

УДК 351.861

В.В. Тютюник<sup>1</sup>, М.В. Бондарев<sup>2</sup>, В.А. Андронов<sup>1</sup>, В.Д. Калугін<sup>1</sup><sup>1</sup> Національний університет цивільного захисту України, Харків<sup>2</sup> Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків

## НЕЙРОМЕРЕЖЕВЕ МОДЕЛЮВАННЯ УМОВ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ ЗА ОСНОВНИМИ ПОКАЗНИКАМИ ПОВСЯКДЕННОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА ПРОЯВУ ТЕХНОГЕННОЇ НЕБЕЗПЕКИ

Представлені результати моделювання, проведеного на базі нейромережових технологій, умов життєдіяльності природно-техногенно-соціальної системи (ПТС системи) України за основними показниками повсякденного функціонування та прояву техногенної небезпеки. Вихідними показниками цих моделей є: енергетичний рівень життєдіяльності; кількості виникнення надзвичайних ситуацій (НС) техногенного характеру, пожеж у техногенно-соціальному середовищі та дорожньо-транспортних пригод на території України; приналежність регіону до відповідного за енергетично-економічним рівнем життєдіяльності та прояву техногенної небезпеки кластеру.

**Ключові слова:** надзвичайна ситуація, пожежа, дорожньо-транспортна пригода, нейромережове моделювання, енергетичний рівень життєдіяльності, рівень техногенної небезпеки.

### Вступ

**Обґрунтування проблеми.** Сьогодні умови життєдіяльності ПТС системи вказують на необхідність розробки ефективних заходів попередження та ліквідації НС різної природи [1 – 4].

При розв'язанні проблеми формування системи комплексних заходів для запобігання НС різної природи на території України виникає необхідність дослідження енергетичних особливостей прояву взаємозв'язків між складовими процесів життєдіяльності ПТС системи у режимах повсякденного функціонування та надзвичайного стану. Режим повсякденного функціонування ПТС системи України визначається рівнем природно-техногенного енергетичного балансу:  $E^{ПТС} = E^П + E^Т$ , де  $E^П$  – енергія природного походження,  $E^Т$  – енергія техногенного походження. Техногенно-енергетичні умови повсякденного функціонування території України та прояву на ній техногенної небезпеки представлено на рис. 1, де енергія  $E^Т$  є сумою енергій різних видів палив ( $E^П$ ) і електричної енергії ( $E^Е$ ), які споживаються в Україні –  $E^Т = E^П + E^Е$  [5, 6].

**Аналіз останніх досліджень.** Першим кроком у даному напрямку дослідження є результат розробки у роботах [7 – 12] підходу до оцінки окремих рівнів пожежної, хімічної, екологічної небезпеки та небезпеки, яка виникає при територіальному розподілі складів боєприпасів і підприємств з їх утилізації, на території України на основі аналізу її інтегрального показника життєдіяльності – енергії техногенного походження, яка являється джерелом для усіх показників опису динаміки стану ПТС системи (рис. 1).

Наступним кроком при розробці наукових основ створення комплексної системи моніторингу,

попередження та ліквідації НС різного походження являється проведення сумарної оцінки рівня техногенної небезпеки території України за даними аналізу взаємозв'язків між основними показниками життєдіяльності регіонів шляхом використання основних багатовимірних статистичних методів аналізу – факторного, головних компонент, кластерного, дискримінантного, канонічного та дерев класифікації.

За результатами цього етапу розвідувального дослідження авторами вперше:

1) за допомогою факторного аналізу виявлені скриті (латентні) фактори, які відповідають за наявність лінійних статистичних взаємозв'язків між змінними, що спостерігаються та визначають умови повсякденного функціонування ПТС системи України та прояву техногенної небезпеки. При об'єднанні у кожному факторі змінних, які сильно корелюють між собою, встановлено ефект виділення показника споживання енергії техногенного походження змінної, що групує інші змінні за основними показниками життєдіяльності ПТС системи України у режимі повсякденного функціонування та в умовах прояву НС техногенного походження [13];

2) методом аналізу головних компонент, виконаного на основі матриць кореляції та коваріації, встановлено наявність жорсткого взаємозв'язку між групувальною змінною (енергією техногенного походження) і основними соціальними, економічними та техногенними показниками функціонування ПТС системи України [13];

3) на основі неієрархічного кластерного аналізу, методом k-середніх – оцінено ступінь кластеризації основних показників життєдіяльності ПТС системи України у режимі повсякденного функціонування та в умовах прояву НС техногенного походження. У результаті неієрархічної кластеризації виділено три хара-

ктерні для території України групи змінних, які характеризуються: високим рівнем кластеризації – чисельність наявного населення ( $N^{\text{Насел.}}$ ), кількість народжених ( $N^{\text{Н}}$ ), кількість померлих ( $N^{\text{П}}$ ); середнім рівнем кластеризації – енергія техногенного походження ( $E^{\text{T}}$ ), об’єм валового внутрішнього продукту ( $S^{\text{ВВП}}$ ), кількість суб’єктів Єдиного державного реєстру підприємств та організацій України ( $K_{\text{Суб'єкт.}}$ ), кількість потенційно небезпечних об’єктів (ПНО) –  $K_{\text{ПНО}}$ , об’єм викидів екологічно небезпечних речовин у атмосферу ( $Q_{\text{АТМ.}}$ ), кількість хворих на активний туберкульоз ( $N_{\text{Туберк.}}$ ), кількість пожеж і загорянь у техногенному середовищі ( $K^{\text{Пожеж.}}$ ); низьким рівнем кластеризації – площа території ( $S^{\text{Тер.}}$ ), об’єм використання пожежо- і вибухонебезпечних речовин ( $Q_{\text{ПВНР}}$ ), об’єм використання хімічно небезпечних речовин ( $Q_{\text{ХНР}}$ ), маса вибухової речовини, яка підлягає утилізації на військових об’єктах ( $M_{\text{ВР}}$ ), кількість безробітних ( $N_{\text{Безробіт.}}$ ), кількість НС техногенного характеру ( $K_{\text{НС}}^{\text{Тех.}}$ ), кількість дорожньо-транспортних пригод ( $K^{\text{ДТП}}$ );

4) на основі ієрархічного кластерного аналізу – проведено кластеризацію регіонів України за основними

змінними, які визначають умови повсякденного функціонування ПТС системи та прояву техногенної небезпеки. У результаті об’єднання в кожному кластері за методом Варда значень цих змінних за період 2002 – 2012 рр., встановлено ефект розділення території України на три кластери. Результат кластеризації представлено на рис. 1, де до I кластера (з високим енергетично-економічним рівнем життєдіяльності та прояву техногенної небезпеки) потрапили Дніпропетровська, Донецька та Київська області. II кластер (з середнім енергетично-економічним рівнем життєдіяльності та прояву техногенної небезпеки) об’єднав Запорізьку, Луганську, Львівську, Одеську, Харківську області та АР Крим. До III кластеру (з низьким енергетично-економічним рівнем життєдіяльності та прояву техногенної небезпеки) увійшла решта регіонів України;

5) методами дискримінантного та канонічного аналізів проведена оцінка результатів кластеризації території України й отримані математичні залежності для достовірної класифікації території України за групами основних показників повсякденного функціонування та прояву техногенної небезпеки;

6) за даними будови дерев класифікації передбачена приналежність регіонів держави до відповідного кластеру (класу) в залежності від значень основних показників енергетично-економічно-соціального рівня повсякденного функціонування та прояву техногенної небезпеки.



Рис. 1. Енергетичні умови повсякденного функціонування території України та прояву техногенної небезпеки

Отримані результати розвідувального аналізу являються фундаментальною основою для нейромережових технологій прогнозування умов повсякденного функціонування ПТС системи України та прояву техногенної небезпеки, з подальшою розробкою пропозицій

щодо будови ефективної територіальної системи моніторингу, попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру в Україні.

**Мета дослідження.** Загальною метою дослідження є розвиток уявлень про динаміку й енерге-

тику функціонування ПТС системи України з рознесеними у просторі та часі різного роду джерел небезпек і їх дестабілізуючого впливу на умови безпеки життєдіяльності, які визначають численну різноманітну інформаційну базу для розробки наукових основ створення ефективної територіальної комплексної системи моніторингу, попередження та ліквідації НС різного походження.

**Постановка задачі та її розв’язання**

Для досягнення поставленої мети у роботі проведено дослідження, які спрямовані на побудову прогностичної нейромережевої моделі для виявлення вкладів основних показників повсякденного функціонування у зміни як енергетичних умов нормального функціонування ПТС системи України, так і рівня техногенної небезпеки за кількістю виникнення НС техногенного характеру, пожеж та дорожньо-транспортних пригод.

Перевага штучних нейронних мереж (ШНМ) перед класичними методами статистичного аналізу даних полягає у можливості апроксимації за експериментальними даними будь-яких скільки завгодно складних нелінійних залежностей довільного та невідомого виду [14, 15].

Інша суттєва особливість нейронних мереж полягає у тому, що залежність між вхідними та вихідними даними знаходиться у процесі навчання мережі.

Штучна нейронна мережа складається з визначеної кількості «штучних нейронів». Нейрон має декілька каналів вводу інформації, так звані дендрити, та канал виводу інформації – аксон. Аксон нейрона поєднується з дендритами інших нейронів за допомогою синапсів.

На рис. 2 представлена графічна модель нейрона, де видно, що через декілька вхідних каналів  $j$ -й нейрон отримує сигнали  $x(i)$  від інших нейронів, кожен з яких множиться на  $w(j,i)$  – вагу синаптичного зв’язку між виходом  $i$ -го нейрона та входом  $j$ -го нейрона, позитивне значення якої відповідає збуджуючим синапсам, а негативне – гальмуючим синапсам. Значення  $w(j,i) = 0$  свідчить про відсутність зв’язку між  $i$ -м та  $j$ -м нейронами. Надалі виконується операція підсумовування у блоці «Суматор» перетворених вхідних сигналів і додається поріг збудження (активації)  $b(i)$ .

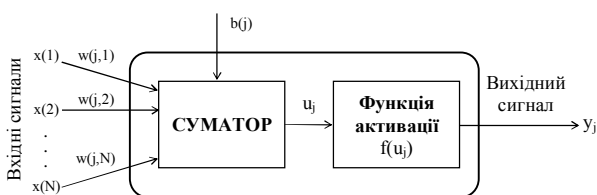


Рис. 2. Схема штучного нейрону

Стан нейрону описується таким виразом:

$$u_j = \sum_{i=1}^N w(j,i)x(i) + b(j), \quad (1)$$

де  $x(i)$  – вхідні сигнали,  $i=1, \dots, N$ . Індекс  $j$  відноситься до номеру нейрону, який розглядається у мережі, індекс  $i$  вказує на номер синаптичного зв’язку.

Отриманий нейроном сигнал перетворюється за допомогою нелінійної функції активації у вихідний сигнал  $y_j = f(u_j)$ .

Відповідно до мети дослідження розв’язання наукової задачі у роботі забезпечено шляхом будови двох ШНМ регресійних моделей повсякденного функціонування ПТС системи України, де вихідними являються: а) енергія техногенного походження  $E^T$ , яка забезпечує умови життєдіяльності ПТС системи та системи безпеки від різного роду небезпек – рис. 3, а; б) кількісні показники виникнення НС техногенного характеру  $K_{НС}^{Тех}$ , пожеж у техногенно-соціальному середовищі  $K^{Пожеж}$  та дорожньо-транспортних пригод  $K^{ДТП}$  – рис. 3, б.

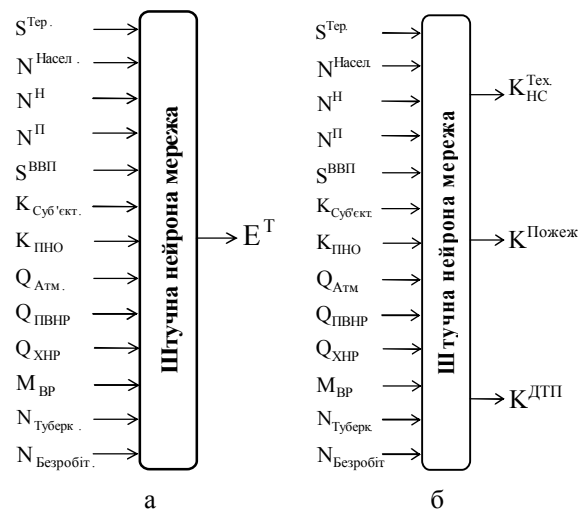


Рис. 3. Схема ШНМ моделей повсякденного функціонування ПТС системи України та прояву техногенної небезпеки: а – з вихідним показником рівня енергії техногенного походження; б – з вихідними показниками кількості виникнення НС техногенного характеру, пожеж у техногенно-соціальному середовищі та дорожньо-транспортних пригод

Будову моделі ШНМ та аналіз даних проведено з використанням статистичного пакету STATISTICA 6.1.

З початку у роботі було побудовано модель повсякденного функціонування ПТС системи України з вихідним показником рівня енергії техногенного походження та проведено аналіз впливу параметрів життєдіяльності на енергетичну ємність регіонів держави.

Так, для обґрунтування вибору функції активації нейронів, як деякої нелінійної функції, що моделює процес передачі збудження, було проведено аналіз наступних типів мереж – лінійна, радіальна базисна функція (РБФ) та багатосаровий перцептрон (БШП).

Лінійна модель реалізується мережею без проміжних шарів й у вихідному шарі має тільки елементи з лінійною функцією активації. Ваги відповідають елементам матриці, а пороги – компонентам вектора зміщення. Під час роботи ця мережа фактично перемножує вектор входів на матрицю ваг, а потім до отриманого вектора додається вектор зміщення. Тому, цей тип мереж при великій кількості вхідних змінних використовується лише для оцінки та перевірки гіпотези об ефектах.

Мережі РБФ мають ряд переваг перед лінійними мережами тому, що архітектура цих мереж має проміжні шари із радіальних елементів, кожен з яких відтворює гаусові поверхні відгуку. Оскільки ці функції нелінійні, то для моделювання довільної функції нема необхідності використовувати більше одного проміжного шару, тому у процесі моделювання необхідно лише взяти достатнє число радіальних елементів. Крім того, параметри лінійної комбінації у вихідному шарі можливо повністю оптимізувати за допомогою добре відомих методів лінійного моделювання. При цьому, процес оптимізації РБФ мережі потребує визначення кількості радіальних елементів, положення їх центрів і величини відхилень.

Частіше для вирішення задач моделювання та прогнозу використовують багатосаровий перцептрон, де кожен елемент мережі будує величину активації у вигляді виваженої суми входів з поправкою. Формування вихідного сигналу здійснюється шляхом проходження функції активації через передаточну функцію. Тому, у цьому типі мереж елементи організовані у плоску топологію з прямою передачею сигналу. Ця мережа інтерпретується як модель вхід-вихід, у якій ваги та порогові значення являються вільними параметрами. Тому, БШП мережі можуть моделювати функцію практично любого ступеню складності. Кількість шарів і кількість елементів у кожному шарі визначаються складністю функції. При цьому треба мати на увазі, що порівнюючи можливість БРФ і БШП мереж за адекватністю опису приведеної на рис. 1 нелінійної багатофакторної моделі повсякденного функціонування ПТС системи України та прояву техногенної небезпеки, ці мережі мають різні представлення просторого моделювання, а саме БРФ – це групова модель, БШП – плоскіна.

Виходячи з цього, БРФ алгоритми мають більшу, у порівнянні з алгоритмами навчання БШП мереж, швидкість роботи, але вони менше придатні для знаходження оптимальних рішень. Для досягнення високої адекватності БРФ мережею, з її більш ексцентричною поверхнею відклику, потрібно більшого, у порівнянні з БШП мережею, включення до

архітектури кількості елементів та використання великого об'єму пам'яті комп'ютера.

Крім того, з груповим підходом пов'язано невміння БРФ мереж екстраполювати вихідні результати за межі відомих даних – при віддаленні від області повчальних змінних значення функції відгуку швидко спадає до нуля. Навпаки, БШП мережі видають найбільш певніші рішення при обробці даних, які сильно відхиляються у разі віддаленні від області повчальних змінних.

Вище наведене явилось основою при обґрунтуванні БШП мереж для розробки представлених на рис. 3 регресійних моделей повсякденного функціонування ПТС системи України та прояву техногенної небезпеки.

При цьому, рішення про складність архітектури БШП базувалося на п'яти аналізах результатів навчання мереж, до складу яких випадково входило до п'ятсот нейромереж. Критерієм для вибору оптимальної мережі був баланс між похибкою регресії та складністю архітектури. Результати цього аналізу представлені у табл. 1, де в основі регресії лежить матриця із 17 вхідних змінних, які визначають умови повсякденного функціонування ПТС системи та прояву техногенної небезпеки.

Для навчання нейромереж всі спостереження (275 спостережень по території 25 регіонів України за період 2002 – 2012 рр. з кроком спостереження – один рік) було розділене на три вибірки. За умовчанням здійснювалося випадкове розділення спостережень між вибірками, щоб уникнути перенавчання мережі та для гарантування якісного узагальнення (прогнозування). Перша вибірка (Повчальна – 50% спостережень) використовувалася для навчання мережі; друга (Контрольна – 25% спостережень) – для крос-валідації алгоритму навчання під час його роботи; третя (Тестова – 25% спостережень) – для остаточного незалежного тестування навченої нейромережі. Навчання проведене із швидкістю  $\eta = 0,01$ .

Так, за першими п'ятьма рішеннями, які запропоновані «майстром рішень», були вибрані БШП мережі з контрольною продуктивністю навчання від 0,187 до 0,112 та контрольною похибкою від 0,028 до 0,023. Кількість запропонованих «майстром рішень» елементів у скритому шарі, за умов встановлених обмежень – від 1 до 100, спостерігалась від 27 до 45 елементів. При цьому, з урахуванням рангу значимості вхідних змінних «майстром рішень» пропонувалися мережі з різною кількістю входів – від 8 до 11.

Таким чином, представлені у табл. 1 мережі свідчать, що мережі БШП 11:11-27-1:1 і БШП 10:10-33-1:1 з кількістю у скритому шарі 27 та 33 елементів, характеризуються більш ефективним балансом між похибкою регресії та складністю архітектури для регресійного моделювання повсякденного функціонування ПТС системи України та прояву техногенної небезпеки за вихідним показником рівня енергії техногенного походження.

Таблиця 1

Статистичні характеристики трьохшарових перцептронів, які запропоновані «майстром рішень» як найкращі для регресійного нейромережевого аналізу умов повсякденного функціонування ПТС системи України та прояву техногенної небезпеки з вихідним показником рівня енергії техногенного походження – рис. 3, а

№ ріш.	Архітектура	Продуктивність навчання	Контрольна продуктивність	Тестова продуктивність	Похибка навчання	Контрольна похибка	Тестова похибка	Навчання *
1.	БШП 11:11-27-1:1	0,134078	0,112501	0,385490	0,024393	0,022528	0,064495	ЗП100, ЗГ20 ЗГ73b
2.	БШП 10:10-33-1:1	0,138592	0,111724	0,123591	0,022227	0,023421	0,024210	ЗП100, ЗГ20ЗГ96b
3.	БШП 9:9-35-1:1	0,125087	0,187461	0,163458	0,023815	0,026158	0,032944	ЗП100, ЗГ20, ЗГ141b
4.	БШП 8:8-35-1:1	0,132559	0,158554	0,426990	0,028194	0,023227	0,046371	ЗР100, ЗГ20, ЗГ90b
5.	БШП 9:9-45-1:1	0,260950	0,138785	0,222695	0,040796	0,028396	0,043578	ЗР100, ЗГ20, ЗГ38b

\* Примітка. Коди, які були використані для оптимізації мереж: ЗП – зворотне поширення; ЗГ – метод зв'язаних градієнтів; b – код зупинки (мережа з найменшою помилкою на контрольній вибірці) [15]. Код ЗГ73b показує, що для оптимізації мережі використаний метод зв'язаних градієнтів і що мережа знайдена на 73 епосі за мінімальною помилкою на валідаційній вибірці.

Це явилось основою для подальшого конструювання трьохшарової БШП мережі з 30 елементами у скритому шарі для розробки ШНМ моделі повсякденного функціонування ПТС системи України та прояву техногенної небезпеки за вихідним показником  $E^T$ . Результати будови перцептронів, який має тринадцять входів (рис. 3, а), 30 елементів у скритому шарі та лінійні вихідні функції, представлено на рис. 4.

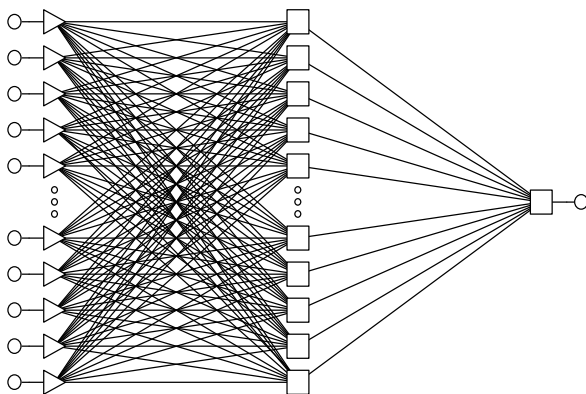


Рис. 4. Архітектура трьохшарового перцептронів БШП 13:13-30-1:1 з прямою передачею сигналу для прогнозування величин споживання територією України енергії техногенного походження за основними показниками повсякденного функціонування

Коригування мережі (пошук відповідних значень для вагів синаптичних зв'язків і порогів активації мережі з метою мінімізації помилки прогнозу) було проведено за допомогою алгоритмів швидкого розповсюдження (100 епох на першому етапі) та Левенберга-Маркара (500 епох на другому етапі), які вважаються одними з найкращих алгоритмів нелінійної оптимізації [15].

Алгоритм швидкого поширення є евристичною модифікацією алгоритму зворотного поширення, де для прискорення збіжності застосовується проста квадратична модель поверхні помилок, які обчислюються для кожної ваги синаптичного зв'язку.

Алгоритм Левенберга-Маркара застосовується лише для відносно невеликих мереж з одним виходом, що у найбільшій мірі відповідає умовам задачі, яка представлена на рис. 3, а. У якості критерію оптимізації у цьому методі використовується середньоквадратична помилка моделі на повчальній вибірці. Алгоритм полягає в послідовному наближенні заданих початкових значень параметрів до шуканого локального оптимуму. Так, у якості функції активації на проміжному шарі у цій моделі використана функція гіперболічного тангенса ( $\tanh$ ), сигмоїдальна нелінійність якої визначається як:

$$\tanh(u) = \frac{\exp(au) - \exp(-au)}{\exp(au) + \exp(-au)}, \quad a > 0. \quad (2)$$

На першій епосі алгоритм швидкого поширення корегував ваги синаптичних зв'язків за формулою узагальненого дельти-правила:

$$\Delta w_{ji}(n) = \eta \delta_j o_i + \alpha \Delta w_{ji}(n-1), \quad (3)$$

де  $n$  – номер прикладу навчання;  $\eta$  – швидкість навчання, яке використовується при переході від одного шагу процесу до іншого (було вибрано на рівні  $\eta = 0,01$ );  $\delta_j$  – локальний градієнт помилки;  $\alpha$  – коефіцієнт інерції, який, як правило, має позитивне значення (у даному випадку вибрано на рівні  $\alpha = 0,3$ );  $o_i$  – вихідне значення  $i$ -го нейрону.

На подальших епохах алгоритм використовував припущення про квадратичність поверхні помилок для швидшого просування до точки мінімуму. Зміни вагів обчислювалися за формулою швидкого поширення:

$$\Delta w_{ji}(n) = \frac{y_j(n)}{y_j(n-1) - y_j(n)} \Delta w_{ji}(n-1), \quad (4)$$

де  $y_j(n)$  та  $y_j(n-1)$  – вихідні значення мережі, які відповідають  $n$  та  $n-1$  прикладам навчання.

Корекція вагів методом Левенберга-Маркара проводилася як:

$$\Delta w_{ji}(n) = -\left(Z^T Z + \lambda I\right)^{-1} Z^T \epsilon, \quad (5)$$

де  $\varepsilon$  – вектор помилок для всіх спостережень;  $Z$  – матриця-якобіан, що містить перші частинні похідні помилок нейронної мережі за змінними вагів і зсувів вагів синаптичних зв'язків;  $Z^T$  – транспонована матриця;  $\lambda$  – параметр алгоритму, який визначається у процесі лінійної (скалярної) оптимізації уздовж вибраного напрямку. Перший член у формулі Левенберга-Маркара відповідає лінійній моделі, а другий – градієнтному спуску. Параметр  $I$ , що управляє процесом корекції, задає відносну значимість цих двох вкладів.

Результат навчання нейронної мережі представлено у табл. 2, де навчений за даними 275 спостережень основних параметрів повсякденного функціонування 25 регіонів України за період 2002 – 2012 рр. [3, 4, 7 – 13] трьохшаровий перцептрон, який має тринадцять входів, тридцять елементів у скритому

шарі та один вихід за показником  $E^T$ , характеризується відносно високими показниками контрольної продуктивності (на рівні 0,141) та контрольної похибки (на рівні 0,029). Корекція вагів у цій мережі відбулась за методом Левенберга-Маркара на 490 епосі другого етапу процесу оптимізації за мінімальною помилкою на валідаційній вибірці.

Поверхні відгуку, які показують вплив зміни двох вхідних (незалежних) змінних на прогноз вихідний змінної, отриманої мережі БШП 13:13-30-1:1 від декількох основних показників життєдіяльності ПТС системи України представлені на рис. 5. Ці графічні залежності підтверджують наявність різного роду нелінійних взаємозв'язків між цими показниками та їх нелінійний вклад в енергетичний стан функціонування держави.

Таблиця 2

Результат навчання мережі БШП 13:13-30-1:1 для прогнозування величин споживання територією України енергії техногенного походження за основними показниками повсякденного функціонування

Архітектура	Продуктивність навчання	Контрольна продуктивність	Тестова продуктивність	Похибка навчання	Контрольна похибка	Тестова похибка	Навчання*
БШП 13:13-30-1:1	0,020191	0,141025	0,156716	0,003333	0,029136	0,033349	ШР100, ЛМ490б

\* Примітка. Коди, які були використані для оптимізації мереж: ШР – алгоритм швидкого розповсюдження; ЛМ – алгоритм Левенберга-Маркара.

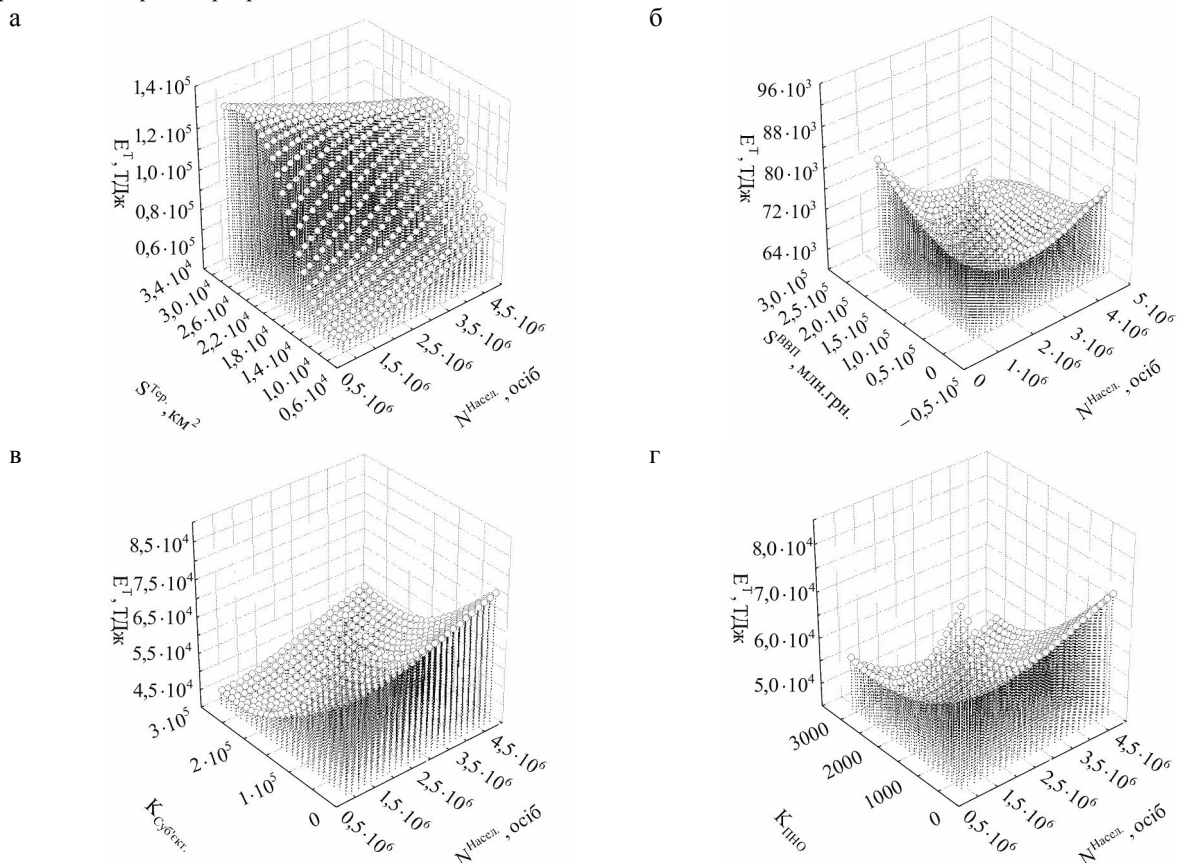


Рис. 5. Приклади поверхонь відгуку мережею БШП 13:13-30-1:1 за енергією техногенного походження від основних показників повсякденного функціонування: а – чисельності наявного населення та площі території; б – чисельності наявного населення та об'єму валового внутрішнього продукту; в – чисельності наявного населення та кількості суб'єктів Єдиного державного реєстру підприємств та організацій України; г – чисельності наявного населення та кількості потенційно небезпечних об'єктів

Таким чином, результати лінійного об'єднання (див. рис. 4) поверхонь відгуку за тринадцятьма входними параметрами (деякі приклади поверхонь представлено на рис. 5) дозволили отримати прогностичну модель впливу основних показників життєдіяльності

на енергетичний рівень функціонування ПТС системи у вигляді нейронної мережі БШП 13:13-30-1:1, результати навчання якої представлено у табл. 2. Роботу цієї мережі продемонстровано на прикладі Харківського регіону. Результати прогнозу представлені у табл. 3.

Таблиця 3

Результат прогнозування мережею БШП 13:13-30-1:1 величин споживання Харківським регіоном енергії техногенного походження за основними показниками повсякденного функціонування

Параметри		Середні значення змінних за 2002 – 2012 рр.	Прогноз 1	Прогноз 2	Прогноз 3
Вхідні	$S^{Тер.}$	31420 км. кв.	31420 км. кв.	31420 км. кв.	31420 км. кв.
	$N^{Насел.}$	2821239 осіб	<b>3821239</b> осіб	2821239 осіб	<b>3821239</b> осіб
	$N^H$	25060 осіб	25060 осіб	25060 осіб	25060 осіб
	$N^П$	43689 осіб	43689 осіб	43689 осіб	43689 осіб
	$S^{ВВП}$	44972 млн. грн.	44972 млн. грн.	44972 млн. грн.	44972 млн. грн.
	$K^{Суб'ект.}$	68478 суб'єктів	68478 суб'єктів	68478 суб'єктів	<b>58478</b> суб'єктів
	$K^{ПНО}$	2519 об'єктів	2519 об'єктів	<b>3519</b> об'єктів	<b>3519</b> об'єктів
	$Q^{ПВНР}$	318,5 тис. т	318,5 тис. т	318,5 тис. т	318,5 тис. т
	$Q^{ХНР}$	20,3 тис. т	20,3 тис. т	20,3 тис. т	20,3 тис. т
	$Q^{Атм.}$	158,2 тис. т	158,2 тис. т	158,2 тис. т	158,2 тис. т
	$M^{ВР}$	18020,4 тис. т	18020,4 тис. т	18020,4 тис. т	18020,4 тис. т
	$N^{Туберк.}$	2135 особи	2135 особи	2135 особи	2135 особи
	$N^{Безробіт.}$	41,0 тис. осіб	41,0 тис. осіб	41,0 тис. осіб	41,0 тис. осіб
<b>Вихідний <math>E^T</math></b>		<b>855,8 ТДж (946,8 ТДж)*</b>	<b>948,3 ТДж</b>	<b>3587,5 ТДж</b>	<b>2272,1 ТДж</b>

\* Примітка. Розраховане за даними 2002 – 2012 рр. середнє значення величини енергії техногенного походження, яка оберталась у процесі повсякденного функціонування регіону.

Так, перевірка адекватності прогностичної працездатності мережі БШП 13:13-30-1:1 базувалась на подачі на її вході середніх за 2002 – 2012 рр. значень всіх тринадцяти параметрів повсякденного функціонування Харківського регіону. Це дозволило прогнозувати енергетичний рівень життєдіяльності регіону як  $E^T = 855,8$  ТДж, що на  $\approx 10\%$  менше від розрахованого за статистичними даними середнього рівня енергії техногенного походження та відповідає ступеню кореляції між значеннями енергії техногенного походження, що спостерігаються ( $E^{T*}$ ) за статистичними даними та прогножуються ( $E^T$ ) мережею –  $r_{E^T*E^T}^2 \approx 0,993$ , а також адекватності прогнозу, представленому на рис. 6.

Зміни деяких параметрів на вході отриманої нейронної мережі дозволили констатувати, що:

– збільшення чисельності населення регіону на один мільйон чоловік (прогноз 1, табл. 3) дозволяє прогнозувати адекватну на наш погляд потребу у збільшенні енергетичного рівня регіону до  $E^T = 948,3$  ТДж;

– значного збільшення енергетичного рівня життєдіяльності (до  $E^T = 3587,5$  ТДж) потребує регі-

он у разі збільшення на 1000 об'єктів кількості потенційно небезпечних об'єктів – прогноз 2 у табл. 3;

– у разі одночасної варіації декількох параметрів життєдіяльності, ці параметри характеризуються різними рівнями вкладу на результат прогнозу енергетичного рівня життєдіяльності регіону. Так, збільшення чисельності населення на один мільйон чоловік, збільшення на 1000 об'єктів ПНО і зменшення на 10000 суб'єктів Єдиного державного реєстру підприємств та організацій України дозволяє прогнозувати енергетичний показник регіону на рівні  $E^T = 2272,1$  ТДж (прогноз 3, табл. 3), що практично на  $\approx 1500$  ТДж менше ніж результати прогнозу енергетичного рівня життєдіяльності регіону за умов збільшення одного лише показнику  $K^{ПНО}$ .

Таким чином, отримані у межах енергетичного підходу, що пропонується авторами у [5, 6], нейрона мережа БШП 13:13-30-1:1 та результати її прогнозу дозволяють констатувати перспективність та адекватність, у відповідності з рис. 6, представленої на рис. 3, а моделі для аналізу рівня енергетичної безпеки держави та окремих її регіонів.\

Надалі у роботі побудовано модель повсякденного функціонування ПТС системи України з вихідними показниками кількості виникнення НС техно-

генного характеру, пожеж у техногенно-соціальному середовищі та дорожньо-транспортних пригод (рис. 3, б) та проведено аналіз впливу параметрів життєдіяльності на умови безпеки функціонування регіонів держави.

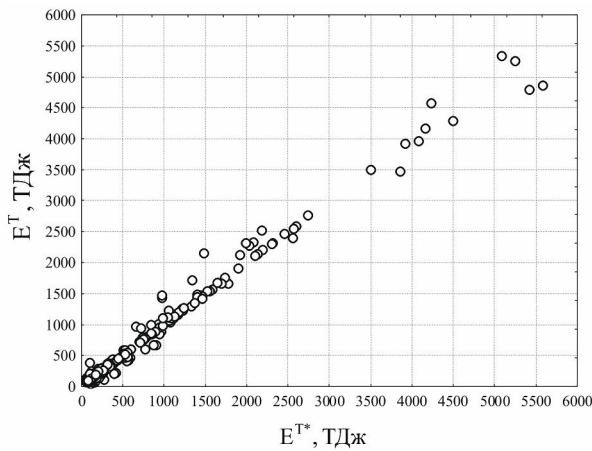


Рис. 6. Графік залежності між значеннями енергії техногенного походження, що спостерігаються ( $E^{T*}$ ) за статистичними даними та прогнозуються ( $E^T$ ) мережею БШП 13:13-30-1:1

Підхід до прийняття рішення про складність архітектури БШП був аналогічним до підходу, який було використано при будові першої моделі, та оснований на п'ятьох аналізах результатів навчання мереж, до складу яких випадково входило п'ятсот нейроммереж. Результати цього аналізу представлені у табл. 4.

Так, за першими п'ятьма рішеннями, які запропоновані «майстром рішень», були вибрані БШП мережі з контрольною продуктивністю навчання від 0,738 до 0,528 та контрольною похибкою від 0,090 до 0,051.

Кількість запропонованих «майстром рішень» елементів у скритому шарі, за умов встановлених обмежень – від 1 до 150, спостерігалась від 32 до 147 елементів. При цьому, з урахуванням рангу значимості вхідних змінних «майстром рішень» пропонувалися мережі з різною кількістю входів – від 9 до 13.

Таким чином, представлені у табл. 4 мережі свідчать, що за умов використання 13 входів мережі БШП 13:13-141-3:3, БШП 13:13-146-3:3 і БШП 13:13-147-3:3 з кількістю у скритому шарі 141, 146 та 147 елементів, характеризуються більш ефективним балансом між похибкою регресії та складністю архітектури для регресійного моделювання повсякденного функціонування ПТС системи України та прояву техногенної небезпеки за вихідними показниками кількості виникнення НС техногенного характеру, пожеж у техногенно-соціальному середовищі та дорожньо-транспортних пригод.

Це явилось основою для подальшого конструювання трьохшарової БШП мережі з 145 елементами у скритому шарі для розробки ШНМ моделі повсякденного функціонування ПТС системи України та прояву техногенної небезпеки за вихідними показниками  $K_{НС}^{Тех.}$ ,  $K_{Пожеж.}$  і  $K_{ДТП}$ . Результати будови персептрону, який має тринадцять входів (рис. 3, б), 145 елементів у скритому шарі та три логічні вихідні функції, представлено на рис. 7.

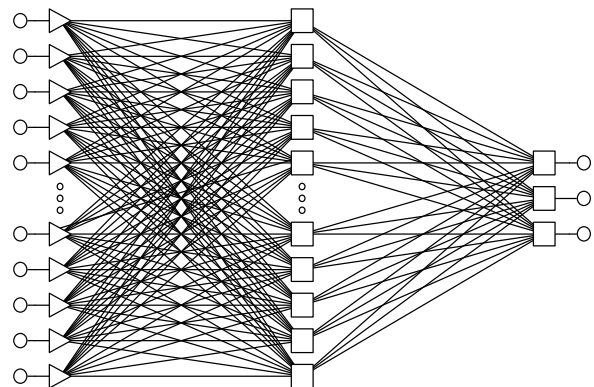


Рис. 7. Архітектура трьохшарового персептрона БШП 13:13-145-3:3 з логічною передачею сигналів для прогнозування кількості виникнення НС техногенного характеру, пожеж у техногенно-соціальному середовищі та дорожньо-транспортних пригод на території України від основних показників повсякденного функціонування ПТС системи

Таблиця 4

Статистичні характеристики трьохшарових персептронів, які запропоновані «майстром рішень» як найкращі мережі для регресійного аналізу умов повсякденного функціонування ПТС системи України та прояву техногенної небезпеки з вихідними показниками кількості виникнення НС техногенного характеру, пожеж у техногенно-соціальному середовищі та дорожньо-транспортних пригод – рис. 3, б

№ ріш.	Архітектура	Продуктивність навчання	Контрольна продуктивність	Тестова продуктивність	Похибка навчання	Контрольна похибка	Тестова похибка	Навчання
1.	БШП 13:13-146-3:3	0,500226	0,527728	0,767525	0,064184	0,089756	0,068800	ЗР100, ЗГ20, ЗГ27б
2.	БШП 13:13-147-3:3	0,414760	0,736844	0,737519	0,039999	0,062560	0,070330	ЗР100, ЗГ20, ЗГ75б
3.	БШП 13:13-141-3:3	0,477678	0,682722	0,829070	0,041950	0,061256	0,049526	ЗР100, ЗГ20, ЗГ0б
4.	БШП 11:11-120-3:3	0,494496	0,737537	0,590336	0,043814	0,050993	0,052996	ЗР100, ЗГ20, ЗГ57б
5.	БШП 9:9-32-3:3	0,447167	0,664174	0,662505	0,046595	0,176167	0,185510	ЗР100, ЗГ20, ЗГ80б

Використання у даному випадку логічних функцій активації, з параметрами масштабування, осно-

увалося на заданій долі розмаху логічної функції рівної 0,9, що відповідає [0,05; 0,95] діапазону на-



вчання нейронної мережі. Це дозволяє проводити незначну екстраполяцію даних. Крім того, використання логічних функцій стабілізує навчання.

Результат навчання нейронної мережі представлено у табл. 5, де навчений за аналогічними першої моделі даними 275 спостережень основних параметрів повсякденного функціонування 25 регіонів України за період 2002 – 2012 рр. трьохшаровий персептрон, який має тринадцять входів, сто сорок п'ять елементів у скритому шарі та трьома виходами за показниками  $K_{НС}^{Тех.}$ ,  $K_{Пожеж.}$  і  $K_{ДТП}$ , характеризується показником контрольної продуктивності на рівні 0,721 та контрольної похибки на рівні 0,086. Для оптимізації мережі використані методи зворотного поширення (100 епох на першому етапі) та зв'язаних градієнтів (500 епох на другому етапі) [14, 15].

Метод зв'язаних градієнтів рекомендовано застосовувати для мереж з декількома вихідними елементами, що відповідає умовам повсякденного функціонування ПТС системи України та прояву техногенної небезпеки, які представлені на рис. 3, б.

Цей метод базується на розрахунку усереднених градієнтів поверхні помилок по всій навчальній вибірці. Ваги синаптичних зв'язків корегуються один раз у кінці кожної епохи. Навчальний напрямок пошуку  $d_0$  задається як:

$$d_0 = -g_0, \tag{6}$$

де  $g_0$  – градієнт у початковій точці.

На наступному кроці напрямок пошуку  $d_{j+1}$  корегується за допомогою формули Полака-Риб'єра [14]:

$$d_{j+1} = -g_{j+1} + \beta_j d_j, \tag{7}$$

де  $\beta_j = \frac{g_{j+1}^T (g_{j+1} - g_j)}{g_j^T g_j}$  – множник масштабування.

Якщо за даним напрямком похибка не зменшується, то алгоритм вибирає інший напрямок спуску.

Так, у результаті навчання, оптимальну БШП 13:13-145-3:3 мережу (табл. 5) знайдено на другому етапі за умов використання методу зв'язаних градієнтів на 206 епосі за мінімальною помилкою на валідаційній вибірці.

Поверхні відгуку навченої мережі БШП 13:13-145-3:3 від декількох основних показників життєдіяльності ПТС системи України представлені на

рис. 8, які підтверджують наявність різного роду нелінійних взаємозв'язків між показниками повсякденного функціонування ПТС системи України та прояву техногенної небезпеки за кількістю виникнення НС техногенного характеру, пожеж у техногенно-соціальному середовищі та дорожньо-транспортних пригод.

Таким чином, результати логічного об'єднання (див. рис. 7) поверхонь відгуку за тринадцятьма вхідними параметрами (деякі приклади поверхонь представлено на рис. 8) дозволили отримати прогностичну модель впливу основних показників життєдіяльності на рівень техногенної небезпеки ПТС системи у вигляді нейронної мережі БШП 13:13-145-3:3, результати навчання якої представлено у табл. 5.

Роботу цієї мережі продемонстровано на прикладі Харківського регіону. Результати прогнозу представлені у табл. 6.

Перевірка адекватної прогностичної працездатності мережі БШП 13:13-145-3:3 базувалась на подачі на її входи середніх за 2002 – 2012 рр. значень тринадцяти параметрів повсякденного функціонування Харківського регіону. Це дозволило прогнозувати рівень техногенної небезпеки регіону як  $K_{НС}^{Тех.} = 8$ ;  $K_{Пожеж.} = 3244$  та  $K_{ДТП} = 2231$ , що відповідає ступеням кореляції між кількостями виникнення НС техногенного характеру, пожеж у техногенно-соціальному середовищі та дорожньо-транспортних пригод, що спостерігаються ( $K_{НС}^{Тех.*}$ ,  $K_{Пожеж.*}$ ,  $K_{ДТП*}$ ) за статистичними даними та прогнозуються ( $K_{НС}^{Тех.}$ ,  $K_{Пожеж.}$ ,  $K_{ДТП}$ ) нейронною мережею –  $r_{K_{НС}^{Тех.*} K_{НС}^{Тех.}}^2 \approx 0,833$ ;  $r_{K_{Пожеж.*} K_{Пожеж.}}^2 \approx 0,956$ ;  $r_{K_{ДТП*} K_{ДТП}}^2 \approx 0,729$ , а також адекватності прогнозу, представленою на рис. 9.

Зміни деяких параметрів на вході отриманої нейронної мережі дозволили констатувати, що:

збільшення чисельності населення регіону на один мільйон чоловік (прогноз 1, табл. 6) дозволяє прогнозувати збільшення рівня техногенного навантаження на регіон до  $K_{НС}^{Тех.} = 18$  і  $K_{Пожеж.} = 4819$ ;

Таблиця 5

Результат навчання мережі БШП 13:13-145-3:3 для прогнозування кількості виникнення НС техногенного характеру, пожеж у техногенно-соціальному середовищі та дорожньо-транспортних пригод на території України за основними показниками повсякденного функціонування ПТС системи

Архітектура	Продуктивність навчання	Контрольна продуктивність	Тестова продуктивність	Похибка навчання	Контрольна похибка	Тестова похибка	Навчання
БШП 13:13-145-3:3	0,393187	0,711277	0,604224	0,047943	0,236434	0,242723	OP100,CG206b

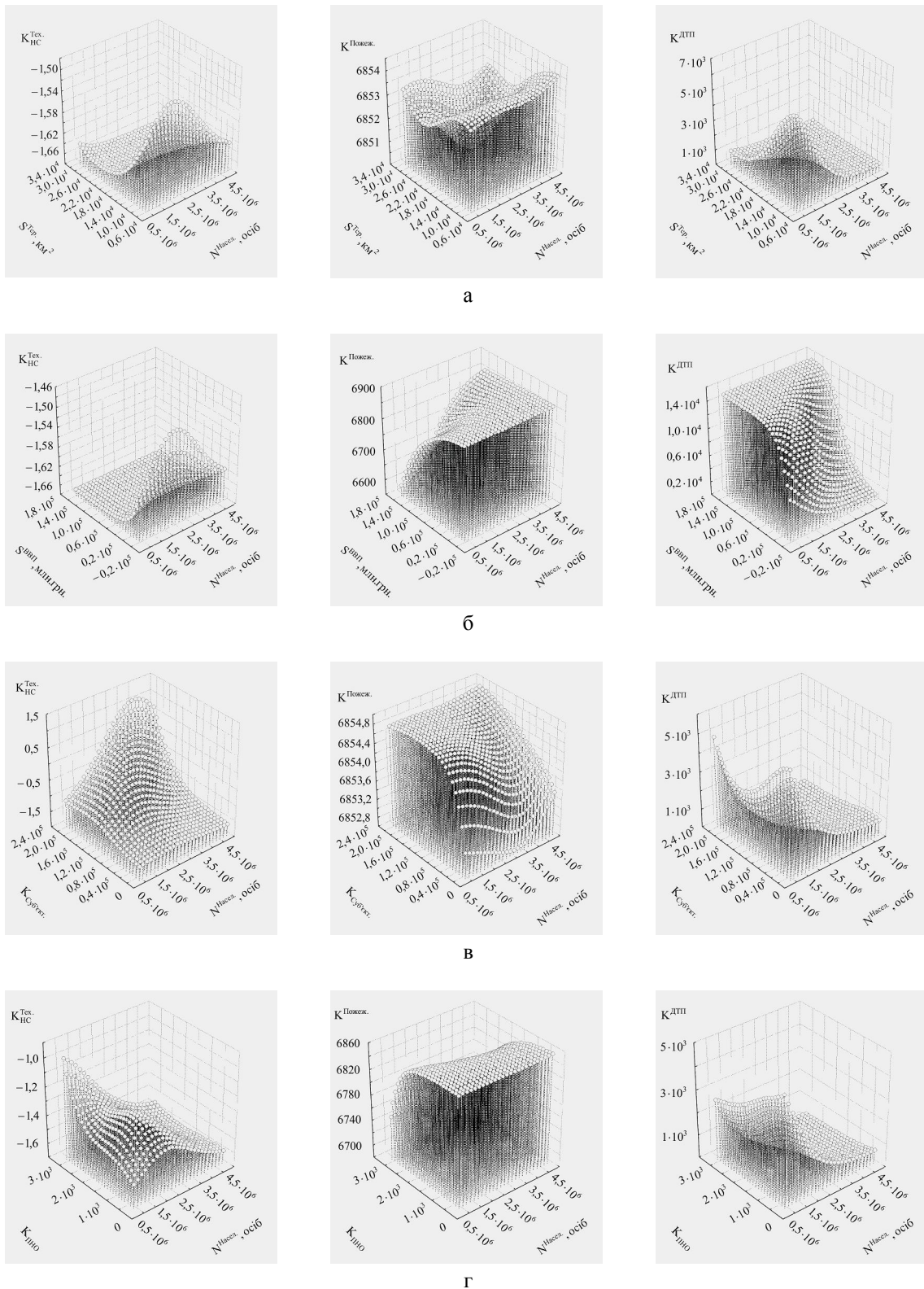


Рис. 8. Приклади поверхонь відгуку мережею БШП 13:13-145-3:3 за рівнем техногенної небезпеки від основних показників повсякденного функціонування:  
 а – чисельності наявного населення та площі території;  
 б – чисельності наявного населення та об'єму валового внутрішнього продукту;  
 в – чисельності наявного населення та кількості суб'єктів Єдиного державного реєстру підприємств та організацій України;  
 г – чисельності наявного населення та кількості потенційно небезпечних об'єктів

Результат прогнозування мережею БШП 13:13-145-3:3 рівня техногенної небезпеки Харківського регіону за основними показниками повсякденного функціонування

Параметри		Середні значення змінних за 2002 – 2012 рр.	Прогноз 1	Прогноз 2	Прогноз 3
Вхідні	$S_{\text{Тер.}}$	31420 км. кв.	31420 км. кв.	31420 км. кв.	31420 км. кв.
	$N_{\text{Насел.}}$	2821239 осіб	<b>3821239</b> осіб	2821239 осіб	<b>3821239</b> осіб
	$N_{\text{Н}}$	25060 осіб	25060 осіб	25060 осіб	25060 осіб
	$N_{\text{П}}$	43689 осіб	43689 осіб	43689 осіб	43689 осіб
	$S_{\text{ВВП}}$	44972 млн. грн.	44972 млн. грн.	44972 млн. грн.	44972 млн. грн.
	$K_{\text{Суб'єкт.}}$	68478 суб'єктів	68478 суб'єктів	68478 суб'єктів	<b>58478</b> суб'єктів
	$K_{\text{ПНО}}$	2519 об'єктів	2519 об'єктів	<b>3519</b> об'єктів	<b>3519</b> об'єктів
	$Q_{\text{ПВНР}}$	318,5 тис. т	318,5 тис. т	318,5 тис. т	318,5 тис. т
	$Q_{\text{ХНР}}$	20,3 тис. т	20,3 тис. т	20,3 тис. т	20,3 тис. т
	$Q_{\text{АТМ.}}$	158,2 тис. т	158,2 тис. т	158,2 тис. т	158,2 тис. т
	$M_{\text{ВР}}$	18020,4 тис. т	18020,4 тис. т	18020,4 тис. т	18020,4 тис. т
	$N_{\text{Туберк.}}$	2135 особи	2135 особи	2135 особи	2135 особи
	$N_{\text{Безробіт.}}$	41,0 тис. осіб	41,0 тис. осіб	41,0 тис. осіб	41,0 тис. осіб
Вихідні	$K_{\text{НС}}^{\text{Тех.}}$	<b>8 (9)*</b>	<b>18</b>	<b>12</b>	<b>25</b>
	$K_{\text{Пожеж.}}$	<b>3244 (3395)*</b>	<b>4819</b>	<b>2734</b>	<b>4091</b>
	$K_{\text{ДТП}}$	<b>2231 (4735)*</b>	<b>820</b>	<b>1237</b>	<b>535</b>

\* Примітка. Розрахункові за даними 2002 – 2012 рр. середні значення показників техногенної небезпеки регіону.

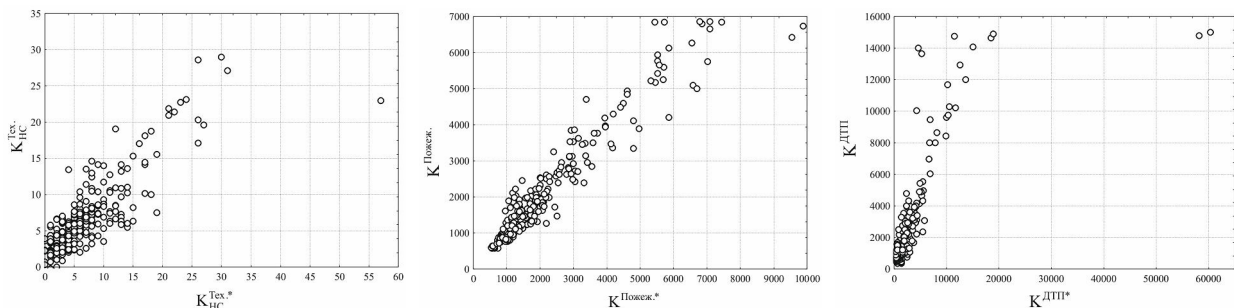


Рис. 9. Графіки залежностей між кількостями виникнення НС техногенного характеру, пожеж у техногенно-соціальному середовищі та дорожньо-транспортних пригод, що спостерігаються ( $K_{\text{НС}}^{\text{Тех.}*}$ ,  $K_{\text{Пожеж.}*}$ ,  $K_{\text{ДТП}*}$ ) за статистичними даними та прогнозуються ( $K_{\text{НС}}^{\text{Тех.}}$ ,  $K_{\text{Пожеж.}}$ ,  $K_{\text{ДТП}}$ ) мережею БШП 13:13-145-3:3

– значним збільшенням рівня техногенної небезпеки (до  $K_{\text{НС}}^{\text{Тех.}} = 12$ ) характеризується регіон у разі збільшення на 1000 об'єктів ПНО – прогноз 2 у табл. 6;

– у разі одночасної варіації декількох параметрів життєдіяльності, ці параметри характеризуються різними рівнями вкладу на результат прогнозу рівня техногенної небезпеки регіону. Так, збільшення чисельності населення на один мільйон чоловік, збільшення на 1000 об'єктів ПНО і зменшення на 10000 суб'єктів Єдиного державного реєстру підп-

риємств та організацій України дозволяє прогнозувати показники техногенного навантаження регіону на рівні  $K_{\text{НС}}^{\text{Тех.}} = 25$  і  $K_{\text{Пожеж.}} = 4091$  (прогноз 3, табл. 6), що практично у два рази більше ніж результати прогнозу за умов збільшення одного лише показника  $K_{\text{ПНО}}$ ;

– зменшення на 10000 суб'єктів Єдиного державного реєстру підприємств та організацій України дозволяє прогнозувати зменшення у чотири рази кількості дорожньо-транспортних пригод.

Таким чином, отримані нейрона мережа БШП 13:13-145-3:3 та результати її прогнозу дозволяють констатувати перспективність та відповідну адекватність (див. рис. 9), представленої на рис. 3, б моделі для аналізу рівня техногенної небезпеки держави та окремих її регіонів.

На наступному кроці дослідження були зорієнтовані на будову моделі класифікації регіонів України за основними показниками повсякденного функціонування ПТС системи та прояву на її території техногенної небезпеки – НС техногенного походження, пожеж у техногенно-соціальному середовищі та дорожньо-транспортних пригод. Схему цієї моделі представлено на рис. 10, де у якості класифікаційної ознаки використані результати ієрархічного кластерного аналізу регіонів України та встановлено ефект розділення території держави на три кластери.

Підхід до прийняття рішення про складність архітектури БШП був аналогічним до підходу, який було використано при будові попередніх моделей, та оснований на п'ятьох аналізах результатів навчання мереж, до складу яких випадково входило п'ятсот нейромереж. Результати цього аналізу представлені у табл. 7.

Так, за першими п'ятьма рішеннями, які запропоновані «майстром рішень», були вибрані БШП мережі, з контрольною продуктивністю навчання 1,000 та контрольною похибкою 0,000. Кількість запропонованих «майстром рішень» елементів у скритому шарі, за умов встановлених обмежень – від 1 до 150, спостерігалась від 88 до 148 елементів. При цьому, з урахуванням рангу значимості вхідних змінних, «майстром рішень» пропонувалися мережі з різною кількістю входів – від 13 до 17.

Таким чином, представлені у табл. 7 мережі свідчать, що за умов використання 17 входів мережі

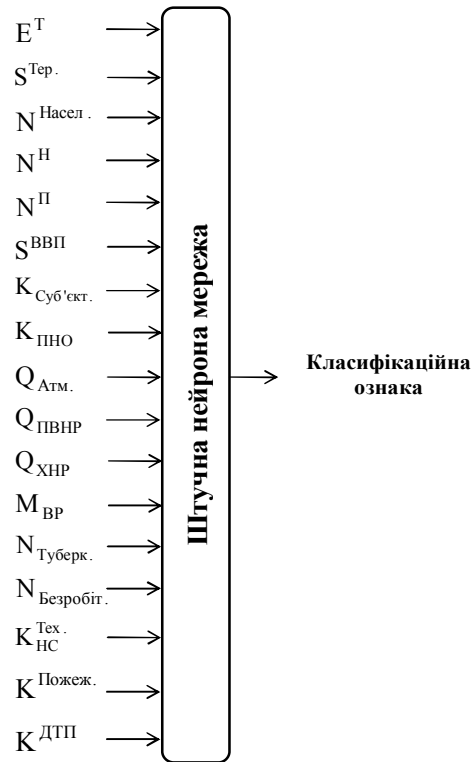


Рис. 10. Схема ШНМ для класифікаційного аналізу регіонів України за основними показниками повсякденного функціонування та прояву техногенної небезпеки

БШП 17:17-148-3:1 і БШП 17:17-138-3:1 з кількістю у скритому шарі 138 та 148 елементів, характеризуються більш ефективним балансом між похибкою регресії та складністю архітектури для класифікаційного аналізу регіонів України за умовами повсякденного функціонування та прояву техногенної небезпеки.

Таблиця 7

Статистичні характеристики трьохшарових перцептронів, які запропоновані «майстром рішень» як найкращі мережі для класифікаційного аналізу регіонів України за умовами повсякденного функціонування та прояву техногенної небезпеки

№ рішення	Архітектура	Продуктивність навчання	Контрольна продуктивність	Тестова продуктивність	Похибка навчання	Контрольна похибка	Тестова похибка	Навчання
1.	БШП 17:17-148-3:1	1,000000	1,000000	1,000000	0,000000	0,000000	0,000001	ЗР100,ЗГ5с, ЗГ0б
2.	БШП 17:17-138-3:1	1,000000	1,000000	1,000000	0,000000	0,000000	0,000000	ЗР100, ЗГ20, ЗГ17б
3.	БШП 13:13-107-3:1	1,000000	1,000000	1,000000	0,000000	0,000000	0,000000	ЗР100, ЗГ20, ЗГ16б
4.	БШП 14:14-88-3:1	1,000000	1,000000	1,000000	0,000000	0,000000	0,000000	ЗР100, ЗГ20, ЗГ13б
5.	БШП 15:15-96-3:1	1,000000	1,000000	1,000000	0,000000	0,000000	0,000055	ЗР100, ЗГ20, ЗГ13б

Базуючись на результатах табл. 7 та попередніх результатах моделювання рівня техногенної небезпеки за основними показниками повсякденного функціонування ПТС системи України (див. рис. 7) було використано трьохшарову БШП мережу з 145 елементами у скритому шарі для розробки ШНМ моделі класифікаційного аналізу регіонів України за умовами повсякденного функціонування та прояву техногенної небезпеки. Результати будови перцептрон, який має сімнадцять входів (рис. 10), 145 елементів у скритому шарі та один вихід класифікаційної ознаки, представлено на рис. 11.

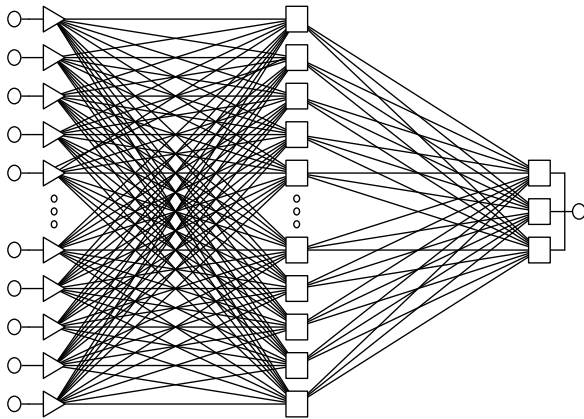


Рис. 11. Архітектура трьохшарового перцептрон БШП 17:17-145-3 для класифікаційного аналізу регіонів України за умовами повсякденного функціонування та прояву техногенної небезпеки

Результат навчання нейронної мережі представлено у табл. 8, де навчений за аналогічними попередніх моделей даними 275 спостережень основних параметрів повсякденного функціонування 25 регіонів України за період 2002 – 2012 рр. трьохшаровий перцептрон БШП 17:17-145-3:1 характеризується показником контрольної продуктивності на рівні 0,721 та контрольної похибки на рівні 0,086. Для оптимізації мережі використані методи зворотного поширення (100 епох на першому етапі) та зв'язаних градієнтів (500 епох на другому етапі). Так, у результаті навчання, оптимальну БШП 17:17-145-3 мережу знайдено на другому етапі за умов вико рис-

тання методу зв'язаних градієнтів на 5 епосі за мінімальною помилкою на валідаційній вибірці.

Роботу цієї мережі продемонстровано на прикладі Харківського регіону. Результати прогнозу представлені у табл. 9.

Перевірка адекватної прогностичної працездатності мережі БШП 17:17-145-3 базувалась на подачі на її входи середніх за 2002 – 2012 рр. значень тринадцяти параметрів повсякденного функціонування Харківського регіону, які були використані у попередніх моделях, та прогностичні значення параметрів  $E^T$ ,  $K_{НС}^{Тех.}$ ,  $K^{Пожеж.}$  і  $K^{ДТП}$ , які були отримані за попередніми моделями. Це дозволило прогнозувати потрапляння Харківського регіону до кластеру з середнім енергетично-економічним рівнем життєдіяльності та прояву техногенної небезпеки (до II кластеру), що відповідає адекватності попереднім результатам проведеного нами кластерного аналізу та прогнозу, представлено у табл. 10.

Зміни деяких параметрів на вході отриманої нейронної мережі дозволили констатувати, що Харківський регіон характеризується відповідним показником надійності, який обумовлено наявністю взаємозв'язків між параметрами ПТС системи, тому варіювання декількома енергетично-економічними параметрами життєдіяльності та параметрами прояву техногенної небезпеки недостатню для зміни рівня життєдіяльності регіону. Так:

- задане збільшення чисельності населення регіону на один мільйон чоловік і задані результати прогнозу збільшення енергетичного рівня регіону (прогноз 1, табл. 3) та збільшення рівня техногенного навантаження на регіон (прогноз 1, табл. 6) дозволило прогнозувати факт залишення Харківського регіону у II кластері – прогноз 1 у табл. 9;

- на аналогічному середньому енергетично-економічному рівні життєдіяльності та прояву техногенної небезпеки залишається регіон у разі штучного збільшення на 1000 об'єктів ПНО і задані результату прогнозу відповідного збільшення енергетичного рівня регіону (прогноз 2, табл. 3) та збільшення рівня техногенного навантаження на регіон (прогноз 2, табл. 6) – прогноз 2 у табл. 9;

Таблиця 8

Результат навчання мережі БШП 17:17-145-3 для класифікаційного аналізу регіонів України за умовами повсякденного функціонування та прояву техногенної небезпеки

Архітектура	Продуктивність навчання	Контрольна продуктивність	Тестова продуктивність	Похибка навчання	Контрольна похибка	Тестова похибка	Навчання
БШП 17:17-145-3	1,000000	1,000000	1,000000	0,000036	0,000175	0,000807	ЗР100, ЗГ5b

Результати прогнозу мережею БШП 17:17-145-3 класифікаційного стану (знаходження у відповідному кластері) Харківського регіону за умовами повсякденного функціонування та прояву техногенної небезпеки

Параметри		Середні значення змінних за 2002 – 2012 рр.	Прогноз 1	Прогноз 2	Прогноз 3
Вхідні	$E^T$	855,8 ТДж	<b>948,3</b> ТДж	<b>3587,5</b> ТДж	<b>2272,1</b> ТДж
	$S^{Тер.}$	31420 км. кв.	31420 км. кв.	31420 км. кв.	31420 км. кв.
	$N^{Насел.}$	2821239 осіб	<b>3821239</b> осіб	2821239 осіб	<b>3821239</b> осіб
	$N^H$	25060 осіб	25060 осіб	25060 осіб	25060 осіб
	$N^П$	43689 осіб	43689 осіб	43689 осіб	43689 осіб
	$S^{ВВП}$	44972 млн. грн.	44972 млн. грн.	44972 млн. грн.	44972 млн. грн.
	$K_{Суб'ект.}$	68478 суб'єктів	68478 суб'єктів	68478 суб'єктів	<b>58478</b> суб'єктів
	$K_{ДНО}$	2519 об'єктів	2519 об'єктів	<b>3519</b> об'єктів	<b>3519</b> об'єктів
	$Q_{ПВНР}$	318,5 тис. т	318,5 тис. т	318,5 тис. т	318,5 тис. т
	$Q_{ХНР}$	20,3 тис. т	20,3 тис. т	20,3 тис. т	20,3 тис. т
	$Q_{Атм.}$	158,2 тис. т	158,2 тис. т	158,2 тис. т	158,2 тис. т
	$M_{ВР}$	18020,4 тис. т	18020,4 тис. т	18020,4 тис. т	18020,4 тис. т
	$N_{Туберк.}$	2135 особи	2135 особи	2135 особи	2135 особи
	$N_{Безробіт.}$	41,0 тис. осіб	41,0 тис. осіб	41,0 тис. осіб	41,0 тис. осіб
	$K_{НС}^{Тех.}$	8	<b>18</b>	<b>12</b>	<b>25</b>
	$K_{Пожеж.}$	3244	<b>4819</b>	<b>2734</b>	<b>4091</b>
	$K_{ДТП}$	2231	<b>820</b>	<b>1237</b>	<b>535</b>
<b>Вихідний</b>	<b>II кластер (II кластер)*</b>	<b>II кластер</b>	<b>II кластер</b>	<b>II кластер</b>	

\* Примітка. Визначено за середніми (за період 2002 – 2012 рр.) значеннями показників повсякденного функціонування та техногенної небезпеки відношення регіону до відповідного кластеру

Таблиця 10

Результат перевірки адекватності класифікаційного аналізу мережею БШП 17:17-145-3 регіонів України за умовами повсякденного функціонування та прояву техногенної небезпеки

	I кластер	II кластер	III кластер
Кількість спостережень	33	66	176
Кількість правильно визначених спостережень	33	66	176
Кількість помилково визначених спостережень	0	0	0
Кількість невизначених спостережень	0	0	0
Відсоток правильно визначених спостережень	100	100	100
Відсоток помилково визначених спостережень	0	0	0
Відсоток невизначених спостережень	0	0	0

– у разі одночасної варіації декількох параметрів життєдіяльності (збільшення чисельності населення на один мільйон чоловік, збільшення на 1000 об'єктів ПНО і зменшення на 10000 суб'єктів Єдиного державного реєстру підприємств та організацій України та врахування результатів прогнозу відповідного збільшення енергетичного рівня регіону (прогноз 3, табл. 3) та зміни рівня техногенного навантаження на регіон (прогноз 3, табл. 6)) дозволило також прогнозувати збереження відповідного запасу надійності Харківського регіону та залишання його у II кластері з середнім енергетично-економічним рівнем життєдіяльності та прояву техногенної небезпеки – прогноз 3 у табл. 9.

Таким чином, отримані нейрона мережа БШП 17:17-145-3 та результати її прогнозу дозволяють констатувати перспективність та високу адекватність (див. табл. 10), представлені на рис. 11 нейромережевої моделі для прогнозу рівня життєдіяльності та прояву техногенної небезпеки регіонів України та аналізу умов їх надійного функціонування під час прояву різного роду техногенних небезпек.

## Висновки

1. У роботі на базі нейромережевих технологій отримані математичні моделі прогнозу умов життєдіяльності ПТС системи України в залежності від значень основних показників енергетично-економічно-соціального рівня повсякденного функціонування та прояву техногенної небезпеки.

2. На основі запропонованого енергетичного підходу отримано нейромережеву прогностичну модель оцінки енергетичного рівню життєдіяльності регіонів за основними показниками повсякденного функціонування. Отримані достовірні за цією моделлю результати прогнозу динаміки енергетичного рівня життєдіяльності Харківського регіону за умов змін показників чисельності наявного населення, кількості потенційно небезпечних об'єктів та кількості суб'єктів Єдиного державного реєстру підприємств та організацій України свідчать про перспективність та адекватність отриманої нейронної мережі для аналізу рівня енергетичної безпеки держави та окремих її регіонів.

3. У межах розвитку уявлень про динаміку й енергетику функціонування ПТС системи України, з рознесеними у просторі та часі різного роду джерел небезпек і їх дестабілізуючого впливу на умови безпеки життєдіяльності, отримано нейромережеву прогностичну модель оцінки рівня техногенної небезпеки регіонів від основних показників повсякденного функціонування. Отримані достовірні за цією моделлю результати прогнозу динаміки рівня техногенної небезпеки життєдіяльності Харківського регіону за умов змін показників чисельності наявного населення, кількості потенційно небезпечних

регіонів та кількості суб'єктів Єдиного державного реєстру підприємств та організацій України свідчать про перспективність та адекватність отриманої нейронної мережі для аналізу кількості виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру, пожеж у техногенно-соціальному середовищі та дорожньо-транспортних пригод на території України.

4. У рамках поставленої мети дослідження у роботі отримано нейромережеву прогностичну модель кластерного аналізу регіонів України за умовами повсякденного функціонування та прояву техногенної небезпеки. Отримані достовірні за цією моделлю результати прогнозу потрапляння Харківського регіону до кластеру з середнім енергетично-економічним рівнем життєдіяльності та прояву техногенної небезпеки відповідають попереднім результатам проведеного нами кластерного аналізу. Це свідчить про перспективність та адекватність отриманої нейронної мережі для аналізу території України на надійність функціонування в умовах прояву різного роду техногенних небезпек та встановлення критичних умов для переходу відповідного регіону на інші рівні функціонування та прояву техногенної небезпеки.

5. Отримані нейромережеві моделі являються основоположними для розвитку наукових основ створення ефективної територіальної комплексної системи моніторингу, запобігання та ліквідації надзвичайних ситуацій природного та техногенного походження та забезпечення екологічної безпеки в Україні [16, 17].

## Список літератури

1. Андронов В.А. Природні та техногенні загрози, оцінювання небезпек / В.А. Андронов, А.С. Розозін, О.М. Соболев, В.В. Тютюник, Р.І. Шевченко. – Х.: Національний університет цивільного захисту України, 2011. – 264 с.
2. Азімов О.Т. Огляд поточного стану природно-техногенної безпеки в Україні та перспективи розвитку аналітичної інтерактивної системи моніторингу надзвичайних ситуацій засобами дистанційних, телематичних та ГИС-технологій / О.Т. Азімов, П.А. Коротинський, Ю.Ю. Колесніченко // ГЕОІНФОРМАТИКА – 2006. – № 4. – С. 52-66.
3. Андронов В.А. Комплексні показники оцінювання стану природно-техногенної безпеки адміністративно-територіальних одиниць України / В.А. Андронов, Ю.П. Бабков, В.В. Тютюник, Р.І. Шевченко // Проблеми надзвичайних ситуацій: Зб. наук. праць. – Х.: Національний університет цивільного захисту України, 2010. – Вип. 12. – С. 9-20.
4. Тютюник В.В. Оцінка індивідуальної безпеки населення регіонів України в умовах надзвичайних ситуацій / В.В. Тютюник, Р.І. Шевченко, О.В. Тютюник // Проблеми надзвичайних ситуацій: Зб. наук. праць. – Х.: Університет цивільного захисту України, 2009. – Вип. 9. – С. 146-157.
5. Тютюник В.В. Системний підхід до оцінки безпеки життєдіяльності при територіально-часовому розподілі енергії джерел надзвичайних ситуацій / В.В. Тютюник, Л.Ф. Черногор, В.Д. Калугін // Проблеми надзвичайних ситуацій: Зб. наук. праць. – Х.: Національ-

ний університет цивільного захисту України, 2011. – Вип. 14. – С. 171-194.

6. Калугін В.Д. Системний підхід до оцінки ризиків надзвичайних ситуацій в Україні / В.Д. Калугін, В.В. Тютюник, Л.Ф. Черногор, Р.І. Шевченко // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2012. – 1/6 (55). – С. 59-70.

7. Калугін В.Д. Оцінка рівня пожежної небезпеки території України на основі аналізу енергетичних показників стану життєдіяльності / В.Д. Калугін, В.В. Коврегін, В.В. Тютюник, Л.Ф. Черногор, Р.І. Шевченко // *Пожежна безпека: Зб. наук. праць*. – Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2013. – № 22. – С. 99-112.

8. Калугін В.Д. Оценка уровня химической опасности территории Украины на основе анализа энергетических показателей жизнедеятельности / В.Д. Калугин, В.В. Тютюник, Л.Ф. Черногор, Р.И. Шевченко // *Нафтогазова енергетика*. – Івано-Франківськ: Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2013. – № 1(19). – С. 109-123.

9. Калугін В.Д. Енергетичний підхід до оцінки екологічного стану природно-техногенно-соціальної системи України в режимі повсякденного функціонування / В.Д. Калугін, В.В. Тютюник, Л.Ф. Черногор, Р.І. Шевченко // *Зб. наук. праць Севастопольського національного університету ядерної енергетики та промисловості: Зб. наук. праць*. – Севастополь: Севастопольський національний університет ядерної енергетики та промисловості, 2013. – Вип. 4 (48). – С. 196-208.

10. Калугін В.Д. Енергетичний підхід до оцінки небезпеки життєдіяльності природно-техногенно-соціальної системи України в умовах територіального розподілу складів боєприпасів і підприємств з їх утилізації / В.Д. Калугін, В.В. Тютюник, Л.Ф. Черногор, Р.І. Шевченко // *Системи озброєння і військова техніка*. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, 2013. – № 4 (36). – С. 47-56.

11. Калугін В.Д. Оцінка сумарного впливу складових техногенного навантаження на загальний рівень небезпеки життєдіяльності території України / В.Д. Калугін, В.В. Тютюник, Л.Ф. Черногор, Р.І. Шевченко // *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, 2013. – Вип. 9 (116). – С. 204-216.

Сил. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, 2013. – Вип. 4(37). – С. 189-197.

12. Калугин В.Д. Энергетический подход для оценки уровня техногенной опасности природно-техногенно-социальной системы / В.Д. Калугин, В.В. Тютюник, Л.Ф. Черногор, Р.И. Шевченко // *Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности»*. – М.: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <http://academygps.ru/img/UNK/asi/ttb/2014-1/28-01-14.ttb.pdf>.

13. Тютюник В.В. Оценка уровня техногенной опасности территории по основным показателям жизнедеятельности методами факторного анализа и анализа главных компонент / В.В. Тютюник, Н.В. Бондарев, Р.И. Шевченко, Л.Ф. Черногор, В.Д. Калугин // *Научные и образовательные проблемы гражданской защиты: Научный журнал*. – Химки: Академия гражданской защиты МЧС России, 2014. – № 3(22). – С. 47-57.

14. Хайкин С. Нейронные сети / С. Хайкин – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.

15. Нейронные сети. Электронный учебник [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>.

16. Тютюник В.В. Основні принципи інтегральної системи безпеки при надзвичайних ситуаціях / В.В. Тютюник, Р.І. Шевченко // *Зб. наук. праць Харківського університету Повітряних Сил: Зб. наук. праць*. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, 2008. – Вип. 3(18). – С. 179-180.

17. Калугін В.Д. Розробка науково-технічних основ для створення системи моніторингу, попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру та забезпечення екологічної безпеки / В.Д. Калугін, В.В. Тютюник, Л.Ф. Черногор, Р.І. Шевченко // *Системи обробки інформації: Зб. наук. праць*. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, 2013. – Вип. 9 (116). – С. 204-216.

Надійшла до редколегії 23.09.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.І. Адаменко, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків.

## НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ТЕРРИТОРИИ УКРАИНЫ ПО ОСНОВНЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ ПОВСЕДНЕВНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ПРОЯВЛЕНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ ОПАСНОСТИ

В.В. Тютюник, Н.В. Бондарев, В.А. Андронов, В.Д. Калугин

Представлены результаты моделирования, проведенного на базе нейросетевых технологий, условий жизнедеятельности природно-техногенно-социальной системы Украины по основным показателям повседневного функционирования и проявления техногенной опасности. Выходными показателями данных моделей являются: энергетический уровень жизнедеятельности; количества возникновения чрезвычайных ситуаций, пожаров в техногенно-социальной среде и дорожно-транспортных происшествий на территории Украины; принадлежность региона соответствующему кластеру по энергетически-экономическому уровню жизнедеятельности и проявления техногенных опасностей.

**Ключевые слова:** чрезвычайная ситуация, пожар, дорожно-транспортное происшествие, нейросетевое моделирование, энергетический уровень жизнедеятельности, уровень техногенной опасности.

## NEURAL NETWORK MODELING CONDITIONS OF VITAL ACTIVITY ON TERRITORY OF UKRAINE BY BASIC INDICATORS OF DAILY FUNCTIONING AND DISPLAYING OF TECHNOLOGICAL HAZARD

V.V. Tiutiunik, N.V. Bondarev, V.A. Andronov, V.D. Kalugin

Results of modeling, that performed on base of neural network technologies, conditions of vital activity of natural and technogenic and social system of Ukraine by basic indicators of daily functioning and displaying of technological hazard are submitted. Initial data for the models are: energy level of vital activity; numbers of emergencies, fires in technological and social environment and road accidents on territory of Ukraine; identity of the region corresponding to a cluster of energy-economic level of vital activity and displaying of technological hazards.

**Keywords:** emergency situation, fire, road accident, neural network modeling, energy level of vital activity, level of technological hazard.