



УКРАЇНА

(19) UA (11) 47481 (13) U
(51) МПК
G06G 7/60 (2009.01)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС
ДО ПАТЕНТУ
НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

видається під
відповідальність
власника
патенту

(54) ПРИСТРІЙ АНАЛОГОВОЇ ДВОНАПРАВЛЕНОЇ АСОЦІАТИВНОЇ ПАМ'ЯТІ

1

2

(21) u200907222

(22) 10.07.2009

(24) 10.02.2010

(46) 10.02.2010, Бюл.№ 3, 2010 р.

(72) ДМИТРИЄНКО ВАЛЕРІЙ ДМИТРІЙОВИЧ, ЗАКОВОРОТНИЙ ОЛЕКСАНДР ЮРІЙОВИЧ, МАЗУРІКА РОМАН СЕРГІЙОВИЧ

(73) НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

(57) Пристрій аналогової двонаправленої асоціативної пам'яті, створений на основі нейронних мереж адаптивної резонансної теорії (АРТ), що складається із двох сенсорних шарів нейронів, проміжного шару нейронів, елементи якого зв'язані парами бінарних двонаправлених зважених зв'язків з усіма елементами шару загальних вирішальних нейронів двох модулів, до складу першого з яких входять два паралельно працюючі підмодулі, зв'язані один з одним однонаправленими зв'язками, і являє собою модифіковану безперервну нейронну мережу АРТ-2, що включає в себе шар інтерфейсних елементів, нейрони якого зв'язані з відповідними їм елементами сенсорного шару нейронів модуля парами двонаправлених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами, шар елементів, що розпізнають, нейрони якого зв'язані бінарними однонаправленими зв'язками з відповідними їм розпізнавальними нейронами другого підмодуля нейронної мережі, з кожним з елементів інтерфейсного шару підмодуля парами двонаправлених зважених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами та з відповідними їм загальними розпізнавальними нейронами модуля безперервної нейронної мережі парами двонаправлених зважених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами, вирішальний нейрон, який зв'язаний збудливими та гальмівними бінарними односпрямованими зв'язками з усіма елементами інтерфейсного шару нейронів й з усіма елементами шару нейронів, що розпізнають, та загальним вирішальним нейроном модуля, що у свою чергу зв'язаний бінарними однонаправленими вихідними зв'язками з усіма елементами загального розпі-

знавального шару нейронів модуля, а також нормуючий нейрон, що зв'язаний безперервними однонаправленими вихідними зв'язками з усіма елементами інтерфейсного шару нейронів підмодуля безперервної нейронної мережі та безперервними однонаправленими вхідними зв'язками з усіма елементами сенсорного шару нейронів, який відрізняється тим, що в нього введені два однотипних паралельно працюючих підмодулі, зв'язані один з одним бінарними однонаправленими зв'язками, які являють собою модифіковані безперервні нейронні мережі АРТ-2, кожна з яких містить у собі шар інтерфейсних елементів, нейрони якого пов'язані з відповідними їм елементами сенсорного шару нейронів модуля парами двонаправлених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами, шар елементів, що розпізнають, нейрони якого зв'язані бінарними однонаправленими зв'язками з відповідними їм розпізнавальними нейронами іншого підмодуля нейронної мережі, з кожним з елементів інтерфейсного шару підмодуля парами двонаправлених зважених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами та з відповідними їм загальними розпізнавальними нейронами модуля безперервної нейронної мережі парами двонаправлених зважених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами, вирішальний нейрон, що зв'язаний збудливими й гальмівними бінарними однонаправленими зв'язками з усіма елементами інтерфейсного шару нейронів й шару нейронів, що розпізнають, та загальним вирішальним нейроном модуля, що у свою чергу зв'язаний бінарними однонаправленими вихідними зв'язками з усіма елементами загального розпізнавального шару нейронів модуля нейронної мережі, а також нормуючий нейрон, що зв'язаний безперервними однонаправленими вихідними зв'язками з усіма елементами інтерфейсного шару нейронів підмодуля нейронної мережі й безперервними однонаправленими вхідними зв'язками з усіма елементами сенсорного шару нейронів паралельно до працюючого модуля безперервної нейронної мережі.

(19) UA (11) 47481 (13) U

Корисна модель відноситься до обчислювальної техніки, зокрема до області побудови інтелектуальних автоматизованих систем керування, а саме до напрямку створення систем діагностики складних технічних об'єктів у процесі їхньої експлуатації.

Корисна модель може бути використане при побудові системи керування або діагностики такого складного технічного об'єкта як трифазний асинхронний тяговий електропривод.

Відомий пристрій двонаправленої асоціативної пам'яті, що складається із двох сенсорних шарів, нейрони яких зв'язані між собою парами зважених двонаправлених зв'язків з відповідними ваговими коефіцієнтами [1].

Недоліками відомого пристрою є, з одного боку, відсутність можливості відділення нових образів від спотворених або зашумлених відомих образів, а, з іншого боку, відсутність можливості донавчання пристрою в процесі його функціонування. Це пов'язано, в першу чергу, з тим, що запам'ятовування нових асоціацій вимагає процесу повного перенавчання всіх вагових коефіцієнтів даного пристрою.

Відомий пристрій двонаправленої асоціативної пам'яті, створеної на основі дискретних нейронних мереж адаптивної резонансної теорії, складається з двох сенсорних шарів нейронів та двох керуючих нейронів, які зв'язані вихідними зв'язками з керуючими нейронами відповідних модулів та вхідними зв'язками з усіма нейронами в проміжному шарі, елементи якого зв'язані парами двонаправлених зважених зв'язків з відповідними їм елементами розпізнавальних шарів двох однотипних паралельно працюючих модулів, кожний з яких являє собою дискретну нейронну мережу адаптивної резонансної теорії, що містить у собі шари інтерфейсних елементів, нейрони яких пов'язані з відповідними їм елементами сенсорних шарів парами бінарних двонаправлених зв'язків, шари розпізнавальних елементів, нейрони яких пов'язані з кожним з елементів у відповідним їм інтерфейсних шарах парами двонаправлених зважених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами, вирішуючі нейрони, які зв'язані збудливими вхідними зв'язками з усіма елементами сенсорних шарів, гальмуючими вхідними зв'язками з усіма елементами інтерфейсних шарів та збудливими вихідними зв'язками з усіма елементами розпізнавальних шарів й керуючі нейрони модулів, які зв'язані збудливими вхідними зв'язками з усіма елементами сенсорних шарів, збудливими вихідними зв'язками з усіма елементами інтерфейсних шарів та гальмуючими вхідними зв'язками з усіма елементами розпізнавальних шарів, а також зв'язані вхідними зв'язками з відповідними керуючими нейронами мережі [2].

При порівнянні з першим аналогом пристрій двонаправленої асоціативної пам'яті має можливість донавчання в процесі свого функціонування та здатен відокремлювати нові образи від спотворених або зашумлених відомих образів. Однак у

розглянутого аналога відсутня можливість запам'ятовування й відновлення з пам'яті пристрою асоціативних зображень, які представлені у вигляді векторів з безперервними складовими.

Найбільш близьким до заявленого пристрою є пристрій двонаправленої аналого-дискретної асоціативної пам'яті, створений на основі нейронних мереж адаптивної резонансної теорії (АРТ), що складається із двох сенсорних шарів нейронів, проміжного шару нейронів, елементи якого зв'язані парами бінарних двонаправлених зважених зв'язків з усіма елементами шару загальних вирішальних нейронів одного модуля та з усіма елементами розпізнавального шару, іншого модуля, що являє собою дискретну нейронну мережу АРТ-1 та включає в себе шар інтерфейсних елементів, нейрони якого пов'язані з відповідними їм елементами сенсорного шару модуля парами двонаправлених зважених зв'язків с бінарними ваговими коефіцієнтами, шар розпізнавальних елементів, нейрони якого пов'язані з кожним з елементів в інтерфейсному шарі парами двонаправлених зважених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами, вирішальний нейрон, який зв'язаний збудливими й гальмівними зв'язками з усіма елементами сенсорного, інтерфейсного та розпізнавального шарів і два керуючі нейрони, один із яких зв'язаний збудливими й гальмуючими зв'язками з усіма елементами сенсорного, інтерфейсного та розпізнавального шарів, а інший, зв'язаний збудливими й гальмівними зв'язками з усіма елементами сенсорного та розпізнавального шару нейронів, а так само з керуючим нейроном усього модуля, що у свою чергу зв'язаний вхідними зв'язками з усіма нейронами в проміжному шарі елементів нейронної мережі, та відрізняючийся тим, що в нього введені два однотипних паралельно працюючих підмодуля, розпізнавальні нейрони яких, зв'язані один з одним бінарними однонаправленими зв'язками, та представляючих собою модифіковані безперервні нейронні мережі АРТ-2, кожна з яких містить у собі шар інтерфейсних елементів, нейрони якого пов'язані з відповідними їм елементами сенсорного шару нейронів модуля парами двонаправлених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами, шар розпізнавальних елементів, нейрони якого зв'язані бінарними однонаправленими зв'язками з відповідними їм розпізнавальними нейронами, іншого підмодуля нейронної мережі, з кожним з елементів інтерфейсного шару підмодуля парами двонаправлених зважених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами та з відповідними їм загальними розпізнавальними нейронами, модуля безперервної нейронної мережі парами двонаправлених зважених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами, вирішальний нейрон, який зв'язаний збудливими й гальмівними бінарними однонаправленими зв'язками з усіма елементами інтерфейсного та розпізнавального шарів підмодуля й загальним вирішальним нейроном модуля, що в свою чергу зв'язаний бінарними однонаправленими вихідними зв'язками з усіма

елементами загального розпізнавального шару нейронів модуля нейронної мережі, а також, нормуючий нейрон, що зв'язаний безперервними однонаправленими вихідними зв'язками з усіма елементами інтерфейсного шару нейронів підмодуля нейронної мережі й безперервними однонаправленими вхідними зв'язками з усіма елементами сенсорного шару нейронів паралельно працюючого модуля аналогово-дискретної нейронної мережі [3].

При порівнянні з відомими аналогами пристрій - прототип (двонаправлена аналого-дискретна асоціативна пам'ять) має можливість донавчання в процесі свого функціонування та здатен відокремлювати нові образи від спотворених або зашумлених відомих образів, а також має можливість запам'ятовування у своїй пам'яті зображень, представлених у вигляді векторів з бінарними складовими й ставити їм в асоціацію зображення, представлені у вигляді векторів з безперервними складовими. Однак у розглянутого прототипу відсутня можливість запам'ятовування й відновлення з пам'яті пристрою асоціативних зображень, які представлені тільки у вигляді векторів з безперервними складовими.

Таким чином, недоліком прототипу є те, що він не в змозі запам'ятовувати й відновлювати з пам'яті пристрою асоціативні зображення, які представлені тільки у вигляді векторів з безперервними складовими.

Завдання корисної моделі є розробка пристрою аналогової двонаправленої асоціативної пам'яті, що володіє можливістю запам'ятовування й відновлення з пам'яті нейронної мережі асоціативних зображень, які представлені тільки у вигляді векторів з безперервними складовими.

Завдання вирішується завдяки тому, що пристрій аналогової двонаправленої асоціативної пам'яті змінюється шляхом введення в його структуру двох однотипних паралельно працюючих підмодулів, зв'язаних один з одним бінарними однонаправленими зв'язками, які являють собою модифіковані безперервні нейронні мережі АРТ-2, кожна з яких містить у собі шар інтерфейсних елементів, нейрони якого пов'язані з відповідними їм елементами сенсорного шару нейронів модуля парами двонаправлених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами, шар елементів, що розпізнають, нейрони якого зв'язані бінарними однонаправленими зв'язками з відповідними їм розпізнавальними нейронами іншого підмодуля нейронної мережі, з кожним з елементів інтерфейсного шару підмодуля парами двонаправлених зважених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами та з відповідними їм загальними розпізнавальними нейронами модуля безперервної нейронної мережі парами двонаправлених зважених зв'язків з безперервними ваговими коефіцієнтами, вирішальний нейрон, що зв'язаний збудливими й гальмівними бінарними однонаправленими зв'язками з усіма елементами інтерфейсного шару нейронів й шару нейронів, що розпізнають, та загальним вирішальним нейроном модуля, що у свою чергу зв'язаний бінарними однонаправленими вихідними зв'язками з усіма елементами загального розпізнавального

шару нейронів модуля нейронної мережі, а також нормуючий нейрон, що зв'язаний безперервними однонаправленими вихідними зв'язками з усіма елементами інтерфейсного шару нейронів підмодуля нейронної мережі й безперервними однонаправленими вхідними зв'язками з усіма елементами сенсорного шару нейронів паралельно працюючого модуля безперервної нейронної мережі.

У результаті додавання в структуру нейронної мережі перерахованих вище елементів досягається можливість роботи пристрою із зображеннями, які представляються у вигляді векторів з безперервними складовими. Це стає можливим завдяки тому, що використані при побудові пристрою безперервні нейронні мережі АРТ-2Д орієнтовані на роботу із зображеннями, які представлені тільки у вигляді векторів з безперервними складовими.

Корисна модель ілюструється рисунком (Фіг.1), на якому наведена схема пристрою аналогової двонаправленої асоціативної пам'яті, розробленої на основі штучних нейронних мереж АРТ-2Д.

Корисна модель складається із двох паралельно працюючих модулів M_1 , M_2 , кожний з яких являє собою нейронну мережу АРТ-2Д. До складу модулів M_1 і M_2 входять сенсорні шари елементів, відповідно S^1_i і S^2_i ($i=1, \dots, n$; $l=1, \dots, k$), які приймають пари асоціативних вхідних зображень $(S^1_1, S^2_1), (S^1_2, S^2_2), \dots, (S^1_n, S^2_n)$. Елементи сенсорних шарів модулів M_1 і M_2 передають вхідні зображення інтерфейсним нейронам Z^1_i, Z^2_i , і Z^3_i, Z^4_i ($i=1, \dots, n$; $l=1, \dots, k$), відповідно підмодулів M_{11}, M_{12} і M_{21}, M_{22} нейронної мережі. Елементи інтерфейсних шарів Z^1_i, Z^2_i , і Z^3_i, Z^4_i ($i=1, \dots, n$; $l=1, \dots, k$) пов'язані з елементами розпізнавальних шарів Y^1, Y^2 і Y^3, Y^4 ($j=1, \dots, m$; $g=1, \dots, m$), відповідно підмодулів M_{11}, M_{12} і M_{21}, M_{22} нейронної мережі. З'єднання між елементами інтерфейсних та розпізнавальних шарів, здійснюється зваженими зв'язками з ваговими коефіцієнтами $b^1_{ij}, b^2_{ij}, b^3_{lg}, b^4_{lg}, t^1_{ji}, t^2_{ji}, t^3_{gl}, t^4_{gl}$, ($i=1, \dots, n$; $j=1, \dots, m$; $l=1, \dots, k$; $g=1, \dots, m$), відповідно для підмодулів $M_{11}, M_{12}, M_{21}, M_{22}$ нейронної мережі. У підмодулях M_{11}, M_{12} і M_{21}, M_{22} шари Y^1_j, Y^2_j і Y^3_g, Y^4_g ($j=1, \dots, m$; $g=1, \dots, m$) є шарами нейронів, що змагаються, у яких кожний елемент може перебувати в одному із трьох станів: активному, неактивному, загальмованому. У результаті розпізнавання вхідних зображень у підмодулях M_{11} і M_{21} нейронної мережі залишається активним тільки один нейрон розпізнавального шару Y^1_j та Y^3_g у відповідним їм шарах Y^1_j та Y^3_g ($j=1, \dots, m$; $g=1, \dots, m$). При цьому в режимі розпізнавання нейрони Y^2_j і Y^4_g підмодулів M_{12} і M_{22} виділяються за допомогою сигналів нейронів Y^1_j та Y^3_g підмодулів M_{11} і M_{21} . За допомогою вирішальних нейронів R^1_1, R^2_1 і R^2_2 визначаються параметри подібності p^1_1, p^1_2 і p^2_1, p^2_2 , відповідно для підмодулів M_{11}, M_{12} і M_{21}, M_{22} нейронної мережі, а за допомогою нейронів R^1 і R^2 , які входять до складу модулів M_1 і M_2 , визначаються загальні параметри подібностей p^1 і p^2 .

Двонаправлена асоціативна пам'ять, яка побудована на нейронних мережах АРТ-2Д, орієнтована на роботу з безперервними вхідними зображеннями, тому всі ваги зв'язків $b^1_{ij}, b^2_{ij}, b^3_{lg}, b^4_{lg}, t^1_{ji}, t^2_{ji}, t^3_{gl}, t^4_{gl}$, ($i=1, \dots, n$; $j=1, \dots, m$; $l=1, \dots, k$; $g=1, \dots,$

м) підмодулів M_{11} , M_{12} і M_{21} , M_{22} нейронної мережі є безперервними.

Архітектуру мережі, крім модулів M_1 і M_2 на основі нейронних мереж АРТ-2Д, визначає шар проміжних нейронів P_d ($d = 1, \dots, m$), що зв'язує модулі M_1 й M_2 нейронної мережі. На етапі навчання модулі M_1 й M_2 нейронної мережі будуть запам'ятовувати пари асоціативних зображень. При цьому поряд із установленням значень ваг зв'язків усередині кожного з модулів, будуть установлюватися і матриці вагових коефіцієнтів проміжного шару нейронів P_d ($d = 1, \dots, m$), який зв'язує модулі M_1 й M_2 нейронної мережі. На основі цих вагових коефіцієнтів буде здійснюватися асоціативний зв'язок між запам'ятованими зображеннями двох модулів. Процес навчання нової нейронної мережі вважається закінченим, коли по закінченню чергової епохи навчання відсутні зміни вагових коефіцієнтів: b^1_{ij} , b^2_{ij} , b^3_{lg} , b^4_{lg} , ($i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, m$; $l = 1, \dots, k$; $g = 1, \dots, m$) і t^1_{ji} , t^2_{ji} , t^3_{gl} , t^4_{gl} , ($j = 1, \dots, m$; $i = 1, \dots, n$; $g = 1, \dots, m$ $l = 1, \dots, k$), відповідно ваг зв'язків від елементів інтерфейсного шару до елементів розпізнавального шару, і ваг зв'язків від елементів розпізнавального шару, до елементів інтерфейсного шару, модулів M_1 і M_2 нейронної мережі. Матриці ваг зв'язків між елементами шарів, що розпізнають, модулів M_1 і M_2 нейронної мережі й елементами проміжного шару на умову навчання не впливають.

В режимі розпізнавання вхідних зображень і визначення їм асоціативних зображень n - або k -мірні вхідні вектори можуть подаватися відповідно на входи S^1_i або S^2_l ($i=1, \dots, n$; $l=1, \dots, k$) елементів, відповідно модулів M_1 і M_2 нейронної мережі. При роботі нейронної мережі не передбачається подача зображень на два поля вхідних елементів одночасно. Нейрон-переможець X^1_j або X^2_g модулів M_1 або M_2 , активізується сигналами від пари нейронів шарів, що розпізнають, відповідно підмодулів M_{11}, M_{12} або M_{21}, M_{22} . Нейрон-переможець X^1_j модуля M_1 , визначається сигналами нейронів-переможців Y^1_j і Y^2_j розпізнавальних шарів Y^1_j , Y^2_j ($j = 1, \dots, m$), відповідно підмодулів M_{11} , M_{12} . Аналогічним образом може визначатися й нейрон-переможець X^2_g для модуля M_2 нейронної мережі, що відповідають сигналами нейронів-переможців Y^3_g і Y^4_g розпізнавальних шарів Y^3_g , Y^4_g ($g=1, \dots, m$), відповідно підмодулів M_{21} , M_{22} нейронної мережі. Нейрони-переможці Y^1_j і Y^3_g , вибираються в результаті змагання нейронів розпізнавальних шарів Y^1_j і Y^3_g ($j = 1, \dots, m$; $g = 1, \dots, m$), підмодулів M_{11} і M_{21} нейронної мережі. Нейрони-переможці Y^2_j і Y^4_g підмодулів M_{12} і M_{22} , вибираються не в результаті змагання нейронів розпізнавальних шарів Y^2_j і Y^4_g ($j = 1, \dots, m$; $g = 1, \dots, m$), підмодулів M_{12} і M_{22} , а сигналами з відповідних Y^1_j і Y^3_g нейронів-переможців підмодулів M_{11} і M_{21} , після їхньої перевірки за величиною параметрів p^1_1 і p^2_1 подібності. У зв'язку із цим введені зв'язки між парами Y -нейронів Y^1_j , Y^2_j і Y^3_g , Y^4_g ($j = 1, \dots, m$; $g = 1, \dots, m$) модулів M_1 і M_2 нейронної мережі. Виділені в такий спосіб нейрони Y^2_j і Y^4_g підмодулів M_{12} і M_{22} , також перевіряються по величині параметрів подібності p^1_2 і p^2_2 . Якщо нейрони Y^2_j і Y^4_g витримують цю перевірку та витримують наступну перевірку за

величиною параметра подібності й пари нейронів Y^1_j , Y^2_j і Y^3_g , Y^4_g для модулів M_1 і M_2 , то на виході нейрона X^1_j , що розпізнає, або X^2_g модулів M_1 або M_2 з'являється одиничний сигнал, що свідчить про розпізнавання вхідного зображення. Якщо нейрони Y^2_j і Y^4_g або пари елементів Y^1_j , Y^2_j і Y^3_g , Y^4_g , модулів M_1 і M_2 , не витримують перевірку за величиною параметрів подібності, то нейрони Y^1_j і Y^3_g , підмодулів M_{11} і M_{21} , загальмовуються $U_{\text{вих}Y^1_j} = -1$; $U_{\text{вих}Y^3_g} = -1$, а нейрони Y^2_j і Y^4_g , підмодулів M_{12} і M_{22} , переводяться в неактивний стан $U_{\text{вих}Y^2_j} = 0$; $U_{\text{вих}Y^4_g} = 0$.

Після вибору нейрона-переможця X^1_j або X^2_g одного з модулів M_1 або M_2 , здійснюється вибір нейрона-переможця іншого модуля нейронної мережі. Він визначається не в результаті змагання нейронів шару, що розпізнає, а активізується нейроном-переможцем модуля M_1 або M_2 , через зв'язки елементів P -шару. Цей нейрон-переможець за допомогою спадаючих зв'язків відновить в інтерфейсному шарі Z -елементів зображення, що зберігається в його пам'яті. Відновлене зображення повториться на шарі Z -елементів і надійде на вхід модуля. Таким чином, відбудеться вибір зображення, асоціативного вхідному зображенню, що подається на вхід іншого модуля нейронної мережі.

Пристрій аналогової двонаправленої асоціативної пам'яті, на основі нейронних мереж АРТ-2Д, функціонує відповідно до двох алгоритмів: навчання й розпізнавання.

В алгоритмах прийняті наступні позначення:

m - максимальне число пар асоціативних зображень, що запам'ятовуються;

n і k - число компонентів у вхідному векторі (зображенні) відповідно для модуля M_1 й M_2 ;

p^1 і p^2 - параметри подібності модулів M_1 і M_2 ;

q - число пар асоціативних зображень, що запам'ятовуються;

p^1_1 , p^1_2 і p^2_1 і p^2_2 - параметри подібності між вхідним вектором і векторами, що зберігаються у вагах зв'язків перемігших нейронів, відповідно Y^1_j , Y^2_j і Y^3_g , Y^4_g підмодулів M_{11} , M_{12} або M_{21} , M_{22} нейронної мережі; діапазон припустимих значень параметрів подібності: $0 < p^1_1, p^1_2 \leq 1$; $0 < p^2_1, p^2_2 \leq 1$;

b^1_{ij} , b^2_{ij} і b^3_{lg} , b^4_{lg} ($i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, m$; $l = 1, \dots, k$; $g = 1, \dots, m$) - ваги зв'язків від елементів інтерфейсного шару до елементів розпізнавального шару нейронів, відповідно підмодулів M_{11} , M_{12} і M_{21} , M_{22} ; початкове значення, що рекомендується, при навчанні $b^1_{ij} = b^2_{ij} = b^3_{lg} = b^4_{lg} = 1$ ($i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, m$; $l = 1, \dots, k$);

t^1_{ji} , t^2_{ji} і t^3_{gl} , t^4_{gl} , ($j = 1, \dots, m$; $i = 1, \dots, n$; $l = 1, \dots, k$) - ваги зв'язків від елементів розпізнавального шару, до елементів інтерфейсного шару нейронів, відповідно підмодулів M_{11} , M_{12} і M_{21} , M_{22} ; початкове значення, що рекомендується, при навчанні $t^1_{ji} = t^2_{ji} = t^3_{gl} = t^4_{gl} = 1$ ($j = 1, \dots, m$; $i = 1, \dots, n$; $l = 1, \dots, k$);

$U_{\text{вих}S^1_i}$, $U_{\text{вих}S^2_l}$ ($i = 1, \dots, n$; $l = 1, \dots, k$) - вихідні сигнали елементів S -шару, відповідно модулів M_1 і M_2 нейронної мережі;

$U_{\text{вх}Z_i^p}, U_{\text{вх}Z_i^q}$ и $U_{\text{вх}Z_i^p}, U_{\text{вх}Z_i^q}$ - вхідні й вихідні сигнали елементів інтерфейсного шару, відповідно підмодулів M_{11}, M_{12} і M_{21}, M_{22} нейронної мережі;

$U_{\text{вих}Y_j^1}, U_{\text{вих}Y_j^2}, U_{\text{вих}Y_g^3}, U_{\text{вих}Y_g^4}$ ($j, g=1, \dots, m$) - вихідні сигнали розпізнавальних елементів, відповідно підмодулів M_{11}, M_{12} і M_{21}, M_{22} нейронної мережі;

$U_{\text{вих}X_j^1}, U_{\text{вих}X_g^2}$ ($j, g=1, \dots, m$) - вихідні сигнали розпізнавальних елементів, відповідно модулів M_1 і M_2 нейронної мережі;

$(S_1^{u1}, S_1^{u2}), (S_2^{u1}, S_2^{u2}), \dots, (S_q^{u1}, S_q^{u2})$ - пари асоціативних зображень, які належать навчальній множині $M^u = \{M_1^u, M_2^u, \dots, M_L^u\}$ вхідних зображень, що відносяться до L образів (динамічних режимів), $L \ll q$, кожен з яких характеризується K процесами, що змінюються у часі;

$S_r^{u1} = (S_{r1}^{u1}, \dots, S_{rm}^{u1}), S_r^{u2} = (S_{r1}^{u2}, \dots, S_{rk}^{u2}), r=1, \dots, q$ - бінарні вхідні вектора g -ї пари асоціативних зображень, відповідно для модулів M_1 і M_2 ;

$\|Y\|$ - норма вектора Y ;

P_d ($d=1, \dots, m$) - нейрони проміжного шару, які зв'язують модулі M_1 й M_2 асоціативної нейронної мережі;

$I_{w\min}^l(t_i), I_{w\max}^l(t_i)$ ($l=1, \dots, L; w=1, \dots, K; t_i=0, 1, 2, \dots$)

- відповідно мінімальне й максимальне значення змінної $I_w(t_i)$ в l -м ($l=1, \dots, L$) режимі функціонування об'єкта у враховуємі множині $\{I_{w1}^l(t_i), I_{w2}^l(t_i), \dots, I_{wM_l}^l(t_i)\}$ навчальних процесів у моменти часу t_i ;

K - число процесів у динамічному режимі, що розпізнається;

H_{jd}^1 і Q_{dg}^2 ($j, d, g=1, \dots, m$)

- ваги зв'язків відповідно від елементів розпізнавального шару модуля M_1 до елементів проміжного P -шару та від елементів проміжного P -шару до елементів розпізнавального шару модуля M_2 нейронної мережі;

Q_{gd}^1 і H_{dj}^2 ($g, d, j=1, \dots, m$)

- ваги зв'язків відповідно від елементів розпізнавального шару модуля M_2 до елементів проміжного P -шару та від елементів проміжного P -шару до елементів розпізнавального шару модуля M_1 нейронної мережі;

Алгоритм навчання двонаправленої асоціативної пам'яті на основі безперервних нейронних мереж АРТ-2Д припускає виконання наступних кроків:

Крок 1. Ініціюються параметри подібності й всі ваги зв'язків асоціативної нейронної мережі.

Крок 2. Задаються нульові вихідні сигнали всіх розпізнавальних елементів підмодулів M_{11}, M_{12} і M_{21}, M_{22} нейронної мережі:

$U_{\text{вих}Y_j^g} = 0; U_{\text{вих}Y_g^q} = 0; U_{\text{вих}X_j^1} = 0; U_{\text{вих}X_g^2} = 0; p=1, 2; q=3, 4; j, g=1, \dots, m.$

Крок 3. Для кожної навчальної множини M_l^u ($l=1, \dots, L$) вхідних зображень, що ставляться до одно-

го режиму функціонування об'єкта, виконуються шага 4-22.

Крок 4. Для кожної множини M_l^u ($l=1, \dots, L$) вхідних зображень, що відносяться до одного режиму функціонування об'єкта, визначається множина

верхніх $I_{w\max}^l(t_i)$ і нижніх $I_{w\min}^l(t_i)$ огинаючих для кожного з K процесів. Для модуля M_1 :

$$I_{w\max}^{lM_1} = \max(I_{w1}^l(t_i), I_{w2}^l(t_i), \dots, I_{wM_1}^l(t_i)), l=1, \dots, L; w=1, \dots, K;$$

$$t_i = 0, 1, 2, \dots, T = n - 1,$$

$$I_{q\min}^{lM_1} = \min(I_{q1}^l(t_i), I_{q2}^l(t_i), \dots, I_{qM_1}^l(t_i)), l=1, \dots, L; w=1, \dots, K;$$

$$t_i = 0, 1, 2, \dots, T = n - 1.$$

Для модуля M_2 :

$$I_{w\max}^{lM_2} = \max(I_{w1}^l(t_i), I_{w2}^l(t_i), \dots, I_{wM_2}^l(t_i)), l=1, \dots, L; w=1, \dots, K;$$

$$t_i = 0, 1, 2, \dots, T = k - 1,$$

$$I_{q\min}^{lM_2} = \min(I_{q1}^l(t_i), I_{q2}^l(t_i), \dots, I_{qM_2}^l(t_i)), l=1, \dots, L; w=1, \dots, K;$$

$$t_i = 0, 1, 2, \dots, T = k - 1.$$

Отриманими обгинаючими активізуються нейрони сенсорних шарів S_i^1 і S_i^2 ($i=1, \dots, n; l=1, \dots, K$), відповідно модулів M_1 і M_2 :

$$U_{\text{вих}S_i^1} = S_{ri}^{u1}; U_{\text{вих}S_i^2} = S_{ri}^{u2}, i=1, \dots, n; l=1, \dots, k.$$

Крок 5. Для кожної із огинаючих виконуються шага алгоритму 6-17. Крок 6. Аналогічним образом, як і в алгоритмі навчання нейронної мережі

АРТ-2Д, формуються вхідні сигнали $U_{\text{вх}Z_i^p}, U_{\text{вх}Z_i^q}$ ($p=1, 2; i=1, \dots, n; q=3, 4; l=1, \dots, k$); елементів інтерфейсних шарів Z_i^1, Z_i^2 і Z_i^3, Z_i^4 ($i=1, \dots, n; l=1, \dots, k$) підмодулів M_{11}, M_{12} і M_{21}, M_{22} нейронної мережі.

Крок 7. Формуються вихідні сигнали елементів інтерфейсних шарів Z_i^1, Z_i^2 і Z_i^3, Z_i^4 ($i=1, \dots, n; l=1, \dots, k$) підмодулів M_{11}, M_{12} і M_{21}, M_{22} асоціативної нейронної мережі:

$$U_{\text{вх}Z_i^p} = U_{\text{вх}Z_i^q}; U_{\text{вих}Z_i^q} = U_{\text{вих}Z_i^p}; p=1, 2; i=1, \dots, n; q=3, 4; l=1, \dots, k.$$

Крок 8. Для всіх незагальмованих розпізнаючих, Y -нейронів, M_{11}, M_{12} підмодулів M_{21}, M_{22} і нейронної мережі, розраховуються їхні вихідні сигнали:

$$U_{\text{вих}Y_j^k} = \sum_{l=1}^n b_{lj}^k U_{\text{вих}Z_l^k}, \text{ якщо } U_{\text{вих}Y_j^k} \neq -1, k=1, 2; j=1, \dots, m;$$

$$U_{\text{вих}Y_g^k} = \sum_{l=1}^k b_{lg}^k U_{\text{вих}Z_l^k}, \text{ якщо } U_{\text{вих}Y_g^k} \neq -1, g=3, 4; g=1, \dots, m.$$

Крок 9. Поки не знайдені нейрони-переможці розпізнавальних шарів Y_j^1, Y_j^2 і Y_g^3, Y_g^4 ($j, g=1, \dots, m$), відповідно підмодулів M_{11}, M_{12} і M_{21}, M_{22} , вагові вектори яких відповідно до заданих значень параметрів подібності p^1, p^2 і p^3, p^4 відповідають верхнім і нижнім огинаючим вхідних векторів S_{r1}^1 і S_{r2}^2 , виконуються шага 10-17 (для обох модулів M_1 і M_2 або для одного з них).

Крок 10. В Y -шарах підмодулів M_{11}, M_{12} і M_{21}, M_{22} визначаються нейрони, відповідно Y_j^1, Y_j^2 і Y_g^3, Y_g^4 , що задовольняють умовам:

$$U_{\text{вих}Y_j^k} \geq U_{\text{вих}Y_j^k}; k=1, 2; j=1, \dots, m; U_{\text{вих}Y_g^k} \geq U_{\text{вих}Y_g^k}; l=3, 4; g=1, \dots, m.$$

Якщо елементів $Y^1_j, Y^2_j, i Y^3_G, Y^4_G$ в Y -шарах підмодулів M_{11}, M_{12} і M_{21}, M_{22} декілька, то вибираються елементи з найменшими індексами. Якщо знайдений нейрон-переможець є загальмованим, то вхідне зображення для даного модуля не може бути запам'ятовано.

Крок 11. Вихідним сигналам нейронів-переможців $Y^1_j, Y^2_j, i Y^3_G, Y^4_G$ привласнюються одиничні значення:

$U_{вихY^1_j} = U_{вихY^2_j} = U_{вихY^3_G} = U_{вихY^4_G} = 1$, а всі інші незагальмовані розпізнавальних нейронів шарів підмодулів M_{11}, M_{12} і M_{21}, M_{22} переводяться в неактивний стан:

$$U_{вихY^1_j} = U_{вихY^2_j} = U_{вихY^3_G} = U_{вихY^4_G} = 0, j, g = 1, \dots, m, j \neq j, g \neq G.$$

Крок 12. Розраховуються вихідні сигнали елементів інтерфейсних шарів $Z^1_i, Z^2_i (i=1, \dots, n)$ і $Z^3_i, Z^4_i (i=1, \dots, k)$ відповідно підмодулів M_{11}, M_{12} і M_{21}, M_{22} нейронної мережі:

$$U_{вихZ^1_i} = U_{вихY^1_j} t_{ji}^1, U_{вихZ^2_i} = U_{вихY^2_j} t_{ji}^2, i = 1, \dots, n;$$

$$U_{вихZ^3_i} = U_{вихY^3_G} t_{Gi}^3, U_{вихZ^4_i} = U_{вихY^4_G} t_{Gi}^4, i = 1, \dots, k.$$

Крок 13. Визначаються параметри подібності p^1_1, p^2_1 і p^1_2, p^2_2 , відповідно для підмодулів M_{11}, M_{12} і M_{21}, M_{22} нейронної мережі:

$$p^1_1 = \frac{\|P^1_1(k, t_i)\|}{K(T+1)}, p^2_1 = \frac{\|P^2_1(k, t_i)\|}{K(T+1)},$$

де $P^1_1(k, t_i)$ й $P^2_1(k, t_i)$ - функції, що відповідають l -му динамічному режиму, розпізнавальному по відповідно до максимальним $l^1_{k \max}(t_i)$ і мінімальним $l^1_{k \min}(t_i)$ значенням;

$$P^1_1(w, t_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } l^1_{w \max}(t_i) \geq l^1_w(t_i), w = 1, \dots, K, t_i = 0, 1, \dots, T = n-1, \\ 0, & \text{если } l^1_{w \max}(t_i) < l^1_w(t_i), w = 1, \dots, K, t_i = 0, 1, \dots, T = n-1, \end{cases}$$

$$P^2_1(w, t_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } l^2_{w \min}(t_i) \geq l^2_w(t_i), w = 1, \dots, K, t_i = 0, 1, \dots, T = n-1, \\ 0, & \text{если } l^2_{w \min}(t_i) < l^2_w(t_i), w = 1, \dots, K, t_i = 0, 1, \dots, T = n-1, \end{cases}$$

$$\|P^1_1(k, t_i)\| \quad \text{і} \quad \|P^2_1(k, t_i)\| \quad - \text{норми функцій } P^1_1(k, t_i) \quad \text{і} \quad P^2_1(k, t_i),$$

обумовлені співвідношеннями:

$$\|P^1_1(k, t_i)\| = \sum_{k=1}^K \sum_{t_i=0}^T P^1_1(k, t_i), \|P^2_1(k, t_i)\| = \sum_{k=1}^K \sum_{t_i=0}^T P^2_1(k, t_i),$$

де K - кількість процесів у режимах функціонування об'єкта що розпізнаються. Параметри подібності p^2_1 і p^2_2 для модуля M_2 мережі визначаються аналогічним образом.

Крок 14. Перевіряється по обчислених параметрах подібності p^1_1, p^2_1 і p^1_2, p^2_2 правильність вибору нейронів-переможців Y^1_j, Y^2_j і Y^3_G, Y^4_G . Якщо $p^1_1 < p^1_1$, то умова не виконується, елемент

Y^1_j загальмовується: $U_{вихY^1_j} = -1$; здійснюється перехід до шагу 10 алгоритму. Якщо $p^1_1 \geq p^1_1$, то умова, що підтверджує правильність вибору нейрона-переможця Y^1_j підмодуля M_{11} виконується й

здійснюється перехід до наступного кроку алгоритму. Аналогічним образом проводиться перевірка правильності вибору нейронів-переможців Y^2_j, Y^3_G, Y^4_G у відповідним їм шарах $Y^2_j, Y^3_G, Y^4_G (j, g=1, \dots, m)$ підмодулів M_{12}, M_{21}, M_{22} нейронної мережі.

Крок 15. Проводиться перевірка правильності вибору нейронів-переможців по загальним параметрам подібності p^1 й p^2 , відповідно для модулів M_1 і M_2 нейронної мережі. Якщо $p^1 \leq p^1_1 + p^2_1 - 1$ й $p^2 \leq p^2_1 + p^2_2 - 1$, то підтверджується правильність вибору нейронів-переможців $Y^1_j, Y^2_j, i Y^3_G, Y^4_G$ відповідно для підмодулів M_{11}, M_{12} і M_{21}, M_{22} нейронної мережі та здійснюється перехід до наступного кроку алгоритму. Якщо умова не виконується, то здійснюється перехід до кроку 10 алгоритму.

Крок 16. Адаптуються ваги зв'язків елементів $Y^1_j, Y^2_j, i Y^3_G, Y^4_G$, відповідно для підмодулів M_{11}, M_{12} і M_{21}, M_{22} нейронної мережі:

$$b^1_{ij} = U_{вхZ^1_i} t^1_{ji}, b^2_{ij} = U_{вхZ^2_i} t^2_{ji}, t^2_{ji} = U_{вхZ^2_i}, i = 1, \dots, n;$$

$$b^3_{iG} = U_{вхZ^3_i} t^3_{Gi}, b^4_{iG} = U_{вхZ^4_i} t^4_{Gi} = U_{вхZ^4_i}, i = 1, \dots, k.$$

Крок 17. Пари нейронів-переможців $Y^1_j, Y^2_j, i Y^3_G, Y^4_G$ активізують відповідні їм елементи розпізнавальних шарів X модулів M_1 і M_2 .

Крок 18. Перевіряється умова закінчення навчання модулів M_1 і M_2 нейронної мережі, якщо воно не виконується, то триває навчання одного або двох модулів мережі, у протилежному випадку здійснюється перехід на наступний крок алгоритму з метою визначення ваг зв'язків нейронів P -шару.

Крок 19. Для кожної пари вхідних зображень $(S^{u1}_r, S^{u2}_r), r=1, \dots, q$ виконуються шаги 20-22.

Крок 20. Вхідними зображеннями S^{u1}_r і $S^{u2}_r (r=1, \dots, q)$, що подаються відповідно на входи модулів M_1 і M_2 нейронної мережі, визначаються нейрони-переможці X^1_{Jr}, X^2_{Gr} модулів M_1 і M_2 нейронної мережі.

Крок 21. Визначаються ваги зв'язків між нейроном-переможцем X^1_{Jr} модуля M_1 й елементами P -шару:

$$H^1_{Jr, Jr} = H^2_{Jr, Jr} = 1; H^1_{Jr, d} = H^2_{Jr, d} = 0, d, 1, \dots, m; d \neq Jr; j \neq Jr.$$

Крок 22. Визначаються ваги зв'язків між нейроном-переможцем X^2_{Gr} модуля M_2 та елементами P -шару:

$$Q^2_{Gr, Gr} = Q^1_{Gr, Gr} = 1; Q^1_{Gr, d} = Q^2_{Gr, d} = 0; d, g = 1, \dots, m; d \neq Gr; g \neq Gr.$$

Крок 23. Останов.

Алгоритм роботи, у режимі визначення асоціативних зображень, пристрою аналогової двонаправленої асоціативної пам'яті побудованої на основі безперервних нейронних мереж АРТ-2Д, припускає виконання наступних шагів:

Крок 1. Ініціюються параметри подібності нейронної мережі й всіх її ваги зв'язків.

Крок 2. На вхід одного з модулів мережі подається вхідне зображення.

Допустимо, що вхідне зображення S^1_r подається на вхід модуля M_1 нейронної мережі. Тоді аналогічним образом, як і в алгоритмі навчання, визначається нейрон-переможець X^1_{Jr} модуля M_1 нейронної мережі.

Крок 3. Визначається нейрон-переможець X^2_{Jr} модуля M_2 нейронної мережі. Він виділяється не в

результаті змагання між розпізнавальними елементами модуля M_2 , а одиничним сигналом елемента P_{Jr} , що, в свою чергу, в активний стан переводиться X^1_{Jr} нейроном-переможцем:

$$U_{вихX^2_{Gr}} = 1, U_{вихX^2_g} = 0, g = 1, \dots, m, g \neq Gr.$$

При цьому вихідному сигналу нейрона-переможця X^2_{Gr} привласнюється одиничне значення $U_{вихX^2_{Gr}} = 1$, а всі інші нейрони, розпізнавального шару модуля M_2 нейронної мережі, переводяться в неактивний стан:

$$U_{вихX^2_g} = 0, g = 1, \dots, m, g \neq Gr.$$

Крок 4. Одиничним вихідним сигналом з нейрона-переможця X^2_{Gr} модуля M_2 в активний стан переводяться нейрони-переможці Y^3_{Gr} і Y^4_{Gr} у відповідним їм шарах Y^3_g і Y^4_g ($g=1, \dots, m$) підмодулів M_{21} і M_{22} нейронної мережі. При цьому вихідним сигналам нейронів Y^3_{Gr} і Y^4_{Gr} підмодулів M_{21} і M_{22} нейронної мережі, привласнюється одиничне значення $U_{вихY^3_{Gr}} = 1$ та $U_{вихY^4_{Gr}} = 1$, а всі інші нейрони, розпізнавальних Y -шарів підмодулів M_{21} і M_{22} , переводяться в неактивний стан:

$$U_{вихY^3_g} = 0, U_{вихY^4_g} = 0, g = 1, \dots, m, g \neq Gr.$$

Крок 5. Розраховуються вихідні сигнали елементів інтерфейсних шарів Z^3_l і Z^4_l ($l = 1, \dots, k$) підмодулів M_{21} і M_{22} нейронної мережі:

$$U_{вихZ^3_l} = t^3_{Gl}, U_{вихZ^4_l} = t^4_{Gl}, l = 1, \dots, k.$$

Крок 6. На основі вихідних сигналів елементів інтерфейсних шарів Z^3_l і Z^4_l ($l = 1, \dots, k$) підмодулів M_{21} і M_{22} нейронної мережі, формуються вхідні й вихідні сигнали елементів вхідного шару S^2_l ($l = 1, \dots, k$), модуля M_2 нейронної мережі. Отримане на виході модуля M_2 зображення $S^2_{r1} = (S^2_{r1}, \dots, S^2_{rk})$, є асоціацією зображенню

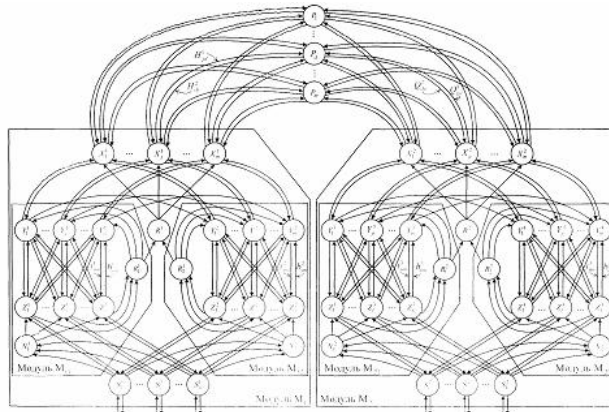
$S^1_r = (S^1_{r1}, \dots, S^1_{rm})$ ($r = 1, \dots, q$), що подається на елементи вхідного шару модуля M_1 нейронної мережі.

Крок 7. Останов.

Таким чином, розроблений пристрій аналогової двонаправленої асоціативної пам'яті має можливість запам'ятовування й відновлення з пам'яті нейронної мережі асоціативних зображень, які представлені тільки у вигляді векторів з безперервними складовими.

Джерела інформації:

1. Fausett L. Fundamentals of Neural Networks. Architectures, Algorithms and Applications. - New Jersey: Prentice Hall Int., Inc., 2005. - 461p.
2. Свідчення на корисну модель №18624 по заявці Neu200605460, кл. G 06 G 7/00, 2006р.
3. Свідчення на корисну модель №33321 по заявці Neu200800804, кл. G 06 G 7/00, 2008р.



Фіг. 1