

УДК 004.032.26

ЯГАНОВ П. О., РЕДЬКО І. В.

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

ПЕРСЕПТРОННИЙ КЛАСИФІКАТОР ТЕПЛООВОГО КОМФОРТУ

Мета. Алгоритмізація управління автоматизованими системами тепловим комфортом людини для встановлення оптимального теплового комфорту з використанням класифікаційних та обчислювальних можливостей найпростішої одношарової нейронної мережі – перцептрону.

Методика. Класифікація гіперпростору станів системи теплового комфорту штучною нейронною мережею, математичний аналіз класифікаційних рівнянь гіперплощин, сформованих внутрішніми нейронами перцептрону, оптимізація стану теплового комфорту шляхом визначення координат проекції вектору-образу теплового комфорту на гіперплощину.

Результати. Розвиток методів і моделей нейронних мереж для формування алгоритму управління системою теплового комфорту людини. Досліджено використання класифікаційних та обчислювальних властивостей перцептрону як інструменту геометричної інтерпретації переходу від дійсного стану теплового комфорту до бажаного у багатовимірному гіперпросторі станів системи, що дозволило відмовитись від формулювання аналітичної оптимізаційної функції.

Наукова новизна. Розвинено і поширено на клас систем теплового комфорту класифікаційні властивості штучної нейронної мережі. Вперше для подальшої формалізації алгоритму зміни параметрів довкілля використано метод Качмажа.

Практична значущість. Енергоефективність складних багатофакторних динамічних технічних систем забезпечується не тільки досконалим сучасним обладнанням, але і раціональними моделями управління. Технології нейронних мереж дозволяють оптимально використати класифікаційні та обчислювальні можливості штучних нейронних мереж для формування команд управління виконавчим пристроям систем теплового комфорту.

Ключові слова: тепловий комфорт, нейронні мережі, перцептрон, гіперпростір станів, класифікаційні гіперплощини, проекція вектору-образу теплового комфорту на гіперплощину.

Вступ. Тепловий комфорт пов'язують із суб'єктивним відчуттям людини довкілля у її повсякденній життєдіяльності. Для об'єктивної оцінки ТК необхідні числові оцінки цього відчуття, на підставі яких можливе якісне проектування мікроклімату житлових приміщень, зон роботи і відпочинку, створення належних умов праці у замкнених просторах на зразок кабін і капсул літальних, надводних і підводних апаратів тощо.

Сутність теплового комфорту як функції багатьох змінних досліджена у багатьох наукових працях, в яких враховано фізіологічні особливості людського організму і його реакцію на зовнішні фактори, що формують відчуття теплового комфорту або дискомфорту [1 – 5]. Головними об'єктивними чинниками, які формують це відчуття, є температура навколишнього середовища, швидкість руху повітря, вологість, теплове випромінювання від навколишніх предметів, фізична активність (рівень метаболізму), термоізоляція одягу. Вони покладені в основу визначення теплового комфорту, яке закріплено у міжнародному стандарті та у національних стандартах країн [6 – 9]. Завдяки цьому створено передумови для розробки алгоритмів і команд виконавчим пристроям для автоматизованих систем життєзабезпечення з метою підтримки процесу оптимізації умов теплового комфорту.

Створення універсальної автоматизованої системи управління тепловим комфортом (АСУ ТК) з наперед визначеними параметрами регулювання є проблемною задачею, оскільки повністю задовольнити потреби усіх користувачів таких систем складно. Адже для деяких з них їх власні суб'єктивні уявлення про тепловий комфорт і бажання внести зміни до

усталених режимів функціонування АСУ ТК будуть тими чинниками збурень, які порушують детермінізм системи і потребуватимуть внесення змін до визначеної моделі.

Надати гнучкості і адаптивності існуючим системам на базі аналогової і цифрової схемотехніки може залучення технологій нейронних мереж для систем прийняття рішень у АСУ ТК. З їх допомогою здійснюють класифікацію та кластеризацію станів технічної системи, що забезпечує тепловий комфорт, формують команди управління для виконавчих пристроїв, керують режимами об'єктів зі складною і розгалуженою структурою, залучають до формування рішення динамічні зміни, що відбуваються з об'єктом управління. Вони здатні швидко реагувати на зміну умов функціонування у режимах реального часу, забезпечуючи необхідні адаптаційні властивості, притаманні системам зі штучним інтелектом, а у їх апаратно-програмній реалізації використовують програмовані логічні інтегральні схеми. В роботах [10, 11, 12] наведено приклади використання двошарових штучних нейронних мереж з нелінійними функціями активації як для обчислення індексів теплового комфорту, так і для класифікації температурних образів мікроклімату для агропромислового виробництва, де температура обрана основним параметром мікроклімату.

Метою даної роботи є використання класифікаційних та обчислювальних властивостей перцептронів як найпростішої одношарової нейронної мережі для алгоритмізації управління автоматизованими системами тепловим комфортом людини.

Розвиток можливостей методів і моделей штучних нейронних мереж досліджено на прикладі перцептронів для формування алгоритму управління тепловим комфортом і встановлення оптимального для користувача системи вектора-образа теплового комфорту. Для досягнення мети зважені вагові суми синаптичних коефіцієнтів вихідних нейронів перцептронів розглянуто як рівняння класифікаційних гіперплощин у гіперпросторі станів системи теплового комфорту, на поверхні яких знаходяться проекції векторів-образів бажаного теплового комфорту.

Основна частина. Дослідження з ергономіки теплового середовища свідчать про те, що навіть при ідеально підібраних параметрах доквілля, у якому прогнозована середня оцінка людьми теплового комфорту (параметр PMV, англ. «Predicted Mean Vote») є прийнятною, знайдеться не менше 5% людей, які оцінять його як дискомфортне. Для них уведено показник прогнозованого відсотка незадоволених (англ. PPD – Predicted Percentage Dissatisfied»), який розраховують за формулою:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2).$$

Показники PPD та PMV визначають межі теплового комфорту і дискомфорту. Ефективність АСУ ТК оцінюють за здатністю забезпечити потрібний режим будь-якому користувачу системи з мінімальними енерговитратами. Цю задачу можна вирішити, застосовуючи технології нейронних мереж.

Нейронні мережі є визнаним і апробованим інструментом класифікації і ідентифікації станів технічних систем і технологічних процесів. Моделі нейронних мереж реалізовані як програмно, так і апаратно. Серед програмних емуляторів нейронних мереж найбільш відомими є пакет прикладних програм Neural Network Toolbox (NNT) у складі системи комп'ютерної математики MATLAB, програмні пакети GeneHunter, NeuroShell Trader, NeuroShell Classifier та інші.

У даній роботі було використано обчислювальні можливості утіліти NNT. Для класифікації станів ТК створено одношаровий перцептрон з пороговою функцією активації. Кількість вхідних нейронів відповідає позиціям вхідного вектора-образу, сформованого головними змінними x_j , що визначають ТК згідно [6 – 9], а кількість вихідних нейронів – авторській класифікації на 10-ти рівнях, яка відображена у таблиці 1. За основу взято показник PMV. Запропонована у таблиці 1 класифікація не розглядається як остаточна, а є базовою. Вона може змінюватись у залежності від суб'єктивних уявлень про тепловий комфорт користувача системи. Він призначає «правильну» реакцію перцептрона на вхідний вектор-образ. Тоді синаптичні коефіцієнти перцептрону коригуються у процесі перенавчання нейронної мережі.

Таблиця 1

Класифікація діапазонів індексів теплового комфорту

№	Діапазон PMV	Клас
1	-1,0 ... -0,7	Помірно холодно
2	-0,7 ... -0,5	Прохолодно
3	-0,5 ... -0,3	Помірно прохолодно
4	-0,3 ... -0,2	Приємна прохолода
5	-0,2 ... 0,0	Комфортна прохолода
6	0,0 ... +0,2	Теплий комфорт
7	+0,2 ... +0,3	Приємно тепло
8	+0,2 ... +0,5	Помірно тепло
9	+0,5 ... + 0,7	Тепло
10	+0,7 ... +1,0	Помірно спекотно

Основні результати. Для проведення обчислень індексу PMV як функції основних змінних теплового комфорту доступні пакети прикладних програм як мовами високого рівня [13, 14], так і відносно прості алгоритми у табличному редакторі Microsoft Excel. Скориставшись ними, за допомогою генератора випадкових чисел у межах змін основних факторів (дивись таблицю 2) отримали понад 6000 значень індексу PMV за рівняннями (1) – (4) [9], а для навчаючої і тестової вибірки теплового комфорту залишили 1220 векторів-образів і 3000 векторів-образів відповідно:

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

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

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

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

M – рівень метаболізму, Вт/м²;
 W – ефективна механічна енергія, Вт/м²;
 I_{cl} – коефіцієнт теплоізоляції одягу, м² К/Вт;
 f_{cl} – фактор площі ізоляції одягу;
 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.

Таблиця 2

Діапазони змінних вектору-образу теплового комфорту

Змінна	x_1 $t_a, ^\circ\text{C}$	x_2 $\bar{t}_r, ^\circ\text{C}$	x_3 $v_{ar}, \text{м/с}$	x_4 RH, %	x_5 M, met	x_6 I_{cl}, clo	x_7 $PMV, \text{ум.од.}$
Макс.	30	40	1,0	60	4	2,0	+2
Мін.	10	10	0,01	40	0,8	0,002	-2

Вологість RH у межах 40 ... 60 % розрахована за парціального тиску водяної пари у повітрі p_a , що не перевищує 2700 Па. Одиниця метаболізму: $1 \text{ met} = 58 \frac{Bm}{m^2}$. Одиниця теплоізоляції одягу: $1 \text{ clo} = 0,155 \frac{^\circ\text{C} \cdot m^2}{Bm}$.

Синаптичні коефіцієнти w_{ij} навченої нейромережі формують рівняння класифікаційних гіперплощин H^i у семивимірному просторі станів ТК виду:

$$\sum_{j=0}^7 w_{ij} \cdot x_j = 0,$$

де i – номер класифікаційної гіперплощини;

j – номер синапсу,

$$x_0 = 1$$

Якщо стан теплового комфорту визначається вектором, що не належить класифікаційній гіперплощині, то $\sum_{j=0}^7 w_{ij} \cdot x_j \neq 0$. У персептроні функція активації порогова (hardlim) з нульовим порогом. Тому на вихідних нейронах буде генеруватись «1», якщо $\sum_{j=0}^7 w_{ij} \cdot x_j \geq 0$, або «0», якщо $\sum_{j=0}^7 w_{ij} \cdot x_j < 0$. На цих же нейронах формується також бінарний вектор, який вказує на певний стан теплового комфорту, у якому перебуває система. Його двійковий код використовують для формування керуючих сигналів управління виконавчими пристроями.

Для зміни стану теплового комфорту необхідно синтезувати керуючий сигнал виконавчим пристроям на встановлення нових параметрів температури навколишнього середовища, вентиляції, вологості тощо. Рівняння (1) – (4) розглядають ці параметри як змінні, від яких залежить функція (PMV). Але після класифікації станів потрібно мати алгоритм щодо встановлення цих змінних в залежності від класу теплового комфорту. За рівняннями (1) – (4) це зробити можна тільки, здійснюючи перебір параметрів до досягнення бажаного рівня PMV.

Альтернативою цьому може стати ітераційний перехід до потрібного стану, використовуючи результат класифікації станів теплового комфорту нейронною мережею. Якщо система перебуває у стані з координатами $\{x_{ij}^0\}$, то першим кроком буде визначення відстані до найближчої розділової гіперплощини H^k : $d_k = \frac{\sum_{j=0}^7 w_{kj} \cdot x_{ij}^0}{\sqrt{\sum_{j=1}^7 w_{kj}^2}}$. Врахуємо, що

$x_{i0}^0 = 1$. Знак d_k вкаже на розташування точки з координатами $\{x_{ij}^0\}$ і початку координат відносно цієї гіперплощини: якщо $d_k > 0$, це означатиме, що точка $\{x_{ij}^0\}$ і початок координат розташовані по різні боки від гіперплощини, а $d_k < 0$ – що вони розташовані по один бік від гіперплощини. Це допоможе зорієнтуватись перед виконанням наступного кроку, на якому визначають проекцію точки $\{x_{ij}^0\}$ на k -ту гіперплощину H^k , яка розташована у напрямку точки бажаного комфорту $\{x_{ij}^{opt}\}$. Ця проекція p_k з координатами $\{x_{kj}^{pk}\}$ далі проектується на наступну $(k + 1)$ -у гіперплощину H^{k+1} і так до тих пір, поки не буде досягнуто бажаного результату. Координати останньої проекції $\{x_{kj}^{pk}\}$ і точки $\{x_{ij}^{opt}\}$ можуть не співпадати. Можна або прийняти рішення, яке отримано внаслідок реалізації алгоритму, або здійснити ще одне корегування на останньому етапі. Після цього оцінюють шлях від початкової точки $\{x_{ij}^0\}$ до $\{x_{ij}^{opt}\}$. Подібну послідовність дій реалізують у методі Стефана Качмажа, відшукуючи відстань від точки у гіперпросторі станів до найближчої точки перетину усіх гіперплощин як спосіб розв'язку систем лінійних алгебраїчних рівнянь [15, 16].

Обґрунтування результатів. Проілюструємо цей перехід прикладом. Для спрощення звузимо простір станів системи теплового комфорту, яка перебуватиме в умовах постійної вологості ($RH = 50\%$), метаболізму ($1\ met$), теплоізоляції одягу ($1\ clo$), що є типовим для розслабленого стану офісного службовця, що сидить [9], до трьох змінних, а саме: температури повітря ($t_a, ^\circ C$), середньої температури випромінювання ($\bar{t}_r, ^\circ C$) та відносної швидкості руху повітря ($v_{ar}, m/s$). У результаті здійсненої класифікації оберемо дві розділові гіперплощини ($i = 1, 2$), загальні рівняння яких: $\sum_{j=0}^3 w_{ij} \cdot x_j = 0$, де $x_0 = 1$. У таблиці 3 наведено коефіцієнти рівнянь двох гіперплощин.

Таблиця 3

Коефіцієнти рівнянь класифікаційних гіперплощин

Коефіцієнти рівняння	Гіперплощини	
	H^1 (PMV = -1,0)	H^2 (PMV = 0,0)
w_{i0}	1,6456	1,6407
w_{i1}	-0,0648	-0,0475
w_{i2}	-0,0273	-0,0205
w_{i3}	0,5476	0,0659

Нехай у початковому стані система ТК перебуває у точці 1 з координатами $\{x_1, x_2, x_3\}$, що представлені у таблиці 4. Її відстань від гіперплощини H^1 (PMV = -1,0) $d = 0,453 > 0$ вказує на те, що між нею і початком координат розташовується гіперплощина H^1 .

Таблиця 4

Координати точок теплового комфорту у гіперпросторі станів системи теплового комфорту

Змінна	x_1	x_2	x_3	PMV, ум.од.
№	$t_a, ^\circ\text{C}$	$\bar{t}_r, ^\circ\text{C}$	$v_{ar}, \text{м/с}$	
1	12,83	36,57	0,79	-2
2	12,98	36,60	0,35	-0,99
3	15,0	37,47	-2,45	0,0
4	21,99	25,73	0,16	0,0
5	23,50	23,50	0,10	0,0
6	28,31	16,20	0,42	0,0
7	23,50	25,50	0,20	0,0

Проекцією точки 1 на гіперплощину H^1 (PMV = -1,0) буде точка з координатами у рядку 2, а проекція цієї точки на гіперплощину H^2 (PMV = 0,0) має координати, що наведені у рядку 3. Якщо ці координати не влаштовують користувача або є недосяжними, як у прикладі, що розглядається ($v_{ar} = -2,45 \text{ м/с}$), їх приймають як базові для коригування. Вони належать бажаній гіперплощині H^2 , кожна точка якої відповідає найвищому рівню ТК (PMV = 0,0). У таблиці 4 на позиціях 4 – 7 наведено координати чотирьох вибірових точок цієї гіперплощини. Остаточний вибір бажаного теплового режиму залишається за

користувачем системи на основі аналізу технічних характеристик виконавчих пристроїв АСУ ТК, енергетичної доцільності, швидкодії тощо.

Слід відзначити, що класифікатор на основі навченого персептрону генерує рівняння класифікаційних гіперплощин, які у різних класифікаторів можуть бути різними, залишаючись вірними по суті. Адже між лінійно розділними множинами можна провести багато (загалом безліч) розділових гіперплощин. Від того, по яких з них буде здійснено сходження від точки $\{x_{ij}^0\}$ до точки $\{x_{ij}^{onm}\}$, буде залежати довжина обраного шляху. Описаний спосіб досягнення результату не передбачає формулювання деякої функції $x_{ij}^{onm}(PMV)$ у явному вигляді для оптимізації траєкторії руху у просторі станів системи теплового комфорту.

Висновки. Штучну нейронну мережу розглянуто не тільки як інструмент класифікації станів теплового комфорту, але і як засіб побудови геометричної інтерпретації алгоритму управління виконавчими пристроями з метою досягнення бажаного для користувача стану теплового комфорту. Рух точки з координатами, що визначають тепловий комфорт у гіперпросторі станів технічної системи багатьох змінних, можна здійснювати за траєкторією, сформованою проєкціями точки на класифікаційні гіперплощини. Рівняннями класифікаційних гіперплощин є зважені вагові суми нейронів внутрішнього шару персептрону. Проєкція точки на гіперплощині відповідає певному вектору-образу теплового комфорту. Складові цього вектора є змінні, за допомогою яких встановлюють певний рівень теплового комфорту. Орієнтуючись на них, формують команди виконавчим пристроям системи теплового комфорту.

Подальші дослідження будуть спрямовані на встановлення оптимальних з точки зору енергозбереження і ресурсозбереження траєкторій руху у гіперпросторі станів багатофакторних технічних систем і технологічних процесів, пов'язаних з ергономікою теплових середовищ. Для цього слід враховувати енерговитрати конкретних виконавчих пристроїв.

Література

1. Toftum J., Nielsen R. Draught sensitivity is influences by general thermal sensation. International Journal of Industrial Ergonomics. – 1996. – V. 18(4). – P. 295-305.
2. Toftum J., Nielsen R. Impact of metabolic rate on human response to air movements during work in cool environments. // International Journal of Industrial Ergonomics. – 1996. – V. 18(4). – P. 307-316.
3. Prek M. Exergy analysis of thermal comfort / M. Prek. // International Journal of Exergy. – 2004. – V. 1. – P. 303–315.
4. Возняк О. Т. Вплив параметрів внутрішнього мікроклімату приміщення на теплообмін людини / О. Т. Возняк // Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Теорія і практика будівництва. – 2010. – № 662. – С. 84–88.
5. Дешко В.І. Модель теплового комфорту

References

1. Toftum J., Nielsen R. Draught sensitivity is influences by general thermal sensation. International Journal of Industrial Ergonomics. – 1996. – V. 18(4). – P. 295-305.
2. Toftum J., Nielsen R. Impact of metabolic rate on human response to air movements during work in cool environments. // International Journal of Industrial Ergonomics. – 1996. – V. 18(4). – P. 307-316.
3. Prek M. Exergy analysis of thermal comfort / M. Prek. // International Journal of Exergy. – 2004. – V. 1. – P. 303–315.
4. Vozniak, O. T. (2010) Vplyv parametriv vnutrishnoho mikroklimatu prymishchennia na teploobmin liudyny [Influence of parameters of the internal microclimate primishcheniya on heat exchange for man] Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika": Teoriia i praktyka budivnytstva. – Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic": Theory and practice of construction (662), 84–88 [in Ukraine].

- людини для аналізу енергетичних характеристик будівлі / Дешко В.І., Буяк Н.А. // Восточно - Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – Т. 4, № 8 (82). – С. 33-41.
6. 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. Third edition 2005-11-15.
7. BS EN ISO 7726: 2001. Ergonomics of the thermal environment–Instruments for measuring physical quantities. – [Execute Date 2001/11/6]. - British Standards: 2001. – p. 62 (Adopted International Standard).
8. ГОСТ Р ИСО 7730-2009. Эргономика термальной среды. Аналитическое определение и интерпретация комфортности теплового режима с использованием расчета показателей PMV и PPD и критериев локального теплового комфорта. Москва. Дата введения 2010-12-01.
9. ДСТУ Б EN ISO 7730: 2011. 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):– [чинний від 01.07.2013]. – К.: – Мінрегіон України, 2012. – 64 с.
10. 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.
11. Карпенко А.В. Оценка теплового комфорта с использованием искусственной нейронной сети /А.В. Карпенко, А.В. Глебов // Режим доступа http://www.aracy.pф/images/nauka/forum6/forum6_111-115.pdf
12. Русиняк М. О. Алгоритм розпізнавання образів мікроклімату за допомогою штучних нейронних мереж / М. О. Русиняк // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК. – 2014. – Вип. 194(1). – С. 57 – 63.
13. Calculation of Predicted mean Vote (PMV), and Predicted Percentage Dissatisfied (PPD) [Elecrtonic Resource]. – Mode of access: URL: http://www.eat.lth.se/fileadmin/eat/Termisk_miljoe/PMV-PPD.html.
14. CBE Thermal Comfort Tool [Elecrtonic Resource]. – Mode of access: URL: <http://www.cbe.thermalkomfort.com/>
5. Deshko, V. I., Buiak, N. A. (2016) *Model teplovoho komfortu liudyny dlia analizu enerhetychnykh kharakterystyk budivli. Vostochno-Evropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohyi* [Model of thermal comfort of a person for the analysis of energy characteristics of a building]. East European Journal of Advanced Technology, Vol. 4, 8 (82) 33 – 41 [in Ukraine].
6. 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.
7. Ergonomics of the thermal environment–Instruments for measuring physical quantities: BS EN ISO 7726: 2001. – [Execute Date 2001/11/6]. - British Standards: 2001. – p. 62 (Adopted International Standard).
8. Ergonomika termal'noy sredy. Analiticheskoe opredelenie i interpretatsiya komfortnosti teplovogo rezhima s ispol'zovaniem rascheta pokazateley PMV i PPD i kriteriev lokal'nogo teplovogo komforta. GOST R ISO 7730 – 2009.
9. Erhonomika teplovoho seredovyscha. Analitychne vyznachennia ta interpretatsiia teplovoho komfortu na osnovi rozrakhunkiv pokaznykiv PMV i PPD i kryteriiv lokalnoho teplovoho komfortu (EN ISO 7730:2011, IDT): DSTU B EN ISO 7730: 2011. – [chynnyi vid 01.07.2013]. – К.: – Minrehion Ukrainy, 2012. – 64 p.
10. 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.
11. Karpenko, A.V., Glebov, A.V. (2016) Otsenka teplovogo komforta s ispol'zovaniem iskusstvennoy neyronnoy seti [Estimation of thermal comfort using artificial neural network]. Retrieved from: http://www.aracy.pф/images/nauka/forum6/forum6_111-115.pdf [in Russian].
12. Rusyniak, M. O. (2014). *Alhorytm rozpoznavannia obraziv mikroklimatu za dopomohoiu shtuchnykh neuronnykh merezh* [Algorithm for the recognition of microclimate images using artificial neural networks]. Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seriiia : Tekhnika ta enerhetyka APK – Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: Engineering and Power Engineering of Agroindustrial Complex, 194(1), 57 – 63 [in Ukraine].
13. Calculation of Predicted mean Vote (PMV), and Predicted Percentage Dissatisfied (PPD) [Elecrtonic Resource]. – Mode of access: URL:http://www.eat.lth.se/fileadmin/eat/Termisk_miljoe/PMV-PPD.html.

://comfort.cbe.berkeley.edu.

15. Kaczmarz S. Angenäherte Auflösung von Systemen linearer Gleichungen / S. Kaczmarz // Bulletin International de l'Académie Polonaise des Sciences et des Lettres / Classe des Sciences Mathématiques et Naturelles. Série A, Sciences Mathématiques. – 1937. – Vol. 35. – С. 355-357.

16. Ильин В. П. Об итерационном методе Качмажа и его обобщениях / В. П. Ильин // Сибирский журнал промышленной математики. – 2006. – Т. 9, вып. 3. – С. 39 – 49.

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

15. Kaczmarz S. Angenäherte Auflösung von Systemen linearer Gleichungen / S. Kaczmarz // Bulletin International de l'Académie Polonaise des Sciences et des Lettres / Classe des Sciences Mathématiques et Naturelles. Série A, Sciences Mathématiques. – 1937. – Vol. 35. – P. 355-357.

16. Il'in, V. P. (2006) Ob iteratsionnom metode Kachmazha i ego obobshcheniyakh [On the iterative method of Kačmaža and its generalizations]. Sibirskiy zhurnal industrial'noy matematiki – Siberian Journal of Industrial Mathematics, Vol. 9, 3, 39 – 49 [in Russian].

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»

ПЕРСЕПТРОННЫЙ КЛАССИФИКАТОР ТЕПЛООВОГО КОМФОРТА

ЯГАНОВ П. А., РЕДЬКО И. В.

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

Цель. Алгоритмизация управления автоматизированными системами тепловым комфортом человека для установления оптимального теплового комфорта с использованием классификационных и вычислительных возможностей простой однослойной нейронной сети – перцептрона.

Методика. Классификация гиперпространства состояний системы теплового комфорта искусственной нейронной сетью, математический анализ классификационных уравнений гиперплоскостей, сформированных внутренними нейронами перцептрона, оптимизация состояния теплового комфорта путем определения координат проекции вектора-образа теплового комфорта на гиперплоскости.

Результаты. Развитие методов и моделей нейронных сетей для формирования алгоритма управления системой теплового комфорта человека. Исследовано использование классификационных и вычислительных свойств перцептрона как инструмента геометрической интерпретации перехода от действительного состояния теплового комфорта к желаемому в многомерном гиперпространстве состояний системы, что позволило отказаться от формулировки аналитической оптимизационной функции.

Научная новизна. Развито и распространено на класс систем теплового комфорта классификационные свойства искусственной нейронной сети. Впервые для дальнейшей формализации алгоритма изменения параметров окружающей среды использован метод Качмажа.

Практическая значимость. Энергоэффективность сложных многофакторных динамических технических систем обеспечивается не только совершенным современным оборудованием, но и рациональными моделями управления. Технологии нейронных сетей позволяют оптимально использовать классификационные и вычислительные возможности искусственных нейронных сетей для формирования команд управления исполнительным устройствам систем теплового комфорта.

Ключевые слова: тепловой комфорт, нейронные сети, перцептрон, гиперпространство состояний, классификационные гиперплоскости, проекция вектора-образа теплового комфорта на гиперплоскость.

PERCEPTRON CLASSIFIER OF THERMAL COMFORT

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

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

Purpose. Algorithmic control of automated systems by human thermal comfort for the establishment of optimal thermal comfort with the use of classification and computational capabilities of the simplest single layer neural network – perceptron.

Methodology. Classification of the hyperspace of the states of the thermal comfort system by an artificial neural network, mathematical analysis of the classification equations of the hyperplanes, formed by the internal periphery perceptron neurons, optimization of the thermal comfort state by determining of the coordinates of the projection of the thermal comfort vector-image on the hyperplane.

Findings. Development of methods and models of neural networks for forming of the algorithm of control of human thermal comfort system. The use of classification and computational properties of the perceptron as an instrument of geometric interpretation of the transition from the real to the desired state of thermal comfort s in the multidimensional hyperplane space has been studied. Such an approach made it possible to abandon of the formulation of the analytical optimization function.

Originality. The classification properties of the artificial neural network have been developed and extended to the class of systems of thermal comfort. For the first time, the method of Kačmaža was used to further formalize the algorithm of environmental parameters change.

Practical value. Energy efficiency of complex multifactorial dynamic technical systems is ensured not only by advanced modern equipment, but by rational management models also. Neural network technologies allow to use the classification and computational capabilities of artificial neural networks optimally to form commands for the devices of thermal comfort systems managing.

Key words: thermal comfort, neural networks, perceptron, hyperspaces of states, classification hyperplanes, vector-image of thermal comfort projection on a hyperplane.