннік // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2009. — № 2. — С. 17—21.
11. Стефанюк В. В. Управління теплонасосним теплопостачанням на рівні прийняття рішень / В. В. Стефанюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2009. — №1/3 (37). — С. 32—35.
12. Чайковська Є. Є. Комплексна система підтримки функціонування тепло насосного енергопостачання / Є. Є. Чайковська, В. В. Стефанюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2011. — № 2/8 (50). — С. 54—57.
13. Журавлев А. А. Система регулирования газоохладителя теплонасосной установки в комбинированной системе теплоснабжения в широком диапазоне изменения тепловой нагрузки / [А. А. Журавлев, М. Л. Шит, Б. М. Шит, и др.] // Problemele Energeticii Regionale. — 2008. — № 2.
14. Шит Б. М. Повышение энергетической эффективности теплонасосной установки на диоксиде углерода в системе комбинированного теплоснабжения за счет оптимизации ее системы управления / Б. М. Шит, А. А. Журавлев, М. Л. Шит // Проблемы региональной энергетики. — 2008. — № 1.

Рекомендована кафедрою комп'ютерних систем управління

Стаття надійшла до редакції 30.03.11
Рекомендована до друку 2.09.11

Чайковська Євгенія Євстафіївна — доцент, **Стефанюк Вадим Володимирович** — аспірант.

Кафедра теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики, Одеський національний політехнічний університет, Одеса