



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **105541** (13) **C2**
(51) МПК (2014.01)
G01K 13/00

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

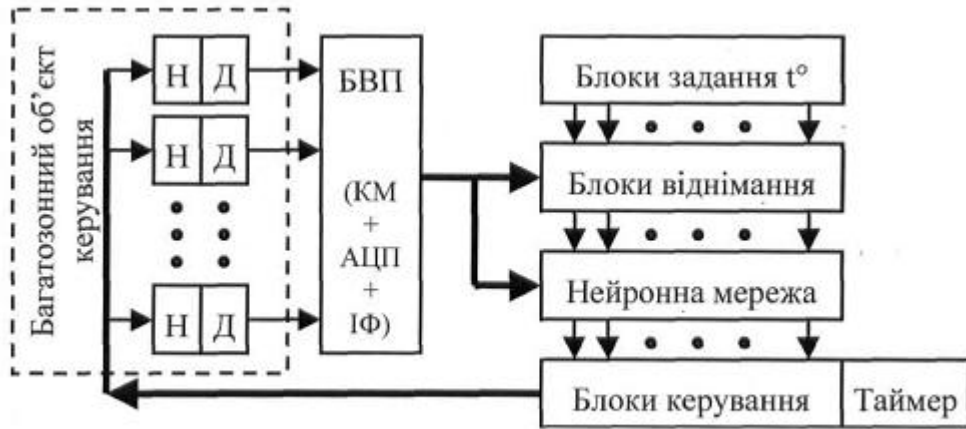
<p>(21) Номер заявки: а 2012 06433</p> <p>(22) Дата подання заявки: 28.05.2012</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: 26.05.2014</p> <p>(41) Публікація відомостей про заявку: 10.12.2013, Бюл.№ 23</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 26.05.2014, Бюл.№ 10</p>	<p>(72) Винахідник(и): Кочан Орест Володимирович (UA), Кочан Роман Володимирович (UA), Кочан Володимир Володимирович (UA)</p> <p>(73) Власник(и): НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ТЕРНОПІЛЬСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО ЕКОНОМІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ, вул. Львівська, 11, м. Тернопіль, 46020 (UA)</p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: Кочан О.В. Мікроконтролерний метод керування профілем температурного поля /О.В. Кочан , Р.В. Кочан // Вісник Національного університету "Львівська Політехніка". Комп'ютерні системи та мережі.-2008. - № 630. UA 97464 C2; 27.02.2012 WO 2006036420 A2; 06.04.2006 WO 2006110165 A2; 19.10.2006 CN 101464096 B; 06.10.2010 US 2007277537 A1; 06.12.2007</p>
---	--

(54) СПОСІБ КЕРУВАННЯ ПРОФІЛЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ БАГАТОЗОННОГО ОБ'ЄКТА ТА ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЇ

(57) Реферат:

Винахід належить до систем керування профілем температурного поля об'єктів із значним тепловим зв'язком між зонами регулювання температури, зокрема термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля (ТЕП з КПТП). Спосіб керування профілем температурного поля багатозонного об'єкта полягає у вимірюванні поточної температури всіх зон, визначенні їх відхилення від заданої та його подачі на вхід навченої нейронної мережі (НМ), яка визначає необхідні зміни потужності нагрівачів зон, причому на додаткові входи НМ подають поточні температури всіх зон об'єкта, а при навчанні НМ вектори навчальної вибірки містять задані випадковим чином природи потужності нагрівачів зон і відповідні, експериментально знайдені природи температури та її поточні значення. Технічний результат полягає у покращенні експлуатаційних властивостей ТЕП з КПТП, зокрема зменшенні часу його реакції на зміни зовнішнього профілю температурного поля.

UA 105541 C2



Фіг. 1

Запропонований спосіб керування профілем температурного поля багатозонного об'єкта та пристрій для його реалізації належить до систем керування об'єктами, які мають значний тепловий зв'язок між зонами регулювання температури. Зокрема, його можна застосувати для керування профілем температурного поля термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля (ТЕП з КПТП) [1].

5 Термоелектричний перетворювач (ТЕП) [2, 3] зазвичай містить термоду, захисний чохол, ізоляційні (звичайно, керамічні) втулки (буси) та головку, в якій розміщені контакти (клеми), до яких під'єднують вільні кінці термоду і які служать виходом ТЕП (за їх допомогою ТЕП вмикають у вимірювальне коло). В свою чергу термоду являє собою два провідники, виготовлені з різних металів або сплавів, з'єднані (спаяні, зварені, склепані) одними з кінців (це з'єднання називають робочим кінцем). Інші, не з'єднані між собою кінці, називають вільними кінцями і під'єднують до клем ТЕП. Такі датчики температури забезпечують вимірювання температур в діапазоні -50...2500 °С (різні типи ТЕП). Порівняно з іншими типами датчиків, ТЕП забезпечують на сьогодні найвищу точність вимірювання температур вище 700 °С в промисловості, на транспорті та тих наукових дослідженнях, де, через обмеження об'єкта вимірювання (відмінність властивостей об'єкта від абсолютно чорного тіла) або оточуючого середовища (затуманеність, відсутність оптичного доступу), пірометри випромінювання [2] мають високі методичні похибки [4].

Однак границя основної допустимої похибки термоду досить велика. Наприклад, для термоду типу ПП (платина - платина +10 % родію), що на сьогодні мають найвищу точність, границя основної допустимої похибки при 1000 °С досягає 2,9 °С [5]. Термоду з неблагородних металів мають в 2...2,5 рази вищі похибки [5].

При необхідності підвищення точності вимірювання температури використовують індивідуальну функцію перетворення (ФП), для чого проводять повірку ТЕП і визначають індивідуальні його поправки, які використовують в подальшому для корекції похибки ФП ТЕП [6]. Однак цей метод вимагає досить частої повірки ТЕП через відносно значний часовий дрейф термоду під дією високої температури експлуатації [3, 7, 8].

Слід відзначити, що цей метод може не дати підвищення точності при використанні термоду, які довго перебували в експлуатації через вплив термоелектричної неоднорідності термоелектродів [9]. Під час експлуатації, під дією високих температур, термоелектроди деградують - міняється їх хімічний склад і кристалічний стан [10], причому інтенсивність змін сильно залежить від температури експлуатації [8, 10]. В результаті накопичення цих змін термоелектрична здатність (генерована під дією заданої різниці температур електрорушійна сила - е.р.с.) окремих ділянок термоелектродів стає неоднаковою, тобто сумарна е.р.с. стає залежною від розподілу температурного поля вздовж термоелектродів. Наприклад, розділимо на n ділянок кожен термоелектрод термоду. При тривалій експлуатації ТЕП в умовах вимірювання температури об'єкта із сталим профілем температурного поля кожна ділянка знаходиться у деякій фіксованій температурі, її деградація, а значить і зміна (дрейф) ФП, відповідає саме цій температурі [9, 11]. При зміні профілю температурного поля, тобто розподілу температури вздовж термоелектродів (при сталих температурах робочого і вільних кінців) ряд ділянок термоелектродів потрапляє у іншу температуру, якій не відповідає їх деградація. Згідно результатів експериментальних досліджень [7, 8], деградація термоелектродів веде до зміни всієї їх ФП, тобто при зміні температури кожної ділянки похибка її ФП змінюється. Таким чином змінюється і сумарна е.р.с, генерована термоду, хоча температури робочого і вільних кінців залишилися постійними - виникає специфічна похибка вимірювання температури, яку називають похибкою від набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів термоду.

Таким чином, однорідна термоду, яка не експлуатувалася тривалий час, є інваріантною до профілю температурного поля вздовж термоелектродів, тому, при повірці в лабораторній повірній печі можна отримати значення коригуючих поправок, які дозволять підвищити точність вимірювання температури за допомогою цього ТЕП. А для неоднорідної термоду (яка вже експлуатувалася тривалий час) е.р.с. не є однозначною функцією різниці температур між робочим і вільними кінцями. Профіль температурного поля вздовж термоелектродів стає додатковою впливаючою величиною, тобто знайдена при повірці коригуюча поправка (в температурному полі повірної печі) не обов'язково відповідає похибці ТЕП в температурному полі об'єкта експлуатації. Більше того, похибка від набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності електродів термоду визнана найбільш небезпечним джерелом похибок термоду [12], а в [9] було зроблено висновок про неможливість корекції похибок термоду взагалі.

Однак висновок [9] виявився надто поспішним. В [1] було запропоновано, а в [13] досліджено термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля (ТЕП з КПТП), в якому завдяки навмисно стабілізованому профілю температурного поля вздовж електродів термопари, яка вимірює температуру об'єкта (головної термопари), похибка від набутої в процесі тривалої експлуатації термоелектричної неоднорідності її електродів не може себе проявити. Стабілізація профілю температурного поля вздовж електродів термопари здійснюється декількома підсистемами регулювання температури, що складаються з термопар (додаткових), нагрівачів та регуляторів. При цьому невиключена (залишкова) похибка від набутої термоелектричної неоднорідності головної термопари, як це показано в [13, 14], визначається в основному похибкою регулювання температури вздовж електродів головної термопари. Тобто саме якість регуляторів підсистем регулювання температури визначає ефективність стабілізації профілю температурного поля вздовж електродів термопари, а, значить, і невиключену похибку від набутої термоелектричної неоднорідності головної термопари

З точки зору теорії регулювання ТЕП з КПТП являє собою багатозонний об'єкт регулювання з відносно тісним зв'язком між окремими зонами. Такі об'єкти з точки зору керування є складними [15]. Це пов'язано з великою схильністю таких об'єктів регулювання до самозбудження через значний вплив змін потужності одного нагрівача на температуру інших зон (тісний зв'язок між окремими зонами). Найбільш повно методи регулювання температури багатозонних об'єктів розглянуті в [16]. Але ці методи мають дуже велику обчислювальну складність, в [16] для реалізації регулювання всього двозонного об'єкта використано персональний комп'ютер та спеціалізований пакет прикладних програм Матлаб [17], один з найбільших програмних засобів в області математики з дуже великими вбудованими можливостями. Таке рішення є економічно надлишковим.

Значні переваги мають методи керування на базі штучних нейронних мереж (НМ) [18]. За обчислювальною складністю ці методи дуже вимогливі під час навчання НМ і вимагають на тричотири порядки менше обчислювальних ресурсів при їх використанні. Тому, при використанні попередньо навчених НМ, такі методи можуть бути застосовані в системах на базі мікроконтролерів, які мають обмежені обчислювальні ресурси. Однак більшість розглянутих у [18] методів нейромережевого керування вимагають для навчання достатньо точних математичних моделей об'єкта керування. Для ТЕП з КПТП, через наявність багатьох зон нагріву та значний тепловий зв'язок між ними, ідентифікація параметрів математичної моделі є дуже складною задачею, яка вимагає великого об'єму експериментальних досліджень. Крім того, така ідентифікація мусить бути виконана на об'єкті вимірювання температури через вплив параметрів об'єкта на параметри моделі ТЕП з КПТП.

У [18] розглянуто також структури нейромережевих регуляторів багатозонної (тризонної) печі, яку можна вважати подібною до ТЕП з КПТП. Однак описана структура має ряд особливостей, які ускладнюють її використання для керування профілем температурного поля ТЕП з КПТП:

1. Для керування профілем температурного поля тризонної печі запропоновано "нейронний регулятор з емулятором і контролером. Нейроконтролер навчається на інверсній моделі об'єкта, а нейроемулятор - на звичайній моделі об'єкта". Яким чином здійснюється врахування взаємного теплового впливу окремих зон у [18] не описано, приведені структури не вказують, яким чином "нейронний регулятор з емулятором і контролером" узагальнюють температури всіх зон для формування взаємозалежних керуючих впливів. Посилання на РИС. 4.2.5 теж не вирішує питання, на РИС. 4.2.5 представлено одноканальний регулятор.

2. З РИС. 4.2.5 та відсутності інших структур "нейронного регулятора з емулятором і контролером" можна зробити висновок про те, що температура кожної зони регулюється окремим "нейронним регулятором з емулятором і контролером", що значно збільшує обчислювальну складність задачі керування профілем температурного поля, особливо для ТЕП з КПТП, для якого три зони керування надто мало.

3. Інверсна та звичайна моделі об'єкта будуються на основі експериментально знятої залежності "керуюча дія - температура", що зумовлює безпосередній вплив похибки експериментальних досліджень цієї залежності на похибку навчання нейронних мереж, а тим самим - на похибку керування профілем температурного поля ТЕП з КПТП.

4. Інверсна та звичайна моделі об'єкта будуються на основі експериментально знятої залежності "керуюча дія - температура" для всіх трьох зон. При цьому взаємний вплив зон не досліджується і ніяк не описується (ні аналітично, ні графічно), тому, з врахуванням зауважень п. 1, можна зробити висновок, що взаємний вплив зон в об'єкті регулювання незначний, ним для попереднього навчання нейронних мереж можна нехтувати.

5. Для підвищення точності підтримки температури в окремих зонах у [18] запропоновано додаткове навчання нейронних мереж в процесі функціонування. Таке рішення напевне дозволяє врахувати взаємний вплив температур окремих зон (хоча тільки посередньо, прямих зв'язків між нейронними мережами окремих зон у [18] не описано), однак вимагає збільшення обчислювальних ресурсів регулятора ще на три-чотири порядки [19], адже в такому випадку під час експлуатації необхідно не тільки обчислювати вихідні значення нейронних мереж, а і реалізувати алгоритми їх навчання, які значно складніші. У [18] для реалізації системи керування температурами зон трьохзонної печі використано персональний комп'ютер типу NEC PC-9801F.

Таким чином, описаний у [18] метод нейромережевого керування надто складний для ТЕП з КПТП і не повністю вирішує задачу стабілізації профілю температурного поля вздовж електродів головної термопари через те, що в ТЕП з КПТП тепловий зв'язок між зонами настільки значний, що ним не можна нехтувати навіть при попередньому навчанні керуючої нейронної мережі.

В [13, 20] запропоновано простіший спосіб регулювання, придатний для керування профілем температурного поля ТЕП з КПТП, який є прототипом запропонованого способу. Регулятор прототипу формує зміни керуючої дії (зміни потужності нагрівачів ТЕП з КПТП) циклічно, причому тривалість циклу вибрана такою, щоби перехідний процес зміни внутрішнього профілю температурного поля ТЕП з КПТП через попередню зміну керуючої дії практично закінчився. Таким чином, за рахунок затримки між циклами, запропонований в [13, 20] регулятор фактично має розімкнуту структуру, а тому не схильний до самозбудження. Основною задачею регулятора є таке формування керуючої дії, щоби протягом декількох ітераційних циклів відхилення профілю внутрішнього температурного поля ТЕП з КПТП, викликане впливом зовнішнього профілю температурного поля, поверталось до заданого допуску. Припущення, на яких базується спосіб формування керуючої дії в [13, 20], наступні:

1. Залежності приростів температури від приростів потужності нагрівачів зон є лінійними.
2. При обчисленні приростів потужності, необхідних для бажаної зміни температури окремих зон з врахуванням взаємного впливу всіх зон, сумують не прирости теплових потоків, а прирости температури.

Слід відзначити, що приведені вище припущення прямо протирічать основам термодинаміки [21]. Однак, якщо зміни профілю температурного поля об'єкта керування відносно повільні (наприклад, добові зміни профілю температурного поля котлоагрегата теплової електростанції), то:

1. Поточна корекція профілю температурного поля стосується відносно малих змін температури окремих зон.
2. Допуск на поточні відхилення профілю температурного поля головної термопари ТЕП з КПТП є досить великий (адже похибка профілю температурного поля головної термопари веде до прояву похибки від набутої неоднорідності, тобто для похибки результату вимірювання температури похибка профілю температурного поля є величиною другого порядку малості).
3. Кількість ітерацій, необхідна для входження профілю температурного поля головної термопари ТЕП з КПТП в задану межу не є строго лімітована. Практично достатньо, щоби відхилення від заданого профілю температурного поля кожного циклу зменшувалося в три-чотири рази.

Завдяки прийнятим припущенням можна записати систему лінійних рівнянь, які визначають приріст температури кожної зони ΔT_i як сумарну дію приростів потужності ΔP_j окремих нагрівачів

$$\begin{cases} \Delta T_0 = k_{00} \times \Delta P_0 + k_{01} \times \Delta P_1 + \dots + k_{0(k-1)} \times \Delta P_{(k-1)} \\ \Delta T_1 = k_{10} \times \Delta P_0 + k_{11} \times \Delta P_1 + \dots + k_{1(k-1)} \times \Delta P_{(k-1)} \\ \dots \\ \Delta T_{k-1} = k_{(k-1)0} \times \Delta P_0 + k_{(k-1)1} \times \Delta P_1 + \dots + k_{(k-1)(k-1)} \times \Delta P_{(k-1)} \end{cases} \quad (1)$$

де $k_{00} \dots k_{(k-1)(k-1)}$ я: -i)(a: -i) ~ коефіцієнти лінеаризованої моделі ТЕП з КПТП.

Обчислювальна складність розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь є значно меншою порівняно з системами диференційних рівнянь, розглянутими в [16]. Така задача може бути розв'язана з допомогою дешевих 8-ми бітних мікроконтролерів. Зважаючи на їх обмежені обчислювальні ресурси та пам'ять, для розв'язання системи рівнянь (1) в [13, 20] запропоновано використати метод Гауса [22], оскільки у ньому всі обчислення можна проводити

безпосередньо над елементами матриць коефіцієнтів і векторів приростів потужності та температури. Систему рівнянь (1) можна представити у вигляді

$$k \times \overline{\Delta P} = \overline{\Delta T}, \quad (2)$$

5 де k - „квадратна” матриця коефіцієнтів моделі; $\overline{\Delta P}$ - вектор приростів потужності; $\overline{\Delta T}$ - вектор приростів температур.

Метод Гауса зводиться до двохходового алгоритму, при виконанні якого виконують:

1) прямий хід, при якому, шляхом елементарних перетворень рядків, тобто додавань одного рядка до іншого, помноженого на відповідний коефіцієнт, а також перестановок рядків, матриця (2) приводиться до верхньотрикутного вигляду;

2) зворотний хід, при якому, починаючи з останнього рівняння, послідовно визначають елемент вектора невідомих та підставляють його у попередні рівняння.

При виконанні прямого ходу ключовими є дві операції:

1) множення всіх елементів матриці коефіцієнтів та одного елемента вектора результату на константу таким чином, щоби при відніманні двох рядків результат у визначених позиціях був нульовим;

2) власне віднімання.

На першому етапі першої операції слід виконати обчислення згідно з формулою

$$k_{jl} = \frac{k_{jl}}{k_{ji}}, i = \overline{0, K-2}, j = \overline{i, K-1}, l = \overline{i, K-1}$$

$$\Delta T_j = \frac{\Delta T_j}{k_{ji}}, i = \overline{0, K-2}, j = \overline{i, K-1}. \quad (3).$$

На другому етапі першої операції слід виконати обчислення згідно з формулою

$$k_{jl} = k_{jl} - k_{ji}, i = \overline{0, K-2}, j = \overline{i+1, K-1}, l = \overline{i, K-1}$$

$$\Delta T_j = \Delta T_i - \Delta T_j, i = \overline{0, K-2}, j = \overline{i+1, K-1}. \quad (4)$$

Для знаходження вектора приростів потужностей ΔP_i необхідно виконати

$$\Delta T_i = \Delta T_i - \Delta P_i \times k_{ji}, i = \overline{K-1, 0}, j = \overline{0, i-1}$$

$$\Delta P_i = \frac{\Delta T_i}{k_{ii}}, i = \overline{K-1, 0}.$$

Елементи вектора $\overline{\Delta P}$ є приростами потужності, які необхідно подати на нагрівачі. При такій реалізації методу Гауса необхідно задіяти лише три змінні для індексації елементів масивів, а всі результати обчислень зберігаються безпосередньо в елементах масивів і векторів, тобто метод вимагає мінімальних обчислювальних ресурсів.

Як вже вказувалося, приведені вище припущення суперечать основним положенням термодинаміки [21], а обчислені прирости потужності $\overline{\Delta P}$ є наближеними. Однак, вони дозволяють приблизно оцінити необхідні прирости потужності, щоби в процесі ітераційного наближення забезпечити наближення до заданого профілю температурного поля вздовж електродів головної термопари ТЕП з КПТП. Адже похибка керування профілем температурного поля викликає лише залишкову похибку від набутої термоелектричної неоднорідності головної термопари, тобто похибка керування відносно до вимірюваної головною термопарою температури об'єкта є величиною другого порядку малості. Тому запропонований в [13, 20] спосіб керування профілем температурного поля ТЕП з КПТП може суттєво підвищити точність вимірювання температури навіть при значній неоднорідності електродів головної термопари.

Таким чином прототип має відчутні переваги над аналогами при використанні його для керування профілем температурного поля ТЕП з КПТП. Однак, за рахунок значного спрощення теплових процесів через прийняті припущення він має також суттєві недоліки:

1. Обчислені прирости потужності $\overline{\Delta P}$ мають відносно значну похибку, тому прототип вимагає відносно великої кількості ітерацій для встановлення заданого профілю температурного поля головної термопари ТЕП з КПТП.

2. Компенсація значних змін зовнішнього відносно до ТЕП з КПТП температурного поля вимагає значних змін потужності $\overline{\Delta P}$, що збільшує (підсилює) вплив їх похибки, пов'язаної з спрощенням теплових процесів при формуванні системи рівнянь (1), а це знову веде до збільшення кількості ітерацій для встановлення заданого профілю температурного поля головної термопари ТЕП з КПТП.

3. Коефіцієнти $k_{00\dots k_{(k-1)(k-1)}}$, навіть визначені на даному місці експлуатації, але для іншої температури, через нелінійність теплових процесів (що не враховують сформульовані вище припущення) виявляються невідповідними цій новій температурі, що додатково значно збільшує кількість ітерацій для встановлення заданого профілю температурного поля головної термопари ТЕП з КПТП.

4. Невідповідність умов визначення коефіцієнтів $k_{00\dots k_{(k-1)(k-1)}}$ умовам їх використання може привести, за рахунок зростання їх похибок, до ефекту, який аналогічний до самозбудження. Хоча прототип не схильний до самозбудження, при деяких комбінаціях похибок коефіцієнтів $k_{00\dots k_{(k-1)(k-1)}}$ можливе надлишкове зростання потужності при необхідності нагріву деякої зони та надлишкове зменшення потужності при необхідності її охолодження. Тоді температура цієї зони буде осцилювати навколо заданого значення та "розхитувати" інші зони. Такий ефект властивий прототипу, в [13, 20] з ним запропоновано боротися за допомогою встановлення зони нечутливості - якщо поточне відхилення температури зони не більше деякого значення (меншого від допустимого відхилення), то потужність нагрівача цієї зони не змінюють. Однак при невідповідності умов визначення коефіцієнтів $k_{00\dots k_{(k-1)(k-1)}}$ умовам їх використання таку зону нечутливості прийдеться встановлювати досить великою, що збільшує невиключену (залишкову) похибку від набутої неоднорідності електродів термопар.

Таким чином, прототип дозволив різко знизити обчислювальну складність задачі формування приростів ΔP потужності нагрівачів зон ТЕП з КПТП, але за рахунок зниження якості процесу регулювання.

Задачею пропонованого винаходу є створення способу формування приростів потужності нагрівачів зон стабілізації профілю температурного поля багатозонного об'єкта (зокрема, головної термопари ТЕП з КПТП), який не мав би схильності, до самозбудження (як і прототип), мав би відносно малу обчислювальну складність (на рівні прототипу) при значно вищій якості керування (менша кількість ітерацій для встановлення заданого профілю температурного поля порівняно з прототипом навіть при змінах профілю температурного поля, при яких проявляється некоректність припущень, покладених в основу прототипу).

Пропонований спосіб полягає в тому, що вимірюють поточні значення температури всіх зон об'єкта (ТЕП з КПТП), визначають їх відхилення від заданого значення температури та подають ці відхилення на входи навченої нейронної мережі, з виходів якої отримують значення необхідної зміни потужності нагрівачів кожної зони. При цьому на інші входи навченої нейронної мережі подають поточні значення температури всіх зон об'єкта. Навчання нейронної мережі суміщене з експериментальними дослідженнями об'єкта, в процесі яких формуються вектори навчальної вибірки для нейронної мережі. В процесі навчання кожен вектор навчальної вибірки подає на вихід нейронної мережі задані випадковим чином прирости потужності нагрівачів кожної зони, а на входи - відповідні цим приростам зміни температури та поточні значення температури цих зон. Після багатьох циклів подачі випадкових приростів потужності (закон розподілу цих приростів повинен бути близьким до симетричного, тобто повинні бути як додатні прирости, що відповідають збільшенню потужності нагрівачів та відповідно температури зон, так і від'ємні прирости, що відповідають зменшенню потужності нагрівачів та відповідно температури зон) нейронна мережа буде навчена. Це означає, що під час кожного циклу задання приростів потужності нагрівачів кожної зони, прирости потужності, які формує нейронна мережа, будуть співпадати із заданими приростами. В такому випадку, при виникненні під час експлуатації ТЕП з КПТП відхилень температури зон (зумовлених дією зовнішнього температурного поля або іншими причинами), навчена нейронна мережа буде формувати адекватні зміни потужності нагрівачів, які швидко усунуть ці зміни температури зон.

Пропонований спосіб може бути реалізований пристроєм керування профілем температурного поля багатозонного об'єкта, який складається з давачів температури нагрівачів всіх зон багатозонного об'єкта, що підключені до входів багатоканальної вимірювальної підсистеми, виходи якої поступають на входи блоків віднімання. Інші входи блоків віднімання підключені до виходів блока задання температури всіх зон багатозонного об'єкта, а їх виходи підключені до входів нейронної мережі. Виходи нейронної мережі надходять на входи блоків керування потужністю, виходи яких підключені до нагрівачів відповідних зон. В пристрій введено

додатково блок задання приростів потужності нагрівачів і блок навчання нейронної мережі. Перший вихід блока задання приростів потужності нагрівачів підключено до входу керування блоку задання температури всіх зон багатозонного об'єкта. Вихід блока навчання нейронної мережі підключено до входу керування вагами та зміщеннями нейронів, які входять в нейронну мережу. Під час навчання нейронної мережі її виходи підключені лише до входів блока навчання нейронної мережі - від входів блоків керування потужністю виходи нейронної мережі відключаються. Другі входи блока навчання нейронної мережі підключені до виходів блока задання приростів потужності нагрівачів, а останні підключені також до входів блоків керування потужністю. Також виходи багатоканальної вимірювальної підсистеми підключені також до додаткових входів нейронної мережі та додаткових входів блока задання температури всіх зон.

Кожен цикл навчання нейронної мережі починається за ініціативою блоку задання приростів потужності нагрівачів, який формує випадкові значення приростів потужності кожної зони та подає сигнал на блок задання температури всіх зон багатозонного об'єкта, який запам'ятовує поточні значення температури всіх зон (до зміни цих температур під дією сформованих приростів потужності). Сформовані випадкові значення приростів потужності кожної зони реалізуються блоками керування потужністю нагрівачів і приводять до відповідної зміни температури кожної зони. Для реалізації змін потужності в склад блоків керування потужністю нагрівачів введено таймер. Після закінчення перехідного процесу зміни температури кожної зони, що фіксує багатоканальна вимірювальна підсистема з допомогою датчиків температури (після закінчення перехідного процесу зміни температури зон будуть відповідати рівню шумів багатоканальної вимірювальної підсистеми), нове значення температури кожної зони поступає на блок віднімання. Таким чином, на входи нейронної мережі надходять значення температури зон і їх зміни під дією заданої зміни потужності нагрівачів. Блок навчання нейронної мережі змінює вагові коефіцієнти входів нейронів, які входять в нейронну мережу, а також їх зміщення, таким чином, щоби наблизити сформовані нейронною мережею прирости потужності нагрівачів до дійсних приростів, які сформовані блоком задання приростів потужності нагрівачів та реалізовані блоками керування потужністю нагрівачів.

В результаті багатьох циклів навчання нейронної мережі вагові коефіцієнти входів нейронів, які входять в нейронну мережу, а також їх зміщення стануть такими, що сформовані нейронною мережею прирости потужності нагрівачів будуть відповідати дійсним приростам, які сформовані блоком задання приростів потужності нагрівачів та реалізовані блоками керування потужністю нагрівачів. Тоді навчання нейронної мережі завершується, її виходи підключаються до входів блоків керування потужністю нагрівачів, а блоки задання приростів потужності нагрівачів та навчання нейронної мережі виключаються.

Таким чином, навчання нейронної мережі відповідно до запропонованого способу не вимагає побудови математичних моделей об'єкта керування через суміщення процесів експериментального дослідження та навчання нейронної мережі. Запропонований спосіб не вимагає побудови математичних моделей об'єкта, тому навчена нейронна мережа цілком адекватна саме об'єкту, а не його моделі. Запропонований спосіб залишається стійким через те, що перехід на змінене значення потужності нагрівачів всіх зон, яке формує блок керування потужністю нагрівачів, здійснюється лише після закінчення перехідного процесу нагріву (охолодження) всіх зон (аналогічно, як і в прототипі). Обчислювальна складність запропонованого способу не є вищою від прототипу - кількість операцій при обчисленні значення виходів нейронної мережі є приблизно еквівалентною до кількості операцій при рішенні системи лінійних рівнянь виду (1). В той же час нейронна мережа, завдяки тому, що до її додаткових входів підключено вихід багатоканальної вимірювальної підсистеми, отримує та узагальнює інформацію про залежність параметрів об'єкта від саме температури. Це дозволяє, за рахунок навчання нейронної мережі, врахувати нелінійні властивості ТЕП з КПТП як об'єкта керування. Ці нелінійні властивості викликані залежностями теплоємності та теплопровідності елементів ТЕП з КПТП від температури [23]. Прототип принципово не може врахувати цю нелінійність, бо система рівнянь (1) є лінійною, а перехід до рішення системи нелінійних рівнянь настільки ускладнить її рішення, що прототип не можна буде реалізувати на мікроконтролері. В той же час реалізація обчислення значення одного виходу нейронної мережі для 10 вхідних розподільчих нейронів та 10 нейронів схованого шару із сигмоїдною функцією активації на мікроконтролері AT89C52 (ціна менше 1,5 долара США) вимагає не більше 100 мс [19]. Таким чином, запропонований спосіб дає можливість досягнення мети винаходу, при цьому описана послідовність операцій є достатньою та необхідною для досягнення мети - усунення будь якої операції не дозволить досягнути вищої, порівняно з прототипом, якості керування.

Роботу пристрою, що реалізує запропонований спосіб, пояснюють фіг. 1, фіг. 2 і фіг. 3. На фіг. 3 представлено трирівневий перцептрон, який можна використати як нейронну мережу.

На фіг. 1 представлено систему керування профілем температурного поля багатозонного об'єкта (ТЕП з КПТП) в режимі навчання нейронної мережі. Багатозонний об'єкт керування має ряд нагрівачів Н і давачів Д. Виходи давачів Д підключені до входів багатоканальної вимірювальної підсистеми БВП, виходи якої підключені до входів Блоків віднімання та додаткових входів Нейронної мережі. До других входів Блоків віднімання підключені виходи Блоку задання температури всіх зон багатозонного об'єкта. На виході блоків віднімання отримуємо відхилення температур кожної зони від заданого значення. Ці різниці надходять на входи Нейронної мережі та обробляються нею. На виході Нейронної мережі формуються прирости потужності, які необхідно подати на входи блоків керування, які реалізують керуючу дію - відповідно змінюють потужність нагрівачів Н. Однак на час навчання Нейронної мережі її виходи підключені до входів блока навчання Нейронної мережі (див. фіг. 2). А входи Блоків керування на цей час підключені до виходів блока задання потужності та до входів Блоку навчання Нейронної мережі.

Навчання нейронної мережі здійснюється окремими циклами, які ініціює блок задання потужності. Своїм сигналом він подає команду блоку задання температури всіх зон багатозонного об'єкта запам'ятати поточне значення температури зон, яке надходить з багатоканальної вимірювальної підсистеми БВП. Далі блок задання потужності формує випадкові значення приростів потужності для всіх зон, які надходять на блоки керування. Останні відповідно змінюють потужності нагрівачів - прирости можуть бути як додатними (збільшення потужності), так і від'ємними (зменшення потужності). Блоки керування найкраще виконати як широтно-імпульсні модулятори, для цього в їх складі передбачено таймер. Після закінчення перехідного процесу нагріву або охолодження нове значення температури всіх зон з виходу багатоканальної вимірювальної підсистеми БВП надходить на входи блоків віднімання і додатковий вхід Нейронної мережі. З виходу блоків віднімання на вхід Нейронної мережі надійдуть значення різниці між поточною та попередньою температурою всіх зон. З виходу Нейронної мережі сформовані нею значення приростів потужності всіх зон поступають на входи блока навчання Нейронної мережі, на інші входи якого надходять дійсні значення приростів потужності для всіх зон, які були сформовані блоком задання потужності. Через те, що Нейронна мережа не навчена, між сформованими нею значеннями приростів потужності всіх зон та дійсними приростами, які надійшли з блока задання потужності на блоки керування, є різниця. Блок навчання Нейронної мережі змінює вагові коефіцієнти входів нейронів, які входять в Нейронну мережу, а також їх зміщення, таким чином, щоби наблизити сформовані Нейронною мережею прирости потужності нагрівачів до дійсних приростів, які сформовані Блоком задання потужності нагрівачів та реалізовані Блоками керування.

Згідно з [24], достатньо 30-40 дійсних циклів формування приростів потужності для того, щоби трирівневий перцептрон, який може бути використаний як Нейронна мережа, мав достатньо інформації для навчання. Відомі методи навчання нейронних мереж, зокрема один з кращих - Левенберга-Маркуарта [17], не дає змоги навчити трирівневий перцептрон за 30-40 циклів, він вимагає щонайменше ста епох навчання (кожна з яких полягає у проходженні всіх циклів навчання). Однак після 30-40 дійсних циклів Нейронна мережа може вчитися у віртуальному режимі, шляхом повторення вже зроблених дійсних циклів виключно обчислювальним шляхом, без зміни температури багатозонного об'єкта керування. Такий віртуальний режим забезпечує значне, не менше, ніж на п'ять порядків, збільшення швидкості навчання Нейронної мережі.

Після закінчення навчання Нейронної мережі, коли сформовані нею необхідні прирости потужності нагрівачів всіх зон відрізняються від дійсних приростів не більше, ніж на декілька десятих відсотка, пристрій переводиться в режим експлуатації. Для цього виходи Нейронної мережі підключають до входів блоків керування (див. фіг. 2), а Блок навчання Нейронної мережі та Блок задання потужності вимикаються. В Блок задання температури зон багатозонного об'єкта вносять температури всіх зон, які має підтримувати система керування профілем температурного поля об'єкта (ТЕП з КПТП).

При роботі системи Багатоканальна вимірювальна підсистема вимірює за допомогою давачів Д температуру всіх зон багатозонного об'єкта і подає виміряні значення на входи блоків віднімання та додатковий вхід Нейронної мережі. З виходу блоків віднімання на вхід Нейронної мережі надійдуть значення різниці між поточною та заданою температурою всіх зон. Згідно з величиною цих різниць та з врахуванням дійсного значення температури зон Нейронна мережа формує необхідні зміни потужності нагрівачів, щоби довести температуру зон до заданої. Ці зміни потужності поступають на входи блоків керування, які змінюють потужність нагрівачів згідно з сформованими Нейронною мережею необхідних змін. Наступний цикл роботи системи починається після закінчення перехідного процесу зміни температури всіх зон.

На фіг. 3 представлено трирівневий персептрон, який можна використати як Нейронну мережу. Кількість його вихідних нейронів повинна відповідати кількості зон багатозонного об'єкта керування. Кількість вхідних нейронів повинна відповідати подвійній кількості зон багатозонного об'єкта керування через те, що на них надходять як відхилення температури всіх зон від заданого значення, так і самі температури всіх зон. Кількість нейронів схованого шару, для забезпечення хороших узагальнюючих властивостей персептрона, згідно з [24], не повинна перевищувати кількості вхідних нейронів більше ніж в півтора разу.

В пристрої, що реалізує пропонований спосіб керування профілем температурного поля багатозонного об'єкта, найбільше обчислювальних ресурсів вимагає блок навчання Нейронної мережі. Однак цей блок задіяний виключно під час навчання Нейронної мережі, під час експлуатації системи вимірювання температури за допомогою ТЕР з КПТП він не потрібний. Тому його доцільно реалізувати на віддаленому персональному комп'ютері достатньої потужності. На цей комп'ютер надсилаються задані прирости потужності всіх зон і результати вимірювання їх температури та значення приростів потужності, сформовані Нейронною мережею. Там же реалізується алгоритм навчання нейронної мережі. Після чого він пересилає пристрою вимірювання температури змінні вагові коефіцієнти і зміщення нейронів. В такому випадку, як вже було сказано, під час експлуатації мікроконтролеру необхідна обчислювальна потужність, яка відповідає обчисленню виходу нейронної мережі, а не її навчання. Затрати на організацію зв'язку між персональним комп'ютером і мікроконтролером (організацію комп'ютерної мережі) можуть, бути достатньо малими (наприклад, створення дистрибутивної сенсорної мережі на базі інтерфейсу RS-232C, яка забезпечує достатню для вимірювальних мереж пропускну здатність при малих затратах на обладнання [25]). Крім того, така мережа дає інші переваги.

Пропонований спосіб керування профілем температурного поля багатозонного об'єкта та пристрій для його реалізації забезпечують, порівняно з прототипом, значно вищу якість керування (меншу кількість ітераційних циклів, необхідних для входження в межі допуску на профіль температурного поля об'єкта, зокрема, ТЕР з КПТП) навіть при значних змінах профілю температурного поля (коли проявляється недоліки прототипу, викликані нелінійними залежностями між приростами потужності та приростами температури). Цей спосіб може значно покращити експлуатаційні властивості ТЕР з КПТП, зокрема, зменшити час його реакції на зміни зовнішнього профілю температурного поля. Також пропонований спосіб може знайти використання при керуванні профілем температурного поля багатозонними печами, наприклад, термообробки фарфорових виробів.

Джерела інформації:

1. Пат. № 97464 Україна, МПК G01K 7/02. Термоелектричний перетворювач / Кочан О.В., Кочан Р.В. - заявл. 22.02.2007.

2. Гордов А. Н. Основы пирометрии / Гордов А.Н. - Москва: Металлургия, 1971.-447 с.

3. Бычковский Р.В. Контактные датчики температуры /Р.В. Бычковский - Москва: Металлургия, 1978.-240 с.

4. Чугунный Е. Г. Автоматический контроль температуры жидкого чугуна в литейном производстве / Е. Г. Чугунный, Л. Ф. Жуков. - Киев: Наукова Думка, 1978,-175 с.

5. Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статичні характеристики перетворення: ДСТУ 2837-94. - [Чинний від 1986-04-01] - К.: Держстандарт України, 1994. - (Національний стандарт України)

6. А.с. № 352152 СССР. Устройство для измерения температуры / А.А. Саченко, К.М. Обелевская, Л.В. Заничковская, В.А. Кочан.

7. Датчики для измерения температуры в промышленности / Г.В.Самсонов, А.И.Киц, О.А.Кюздени и др. - Киев.:Наукова думка, 1972.-223 с.

8. Рогельберг Н.А. Изменения термоэлектрической силы проволок из хромеля и алюмеля при нагреве на воздухе при 800 °С продолжительностью до 10000 ч. Том III. / Рогельберг Н.А., Пигидина Э.Н., Покровская Г.Н. и др. - Сб. Исследование сплавов для термопар. - Труды института Гипроцветметобработка. - Москва: Металлургия, 1969.

9. Киренков И.И. Некоторые законы термоэлектрической неоднородности/ И.И. Киренков // Исследование в области температурных измерений: Сб.тр. - Москва: ВНИИМ.-1976.-С. 11-15.

10. Павлов Б.П. Термоэлектрическая неоднородность электродов термопар / Павлов Б.П. - Москва: Изд-во стандартов, 1979.-109 с.

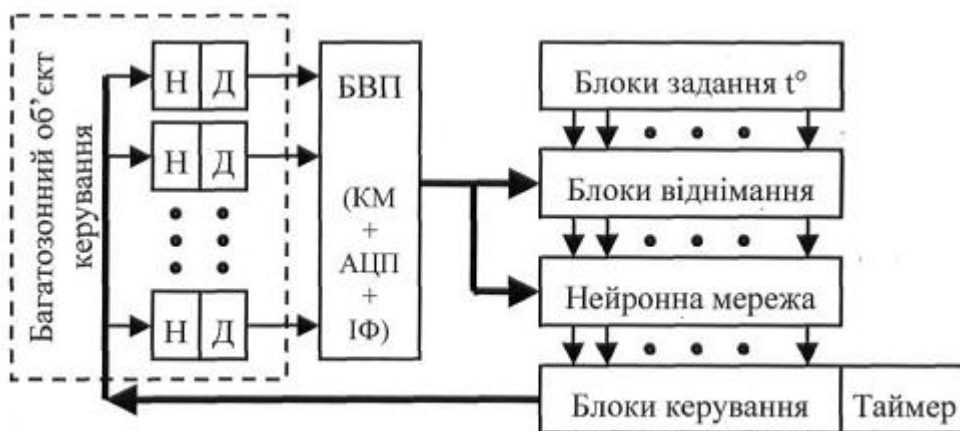
11. Мильченко В.Ю. Исследование методов и разработка средств поверки термоэлектрических преобразователей из неблагородных металлов: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.11.15 "Метрологическое обеспечение по отраслям»/ В.Ю. Мильченко. - Москва, -1984.-25 с.

12. Southworth D.J. Temperature Calibration with Isotech Block Baths / Southworth D.J. - Handbook of Isothermal Corporation Limited 1999.
13. Кочан О.В. Термоелектричний перетворювач з керованим профілем температурного поля: автореферат дисертації, на здобуття наук, ступеня канд. техн. наук: спец. 05.11.04 - прилади і методи вимірювання теплових величин / О.В. Кочан. - Львів, 2011.-20 с
14. Кочан О.В. Аналіз похибки вимірювання температури термоелектричним перетворювачем з керованим профілем температурного поля / О.В. Кочан // Науковий Вісник ЧНУ. Фізика. Електроніка.-2008. - №423. - С 124-129.
15. Мирошник І.В. Согласованное управление многоканальными системами./И.В.Мирошник - Ленинград: Энергоатомиздат, 1990.-235 с.
16. Соболев А. В. Повышение точности регулирования температурного поля путем совершенствования алгоритма управления многозонным термическим объектом: дис. ... кандидата, техн. наук: 05.13.06 / Соболев Андрей Владимирович. -Рыбинск, 2004-159 с.
17. Кетков Ю. MATLAB 7: программирование, численные методы: Самоучитель / Ю. Кетков, А. Кетков, М. Шульц // Санкт Петербург: БХВ-Петербург, 2005.-742 с.
18. Омату Сигеру. Нейрокомпьютеры и их применение. Книга 2. Нейроуправление и его приложения / Сигеру Омату, Марзуки Халид, Рубия Юсоф; Пер с англ. Н. В. Батина - Москва: ИПРЖР 2000.-272 с.
19. Турченко В.О. Нейромеревеві методи і засоби підвищення ефективності дистрибутивних мереж збору та обробки сенсорних даних: автореф. дис. на здобуття наук, ступеня канд. техн. наук: спец. 05.13.13 "Обчислювальні машини, системи, мережі" / В.О. Турченко. - Львів, 2001.-16 с
20. Кочан О.В. Мікроконтролерний метод керування профілем температурного поля /О.В. Кочан, Р.В. Кочан // Вісник Національного університету "Львівська Політехніка". Комп'ютерні системи та мережі.-2008. - № 630. - С 67-76.
21. Недужий І.А. Техническая термодинамика и теплопередача: Учеб. пособие для вузов. /И.А. Недужий, А.Н. Алабовский. - К.: Вища школа. Головное изд-во, 1981.-248 с. - (2-е изд., перераб. и доп.)
22. Gaussian_Elimination. [електронний ресурс]. режим доступу: http://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian_Elimination.
23. Кухлинг Х. Справочник по физике. / Х. Кухлинг; Пер. с нем. - Москва: Мир, 1982.-520 с.
24. Галушкин А.И. Нейрокомпьютеры и их применение - книга 1. Теория нейронных сетей / А.И. Галушкин - Москва: ИПРЖР 2001.-840 с.
25. Патент 25609А України, МПК G06F 15/00. Двопровідна локальна обчислювальна мережа, повторювач сигналу та інвертор для використання в ній / В.В.Кочан, В.О.Тимчишин (Україна). - № 97105295; заявл. 30.10.97; видано 30.10.98.

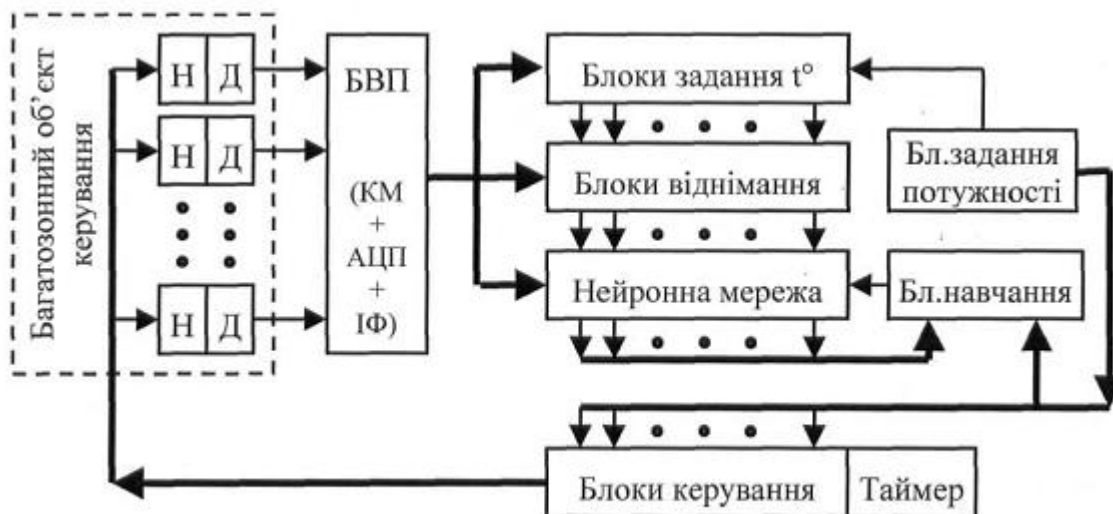
ФОРМУЛА ВІНАХОДУ

1. Спосіб керування профілем температурного поля багатозонного об'єкта, зокрема термоелектричного перетворювача з керованим профілем температурного поля, що полягає у вимірюванні поточної температури всіх зон об'єкта, визначенні їх відхилення від заданого значення температури та подачі цього відхилення на вхід навченої нейронної мережі, з виходу якої отримують значення необхідної зміни потужності нагрівачів кожної зони, який **відрізняється** тим, що на додаткові входи нейронної мережі подають також значення виміряних дійсних поточних температур всіх зон об'єкта, а під час процесу навчання нейронної мережі, суміщеного з експериментальними дослідженнями об'єкта, кожен вектор навчальної вибірки подає на вихід нейронної мережі задані випадковим чином прирости потужності нагрівачів кожної зони, а на входи - відповідні цим приростам зміни температури та поточні значення температури цих зон.
2. Пристрій керування профілем температурного поля багатозонного об'єкта, який складається з давачів температури нагрівачів всіх зон багатозонного об'єкта, що підключені до входів багатоканальної вимірювальної підсистеми, виходи якої надходять на входи блоків віднімання, інші входи яких підключені до виходів блока задання температури всіх зон багатозонного об'єкта, а виходи - до входів нейронної мережі, виходи якої надходять на входи блоків керування потужністю, виходи яких підключені до нагрівачів відповідних зон, який **відрізняється** тим, що в нього введені блок задання приростів потужності нагрівачів, перший вихід якого підключено до входу керування блока задання температури всіх зон багатозонного об'єкта, та блок навчання нейронної мережі, вихід якого підключено до входу керування вагами та зміщеннями нейронів, які входять в нейронну мережу, причому під час навчання нейронної

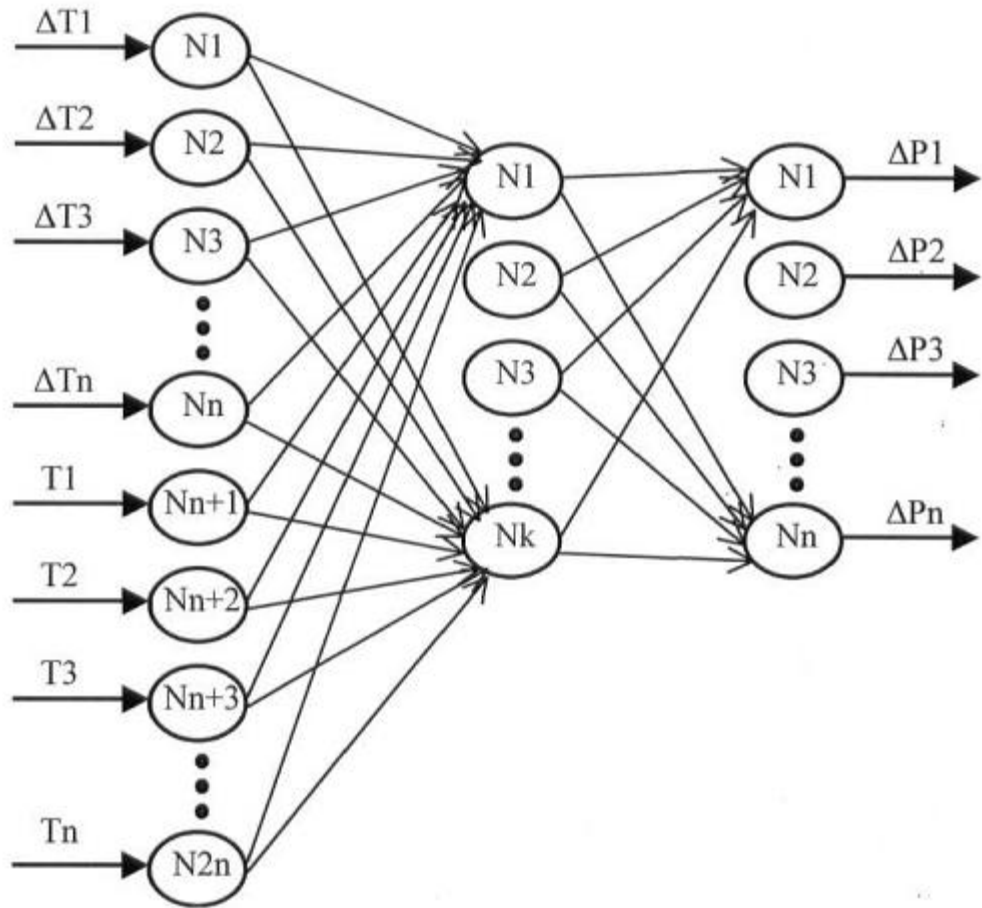
мережі її виходи підключені лише до входів блока навчання нейронної мережі, другі входи якого підключені до входів блоків керування потужністю нагрівачів всіх зон і виходів блока задання приростів потужності, а виходи багатоканальної вимірювальної підсистеми підключені також до додаткових входів нейронної мережі та додаткових входів блока задання температури всіх зон.



Фіг. 1



Фіг. 2



Фіг. 3

Комп'ютерна верстка А. Крижанівський

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601