

УДК 628.8

Моделювання надійності технічного стану теплонасосної установки з використанням системи нечітких логічних рівнянь лінгвістичних змінних

Г. С. Ратушняк¹, О.Г. Лялюк², Д. А. Шпіта³

¹к.т.н., проф. Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, ratusnak@gmail.com
ORCID 0000-0001-9656-5150

²к.т.н., доц. Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, Lyalyuk74@gmail.com
ORCID 0000-0001-6446-9244, Lyalyuk74@gmail.com

³аспірант. Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, shpitadima@gmail.com
ORCID 0000-0001-9811-6340

Анотація. З метою створення експертно-моделювальної системи для багатофакторного аналізу процесу накопичення факторів, що впливають на технічний стан теплового насоса, був використаний математичний апарат, що базується на теорії нечіткої логіки та лінгвістичної змінної. Цей метод як взаємопов'язана сукупність математичних моделей дозволяє використовувати експертно-лінгвістичну інформацію для прогнозування технічного стану теплового насоса залежно від факторів, що його обумовлюють. Виконано оцінку рівнів лінгвістичних змінних, що встановлюють зв'язок між факторами, які впливають на технічний стан теплових насосів, з використанням системи терм-множини. Побудовано нечіткі матриці знань з урахуванням уведених якісних термів та складено лінгвістичні висловлювання, що відповідають системі нечітких логічних рівнянь, які характеризують поверхню належності змінних за відповідними термами.

Ключові слова: моделювання, теплонасосні установки, прогнозований технічний стан, лінгвістичні змінні, фактори впливу

Вступ. Зростання споживання енергоносіїв та ускладнення екологічних наслідків при спалюванні палива для отримання теплової енергії потребує впровадження енергоощадних систем теплопостачання. Сучасна державна політика України спрямована на підвищення енергоощадності шляхом використання відновлювальних альтернативних джерел теплової енергії [1]. Досвід економічно розвинутих країн свідчить про позитивні наслідки використання різних джерел низькопотенційної теплоти теплонасосними установками для забезпечення необхідною тепловою енергією споживачів [2,3]. За експертними оцінками загальна кількість теплових насосів різної потужності у світі досягає близько 20 мільйонів. У США понад 30 % житлових будинків обладнано теплонасосними установками. Суттєво підвищити ефективність систем теплопостачання дозволяє використання теплонасосних установок, у яких джерелом низькопотенційної енергії є теплота Землі, що відбирається за допомогою теплообмінників, розміщених безпосередньо в ґрунті або водоносних горизонтах. Суттєвий вплив на надійність технічного стану теплонасосних установок (ТНУ) має значна сукупність кількісних та якісних чинників [4,5].

Актуальність дослідження. Отримання теплоенергетичних ресурсів з використанням теплонасосних установок, що перетворюють низькопотенційну теплоту ґрунтових вод на

придатну до споживання, є перспективним напрямком використання альтернативних джерел енергії. Експлуатаційна надійність ТНУ визначається науково-технічним рівнем проектних рішень, якістю будівельно-монтажних робіт та умовами експлуатації. Комплекс цих факторів характеризується кількісними та якісними величинами, що є визначальними при забезпеченні здатності ТНУ виконувати покладені на неї функції передачі теплової енергії від низькопотенційного джерела до споживача з більш високою температурою в заданих режимах та умовах застосування.

Останні дослідження та публікації. Аналіз надійності систем теплопостачання з використанням теплових насосів присвячені дослідження А. О. Редька, М. К. Безродного, М. В. Загорученко, О. Ф. Редька, Г. С. Ратушняк, М. Г. Хмелюка та ін. [3, 6]. В розробках М. К. Безродного та Н. О. Притули [12] розглядається оптимальна робота теплового насоса в низькотемпературних системах опалення з використанням теплоти ґрунту.

Формулювання мети дослідження. Мета роботи полягає в обґрунтуванні можливості експертно-аналітичного оцінювання надійності технічного стану теплонасосної установки, яка використовує ґрунтові води як джерело низькопотенційної теплоти. Для цього використано основні теоретичні положення нечіткої логіки та лінгвістичних змінних.

Основна частина. Для встановлення ієрархічних зв'язків факторів, які впливають на технічний стан теплового насоса, виконано їхню класифікацію [3, 13]. Використаємо на системному рівні лінгвістичну змінну $A_{СТН}$, що характеризує вплив сукупності факторів на надійність технічного стану теплового насоса. Її можна представити у вигляді раніше встановленого співвідношення, яке наведено в роботі [13]

$$A_{СТН} = f(X; Y; Z), \quad (1)$$

де X – лінгвістична змінна, яка описує науково-технічний рівень проектних рішень; Y – лінгвістична змінна, що описує якість будівельно-монтажних робіт; Z – лінгвістична змінна, яка описує технічні умови експлуатації системи.

Лінгвістична змінна, яка описує науково-технічний рівень проектних рішень, може бути представлена виразом

$$X = f_x(x_1; x_2; x_3; x_4; x_5), \quad (2)$$

де x_1 – лінгвістична змінна “Помилки в визначенні розрахунку потужності теплового насоса”; x_2 – лінгвістична змінна “Конструктивне виконання схем теплового насоса”; x_3 – лінгвістична змінна “Відхилення технічних характеристик теплового насоса від паспортних даних”; x_4 – лінгвістична змінна “Принцип роботи теплового насоса”; x_5 – лінгвістична змінна “Автоматизація та диспетчеризація управління частинами теплового насоса”.

Лінгвістична змінна, що описує якість будівельно-монтажних робіт, може бути представлена виразом

$$Y = f_y(y_1; y_2; y_3; y_4), \quad (3)$$

де y_1 – лінгвістична змінна “Механічні пошкодження при транспортуванні та монтажі комплектуючих системи”; y_2 – лінгвістична змінна “Відхилення від глибини закладання колекторів теплового насоса”; y_3 – лінгвістична змінна “Відхилення від проміжної відстані між колекторами теплового насоса”; y_4 – лінгвістична змінна “Дотримання правил та чинних норм під час виконання будівельно-монтажних робіт”.

Лінгвістична змінна, що описує технічні умови експлуатації теплових насосів, представлена виразом

$$Z = f_z(z_1; z_2; z_3; z_4; z_5), \quad (4)$$

де z_1 – лінгвістична змінна “Потрапляння сміття (іржі) у випарник під час експлуатації або затоплення теплового насоса”; z_2 – лінгвістична змінна “Мінералізація води, яку використовує система теплового насоса”; z_3 – лінгвістична змінна “Кваліфікаційний рівень персоналу”; z_4 – лінгвістична змінна “Якість міжремонтних та ремонтних заходів”; z_5 – лінгвістична змінна “Дотримання чинних норм та правил під час експлуатації”.

У вираз (2) входять змінні x_2 та x_4 , які в свою чергу залежать від інших факторів

$$x_2 = f_{x_2}(a_1; a_2; a_3), \quad (5)$$

$$x_4 = f_{x_4}(b_1; b_2), \quad (6)$$

де a_1 – лінгвістична змінна “Горизонтальна схема замкнутого типу”; a_2 – лінгвістична змінна “Вертикальна схема замкнутого типу”; a_3 – лінгвістична змінна “Водна схема замкнутого типу”; b_1 – лінгвістична змінна “Компресійні теплові насоси”; b_2 – лінгвістична змінна “Абсорбційні теплові насоси”.

Моделювання інтелектуальної підтримки оцінювання технічного стану теплового насоса на системному рівні здійснюватиметься за допомогою наступних термів:

- $T(A_{СТН}) = \langle \text{низький, нижче середнього, середній, вище середнього, високий} \rangle$;
- $T(X) = \langle \text{низькі, нижче середніх, середні, вище середніх, високі} \rangle$;
- $T(Y) = \langle \text{низькі, нижче середніх, середні, вище середніх, високі} \rangle$;
- $T(Z) = \langle \text{низькі, нижче середніх, середні, вище середніх, високі} \rangle$.

Нечітка матриця знань з урахуванням уведених якісних термів для моделювання залежності наведена в табл. 1.

Лінгвістичним висловлюванням, які наведені в табл. 1, відповідає система нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності оцінювання технічного стану теплового насоса за даним термом:

$$\begin{aligned} \mu_H(A_{СТН}) &= \mu_H(X) \wedge \mu_{HC}(Y) \wedge \mu_H(Z) \vee \\ &\vee \mu_{HC}(X) \wedge \mu_H(Y) \wedge \mu_H(Z) \vee \\ &\vee \mu_H(X) \wedge \mu_H(Y) \wedge \mu_H(Z); \end{aligned} \quad (7)$$

Матриця знань для залежності, що характеризує технічний стан теплового насоса

ЯКЩО			ТО
Науково-технічний рівень проектних рішень (X)	Якість будівельно – монтажних робіт (Y)	Технічні умови експлуатації (Z)	Технічний стан теплового насоса (A _{стп})
Низькі (Н)	Нижче середніх(нС)	Низькі (Н)	Низький (Н)
Нижче середніх(нС)	Низькі (Н)	Низькі (Н)	
Низькі (Н)	Низькі (Н)	Низькі (Н)	
Нижче середніх(нС)	Нижче середніх(нС)	Середні (С)	Нижче середнього (нС)
Нижче середніх(нС)	Середні (С)	Нижче середнього(нС)	
Низькі (Н)	Нижче середніх(нС)	Нижче середнього(нС)	
Нижче середніх(нС)	Середні (С)	Середні (С)	Середній (С)
Середні (С)	Середні (С)	Ниж середнього(нС)	
Середні (С)	Середні (С)	Вище середніх (вС)	
Нижче середніх(нС)	Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	Вище середнього (вС)
Середні (С)	Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	
Вище середніх (вС)	Вище середніх (вС)	Високі (В)	
Високі (В)	Високі (В)	Вище середніх (вС)	Високий (В)
Вище середніх (вС)	Високі (В)	Високі (В)	
Високі (В)	Вище середніх (вС)	Високі (В)	

$$\begin{aligned} \mu_{nC}(A_{стп}) &= \mu_{nC}(X) \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_C(Z) \vee \\ &\vee \mu_{nC}(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_{nC}(Z) \vee \\ &\vee \mu_H(X) \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_{nC}(Z); \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mu_{nC}(A_{стп}) &= \mu_{nC}(X) \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_C(Z) \vee \\ &\vee \mu_C(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_{nC}(Z) \vee \\ &\vee \mu_{nC}(X) \wedge \mu_C(Y) \wedge \mu_{nC}(Z); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mu_{nC}(A_{стп}) &= \mu_{nC}(X) \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_{nC}(Z) \vee \\ &\vee \mu_C(X) \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_{nC}(Z) \vee \\ &\vee \mu_{nC}(X) \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_B(Z); \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mu_B(A_{стп}) &= \mu_B(X) \wedge \mu_B(Y) \wedge \mu_{nC}(Z) \vee \\ &\vee \mu_{nC}(X) \wedge \mu_B(Y) \wedge \mu_B(Z) \vee \\ &\vee \mu_B(X) \wedge \mu_{nC}(Y) \wedge \mu_B(Z); \end{aligned} \quad (11)$$

Моделювання оцінювання технічного стану теплового насоса на рівні проектних рішень виконується таким чином. Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що пов'язує науково-технічний рівень проектних рішень (X) з помилками визначення розрахункової потужності теплового насоса (X₁), конструктивного виконання схем (X₂), відхиленнями технічних характеристик теплового насоса від паспортних даних (X₃), принципу роботи теплового насоса (X₄), автоматизації та диспетчеризації управління частинами теплового насоса (X₅), виконується з

використанням системи терм-множин:

- T(X) = <низькі, нижче середнього, середні, вище середнього, високі>;
- T(X₁) = <грубі, вище середніх, середні, нижче середніх, відсутні>;
- T(X₂) = <примітивна (пр), традиційна (тр), вдосконала (вд)>;
- T(X₃) = <низькі, нижче середнього, середні, вище середнього, високі>;
- T(X₄) = <низький, нижче середнього, середній, вище середнього, високий >;
- T(X₅) = <відсутня, частково відсутня, присутня >.

Лінгвістичним висловлюванням у табл. 2 відповідає певна система нечітких логічних рівнянь, що характеризують дану поверхню належності змінних за відповідним термом:

$$\begin{aligned} \mu_H(X) &= \mu_{Г}(x_1) \wedge \mu_{Пр}(x_2) \wedge \mu_H(x_3) \wedge \mu_H(x_4) \wedge \mu_B(x_5) \vee \\ &\vee \mu_{nC}(x_1) \wedge \mu_{Тр}(x_2) \wedge \mu_{nC}(x_3) \wedge \mu_{nC}(x_4) \wedge \mu_B(x_5) \vee \\ &\vee \mu_{вС}(x_1) \wedge \mu_{Пр}(x_2) \wedge \mu_H(x_3) \wedge \mu_H(x_4) \wedge \mu_B(x_5) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \mu_{nC}(X) &= \mu_{Г}(x_1) \wedge \mu_{Пр}(x_2) \wedge \mu_H(x_3) \wedge \mu_H(x_4) \wedge \mu_B(x_5) \vee \\ &\vee \mu_{вС}(x_1) \wedge \mu_{Тр}(x_2) \wedge \mu_C(x_3) \wedge \mu_C(x_4) \wedge \mu_B(x_5) \vee \\ &\vee \mu_{вС}(x_1) \wedge \mu_{Тр}(x_2) \wedge \mu_{nC}(x_3) \wedge \mu_{nC}(x_4) \wedge \mu_{чВ}(x_5) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \mu_C(X) &= \mu_{вС}(x_1) \wedge \mu_{Тр}(x_2) \wedge \mu_C(x_3) \wedge \mu_C(x_4) \wedge \mu_{чВ}(x_5) \vee \\ &\vee \mu_B(x_1) \wedge \mu_{Тр}(x_2) \wedge \mu_{вС}(x_3) \wedge \mu_{вС}(x_4) \wedge \mu_{чВ}(x_5) \vee \\ &\vee \mu_{nC}(x_1) \wedge \mu_{Тр}(x_2) \wedge \mu_{nC}(x_3) \wedge \mu_{nC}(x_4) \wedge \mu_{чВ}(x_5); \end{aligned} \quad (14)$$

Матриця знань для залежності, яка описує науково-технічний рівень проектних рішень

ЯКЩО					ТО
Помилки визначення розрахункової потужності теплового насоса (X_1)	Конструктивне виконання схем (X_2)	Відхилення реальних технічних характеристик теплового насоса від паспортних даних (X_3)	Принцип роботи теплового насоса (X_4)	Автоматизація та диспетчеризація управління теплового насоса (X_5)	Науково-технічний рівень проектних рішень (X)
Грубі (Г)	Примітивна (Пр)	Низькі (Н)	Низька (Н)	Відсутня (В)	Низькі (Н)
Нижче середнього (нС)	Традиційна (Тр)	Нижчі середнього (нС)	Нижча середнього (нС)	Відсутня (В)	
Вище середнього (вС)	Примітивна (Пр)	Низькі (Н)	Низька (Н)	Відсутня (В)	
Грубі (Г)	Примітивна (Пр)	Низькі (Н)	Низька (Н)	Відсутня (В)	Нижче середніх (нС)
Вище середнього	Традиційна (Тр)	Середні (С)	Середня (С)	Відсутня (В)	
Вище середнього (вС)	Традиційна (Тр)	Нижчі середнього (нС)	Нижча середнього (нС)	Частково відсутня (чВ)	
Нижче середнього (нС)	Традиційна (Тр)	Середні (С)	Середня (С)	Частково відсутня (чВ)	Середні (С)
Відсутні (Відс)	Традиційна (Тр)	Вищі середнього (вС)	Вища середнього (вС)	Частково відсутня (чВ)	
Нижче середнього (нС)	Традиційна (Тр)	Нижчі середнього (нС)	Нижча середнього (нС)	Частково відсутня (чВ)	
Відсутні (Відс)	Традиційна (Тр)	Вищі середнього (вС)	Вища середнього (вС)	Частково відсутня (чВ)	Вище середніх (вС)
Вище середнього (вС)	Вдоскоалена (Вд)	Високі (В)	Висока (В)	Присутня	
Вище середнього (вС)	Вдоскоалена (Вд)	Середні (С)	Середня (С)	Частково відсутня (чВ)	
Відсутні (Відс)	Вдоскоалена (Вд)	Вищі середнього (вС)	Вища середнього (вС)	Присутня (Пр)	Високі (В)
Вище середнього (вС)	Вдоскоалена (Вд)	Вищі середнього (вС)	Вища середнього (вС)	Частково відсутня (чВ)	
Відсутні (Відс)	Вдоскоалена (Вд)	Високі (В)	Висока (В)	Присутня (Пр)	

$$\begin{aligned} \mu_{вС}(X) = & \mu_{В}(x_1) \wedge \mu_{Тр}(x_2) \wedge \mu_{вС}(x_3) \wedge \mu_{вС}(x_4) \wedge \mu_{чВ}(x_5) \vee \\ & \vee \mu_{вС}(x_1) \wedge \mu_{Вд}(x_2) \wedge \mu_{В}(x_3) \wedge \mu_{В}(x_4) \wedge \mu_{Пр}(x_5) \vee \\ & \vee \mu_{вС}(x_1) \wedge \mu_{Вд}(x_2) \wedge \mu_{С}(x_3) \wedge \mu_{С}(x_4) \wedge \mu_{чВ}(x_5); \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_{в}(X) = & \mu_{Вілс}(x_1) \wedge \mu_{Вд}(x_2) \wedge \mu_{вС}(x_3) \wedge \mu_{вС}(x_4) \wedge \mu_{Пр}(x_5) \vee \\ & \vee \mu_{вС}(x_1) \wedge \mu_{Вд}(x_2) \wedge \mu_{вС}(x_3) \wedge \mu_{вС}(x_4) \wedge \mu_{чВ}(x_5) \vee \\ & \vee \mu_{Вілс}(x_1) \wedge \mu_{Вд}(x_2) \wedge \mu_{В}(x_3) \wedge \mu_{В}(x_4) \wedge \mu_{Пр}(x_5); \quad (16) \end{aligned}$$

Нечітку матриця знань, яка враховує введені якісні терми для моделювання залежності конструктивних схем виконання теплового насоса, наведено в табл. 3. Лінгвістичним висловлюванням, які наведено в табл. 3, за відповідним даним термом, є система рівнянь

$$\begin{aligned} \mu_{нез}(X_2) = & \mu_{Пр}(a_1) \wedge \mu_{Пр}(a_2) \wedge \mu_{Пр}(a_3) \vee \\ & \vee \mu_{Пр}(a_1) \wedge \mu_{Пр}(a_2) \wedge \mu_{Пр}(a_3); \quad (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_{мЗад}(X_2) = & \mu_{Тр}(a_1) \wedge \mu_{Тр}(a_2) \wedge \mu_{Тр}(a_3) \vee \\ & \vee \mu_{Тр}(a_1) \wedge \mu_{Тр}(a_2) \wedge \mu_{Тр}(a_3); \quad (18) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_{Зад}(X_2) = & \mu_{Вд}(a_1) \wedge \mu_{Вд}(a_2) \wedge \mu_{Вд}(a_3) \vee \\ & \vee \mu_{Вд}(a_1) \wedge \mu_{Вд}(a_2) \wedge \mu_{Вд}(a_3). \quad (19) \end{aligned}$$

Нечітку матриця знань, що враховує введення якісних термів для здійснення моделювання залежності від принципу роботи теплового насоса, наведено в табл. 4. Лінгвістичним висловлюванням з табл. 4 за відповідним даним термом є система рівнянь

$$\begin{aligned} \mu_{Н}(x_4) = & \mu_{Н}(b_1) \wedge \mu_{нС}(b_2) \vee \\ & \vee \mu_{нС}(b_1) \wedge \mu_{Н}(b_2); \quad (20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_{С}(x_4) = & \mu_{С}(b_1) \wedge \mu_{С}(b_2) \vee \\ & \vee \mu_{вС}(b_1) \wedge \mu_{вС}(b_2); \quad (21) \end{aligned}$$

Таблиця 3

Матриця знань для залежності конструктивних схем виконання теплового насоса

Горизонтальні схеми різних типів	ЯКЩО			ТО
	Горизонтальна схема (а ₁)	Вертикальна схема (а ₂)	Водна схема (а ₃)	Конструктивне виконання схем (Х ₂)
1	Примітивна(Пр)	Примітивна (Пр)	Примітивна (Пр)	Незадовільне (Нез)
2	Примітивна(Пр)	Примітивна (Пр)	Примітивна (Пр)	
3	Традиційна(Тр)	Традиційна (Тр)	Традиційна(Тр)	Менш задовільне (МЗ)
4	Традиційна(Тр)	Традиційна Тр)	Традиційна(Тр)	
5	Вдосконалена (Вд)	Вдосконалена (Вд)	Вдосконалена (Вд)	Задовільне (З)
6	Вдосконалена (Вд)	Вдосконалена (Вд)	Вдосконалена (Вд)	

Таблиця 4

Матриця знань для залежності принципу роботи теплового насоса

ЯКЩО		ТО
Компресійні теплові насоси (b ₁)	Абсорбційні теплові насоси (b ₂)	Принцип роботи теплового насоса (x ₄)
Низька (Н)	Нижча середнього (нС)	Низька (Н)
Нижча середнього (нС)	Низька (Н))	
Середня (С)	Середня (С)	Середня (С)
Вища середнього (вС)	Вища середнього (вС)	Висока (В)
Висока (В)	Вища середнього (вС)	
Вища середнього (вС)	Висока (В)	

$$\mu_{b_1}(x_4) = \mu_{b_1}(b_1) \wedge \mu_{b_2}(b_2) \vee \mu_{b_2}(b_1) \wedge \mu_{b_1}(b_2). \quad (22)$$

Моделювання оцінювання технічного стану теплового насоса на рівні будівельно-монтажних робіт виконується таким чином. Оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що пов'язує будівельно-монтажні роботи (Y) з механічними пошкодженнями при транспортуванні та монтажі комплектуючих систем теплових насосів (Y₁), контроль глибини закладання колекторів теплового насоса (Y₂), контроль проміжної відстані між колекторами теплового насоса (Y₃), дотримання чинних норм та правил під час будівельно-монтажних робіт (Y₄) виконується з використанням системи терм-множин:

- T(Y) = <низькі, нижче середніх, середні, вище середніх, високі>;
- T(Y₁) = <відсутні, частково відсутні, присутні>;
- T(Y₂) = <низька, нижче середнього, середня, вище середньої, висока>;
- T(Y₃) = <низька, середня, висока>;
- T(Y₄) = <низьке, нижче середнього, середнє, вище середнього, високе>.

Нечітка матриця знань з урахуванням якісних термів залежно від експлуатаційних показників теплового насоса наведено в табл. 5. Лінгвістичним висловлюванням, які наведено в табл. 5, відповідає система рівнянь за даним відповідним термом:

$$\mu_{n_1}(Y) = \mu_{n_1}(Y_1) \wedge \mu_{n_2}(Y_2) \wedge \mu_{n_3}(Y_3) \wedge \mu_{n_4}(Y_4) \vee \mu_{n_1}(Y_1) \wedge \mu_{n_2}(Y_2) \wedge \mu_{n_3}(Y_3) \wedge \mu_{n_4}(Y_4) \vee$$

$$\mu_{n_2}(Y_1) \wedge \mu_{n_3}(Y_2) \wedge \mu_{n_4}(Y_3) \wedge \mu_{n_1}(Y_4); \quad (23)$$

$$\mu_{n_1}(Y) = \mu_{n_1}(Y_1) \wedge \mu_{n_2}(Y_2) \wedge \mu_{n_3}(Y_3) \wedge \mu_{n_4}(Y_4) \vee \mu_{n_2}(Y_1) \wedge \mu_{n_3}(Y_2) \wedge \mu_{n_4}(Y_3) \wedge \mu_{n_1}(Y_4) \vee \mu_{n_3}(Y_1) \wedge \mu_{n_4}(Y_2) \wedge \mu_{n_1}(Y_3) \wedge \mu_{n_2}(Y_4); \quad (24)$$

$$\mu_{n_2}(Y) = \mu_{n_2}(Y_1) \wedge \mu_{n_3}(Y_2) \wedge \mu_{n_4}(Y_3) \wedge \mu_{n_1}(Y_4) \vee \mu_{n_3}(Y_1) \wedge \mu_{n_4}(Y_2) \wedge \mu_{n_1}(Y_3) \wedge \mu_{n_2}(Y_4) \vee \mu_{n_4}(Y_1) \wedge \mu_{n_1}(Y_2) \wedge \mu_{n_2}(Y_3) \wedge \mu_{n_3}(Y_4); \quad (25)$$

$$\mu_{n_3}(Y) = \mu_{n_3}(Y_1) \wedge \mu_{n_4}(Y_2) \wedge \mu_{n_1}(Y_3) \wedge \mu_{n_2}(Y_4) \vee \mu_{n_4}(Y_1) \wedge \mu_{n_1}(Y_2) \wedge \mu_{n_2}(Y_3) \wedge \mu_{n_3}(Y_4) \vee \mu_{n_1}(Y_1) \wedge \mu_{n_2}(Y_2) \wedge \mu_{n_3}(Y_3) \wedge \mu_{n_4}(Y_4); \quad (26)$$

$$\mu_{n_4}(Y) = \mu_{n_4}(Y_1) \wedge \mu_{n_1}(Y_2) \wedge \mu_{n_2}(Y_3) \wedge \mu_{n_3}(Y_4) \vee \mu_{n_1}(Y_1) \wedge \mu_{n_2}(Y_2) \wedge \mu_{n_3}(Y_3) \wedge \mu_{n_4}(Y_4) \vee \mu_{n_2}(Y_1) \wedge \mu_{n_3}(Y_2) \wedge \mu_{n_4}(Y_3) \wedge \mu_{n_1}(Y_4); \quad (27)$$

Висновки. Виконаний аналіз та оцінка рівнів лінгвістичних змінних, що встановлюють зв'язок між факторами, які впливають на технічний стан теплових насосів з використанням системи терм-множини, дозволив побудувати нечіткі матриці знань з урахуванням уведених якісних термів та скласти лінгвістичні висловлювання, які відповідають системі нечітких логічних рівнянь, що характеризують поверхню належності змінних за відповідними термами.

Матриця знань в залежності від експлуатаційних показників теплового насоса

Механічні пошкодження при транспортуванні та монтажі (Y ₁)	ЯКЩО			ТО
	Контроль відхилення глибини закладання колекторів теплового насоса (Y ₂)	Контроль відхилення проміжної відстані між колекторами (Y ₃)	Дотримання чинних норм та правил під час будівельно-монтажних робіт (Y ₄)	Експлуатаційні показники (Y)
Присутні (П)	Нижче середнього (нС)	Низька (Н)	Нижче середнього (нС)	Низькі (Н)
Присутні (П)	Низький (Н)	Низька (Н)	Низький (Н)	
Частково присутні (чП)	Низький (Н)	Середня (С)	Низький (Н)	
Присутні (П)	Нижче середнього (нС)	Низька (Н)	Нижче середнього (нС)	Нижче середніх (нС)
Частково п.(Пр)	Середній(С)	Середня (С)	Середній(С)	
Присутні (П)	Низький (Н)	Середня (С)	Низький (Н)	
Частково присутні (чП)	Нижче середнього (нС)	Висока (В)	Нижче середнього (нС)	Середні (С)
Відсутні (В)	Середній (С)	Середня (С)	Середній (С)	
Частково присутні (чП)	Вище середнього (вС)	Середня (С)	Вище середнього (вС)	
Відсутні (В)	Вище середнього (вС)	Висока (В)	Вище середнього (вС)	Вище середніх (вС)
Відсутні (В)	Середній (С)	Середня (С)	Середній (С)	
Частково присутні (чП)	Високий (В)	Висока (В)	Високий (В)	
Відсутні (В)	Високий (В)	Висока (В)	Високий (В)	Високі (В)
Відсутні (В)	Високий (В)	Середня (С)	Високий (В)	
Відсутні (В)	Вище середнього (вС)	Висока (В)	Вище середнього (вС)	

Перспективи подальших досліджень. У подальшому доцільне проведення натурального експерименту для уточнення експертних

значень лінгвістичних змінних, що впливають на параметри функціонування теплових насосів.

Література

1. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних і нетрадиційних джерел енергії України. – НАН України, Інститут відновлюваної енергетики, Держ. ком. України з енергозбереження. – Київ, 2005. – 45 с.
2. Аналіз сучасного стану альтернативної енергетики та рекомендації по екологізації паливно-енергетичного комплексу України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://eco.com.ua/content/analiz-suchasnogo-stanu-alternativnoi-energetiki-ta-rekomendatsii-po-ekologizatsii-palivno-e>
3. Ратушняк Г. С. Моделирование надёжности систем теплоснабжения на основе лингвистической информации / Г. С. Ратушняк, О. Левицкий, О. Г. Ратушняк // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2004. – №1. – С. 179-192.
4. Ратушняк Г. С. Энергозберігаючі відновлювальні джерела теплоснабження: навч. посіб. / Г. С. Ратушняк, В. В. Дзеджула, К. В. Анохіна. – Вінниця: ВНТУ, 2010
5. Теплові насоси. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://tth.com.ua/pub.php?id=15&lang=ukr>.
6. Низькопотенційна енергетика: навч. посіб. / А. О. Редько, М. К. Безродний, М. В. Загорученко, О. Ф. Редько, Г. С. Ратушняк, М. Г. Хмельнюк. – Друкарня Мадрид, 2016. – 412 с.
7. Мальований М. С. Світовий досвід, переваги та недоліки застосування теплових насосів у теплоенергетиці України / М. С. Мальований, О. Ю. Берлінг // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 3 – С. 89-94.
8. Адаменко О. М. Альтернативні палива та інші нетрадиційні джерела енергії / О. М. Адаменко, В. А. Височанський, В. М. Лютко. – Івано-Франківськ: ІМЕ, 2001. – 432с.
9. Васильев Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли / Г. П. Васильев. – Москва: Издательский дом «Граница», 2006. – 176 с., ил. – С. 62 – 66.
10. Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии. – Москомархитектура. ГУП "НИИЦ", 2001.
11. Амерханов Р. А. Гетротермальная энергия в системах теплоснабжения / Р. А. Амерханов // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28. – № 2. – С.30-34.
12. Безродний М. К. Оптимальна робота теплового насоса в низькотемпературних системах опалення з використанням теплоти ґрунту / М. К. Безродний, Н. О. Пригула // Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". – 2012. – №1. – С. 7-12.
13. Ратушняк Г. С. Аналіз факторів оцінки надійності теплового насоса / Г. С. Ратушняк, Д. А. Шпіта // Вісник машинобудування та транспорту. – 2018. – № 2(8). – С. 98-105.

References

1. *Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovliuvanykh i netradytsiinykh dzherel enerhii Ukrainy*. NAN Ukrainy, Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky, Derzh. kom. Ukrainy z enerhozberezhennia, 2005.
2. *Analiz suchasnoho stanu alternatyvnoi enerhetyky ta rekomendatsii po ekolohizatsii palyvno-enerhetychnoho kompleksu Ukrainy*. <http://eco.com.ua/content/analiz-suchasnogo-stanu-alternativnoi-energetiki-ta-rekomendatsii-po-ekologizatsii-palivno-e>
3. Ratushniak H. S., Levytskyi O., Ratushniak O. H. "Modeliuvannya nadiinosti system teplopostachannia na osnovi linhvistychnoi informatsii." *Suchasni tekhnologii, materialy i konstruktivni v budivnytstvi*. №1, 2004. pp. 179-192.
4. Ratushniak H. S., Dzhezhdzula V. V., Anokhina K. V. *Enerhozberihaiuchi vidnovliuvalni dzherela teplopostachannia*. VNTU, 2010
5. *Teplovi nasosy*. <http://tteh.com.ua/pub.php?id=15&lang=ukr>
6. Redko A. O., Bezrodnyi M. K., Zahoruchenko M. V., Redko O. F., Ratushniak H. S., Khmelniuk M. H. *Nyzkopotentsiina enerhetyka*. Drukarnia Madryd, 2016.
7. Malovanyi M. S., Berlih O. Yu. "Svitovyi dosvid, perevahy ta nedoliky zastosuvannia teplovykh nasosiv u teploenerhetytsi Ukrainy." *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, 2012. № 3. pp. 89-94.
8. Adamenko O. M., Vysochanskyi V. A., Lotko V. M. *Alternatyvni palyva ta inshi netradytsiini dzherela enerhii*. IME, 2001.
9. Vasylev H. P. *Teplokhladosnabzhenie zdaniy i sooruzheniy s ispolzovaniem nyzkopotentsyalnoi teplovoi energii poverkhnostnykh sloev Zemli*. Hranitsa, 2006.
10. *Rukovodstvo po primeneniiu teplovykh nasosov s ispolzovaniem vtorichnykh energeticheskikh resursov i netraditsionnykh vozobnovliaemykh istochnikov energii*. Moskomarkhytektura. HUP "NYATS", 2001.
11. Amerkhanov R. A. "Hetrotermalnaia enerhiya v systemakh teplosnabzheniya." *Promyshlennaia teplotekhnika*. 2006. Vol. 28, № 2. pp. 30-34.
12. Bezrodnyi M. K., Prytula N. O. "Optymalna robota teplovoho nasosa v nyzkotemperaturnykh systemakh opalennia z vykorystanniam teploty gruntu." *Naukovi visti Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskyi politekhnichnyi instytut"*. 2012. №1. pp. 7-12.
13. Ratushniak H. S., Shpita D. A. "Analiz faktoriv otsinky nadiinosti teplovoho nasosa." *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu*. 2018. № 2(8). pp. 98-105.

УДК 628.8

Моделирование надежности технического состояния тепловой насосной установки с использованием системы нечетких логических уравнений лингвистических переменных

Г. С. Ратушняк¹, О.Г. Лялюк², Д. А. Шпита³

¹к.т.н., профессор. Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина, ratusnag@gmail.com
ORCID 0000-0001-9656-5150

²к.т.н., доц. Винницкий национальный технический университет, Винница, Украина, Lyalyuk74@gmail.com
ORCID 0000-0001-6446-9244,

³аспирант. Винницкий национальный технический университет, г. Винница, Украина, shpitadima@gmail.com
ORCID 0000-0001-9811-6340

Аннотация. С целью создания экспертно-моделирующей системы для многофакторного анализа процесса накопления факторов, влияющих на техническое состояние теплового насоса, был использован математический аппарат, основанный на теории нечеткой логики и лингвистической переменной. Этот метод как взаимосвязанная совокупность математических моделей позволяет использовать экспертно-лингвистическую информацию для прогнозирования технического состояния теплового насоса в зависимости от обуславливающих факторов. Построены функции принадлежности нечетких оценок влияния факторов на прогнозируемое техническое состояние теплового насоса. Разработано дерево логического вывода иерархических связей факторов, которые могут влиять на оценку состояния теплового насоса. Выполнена оценка уровней лингвистических переменных, установлена связь между факторами, влияющими на техническое состояние тепловых насосов, используя систему терм-множества. Также построены нечеткие матрицы знаний с учетом введенных качественных термов и составлены лингвистические выражения, соответствующие системе нечетких логических уравнений, характеризующих поверхность принадлежности переменных по соответствующим термам.

Ключевые слова: моделирование, тепловые установки, прогнозируемое техническое состояние, лингвистическая переменная, факторы влияния.

UDC 628.8

Modeling the Reliability of the Technical State of a Thermal Pump Installation Using a System of Fuzzy Logical Equations of Linguistic Variables

H. S. Ratushniak¹, O. G. Lyalyuk², D. A. Shpita³

¹PhD, professor. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia Ukraine, ratusnag@gmail.com
ORCID 0000-0001-9656-5150

¹PhD., Associate Professor. Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, Ukraine, Lyalyuk74@gmail.com
ORCID 0000-0001-6446-9244

² postgraduate. Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia Ukraine, shpitadima@gmail.com
ORCID 0000-0001-9811-6340

Abstract. Heat pumps are one of the effective ways for increasing the energy efficiency of heat supply. Prediction of the technical state of heat pumps is necessary for uninterruptible heat supply of the consumers. In order to create an expert-modelling system for multifactorial analysis of the process of accumulation of influencing factors for the technical state of a heat pump, a mathematical apparatus based on the theory of fuzzy logic and a linguistic variable was used. This method gives an interconnected set of mathematical models, which allows using expert-linguistic information to predict the technical condition of the heat pump, depending on the factors that determine it. The functions of membership of fuzzy estimations of the factors influence on the predicted technical condition of the heat pump are constructed. The tree of the logical conclusion of the hierarchical relations of factors that may influence the state of the heat pump is developed. An assessment was made of the levels of linguistic variables that establish the relationship between factors affecting the technical state of heat pumps using the term-set system. Fuzzy matrices of knowledge were also built on the basis of the introduced qualitative terms, and linguistic statements were made, which correspond to the system of fuzzy logic equations that characterize the surface of the variables belonging to the corresponding terms. The methodology of complex factors for the expert of the project on the assessment of the technical condition of the heat pump is presented, which enables to obtain the appropriate management decisions taking into account quantitative and qualitative excitatory factors that influence the reliability and durability of the operation of the heat pump. In the future, the field tests will be conducted, which allow confirmation of the fuzzy logic model of the heat pump state.

Keywords: modeling, heat pump units, predicted technical condition, linguistic variable, factors of influence.

Надійшла до редакції / Received 05.04.2019.