

УДК 004.032.26

ЯГАНОВ П. О., РЕДЬКО І. В.

Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РЕГРЕСІЙНА МОДЕЛЬ ПРОСТОРУ СТАНІВ ТЕПЛОВОГО КОМФОРТУ

Мета. Модель багатовимірної гіперпростору станів складної багатофакторної системи «Тепловий комфорт» (ТК) шляхом моделювання індексу теплового комфорту PMV регресійними поліномами.

Методика. Моделювання гіперпростору станів системи теплового комфорту методом регресійного аналізу, математичний аналіз рівнянь регресії, які моделюють індекс теплового комфорту, оптимізація теплового комфорту шляхом визначення координат проекції вектору-образу теплового комфорту на гіперплощини та розв'язку рівняння багатьох змінних.

Результати. Розвиток методів і моделей для формального опису простору станів теплового комфорту людини. Досліджено використання методу регресійного аналізу як інструменту моделювання стану теплового комфорту у багатовимірному гіперпросторі станів системи. Це спростило процедуру розрахунку індексу теплового комфорту PMV та формування команд управління для АСУ тепловим середовищем. Обґрунтовано, що лінійна і квазілінійна модель поверхні станів системи ТК в межах обраних рівнів ТК з достатньою для практичного використання точністю розраховує індекс теплового комфорту PMV.

Наукова новизна. Розвинено і поширено на клас систем теплового комфорту метод регресійного аналізу. Вперше формальна модель простору станів теплового комфорту представлена лінійними і квазілінійними поліномами.

Практична значущість. Модель станів складної багатофакторної системи забезпечення теплового комфорту для людини представлена регресійним поліномом у лінійній і квазілінійній формі, що суттєво спрощує обчислення індексу PMV, класифікації стану теплового комфорту, пошук оптимальних режимів функціонування та формування команд виконавчим пристроям, які входять до складу АСУ ТК.

Ключові слова: ергономіка теплового середовища, гіперпростір станів системи, моделювання, регресійний аналіз.

Вступ. Аналітична модель станів технічної системи (ТС) є необхідною складовою сучасної інтелектуальної автоматизованої системи управління (АСУ). На її основі здійснюють прогноз динаміки ТС, ідентифікують (визначають) стан ТС, приймають рішення щодо можливих варіантів зміни стану або його підтримки. Проте детальний і всеохоплюючий опис процесів, які відбуваються під час функціонування ТС або технологічних процесів (ТП), формалізований у вигляді математичних рівнянь, може позбавити модель властивості ефективного і зручного інструменту для досліджень, а складність і громіздкість формальної моделі може стати причиною появи випадкових похибок, мультиплікованих самою структурою моделі, на тлі зростання ресурсів для отримання результату. Тому математичні методи і моделі дослідження складних багатофакторних динамічних ТС і ТП повинні бути компромісними в намаганні забезпечити мінімальну похибку апроксимації без надмірної обчислювальної складності. Критеріями оптимальності є точність моделювання, зручність користування, зрозумілий алгоритм математичних перетворень, простота оцінки достовірності отриманих результатів. Модель, як правило, вважається прийнятною для користувача, якщо похибка апроксимації фізичної величини знаходиться в допустимих межах інструментальної похибки вимірювань.

З розвитком комп'ютерних технологій складні алгоритми математичних обчислень не є стримуючим фактором для отримання результату. Наприклад, нейронні мережі з радіальними базисними функціями (РБФ-нейромережі) здатні апроксимувати складну функцію багатьох змінних з наперед заданою точністю [1]. Вони реалізовані у вигляді готових програм у складі відомих пакетів нейро математики, наприклад, MATHLAB [2]. Але для цього кількість нейронів нейромережі може сягати десятків і навіть сотень, а функції активації – гаусіани – утворюють складену вихідну «функцію у функції». Дослідження її, наприклад, на екстремуми породжує нову задачу, яку часто можливо вирішити тільки чисельними методами із залученням спеціальних комп'ютерних програм. Користувач як правило довіряє цим програмам, оскільки часто не має ні можливості, ні особливого бажання занурюватись у верифікацію складних алгоритмів пошуку рішень [3-5].

У той же час традиційні і широко відомі методи можуть стати альтернативою розв'язку деяких дослідницьких задач, заощаджуючи при цьому час і ресурси. До їх числа належить метод регресійного аналізу, за допомогою якого модель станів складної багатофакторної технічної системи моделюють регресійним поліномом у вигляді суперпозиції відносно простих функцій змінних, що адекватно визначає стан системи [6, 7]. Дослідження і аналіз отриманого результату відбувається з використанням визнаних математичних методів перевірки статистичних гіпотез про контрольованість експерименту, про статистичну значущість коефіцієнтів поліному, про адекватність моделі.

Метою даної роботи є дослідження багатовимірної гіперпростору станів системи «Тепловий комфорт» (ТК) шляхом моделювання індексу теплового комфорту PMV [8, 9] регресійними поліномами. Результати дослідження підтверджують, що лінійна і квазілінійна модель поверхні станів системи ТК в межах обраних рівнів ТК з достатньою для практичного використання точністю розраховує індекс теплового комфорту PMV .

Основна частина. Тепловий комфорт спочатку сприймався на інтуїтивному суб'єктивному рівні як теплове середовище, в якому комфортно перебувати людині. Згодом це поняття набуло об'єктивного визначення у результаті проведення численних наукових досліджень з ергономіки теплового середовища. Одна з моделей теплового комфорту дістала міжнародне визнання і була закріплена у державних стандартах багатьох країн світу. В основу досліджень цієї роботи покладено ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 «Ергономіка теплового середовища» [9].

В стандарті представлена модель індексу теплового комфорту PMV (« PMV », англ. «*Predicted Mean Vote*») як функція багатьох змінних, а саме, температури навколишнього середовища, швидкості руху повітря, вологості, теплового випромінювання від навколишніх предметів, фізичної активності (метаболізму), термоізоляції одягу. Розрахунок індексу PMV відбувається за формулами, що наводяться нижче [9]:

$$PMV = [0,303 \cdot \exp(-0,036 \cdot M) + 0,028] \cdot \{(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)\},$$

$$\text{де } t_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \{3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)\},$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} \text{ при } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \text{ при } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 \cdot l_{cl} \text{ при } l_{cl} \leq 0,078 \frac{M^2 \cdot K}{Bm} \\ 1,05 + 0,645 \cdot l_{cl} \text{ при } l_{cl} > 0,078 \frac{M^2 \cdot K}{Bm} \end{cases}$$

M — рівень метаболізму, Вт/м²

W — ефективна механічна енергія, Вт/м²

I_{cl} — коефіцієнт теплоізоляції одягу, м² К/Вт

f_{cl} — фактор площі ізоляції одягом

t_a — температура повітря, °С

$\bar{t}_r$ — середня температура випромінювання, °С

v_{ar} — відносна швидкість руху повітря, м/с

p_a — тиск водної пари, Па

h_c — коефіцієнт конвекційного теплообміну, Вт/(м² К)

t_{cl} — температура поверхні одягу, °С

Параметри t_{cl} та h_c обчислюються ітераційно.

З наведеного очевидно, що розрахунок індексу PMV — це складна обчислювальна процедура. Формули (1-1) дають змогу встановити індекс PMV за набором основних змінних, але практично неможливо за відомим індексом PMV визначити температуру навколишнього середовища, швидкість руху повітря, вологість тощо, якщо не застосовувати метод банального перебору. Очевидно, що можливості наведеної вище моделі обмежені у разі її використання в АСУ ТК, оскільки вона не надає можливості формування команд виконавчим пристроям змінювати параметри теплового комфорту.

Основні результати. Для розрахунку індексу PMV необхідно використовувати обчислювальні засоби у вигляді готових комп'ютерних програм. Рекомендації з використання однієї з таких програм на мові BASIC наведено у Додатку D як до міжнародного стандарту ISO 7730:2005 (E) [8], так і ДСТУ Б EN ISO 7730: 2011 [9]. У примітках ДСТУ Б EN ISO 7730: 2011 зазначається, що програма «надає можливість обчислювати PMV ... для заданого набору уведених змінних» [9, с. 35]. На жаль, програма містить неточність: у програмному коді відсутній рядок 490, який забезпечує обчислювання останнього від'ємника у формулі PMV , а саме $f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)$. Відсутність цієї команди не дозволяє провести коректні обчислення і верифікувати результат з прикладами, наведеними у таблиці D.1 (Додатку D). Тому у цій роботі здійснено доповнення програми відповідною командою, яка виправила цей недолік. За оновленою програмою обчислено індекс PMV за вхідними змінними, наведеними у таблиці D.1. Додатково виявлено, що з 13-ти результатів 12 співпадають, а результат рядка 7 таблиці D.1 дещо відрізняється від обчисленого. Різниця наведена у таблиці 1.

Таблиця 1.

Розрахунок індексу теплового комфорту

Змінна	$t_a, ^\circ\text{C}$	$\bar{t}_r, ^\circ\text{C}$	$v_{ar}, \text{м/с}$	$RH, \%$	M, met	I_{cl}, clo	$PMV, \text{ум.од.}$
р.7 D.1	23,5	23,5	0,1	40,0	1,2	1,0	0,5
Обчислено	23,5	23,5	0,1	40,0	1,2	1,0	0,357

В усіх наступних розрахунках значення PMV наведено за обчисленнями скорегованої програми на мові *Python*. Вологість RH розрахована за парціального тиску водяної пари у повітрі p_a , що не перевищує 2700 Па. Значення шести основних змінних, наведених у таблиці 2, у межах зазначених діапазонів були отримані за допомогою генератора випадкових чисел. Загальний об'єм досліджуваної вибірки індексу теплового комфорту в межах $PMV = \pm 2$ досягав 8975.

Таблиця 2

Діапазони основних змінних теплового комфорту

Змінна	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
	$t_a, ^\circ\text{C}$	$\bar{t}_r, ^\circ\text{C}$	$v_{ar}, \text{м/с}$	$RH, \%$	$M, \text{Bm}/\text{м}^2$	I_{cl}, clo
Макс.	30	40	1,0	80	116	2,0
Мін.	10	10	0,01	40	46	0,5

Рівень метаболізму $0,8 \text{ met} = 46 \text{ Bm}/\text{м}^2$ відповідає напівлежачому стану у розслабленій позі, а $2,0 \text{ met} = 116 \text{ Bm}/\text{м}^2$ середній рухливій активності. Теплоізоляцію одягу $0,5 \text{ clo} = 0,08 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{м}^2/\text{Bm}$ забезпечує легке літнє вбрання (сорочка з короткими рукавами, штани), а $2,0 \text{ clo} = 0,310 \text{ K} \cdot \text{м}^2/\text{Bm}$ відповідає вбранню з піджаком, курткою, шапкою, рукавичками тощо.

Гіперпростір станів системи ТК було розбито на 20 діапазонів від -2 («холодно») до +2 («гаряче»), у кожному з яких досліджено дві форми моделі індексу PMV : лінійну $PMV^1 = b_0 + \sum_{i=1}^6 b_i x_i$ і квазілінійну $PMV^2 = b_0 + \sum_{i=1}^6 b_i x_i + \sum_{i \neq j=1}^6 b_{ij} x_i x_j$. Перша налічує 7 членів регресії, а друга 22. Для кожного з діапазонів індексу PMV , який представлено у таблиці 3, сформована матриця умов X та матриця індексів PMV , що відповідає цим умовам. Коефіцієнти регресії обчислено за матричною формулою [6]:

$$B = (X^T X)^{-1} \cdot X^T Y, \quad (1-2)$$

де X – матриця умов,

X^T – транспонована матриця X ,

$(X^T X)^{-1}$ – обернена матриця добутку матриць X та X^T ,

Y – матриця результатів (матриця індексів PMV , обчислених за формулою 1-1).

Коефіцієнти регресії лінійної моделі PMV^1 , дисперсії моделі $\sigma_{\text{мод}}^2$ лінійної PMV^1 і квазілінійної форми PMV^2 , об'єм вибірки N у кожному з 20-ти діапазонів, наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

Результати моделювання станів теплового комфорту

№ діапаз ону PMV	Коефіцієнти регресії PMV^1							PMV^1	PMV^2	N
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	$\sigma_{\text{мод}}^2$	$\sigma_{\text{мод}}^2$	
2,0 ... 1,8	0,755363	0,021652	0,010290	-0,06901	0,001494	0,000872	0,06370	0,003	0,001	252
1,8 ... 1,6	0,594912	0,020778	0,009368	-0,07696	0,001155	0,001664	0,06776	0,003	0,002	336
1,6 ... 1,4	0,397149	0,020908	0,009113	-0,06283	0,001279	0,001756	0,08023	0,003	0,001	403
1,4 ... 1,2	0,180619	0,020931	0,009118	-0,06450	0,001080	0,001917	0,11393	0,003	0,001	452
1,2 ... 1,0	0,222694	0,016988	0,007120	-0,06081	0,000569	0,001837	0,09427	0,003	0,001	470
1,0 ... 0,8	0,099132	0,014099	0,006659	-0,06342	0,000944	0,001931	0,09259	0,003	0,001	493
0,8 ... 0,6	0,056948	0,011930	0,005333	-0,07406	0,000219	0,00194	0,08644	0,003	0,001	530
0,6 ... 0,4	-0,46007	0,017546	0,007233	-0,08413	0,000669	0,002935	0,13676	0,003	0,001	509
0,4 ... 0,2	-0,48542	0,015072	0,006287	-0,08703	0,000434	0,002412	0,12746	0,003	0,001	459
0,2 ... 0,0	-0,60297	0,012044	0,005083	-0,06544	0,000681	0,002431	0,11856	0,003	0,001	452
0,0 ... -0,2	-0,98137	0,014601	0,006523	-0,08694	0,000895	0,003429	0,14767	0,003	0,001	423
-0,2 ... -0,4	-0,87787	0,010564	0,004891	-0,07619	-0,00001	0,002469	0,10531	0,003	0,002	355
-0,4 ... -0,6	-1,07477	0,009807	0,00438	-0,06873	0,000566	0,002481	0,10311	0,003	0,002	348
-0,6 ... -0,8	-0,69827	0,000201	-0,00011	0,001979	-0,00008	-0,00004	0,00412	0,001	0,001	707
-0,8 ... -1,0	-0,93811	0,000476	0,000253	0,000256	0,000365	0,000142	-0,0073	0,003	0,001	630
-1,0 ... -1,2	-1,10509	0,000397	0,000254	-0,00225	-0,00002	-0,00006	-0,00002	0,003	0,002	558
-1,2 ... -1,4	-1,29656	-0,00014	0,000395	-0,00569	-0,00007	-0,00001	0,00233	0,003	0,003	463
-1,4 ... -1,6	-1,49855	-0,00107	0,000223	-0,00167	0,000079	0,000166	0,00012	0,003	0,005	474
-1,6 ... -1,8	-1,76735	0,000197	0,000917	0,002485	0,000203	0,000312	0,00003	0,003	0,002	350
-1,8 ... -2,0	-1,86059	-0,00071	-0,00020	-0,00127	-0,00010	-0,00013	-0,00242	0,003	0,004	311

Обґрунтування результатів. У таблиці 4 наведено значення індексу теплового комфорту PMV , розрахованому за формулою 1-1, з тестової таблиці D.1 Додатку D ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 та обчисленими за моделями PMV^1 , PMV^2 . Ці дані свідчать про те, що з прагматичних міркувань достатню точність для апроксимації функції $PMV\{x_i\}$ у кожному з представлених інтервалів забезпечує модель PMV^1 , яка апроксимує індекс теплового комфорту PMV гіперплощиною.

Таблиця 4

Результати обчислення індексу теплового комфорту PMV

Змінна	$t_a, ^\circ\text{C}$	$\bar{t}_r, ^\circ\text{C}$	$v_{ar}, \text{м/с}$	$RH, \%$	$M, \text{Вт/м}^2$	I_{cl}, clo	$PMV, \text{ум.од.}$			
							ф. 1-1	D.1	PMV^1	PMV^2
1	22,0	22,0	0,10	60,00	69,6	0,50	-0,76	-0,75	-0,71	-0,69
2	27,0	27,0	0,10	60,00	69,6	0,50	0,76	0,77	0,71	0,72
3	27,0	27,0	0,30	60,00	69,6	0,50	0,43	0,44	0,50	0,49
4	23,5	25,5	0,10	60,00	69,6	0,50	-0,02	-0,01	-0,11	-0,11
5	23,5	25,5	0,30	60,00	69,6	0,50	-0,61	-0,55	-0,50	-0,55
6	19,0	19,0	0,10	40,00	69,6	1,00	-0,61	-0,60	-0,71	-0,66
7	23,5	23,5	0,10	40,00	69,6	1,00	0,36	0,50*	0,32	0,45
8	23,5	23,5	0,30	40,00	69,6	1,00	0,11	0,12	0,09	0,09
9	23,0	21,0	0,10	40,00	69,6	1,00	0,05	0,05	0,09	0,05
10	23,0	21,0	0,30	40,00	69,6	1,00	-0,17	-0,16	-0,11	-0,14
11	22,0	22,0	0,10	60,00	92,8	0,50	0,04	0,05	0,09	0,03
12	27,0	27,0	0,10	60,00	92,8	0,50	1,17	1,17	1,12	1,12
13	27,0	27,0	0,30	60,00	92,8	0,50	0,95	0,95	0,93	0,93

*Не підтверджується обчисленнями.

Перевага лінійної форми моделі PMV^1 полягає у тому, що вона значно спрощує пошук оптимального режиму забезпечення бажаного теплового комфорту в автоматизованих системах керування мікрокліматом, наприклад, «Розумного дому» (англ. «Smart House»). Зокрема, в Україні чинним є державний стандарт ДСТУ-Н Б В.2.5-37:2008 [10], дія якого поширюється на автоматизовані системи моніторингу та управління будівель і споруд і визначає вимоги до апаратної та програмної складової пристроїв, які забезпечують управління електроживленням, узгодження інтерфейсів і протоколів обміну даними та пристроїв приймання і передачі інформації. Параметри регуляторів повинні мати властивість адаптивності і гнучкості щодо оцінки теплового комфорту конкретним користувачем без надмірного ускладнення алгоритмів керування в умовах певної невизначеності моделі об'єкту управління, захисту від зовнішніх завад, необхідності поєднувати усталеність і гнучкість тощо. Надійність їх функціонування залежить від складності команд та процедур пошуку оптимального рішення. У випадку лінійних моделей ця складність гранично спрощується.

Розглянемо випадок, коли попередня класифікація стану теплового комфорту відбулась [11], і система теплового комфорту перебуває у стані 1, що описується функцією $PMV^1\{x_i^1\}$, з якого потрібно перейти до стану 2, для якого відома функція $PMV^1\{x_i^2\}$. Пошук рішення зводиться до розв'язку рівняння виду:

$$PMV^1 = b_0 + \sum_{i=1}^6 b_i x_i^2 \quad (1-2)$$

де x_i^2 – значення змінних функції $PMV^1\{x_i^2\}$

b_0 – постійна змінна.

Множину розв'язку цього рівняння можна значно звузити, розглянувши деякі змінні як параметри. Наприклад, рівень фізичної активності (метаболізму) met , коефіцієнт термоізоляції одягу clo , температура теплового випромінювання від навколишніх предметів $\bar{t}_r$ користувачу АСУ ТК, як правило, відомі наперед. Тоді залишається визначити потрібну для стану 2 температуру навколишнього середовища, швидкість руху повітря і вологість. З множини допустимих розв'язків обирають той, який найбільш раціональний з точки зору енергетичної доцільності керування виконавчими пристроями. Усі ці розв'язки – це координати точок на площині $PMV^1 = b'_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i^2$ з урахуванням значень рівня фізичної активності (метаболізму) met , коефіцієнту термоізоляції одягу clo , температури теплового випромінювання від навколишніх предметів $\bar{t}_r$, які розглядаються як постійні величини (параметри) і входять до складу постійної змінної b'_0 .

Інший варіант пошуку рішення передбачає встановлення проекції точки з координатами $\{x_i^1\}$, що належить гіперплощині $PMV^1\{x_i^1\}$, на гіперплощину $PMV^1\{x_i^2\}$. Розглядаємо гіперпростір станів теплового комфорту як евклідовий. Координати проекції $\{x_i^2\}$ точки $\{x_i^1\}$ можуть виявитись такими, що будуть цілком прийнятні для користувача або потребуватимуть незначного корегування, а формування команд керування виконавчим пристроєм при цьому значно спрощується [11].

Висновки. В результаті досліджень поверхні станів системи ТК встановлено, що у інтервалах індексу теплового комфорту $PMV \pm 0,1$ формальною моделлю може бути рівняння регресії. Дисперсії апроксимації лінійної і нелінійної форми моделей знаходяться у межах $\sigma^2 = 0,001 \dots 0,005$. Такі моделі з достатньою для практичного використання точністю забезпечують апроксимацію індексу PMV , залежного від температури навколишнього середовища, швидкості руху повітря, вологості, теплового випромінювання від навколишніх предметів, рівня метаболізму, термоізоляції одягу. Це дозволяє розглядати їх як прагматичну альтернативу існуючим моделям з ергономіки теплового середовища, які доповнюють у своїй сукупності об'єктивізм поняття «тепловий комфорт». Встановлення режимів підтримки теплового комфорту для виконавчих пристроїв при цьому спрощується.

Подальші дослідження будуть спрямовані на розвиток модельних уявлень про гіперпростір станів складних багатофакторних систем взагалі і теплового середовища зокрема, класифікацію їх станів, формування команд управління для інтелектуальних АСУ.

Література

1. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей / Р. Каллан; пер. с англ. А.Г. Сивака – М. : Издательский дом «Вильямс», 2001. – 288 с.
2. Медведев В. С. Нейронные сети. MATLAB 6 / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин. Под общ. ред. В. Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496 с.
3. Calculation of Predicted mean Vote (PMV), and Predicted Percentage Dissatisfied (PPD) [Electronic Resource]. – Mode of access: URL: <http://www.eat.lth.se/fileadmin/eat/>

References

1. Kallan R. (2001) Osnovnye kontseptsyy neironnykh setei [The essence of Neural Networks]. (A.H. Syvak, Trans.). Moscow: Vyliams.
2. Medvedev, V. S., & Potemkyn, V. H. (2002) Neironnye sety. MATLAB 6 [Neural Networks. MATLAB 6]. V. H. Potemkyn (Ed.). – Moscow: DYALOH-MYFY [in Russian]
3. Calculation of Predicted mean Vote (PMV), and Predicted Percentage Dissatisfied (PPD) [Electronic Resource]. – Mode of access: URL : http://www.eat.lth.se/fileadmin/eat/termisk_miljoe/PMV-PPD.html.
4. CBE Thermal Comfort Tool [Electronic Resource]. – Mode of access: URL: <http://comfort.cbe.berkeley.edu>.

Termisk_miljoe/ PMV-PPD.html.

4. CBE Thermal Comfort Tool [Electronic Resource]. – Mode of access: URL: <http://comfort.cbe.berkeley.edu>.

5. Weiwei Liu. A neural network evaluation model for individual thermal comfort / Liu Weiwei, Lian Zhiwei, Zhao Bo // Energy and Buildings. – 2007. – Vol. 39. – P. 1115–1122.

6. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ. Книга 1. / Н Дрейпер, Г. Смит; пер. с англ. Ю.П. Адлер, В.Г. Горский – М.: Финансы и статистика, 1986. — 366 с.

7. Фёрстер Э., Рёнци Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа / Э. Фёрстер, Б. Рёнци; пер. с нем. В.М. Ивановой – М.: Финансы и статистика, 2008. – 267 с.

8. ISO 7730:2005 (E). Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.

9. Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту (EN ISO 7730:2011, IDT): ДСТУ Б EN ISO 7730: 2011. – [чинний від 01.07.2013]. – К.: – Мінрегіон України, 2012. – 64 с.

10. Інженерне обладнання будинків і споруд. Настанова з проектування, монтажування та експлуатації автоматизованих систем моніторингу та управління будівлями і спорудами: ДСТУ-Н Б В.2.5-37:2008 [чинний від 01.10.2008]. – Київ Мінрегіонбуд України, 2008. – 14 с.

11. Яганов П.О. Персептронний класифікатор теплового комфорту /П.О. Яганов П.О., І.В. Редько // Вісник КНУТД. – 2018. – № 6 (128). – С. 29 - 38.

5. Weiwei Liu. A neural network evaluation model for individual thermal comfort / Liu Weiwei, Lian Zhiwei, Zhao Bo // Energy and Buildings, 39 (2007). P. 1115–1122.

6. Dreiper N., & Smyt H. (1986) *Prykladnoi rehressyonnyi analyz. Knyha 1* [Applied Regression Analysis. Book 1] (Y.P. Adler, V.G. Gorsky, Trans). Moscow: Fynansy y statystyka.

7. Förster E., & Rönz B. (2008) *Metody korreliatsyonnoho y rehressyonnoho analiza* [Methoden der Korrelations- und Regressionsanalyse]. (V.M. Yvanova, Trans.). Moscow: Fynansy y statystyka.

8. ISO 7730:2005 (E). Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.

9. *Erhonomika teplovoho seredovyscha. Analitichne vyznachennia ta interpretatsiia teplovoho komfortu na osnovi rozrakhunkiv pokaznykiv PMV i PPD i kryteriiv lokalnoho teplovoho komfortu* [State Standart. Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (EN ISO 7730:2011, IDT)]: DSTU B EN ISO 7730: 2011. – [chynnyi vid 01.07.2013]. – Kyiv. – Minrehion Ukrainy, 2012. – 64 p.

10. *Inzhenerne obladnannia budynkiv i sporud. Nastanova z proektuvannia, montuvannia ta ekspluatatsii avtomatyzovanykh system monitorynhu ta upravlinnia budivliamy i sporudamy* [State Standart. Engineering equipment of buildings and structures. Instruction on the design, installation and operation of automated systems for monitoring and control of buildings and structures]: DSTU-N B V.2.5-37:2008 [chynnyi vid 01.10.2008]. – Kyiv. – Minrehionbud Ukrainy, 2008. – 14 p.

11. Yahanov P.O., Redko I.V. (2018) *Perseptronnyi klasyfikator teplovoho komfortu*. [Perceptron classifier of thermal comfort] Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design (128), p. 29 – 38 [in Ukraine].

YAHANOV P. O.

pitoryahanov@gmail.com,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7358-9846>

Researcher ID: J-3449-2017

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute»

RED'KO I. V.

redkoigor@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3121-1412>

Researcher ID: J-7576-2017

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute»

РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ ТЕПЛОВОГО КОМФОРТА

ЯГАНОВ П. А., РЕДЬКО И. В.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Цель. Модель многомерного гиперпространства состояний сложной многофакторной системы «Тепловой комфорт» ТК путем моделирования индекса теплового комфорта PMV регрессионными полиномами.

Методика. Моделирование гиперпространства состояний системы методом регрессионного анализа, математический анализ уравнений регрессии, которые моделируют индекс теплового комфорта, оптимизация теплового комфорта определением координат проекции вектора-образа теплового комфорта на гиперплоскость состояния и решение уравнения со многими переменными.

Результаты. Развитие методов и моделей для формального описания пространства состояний теплового комфорта человека. Исследовано использование метода регрессионного анализа как инструмента моделирования состояния теплового комфорта в многомерном гиперпространстве состояний системы. Упрощена процедура расчета индекса теплового комфорта PMV и формирование команд управления для АСУ тепловой среды. Обосновано, что линейная и квазилинейная модель поверхности состояний системы ТК в пределах выбранных интервалов ТК с достаточной для практического использования точностью рассчитывает индекс теплового комфорта PMV.

Научная новизна. Развито и распространено на класс систем теплового комфорта метод регрессионного анализа. Впервые формальная модель пространства состояний теплового комфорта представлена линейными и квазилинейными полиномами.

Практическая значимость. Модель состояний сложной многофакторной системы обеспечения теплового комфорта для человека представлена регрессионными полиномами в линейной и квазилинейной форме, что существенно упрощает вычисление индекса PMV, классификацию состояния теплового комфорта, поиск оптимальных режимов функционирования и формирования команд исполнительным устройствам, которые входят в состав АСУ ТК.

Ключевые слова: эргономика тепловой среды, гиперпространство состояний системы, моделирование, регрессионный анализ.

REGRESSION MODEL OF SPACE OF HEAT COMFORT STATES

YAHANOV P. O., RED'KO I. V.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute»

Purpose. A model of multidimensional hyperspace of states of the complex multifactor system «Thermal comfort» (TC) modeling of the index of thermal comfort PMV by regression polynomials.

Methodology. Modeling the hyperspace of system states by the method of regression analysis, mathematical analysis of regression equations that model the thermal comfort index, optimization of thermal comfort by determining the coordinates of the projection of the vector image of thermal comfort onto a state hyperplane and solving an equation with many variables.

Findings. Development of methods and models for a formal description of the space of states of human thermal comfort. The use of the method of regression analysis as a tool for modeling the state of thermal comfort in multidimensional hyperspace of system states is investigated. The procedure for calculating the PMV thermal comfort index and the formation of control commands for ACS of the thermal environment have been simplified. It is proved that a linear and quasilinear model of the state surface of the TC system within the selected TC intervals with sufficient accuracy for practical use calculates the PMV thermal comfort index.

Originality. The regression analysis method is developed and extended to the class of thermal comfort systems. For the first time, a formal model of the space of states of thermal comfort is represented by linear and quasilinear polynomials.

Practical value. The state model of a complex multifactor system for providing thermal comfort for a person is represented by regression polynomials in a linear and quasilinear form, which greatly simplifies the calculation of the PMV index, classification of the state of thermal comfort, the search for optimal operating modes and command formation for actuators that are part of the ACS of the TC.

Key words: ergonomics of the thermal environment, hyperspace of system states, modeling, regression analysis.