ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНА ТЕХНІКА

https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-147-6-37-44

УДК 004.032.26

Т. Б. Мартинюк[1]
Я. В. Запетрук[1]

НЕЙРОМЕРЕЖЕВИЙ ПІДХІД ДО МЕДИЧНОЇ ЕКСПРЕС-ДІАГНОСТИКИ

[1]Вінницький національний технічний університет

Сучасні комп'ютерні системи медичної діагностики ефективно розв'язують складні та важливі задачі в галузі медицини, зокрема діагностування хвороб, моніторинг стану пацієнтів, прогнозування результатів лікування, підтримку прийняття рішення щодо діагностування та лікування хворих. Це пов'язано з їх здатністю миттєво аналізувати і узагальнювати множину чинників в процесі діагностування біомедичних даних. Використання нейромережевих технологій у складі медичних експертних систем, зокрема для експрес-діагностування дозволяє значно покращити цей процес. Нейромережеві технології дозволяють реалізувати інтелектуальний аналіз даних, виконати інформаційний пошук, розпізнавання (класифікацію) об'єктів (симптомів) та візуалізацію отриманих результатів.

Виконано аналіз особливостей нейромережевого підходу до медичної експрес-діагностики. Аналіз методів та засобів біомедичного діагностування показав актуальність та перспективність застосування нейромережевих технології. Запропоновано нейромережевий класифікатор на базі вдосконаленої мережі Хеммінга з формуванням дискримінантних функцій. Це дозволяє виконати експрес-діагностику на наборі визначених симптомів із застосуванням сформованої в процесі навчання пам'яті ваг для конкретних захворювань. В процесі спрацювання вихідного шару нейромережевого класифікатора з'являється одиничний сигнал y_k, який вказує на захворювання під k-м номером. Отже, формування бінарного вихідного сигналу $Y = \{y_i\}$ запропонованого нейромережевого класифікатора забезпечує можливість візуалізації результату діагностування із застосуванням лінійки світлодіодів. Апаратна реалізація запропонованого нейромережевого класифікатора разом з програмною підтримкою дозволить значно прискорити процес діагностування, використовуючи біомедичні дані та нейромережеві системи експрес-діагностики.

Ключові слова: медична діагностика, нейромережа, дискримінантний аналіз.

Вступ

Сьогодні медичні експертні системи широко використовуються для діагностування, моніторингу, прогнозування, підтримки прийняття рішень [1], [2]. Сучасні системи медичної діагностики можуть виконувати складні і важливі завдання медичної експрес-діагностики, а саме [1]—[3]: класифікувати вид захворювання (диференціальна діагностика); визначати найдоцільніший спосіб лікування; прогнозувати тривалість і результат захворювання; оцінювати ризик можливих ускладнень; виявляти основні синдроми; знаходити найхарактерніші для певного захворювання сукупності симптомів. Цінність медичних експертних систем в тому, що вони здатні миттєво аналізувати і узагальнювати безліч чинників і прецедентів, така можливість недоступна людині, навіть якщо вона є фахівцем [2]. На сьогоднішній день в медичній практиці все частіше застосовують комп'ютерні технології [1]. Лікарі вдаються до послуг роботів під час операцій, а комп'ютерна діагностика взагалі вважається нормою [2].

В останні роки дуже ефективно у складі експертних систем використовують технології на базі штучних нейронних мереж. Це потужний і одночасно гнучкий метод імітації процесів і явищ, оскільки відмінною властивістю нейронних мереж є їх здатність навчатися на основі експериментальних даних предметної області [3].

© Т. Б. Мартинюк, Я. В. Запетрук, 2019

Метою роботи є аналіз особливостей нейромережевого підходу до медичної експрес-діагностики.

Постановка задачі

Базова структура експертної системи (ЕС), показаної на рис. 1, демонструє наявність двох основних функцій в комп'ютерній програмі інтерфейсу, а саме навчатись в експерта і вести діалог з користувачем, тобто давати поради, пояснення, ставити запитання користувачеві [3], [4].

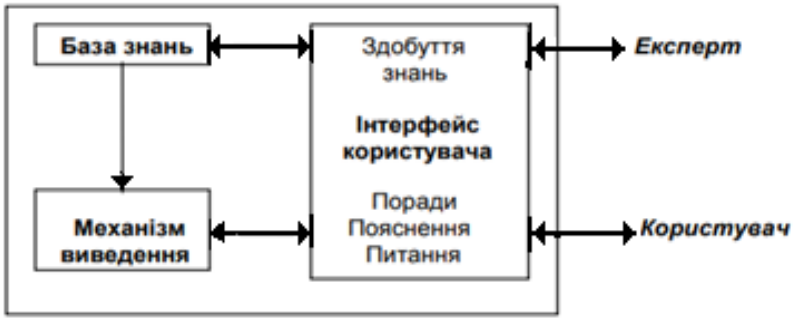

Рис. 1. Базова структура експертної системи

В роботі [5] розроблено автоматизований медичний комплекс (АМК) для моніторингу та діагностики фізичного здоров'я, що підвищує ефективність інформаційних процесів взаємодії пацієнтів з комплексом спеціалізованого контролю за динамікою їх стану.

В АМК інформація про всі дослідження заноситься до блока отримання оцінок діагностичних ознак, а результати обстеження зберігаються в базі даних. Підсистема підтримки прийняття рішень збирає та аналізує інформацію, а підсистема порівняння результатів діагностики надає інформацію про всі результати діагностування пацієнта, дані в яку надсилаються з підсистеми формування висновків і рекомендацій. Отже, автоматизоване робоче місце лікаря виконує функцію підсумовування проведення огляду і виведення на екран результатів у зрозумілій для користувача формі [5]. Для вдосконалення роботи АМК за рахунок застосування нейромережевих технологій особливий інтерес становить підсистема формування висновків та рекомендацій.

Комплексний метод діагностування в АМК можна представити алгоритмічно у вигляді сімох етапів [5], починаючи з аналітичного етапу і завершуючи етапом телемедичної підтримки.

На рис. 2 показано блок-схему алгоритму роботи АМК у режимі поглибленого обстеження пацієнтів [5]. Для такого підходу важливим є блок 8, де визначається ступінь відхилення отриманих результатів від діапазону значень, за якого приймається одне з трьох рішень щодо лікування. Але разом з тим, у випадку значних відхилень (блок 10) виконується перевірка повноти отриманої інформації, тобто саме після цього ставиться остаточний діагноз (блоки 14 і 15).

Біомедичні експертні системи розробляються для вирішення різних проблем, але основні типи їх діяльності можна згрупувати в категорії, наведені в таблиці [4].

Категорії біомедичних експертних систем

Категорія	Проблема, що вирішується
Інтерпретація	Опис ситуації за інформацією від сенсора
Діагностика	Виявлення причин захворювання
Прогноз	Визначення ймовірних наслідків певних ситуацій
Лікування, реабілітація	Виконання послідовності запропонованих дій, спрямованих на приведення до норми
Навчання	Діагностика і корекція поведінки
Планування	Визначення послідовності дій
Управління	Управління станом об'єкта

Застосування нейромережевого підходу до медичного діагностування, а саме на базі дискримінантного аналізу [6] з поєднанням нейромережі у складі підсистеми формування висновків і рекомендацій дозволяє зробити процес підтримки прийняття рішень гнучкішим через здатність такої підсистеми навчатись [7], [8]. При цьому зміни стосуються блоків 8—11, 15 у блок-схемі алгоритму (див. рис. 2).

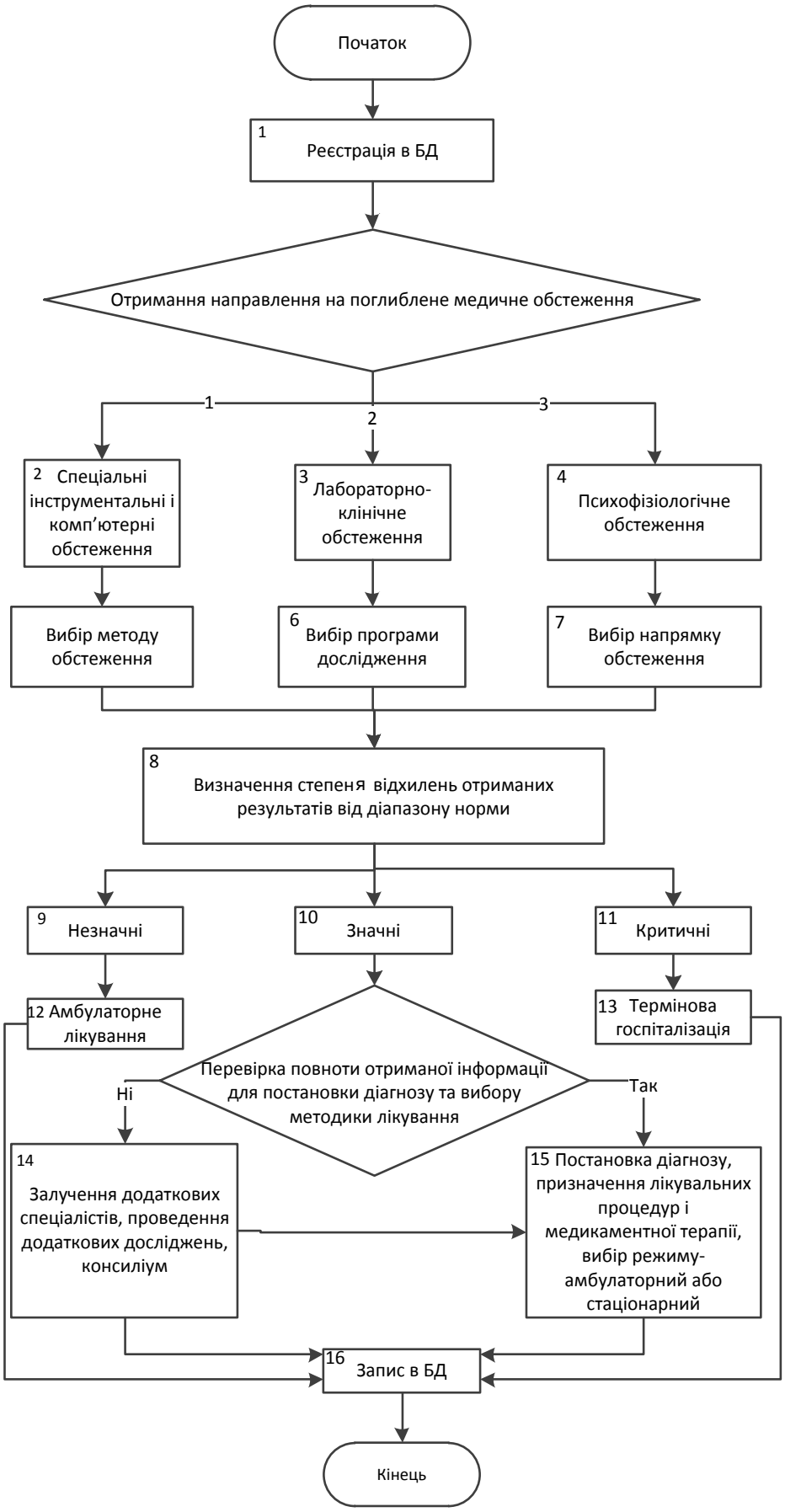

Рис. 2. Блок-схема алгоритму роботи АМК [5]

Система медичної експрес-діагностики на базі нейротехнологій

Пропонується варіант підсистеми формування висновків та рекомендацій (рис. 3) у складі АМК.

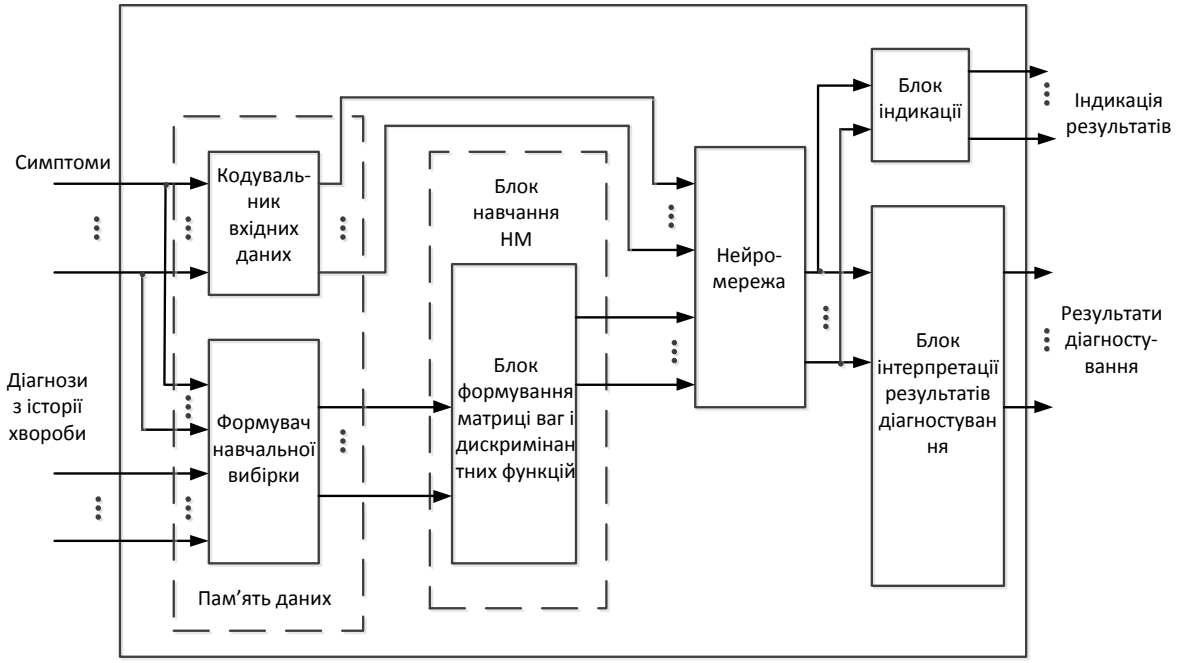

Рис. 3. Підсистема формування висновків та рекомендацій

Підсистема (рис. 3) містить кодувальник вхідних даних, формувач навчальної вибірки, блок формування матриці ваг і дискримінантних функцій, нейромережу, блок індикації та блок інтерпретації результатів діагностування. На вхід підсистеми подаються діагнози з історії хвороби, які надходять до формувача навчальної вибірки, та симптоми, які надходять як до кодувальника вхідних даних, так і до формувача навчальної вибірки. А на виході підсистеми формується результат діагностування з його індикацією. Базовим блоком підсистеми є нейромережа, яка виконує функції класифікатора, що дозволяє діагностувати певні захворювання за їх симптомами.

У підсистемі враховано таку важливу властивість нейронних мереж, як здатність навчатися. В процесі навчання нейронна мережа знаходить приховані нелінійні залежності між вхідними параметрами і кінцевим рішенням, а також оптимальну комбінацію вагових коефіцієнтів нейронів, що з'єднують сусідні шари, за якої похибка визначення класу образу (діагнозу) прагне до мінімуму [6], [9]—[11].

Основні переваги нейромережевих експертних систем перед звичайними такі [7], [9], [12], [13]:

1) нейромережі приймають рішення на основі досвіду, придбаного ними самостійно;

2) рішення, прийняте нейромережею, не є категоричним: мережа видає рішення разом зі ступенем впевненості в ньому, що залишає користувачеві можливість критично оцінювати її відповідь;

3) нейромережа дозволяє моделювати ситуацію прийняття рішення;

4) нейромережі дають відповідь в секундному діапазоні, що дозволяє використовувати їх в різних динамічних системах, які вимагають негайного прийняття рішення.

Все це доводить необхідність, актуальність та затребуваність використання штучних нейронних мереж для розв'язання медичних задач [7], [8], [12]—[14].

Нейромережевий класифікатор медичної діагностики

Для медичного діагностування використано дискримінантний аналіз, а саме, класифікацію об'єктів за дискримінантними функціями [6]. Цей підхід зумовлює використання класифікатора на базі нейромережі Хеммінга [10], [11] з подальшим вдосконаленням його структури [15]. Отже, використання дискримінантного аналізу в АМК замість визначення ступеня відхилення результатів від діапазону норми (блоки 8—11,15 на рис. 2) дозволяє використовувати нейротехнологію.

Структуру одного з варіантів нейромережевого класифікатора на базі вдосконаленої нейромережі Хеммінга показано на рис. 4 [16].

Класифікатор (див. рис. 4) містить три шари взаємозв'язаних нейроелементів. Виходи $y_1,\ldots,y_m$

бінарних нейроелементів вихідного шару є виходами ознаки належності вхідних сигналів відповідному класу, причому прихований шар складається з m лінійних нейроелементів, де m — кількість класів, а кожний з n входів $x_1,\ldots, x_n$ класифікатора з'єднаний з входом відповідного сенсорного нейроелемента вхідного шару.

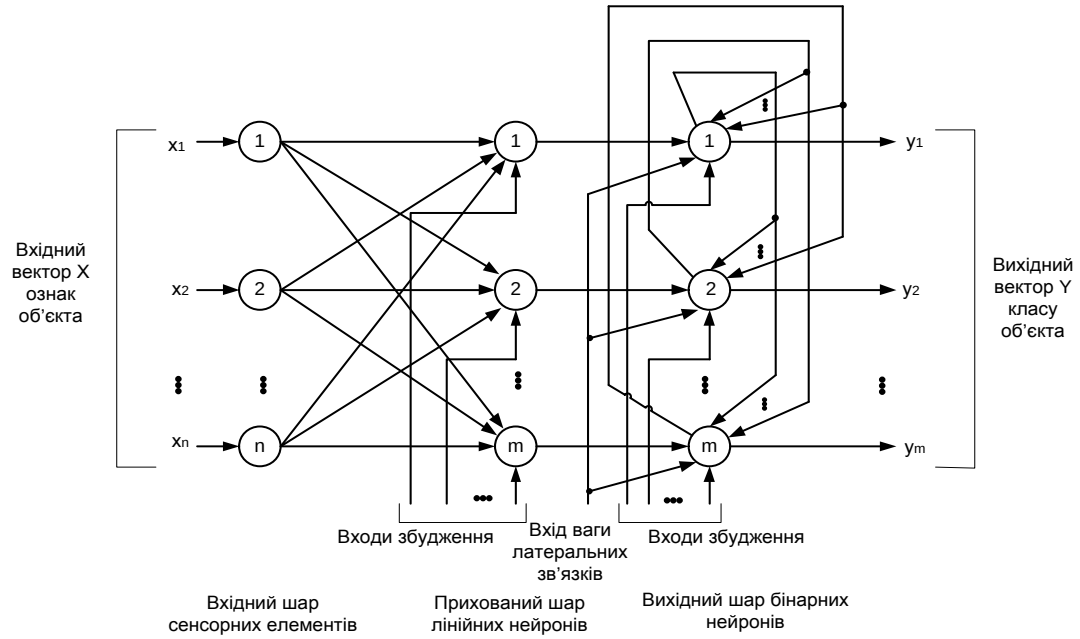

Рис. 4. Структурна схема класифікатора

Перший етап роботи класифікатора — це етап налаштування, на якому встановлюються значення ваг $w_{ij}^{(2)}$ зв'язків входів нейронів прихованого шару з виходами сенсорних елементів вхідного шару, тобто відбувається навчання класифікатора без вчителя [10], [11].

Другий етап — робочий, на якому відбувається основне функціонування класифікатора, при цьому на входи класифікатора подається n-елементний вхідний вектор X ознак з елементами x_j, де j =1,…, n. На виході i-го нейрона прихованого шару формується сума S_i зважених вхідних сигналів $x_1,\ldots, x_n$, тобто відповідна дискримінантна функція вигляду

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} w_{ij}^{(2)} x_j + b_i, \quad i = 1,\ldots, m, \tag{1}$$

де b_i — зовнішній сигнал збудження класифікатора.

Отримані значення дискримінантних функцій $S_1,\ldots, S_m$ (1) задають початкові стани бінарних нейронів вихідного шару. Після цього надходження сигналів S_i припиняється, а зі сформованого цими сигналами початкового стану запускається ітераційний процес всередині вихідного шару.

Нейрони вихідного шару зв'язані між собою латеральними зв'язками, які мають вагу $w_{il}^{(3)}$ вигляду

$$w_{il}^{(3)} = \begin{cases} 0, \text{ якщо } i = l, \\ -\varepsilon \le \dfrac{1}{m}, \text{ якщо } i \ne l, \end{cases} \tag{2}$$

де ε — значення ваги латеральних зв'язків.

Отже, кожний i-й бінарний нейрон вихідного шару з'єднаний від'ємним (гальмівним) латеральним зв'язком з додатковими виходами нейронів цього шару, крім себе самого. Функція активації $f^1(S_i)$ на додаткових виходах відповідних бінарних нейронів вихідного шару має вигляд

$$f^1(S_i) = \begin{cases} S_i, \text{ якщо } S_i > 0, \\ 0, \text{ якщо } S_i \le 0. \end{cases} \tag{3}$$

На початку процесу функціонування нейронів вихідного шару на їх виходах встановлюються одиничні значення за зовнішніми сигналами збудження.

Отже, бінарні нейрони вихідного шару функціонують в режимі WTA (Winner Takes All), в якому у фіксованій (кінцевій) ситуації активізується тільки один бінарний нейрон, а всі інші перебувають у стані спокою. Функція активації $f^2(S_i)$ на виходах відповідних бінарних нейронів вихідного шару задається виразом

$$f^2(S_i)=\begin{cases}1, & \text{якщо } S_i>0,\\ 0, & \text{якщо } S_i\le 0.\end{cases} \quad (4)$$

Ітераційний процес завершується у момент, коли всі нейрони вихідного шару, крім одного бінарного нейрона (переможця з вихідним сигналом, не рівним нулю), перейдуть в нульовий стан. Нейрон-переможець з ненульовим вихідним сигналом y_k є представником k-го класу, до якого належить вхідний вектор X.

Таким чином, на виході ненульового нейрона вихідного шару формується в класифікаторі відгук у вигляді одиничного сигналу y_k відповідно до виразу (4), що дає можливість візуалізувати результати діагностування за допомогою лінійки світлодіодів [17]. Свічення певного світлодіода дозволить швидко ідентифікувати отриманий результат на виході нейромережевого класифікатора [18].

Результати імітаційного моделювання нейромережевого класифікатора

Обчислювальний процес у наведеному нейромережевому класифікаторі та його прототипі — класифікаторі Хеммінга промодельовано [19] з використанням мови C#. Для конкретизації результатів моделювання використано приклад діагностування захворювань апендициту [6], в якому задіяно вісім закодованих симптомів (вхідних сигналів $x_1,\ldots, x_8$) і чотири діагнози захворювання (вихідних симптомів $y_1,\ldots, y_4$).

Вагові коефіцієнти прихованого шару лінійних нейронів як коефіцієнти дискримінантних функцій обчислено за даними ста трьох історій хвороби з трьома видами гострого апендициту і непідтвердженим діагнозом [6]. В результаті сформовано навчальну матрицю вагових коефіцієнтів з використанням ППП Statistica [6].

Результати імітаційного моделювання [19] показали, що обчислювальний процес для цього прикладу в середньому вдвічі швидший у порівнянні з відомим класифікатором Хеммінга. Це пов’язано, у першу чергу, з видаленням у кожного нейрона конкурентного (вихідного) шару латерального додатного зв’язку з самим собою.

В подальшому пропонується реалізація запропонованого нейромережевого класифікатора [16] на сучасній елементній базі. Зокрема, лінійка адаптивних суматорів [20], що виконують функції лінійних нейронів прихованого шару може бути реалізована на ПЛІС фірми Altera на мікросхемі сімейства FLEX 10K/KE [21]. Лінійку помножувачів перед лінійкою адаптивних суматорів прихованого шару можна реалізувати на ПЛІС, наприклад, у вигляді ієрархічного «дерева» багаторозрядних маштабуючих суматорів [21], зокрема, на мікросхемі EPF 10K70RC-2 фірми Altera. Лінійку нейронів вихідного шару, структура яких показана в [16], також планується реалізувати на ПЛІС.

Висновки

1. Аналіз методів та засобів біомедичного діагностування показав, що нейромережеві технології дозволяють реалізувати інтелектуальний аналіз даних, що, в свою чергу, дозволяє ефективно виконати інформаційний пошук, розпізнавання (класифікацію) об’єктів та візуалізацію результатів, зокрема для медичного діагностування.

2. Запропонований нейромережевий класифікатор на базі вдосконаленої мережі Хеммінга з формуванням дискримінантних функцій дозволяє виконати експрес-діагностику, використовуючи набір визначених симптомів із застосуванням сформованої в процесі навчання пам’яті ваг для конкретних захворювань (в цьому випадку матрицю ваг $W^{(2)}=\left\{w_{ij}^{(2)}\right\}$). В процесі спрацювання вихідного шару нейромережевого класифікатора з’являється одиничний сигнал y_k, який вказує на захворювання під k-м номером.

3. Особливістю запропонованого нейромережевого класифікатора є пришвидшення його обчислювального процесу через змінення латеральних зв’язків між нейронами вихідного шару, що виконує роль конкурентного нейромережевого шару. Крім того, формування бінарного вихідного

сигналу $Y = \{y_i\}$ у запропонованого нейромережевого класифікатора забезпечує можливість візуалізації результату діагностування із застосуванням лінійки світлодіодів.

4. Апаратна реалізація запропонованого нейромережевого класифікатора разом з програмною підтримкою дозволить значно прискорити процес діагностування за біомедичними даними з використанням нейромережевих систем експрес-діагностики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] О. З. Готра, В. Вуйцик і В. В. Григор'єв, *Експертні системи.* Львів, Україна: Ліга-Прес, 2006.

[2] *Медицинская диагностика*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://guruginka.ru/zdorov-ja/zdorovi poradi/14089-medichna-diagnostika-diagnostika-zdorov-ja-sistemi.html. Дата обращения: май. 20, 2019.

[3] П. Джексон, *Введение в экспертные системы.* Москва, Россия: Вильямс, 2001.

[4] *Методи класифікації інформації.* [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://helpstudenty.at.ua/publ/katalog_dlja_studenta/informacionnye_sistemy/metodi_klasifikaciji _informaciji/25-1-0-741. Дата звертання: Трав. 20, 2019.

[5] С. М. Злепко, О. Л. Лаугс, К. С. Навроцька і С. В. Тимчик, «Автоматизований медичний комплекс для оцінювання здоров'я студентів», *Патент України A61B 5/00. № 101608 МПК(2008)*, 25.09.2015.

[6] В. И. Юнкеров и С. Е. Григорьев, *Математико-статистическая обработка данных медицинских исследований.* СПб, Россия: ВМедА, 2002.

[7] *Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования в хирургии.* [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.medicum.nnov.ru/nmj/2003/1/26.php. Дата обращения: май, 24, 2019.

[8] *Алгоритм построения экспертных систем на нейронных сетях.* [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/pv2009_0102/pdf /001garkol.pdf. Дата обращения: май, 25, 2019.

[9] Р. М. Рангаян, *Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход.* Москва, Россия: ФИЗМАТЛИТ, 2007.

[10] С. Осовский, *Нейронные сети для обработки информации.* Москва, Россия: Финансы и статистика, 2002.

[11] Р. Каллан, *Основные концепции нейронных сетей*. Москва, Россия: Вильямс, 2003.

[12] *Использование нейроннных сетей*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.neuroproject.ru/articles_dak_nn.php. Дата обращения: май, 29, 2019.

[13] *Нейронный классификатор*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.chat.ru/~neurocomp.html. Дата обращения: Июнь, 3, 2019.

[14] *Нейронные сети в кардиологии*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.icm.ru/~masich/win/lexion/neyro/medicine.html. Дата обращения: Июнь. 3, 2019.

[15] Т. Б. Мартинюк, А. В. Медвідь і Л. М. Куперштейн, «Класифікатор», *Патент України G06G 7/00. № 76519 МПК(2008)*, 10.01.2013.

[16] Т. Б. Мартинюк, і Я. В. Запетрук, «Класифікатор» *Патент України G06G 7/00. №133874 МПК(2008)*, 25.04.2019.

[17] *Лінійка світлодіодів.* [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://arduino.ua/prod1624-poloska-s-8-rgb-svetodiodami . Дата звертання: Квіт. 15, 2018.

[18] Т. Б. Мартинюк, і Я. В. Запетрук, «Реалізаційні моделі базових вузлів нейромережевого класифікатора», на *Шостій міжнар. наук.-техн. конф. Оптоелектронні інформаційні технології «Фотоніка ОДС - 2018»*, Вінниця, 2018, с. 27.

[19] Т. Б. Мартинюк і А. В. Маслій, «Аналіз обчислювального процесу в нейромережевому класифікаторі», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 3 (Ф), с. 55-60, 2017.

[20] Т. Б. Мартинюк, А. Г. Буда, А. С. Біляєва, і Я. В.Запетрук, «Пристрій для моделювання нейрона,» *Патент України G06G 7/00. №12554 МПК(2008)*, 10.05.2018.

[21] В. Б. Стешенко, ПЛИС фирмы Altera: элементная база, система проектирования и языки описания аппаратуры. Москва, Россия: Издательский дом «Додэка-XXI», 2002.

Рекомендована кафедрою лазерної та оптикоелектронної техніки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 5.11.2019

Мартинюк Тетяна Борисівна — д-р техн. наук, професор, професор кафедри лазерної та оптикоелектронної техніки, e-mail: martyniuk.t.b@gmail.com ;

Запетрук Ярослав Вікторович — студент факультету автоматики та комп'ютерних систем управління, e-mail: fkca.o14zyav@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

T. B. Martyniuk[1]
Y. V. Zapetruk[1]

Neural Network Approach to Medical Express Diagnostics

[1]Vinnytsia National Technical University

Modern computerized medical diagnostics systems effectively solve complex and important problems in the field of medicine, including diagnosing diseases, monitoring patients, predicting treatment outcomes, supporting decision-making about diagnosing and treating patients. This is due to their ability to instantly analyze and summarize many factors in the process of diagnosing biomedical data. The use of neural network technologies in medical expert systems, in particular for express diagnostics, can significantly improve this process. Neural networks enable data mining, information retrieval, recognition (classification) of objects (symptoms) and visualization of the obtained results. In this work, the features of the neural network approach to medical express diagnostics are analyzed. The analysis of biomedical diagnostics methods and means showed the relevance and perspective of the use of neural network technologies. The neural network classifier based on the advanced Hamming network with the formation of discriminant functions is proposed. It allows to perform express diagnostics on a set of defined symptoms with the use of the generated in the learning the memory of weights for specific diseases. A single y_k signal indicates the disease at k-number when the output layer of the neural network classifier is triggered. Therefore, the formation of the binary output signal $Y = \{y_i\}$ in the proposed neural network classifier provides the ability to visualize the result of diagnosis with using of LEDs. The hardware implementation of the proposed neural network classifier, along with software support, will significantly speed up the process of diagnosing biomedical data using neural network express diagnostics systems.

Keywords: medical diagnostic, neural network, discriminant analysis.

Martyniuk Tetiana B. —Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Laser And Optoelectronic Technigue, e-mail:martyniuk.t.b@gmail.com ;
Zapetruk Yaroslav V. — Student of the Department of Automation and Computer Systems, e-mail: fkca.o14zyav@gmail.com

Т. Б. Мартинюк[1]
Я. В. Запетрук[1]

Нейросетевой подход к медицинской экспресс-диагностике

[1]Винницкий национальный технический университет

Современные компьютерные системы медицинской диагностики эффективно решают сложные и важные задачи в области медицины, в частности: диагностирование болезней, мониторинг состояния пациентов, прогнозирование результатов лечения, поддержку принятия решения при диагностировании и лечении больных. Это связано с их способностью мгновенно анализировать и обобщать множество факторов в процессе диагностирования биомедицинских данных. Использование нейросетевых технологий в составе медицинских экспертных систем, в частности для экспресс-диагностики позволяет значительно улучшить этот процесс. Нейросетевые технологии позволяют реализовать интеллектуальный анализ данных, выполнить информационный поиск, распознавание (классификацию) объектов (симптомов) и визуализацию полученных результатов. В работе выполнен анализ особенностей нейросетевого подхода к медицинской экспресс-диагностике. Анализ методов и средств биомедицинской диагностики показал актуальность и перспективность применения нейросетевых технологий. Предложен нейросетевой классификатор на базе усовершенствованной сети Хемминга с формированием дискриминантных функций. Это позволяет выполнить экспресс-диагностику на наборе определенных симптомов с применением сложившейся в процессе обучения памяти весов для конкретных заболеваний. В процессе срабатывания выходного слоя нейросетевого классификатора появляется единичный сигнал y_k, который указывает на заболевание под k-м номером. Следовательно, формирование бинарного выходного сигнала $Y = \{y_i\}$ в предложенном нейросетевом классификаторе обеспечивает возможность визуализации результата диагностики с использованием линейки светодиодов. Аппаратная реализация предложенного нейросетевого классификатора наряду с программной поддержкой позволит значительно ускорить процесс диагностики, используя биомедицинские данные и нейросетевые системы экспресс-диагностики.

Ключевые слова: медицинская диагностика, нейросеть, дискриминантный анализ.

Мартинюк Татьяна Борисовна — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры лазерной и оптико-электронной техники, e-mail: martyniuk.t.b@gmail.com;
Запетрук Ярослав Викторович — студент факультета автоматики и компьютерных систем управления, e-mail: fkca.o14zyav@gmail.com