

УДК 621.311.1

DOI: 10.15587/2313-8416.2016.85480

## РОЗРОБКА АЛГОРИТМА ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЯХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ НАПРУГОЮ 6–35 кВ

© В. Л. Бакулєвський

## DEVELOPMENT OF ALGORITHMS FOR SOFTWARE IMPLEMENTATION OF PREDICTION MODELS OF TECHNICAL ELECTRICITY LOSSES IN 6–35 kV OVERHEAD POWER LINES

© V. Bakulevskiy

Здійснена програмна реалізація моделі прогнозування технічних втрат електроенергії в повітряних лініях електропередачі (ЛЕП) напругою 6–35 кВ. Розроблено алгоритм програмної реалізації моделі, здійснено опис параметрів вхідних змінних та логічний зв'язок елементів бази даних (модель «Сутність-Зв'язок»). Проведено тестування запропонованого програмного забезпечення на нових даних та порівняльний аналіз результатів розрахунку втрат електроенергії в повітряних ЛЕП, розрахованих в запропонованому програмному забезпеченні (ПЗ), з даними автоматичної системи контролю та обліку електроенергії (АСКОЕ) та з іншими підходами

**Ключові слова:** втрати електроенергії, повітряні лінії електропередач, нейронні мережі, модель, програмна реалізація

Software implementation of prediction model of technical electricity losses in 6–35 kV overhead power lines (OHP) is done. The algorithm for software implementation of model is developed, description of input variable parameters and the logical relationship of database elements ("entity-relationship" model) are realized. Testing of the proposed software is done on new data and comparative analysis of calculating electricity losses in overhead power lines, calculated in the proposed software with the data of automated control systems and electricity metering (ACSEM) and other approaches

**Keywords:** electricity losses, overhead power lines, neural networks, model, software implementation

### 1. Вступ

Одним з головних завдань енергозбереження України є розробка основних напрямків щодо зниження втрат електроенергії та доведення цього показника до рівня передових країн Європейського Союзу та США в енергоспоживанні [1], тому удосконалення прогнозування та розрахунку втрат електроенергії є актуальним питанням енергозбереження в енергетиці України.

Застосування сучасних математичних моделей прогнозування, зокрема нейронних мереж, дозволяє істотно поліпшити точність прогнозування, зменшити похибки та значно скоротити час на збір інформації.

Сучасне програмне забезпечення (ПЗ), яке реалізоване на нейромережевих моделях, має істотні переваги перед традиційним ПЗ зручнішим інтерфейсом, швидкістю роботи, меншим об'ємом вхідної інформації та точнішим результатом. Цим обґрунтовується актуальність проведення даних досліджень.

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В [2] пропонується більш повно врахувати кліматичні фактори, автор [4] пропонує врахувати топографічні умови місцевості, які безпосередньо пов'язані з деякими кліматичними факторами, в [5] врахування кліматичних факторів пропонується замі-

стити визначеними коефіцієнтами, автор [6] пропонує адаптивне короткочасне прогнозування навантажень з використанням погодних умов, в [7] пропонується короткочасне прогнозування електричного навантаження енергосистеми від залежної моделі погоди. В [8] на прикладі доведено, що похибка розрахунку втрат електроенергії в повітряних лініях може бути значною, якщо не врахувати метеодані. В [9] пропонується враховувати режим роботи повітряних ЛЕП в екстремальних погодних умовах при розрахунку їх навантажувальної здатності. В [10] увага акцентується на необхідності більш детального дослідження впливу метеофакторів на втрати електроенергії в обладнанні, тому що існує досить великий відсоток невизначеності в цьому питанні.

Сьогодні в багатьох програмних засобах, які застосовуються в українських енергокомпаніях, при розрахунках та прогнозуванні не враховується навіть температурний фактор, який пропонує [11], що призводить до значних похибок [3, 9, 12].

Також в роботах українських [2–4] та закордонних фахівців [6–10] увага акцентується на необхідності удосконалення методологічного і технічного забезпечення, більш точного та повного врахування факторів, що впливають на втрати електроенергії в обладнанні, а також застосуванні поліпшених методів та моделей розрахунку та прогнозування втрат

електроенергії з подальшим впровадженням у сучасне програмне забезпечення [3, 9, 12, 13].

Застаріле ПЗ деяких енергопостачальних компаній України не відповідає сучасним вимогам, погано працює в умовах неповноти інформації та має незручний інтерфейс [3, 13]. Тому розробка поліпшеного ПЗ з застосуванням сучасних математичних моделей обумовлює необхідність даного дослідження.

### 3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є розробка алгоритму програмної реалізації моделі прогнозування технічних втрат електроенергії в повітряних лініях електропередачі (ЛЕП) напругою 6–35 кВ.

Для досягнення мети сформульовані та вирішені задачі:

- розроблено алгоритм програмної реалізації моделі;
- здійснено опис параметрів вхідних змінних та логічний зв'язок елементів бази даних (модель «Сутність-Зв'язок»);
- проведено тестування запропонованого програмного забезпечення на нових даних та порівняльний аналіз результатів розрахунку втрат електроенергії в повітряних ЛЕП, розрахованих в запропонованому ПЗ, з даними АСКОЕ та з іншими підходами.

### 4. Матеріали та методи дослідження програмної реалізації моделі прогнозування технічних втрат електроенергії в повітряних ЛЕП напругою 6–35 кВ

Матеріали, методи та результати дослідження впливу кліматичних факторів на технічні втрати електроенергії, а також методи розробки моделі нейромережі для розрахунку та прогнозування технічних втрат електроенергії в повітряних ЛЕП напругою 6–35 кВ, наведені в [14].

В [14] була запропонована модель штучної нейронної мережі (ШНМ) для завдання планування технічних втрат електроенергії в повітряних ЛЕП напругою 6–35 кВ з наступними параметрами:

- архітектура – багат шарової перцептрон, 7 нейронів у вхідному шарі, 5 нейронів – в прихованому шарі і 1 вихідний нейрон;
- вхідні змінні: активне навантаження ПЛ, номінальна напруга ПЛ, переріз проводу ПЛ, довжина проводу ПЛ, середньодобова температура повітря, швидкість вітру, наявність опадів;
- вихідна змінна – технічні втрати активної електроенергії в ПЛ;
- об'єми виборки: навчальна – 250 спостережень, контрольна – 250 спостережень, тестова – 232 спостереження;
- функція активації – логістична; алгоритм навчання – в 2 етапи: на першому етапі – метод швидкого поширення, на другому – метод Левенберга-Марквардта.

Програмна реалізація запропонованої моделі здійснюється в програмі STATISTICA Neural Networks (Нейронні Мережі) американської фірми StatSoft, доцільність застосування і переваги якої наведені в [14, 15].

Файл запропонованої ШНМ збережений в форматі PMML, що дозволяє безпосередньо запуснути його в системі STATISTICA. Також збережений файл бази даних (БД), яка була використана для навчання та тестування запропонованої моделі нейромережі. На основі наведеної інформації та з урахуванням вимог [13–16], розроблений алгоритм програмної реалізації моделі.

Для побудови логічного зв'язку елементів БД був застосований підхід, заснований на ідеях семантичного моделювання – модель «Сутність-Зв'язок» (ER-модель) [13]. Цей підхід передбачає створення логічної структури БД системи для перетворення її в подальшому в набір пов'язаних елементів. При цьому вхідні параметри (тобто складові БД) представляються у вигляді таблиць. За допомогою БД можна осмислити і проаналізувати оброблені в системі дані і відносини між ними.

Далі розглядається вибір параметрів вхідних змінних. Умовно вхідні змінні для зручності розділені на категорії, для кожної змінної проведено детальний опис:

- активне навантаження ЛЕП;
- технічні дані ЛЕП (номінальна напруга, переріз проводу, довжина проводу);
- метеодані (середньодобова температура повітря, атмосферні опади, швидкість вітру).

Проводиться порівняльний аналіз розрахунку втрат електроенергії в повітряних ЛЕП, аналогічний аналізу, який проведений при перевірці адекватності отриманих результатів [14], але замість результатів запропонованого підходу в [14], наведені результати, які отримані в запропонованому програмному забезпеченні. Дослідження проводиться в повітряних ЛЕП напругою 35 кВ ділянки Любашівка – Демидове (провід марки АС-50) та ЛЕП напругою 10 кВ ділянки Демидове – Бобрик (провід марки АС-25) Котовських електричних мереж кожену добу протягом всього 2008 року. При цьому втрати в ЛЕП розраховані за різними підходами: 1 підхід – без урахування кліматичних факторів; 2 підхід – з урахуванням прийнятої середньорічної температури та без урахування інших кліматичних факторів [11]; ПЗ – результати, які отримані в запропонованому програмному забезпеченні. Результати розрахунків порівнюються з даними АСКОЕ повітряних ЛЕП.

### 5. Результати дослідження програмної реалізації моделі прогнозування технічних втрат електроенергії в повітряних ЛЕП напругою 6-35 кВ

Розроблений алгоритм програмної реалізації моделі передбачає послідовне виконання наступних етапів (рис. 1).



Рис. 1. Алгоритм програмної реалізації моделі

Розроблена модель «сутність/зв'язок» БД для програмної реалізації запропонованої ШНМ представлена на рис. 2.

Розроблений детальний опис вибору параметрів вхідних змінних, наведений в табл. 1–3.

На основі запропонованого алгоритму програмної реалізації моделі (рис. 1), моделі «сутність/зв'язок» БД для програмної реалізації запропонованої ШНМ (рис. 2) та з урахуванням вибору параметрів вхідних змінних (табл. 1–3), запропоновано програмне забезпечення (ПЗ) для вирішення даного завдання. На базі запропонованої ШНМ та БД, яка

застосовувалась при навчанні та тестуванні вказаної ШНМ, при введенні значень вхідних змінних, програма автоматично прогнозує значення вихідної змінної (втрати електроенергії). Прогнозування здійснюється для кожного дня, що зменшує похибку розрахунку.

Результати розрахунку відхилення втрат електроенергії, які розраховані за різними підходами, а також в запропонованому ПЗ, в повітряних ЛЕП напругою 35 кВ (провід АС–50) та 10 кВ (провід АС-25) від даних АСКОЕ протягом 2008 року, наведені в табл. 4.

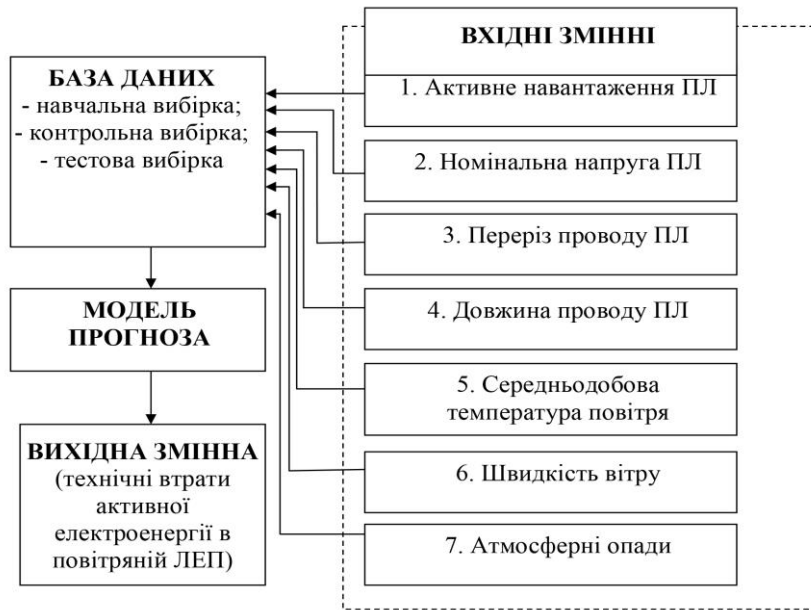


Рис. 2. Модель «сутність/зв'язок» БД для програмної реалізації запропонованої ШНМ

Таблиця 1

Вхідна змінна «активне навантаження ЛЕП»

Вхідна змінна	Інформація щодо змінної	Тип змінної	Діапазон значень змінної
активне навантаження ЛЕП	добове значення за лічильниками активної електроенергії або за даними АСКОЕ	F	[0; ∞]

Таблиця 2

Категорія вхідних змінних «технічні дані ЛЕП»

Вхідна змінна	Інформація щодо змінної	Тип змінної	Діапазон значень змінної
номінальна напруга ЛЕП	обираються за технічними даними відповідних ЛЕП	F	6; 10; 35 кВ
переріз проводу ЛЕП			10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240 мм <sup>2</sup>
довжина проводу ЛЕП			[0; ∞]

Таблиця 3

Категорія вхідних змінних «метеодані»

Вхідна змінна	Інформація щодо змінної	Тип змінної	Діапазон значень змінної
середньодобова температура повітря	усереднене добове значення (за метеоданими)	F	[0; ∞]
швидкість вітру			[0; ∞]
атмосферні опади			Опадів немає: $\alpha_0 = 1$ . При наявності опадів значення $\alpha_0$ обирається з [14] (в залежності від перерізу проводу та типу опадів)

Таблиця 4

Результати розрахунку відхилення втрат електроенергії, які розраховані за різними підходами, а також в запропонованому ПЗ, в повітряних ЛЕП напругою 35 кВ (провід АС–50) та 10 кВ (провід АС–25) від даних АСКОЕ протягом 2008 року

Місяць	Втрати електроенергії, тис. кВт·год							
	Повітряна ЛЕП 35 кВ, провід АС–50				Повітряна ЛЕП 10 кВ, провід АС–25			
	АСКОЕ, тис. кВт·год	1 підхід, тис. кВт·год	2 підхід, тис. кВт·год	ПЗ, тис. кВт·год	АСКОЕ, тис. кВт·год	1 підхід, тис. кВт·год	2 підхід, тис. кВт·год	ПЗ, тис. кВт·год
Січень	2,924	3,515	3,326	2,837	0,861	0,935	0,839	0,869
Лютий	3,154	3,612	3,401	2,843	0,813	0,746	0,783	0,821
Березень	2,837	3,437	3,124	2,523	0,722	0,810	0,809	0,708
Квітень	2,753	3,215	2,970	2,519	0,921	0,750	0,794	0,847
Травень	2,875	3,502	2,994	2,882	1,183	1,023	1,065	1,102
Червень	2,265	2,751	2,587	2,274	1,184	1,019	1,109	1,107
Липень	2,132	1,678	1,794	1,924	1,019	1,019	0,889	0,962
Серпень	2,378	2,874	2,675	2,282	1,678	1,453	1,787	1,712
Вересень	2,252	2,736	2,495	2,362	1,050	0,908	0,979	0,993
Жовтень	2,315	2,795	2,428	2,378	1,461	1,235	1,256	1,524
Листопад	2,453	2,902	2,688	2,489	0,516	0,413	0,422	0,492
Грудень	2,518	3,023	2,869	2,496	0,545	0,648	0,482	0,554
Середнє відносне відхилення підходу (ПЗ), %	–	20,04	10,45	3,39	–	8,30	6,17	2,19

## 6. Висновки

1. Розроблено алгоритм програмної реалізації моделі, який включає етапи: запуск збереженого файлу запропонованої ШНМ в програмі STATISTICA Neural Networks; запуск в запропонованій ШНМ збереженого файлу БД, яка використана при проектуванні ШНМ, з навчальною, контрольною та тестовою вибірками; введення значень вхідних змінних; автоматичне отримання значення вихідної змінної.

2. Здійснено опис параметрів вхідних змінних та логічний зв'язок елементів бази даних (модель «Сутність–Зв'язок»). На основі запропонованої моделі нейромережі реалізовано і запропоновано для подальшого використання програмне забезпечення для розрахунку та прогнозування втрат електроенергії в повітряних ЛЕП напругою 6–35 кВ, яке має наступні переваги:

- програмна реалізація запропонованої моделі здійснюється в програмі STATISTICA Neural Networks (Нейронні Мережі) американської фірми StatSoft, яка має переваги порівняно з аналогічними програмами;

- система спроектована у вигляді «клієнт-серверного» додатка;

- інтерфейс програмного забезпечення розроблений таким чином, щоб надати користувачу максимальні зручності і мінімальну кількість роботи з його боку. При введенні значень вхідних змінних (вручну чи автоматично), програма автоматично прогнозує значення вихідної змінної (втрати електроенергії);

- файл запропонованої ШНМ збережений в форматі PMML, що дозволяє безпосередньо запуснути його в системі STATISTICA. Також збережений файл бази даних (БД), яка використана для навчання та тестування запропонованої ШНМ;

- можливий запис в окремий файл статистичних даних моделі, вхідних і вихідної змінної та його збереження;

- запис в базу додаткових даних вхідних параметрів (вручну або автоматично), в тому числі можливий запис ретроспективних даних телеметрії в базу даних (метеоумов);

- прогнозування здійснюється для кожного дня, що зменшує похибку розрахунку;

- автоматичне збереження результату прогнозування в окремому файлі, а також аналізів на всіх етапах роботи ПЗ, можливість їх друку;

- автоматичне самонавчання і якісне прогнозування запропонованої ШНМ на іншій БД, тобто система має високий рівень адаптації до зміни вхідних параметрів;

- аналіз статистичних параметрів та графічне відображення вхідних змінних, вихідної змінної та моделі вцілому;

- можливість інтегрування в інші програмні комплекси та системи.

3. В результаті порівняльного аналізу результатів розрахунку втрат електроенергії, проведеного для повітряних ЛЕП напругою 35 кВ ділянки Любашівка – Демидове (провід марки АС-50) та ЛЕП напругою 10 кВ ділянки Демидове – Бобрик (провід марки АС-25) Котовських електричних мереж протягом всього 2008 року, встановлено, що результати втрат електроенергії, які розраховані на запропонованому ПЗ, порівняно з офіційним підходом, виявилися точнішим в середньому на 7 % при розрахунку річних втрат електроенергії в повітряній ЛЕП 35 кВ Любашівка – Демидове та на 4 % при розрахунку річних втрат електроенергії в повітряній ЛЕП 10 кВ Демидове – Бобрик.

## Література

1. Комплексна державна програма енергозбереження України [Текст]. – Кабінету Міністрів України, 1997. – № 148. – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/148-97-%D0%BF>
2. Красовський, П. Ю. Фактори, що впливають на динаміку технічних витрат у лініях електропередач [Текст] / П. Ю. Красовський // Праці Дніпропетровського національного гірничого університету. – 2006. – № 3.
3. Мирошник, А. А. Уточненні алгоритми расчета потерь электроэнергии в сетях 0,38 кВ в реальном времени [Текст] / А. А. Мирошник // Проблемы региональной энергетики. – 2010. – Т. 2, № 13. – С. 35–42.
4. Турбін, С. В. Удосконалення методів визначення кліматичних навантажень на повітряні лінії з урахуванням топографічних особливостей місцевості [Текст] / С. В. Турбін // Энергетика та електрифікація. – 2007. – № 10. – С. 3–9.
5. Hamid, B. Automated load forecasting using neural networks [Text] / B. Hamid, M. Walter // Proc. Amer. Power Conf. – Chicago, 1992. – Vol. 54. – P. 1149 – 1153.
6. Gupta, P. C. Adaptive short-term forecasting of hourly loads using weather in formation [Text] / P. C. Gupta, K. Yamada // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1972. – Vol. PAS-91, Issue 5. – P. 2085–2094. doi: 10.1109/tpas.1972.293541
7. Panuska, V. Short-term forecasting of electric power system load from a weather dependent model [Text] / V. Panuska // IFAC Symp. 1977. autom. contr. and prot. electr. power syst. – Melbourne, 1977. – P. 414–418.
8. Воротицкий, В. Э. Оценка погрешностей расчета переменных потерь электроэнергии в ВЛ из-за неучета метеоусловий [Текст] / В. Э. Воротицкий, О. В. Туркина // Энергосистемы и электрические сети. – 2008. – № 10.
9. Левченко, И. И. Нагрузочная способность и мониторинг воздушных линий электропередачи в экстремальных погодных условиях [Текст] / И. И. Левченко, Е. И. Сацук // Электричество. – 2008. – № 4. – С. 2–8.
10. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии в электрических сетях, зависящие от погодных условий [Текст] / Ю. С. Железко // Электрические станции. – 2004. – № 11.
11. Методика визначення технологічних витрат електроенергії у трансформаторах і лініях електропередавання [Текст]. – Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2011. – № 532. – Режим доступу: [http://www.mega-billing.com/files/metodika\\_vtrat.pdf](http://www.mega-billing.com/files/metodika_vtrat.pdf)
12. Осипов, Д. С. Учет нагрева токоведущих частей в расчетах потерь мощности и электроэнергии при несинусоидальных режимах систем электроснабжения [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Д. С. Осипов. – Омск: РГБ, 2005.
13. Глебов, А. А. Модель краткосрочного прогнозирования элек-троснабжения с помощью нейро-нечетких систем [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А. А. Глебов. – Астрахань: РГБ, 2007. – 21 с.
14. Bakulevskiy, V. Research into the influence of climatic factors on the losses of electric energy in overhead power transmission lines [Text] / V. Bakulevskiy // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 5, Issue 8 (83). doi: 10.15587/1729-4061.2016.80072
15. Нейронные сети. Statistica Neural Networks. Методология и технологии современного анализа данных

[Текст] / под ред. В. П. Боровиков. – М.: Горячая линия-Телеком, 2008. – 392 с.

16. Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks [Текст] – М.: Горячая линия-Телеком. – 2001. – 654 с.

## References

1. The Cabinet of Ministers of Ukraine (1997). A comprehensive state program of energy saving in Ukraine, 148. Available at: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/148-97-%D0%BF>
2. Krasovsky, P. Y. (2006). Factors affecting the dynamics of technical losses in power lines. Proceedings of the Dnipropetrovsk National Mining University, 3.
3. Miroshnik, A. A. (2010). Refined algorithms for calculating the energy losses in networks 0,38 kV in real time. Regional energy issues, 2 (13), 35–42.
4. Turbin, S. V. (2007). Improving methods for determining environmental loads on air routes taking into consideration subject topographical features of the area. Energy and Electrification, 10, 3–9.
5. Hamid, B. (1992). Automated load forecasting using neural networks. Proc. Amer. Power Conf. Chicago, 54, 1149–1153.
6. Gupta, P., Yamada, K. (1972). Adaptive Short-Term Forecasting of Hourly Loads Using Weather Information. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-91 (5), 2085–2094. doi: 10.1109/tpas.1972.293541
7. Panuska, V. (1977). Short-term forecasting of electric power system load from a weather dependent model. IFAC Symp. autom. contr. and prot. electr. power syst. Melbourne, 414–418.
8. Vorotnitsky, V. E., Turkina, O. V. (2008). Estimation of variable energy losses error in overhead lines because of the weather conditions neglect. Energy systems and electrical networks, 10.
9. Levchenko, I. I., Satsuk, E. I. (2008). Carrying capacity and monitoring of overhead power lines in extreme weather conditions. Electricity, 4, 2–8.
10. Zhelezko, Y. S. (2004). Loss of electric energy in electric grids, depending on weather conditions. Power station, 11.
11. Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine (2011). Method for determining the technological power consumption of transshaper and power lines, 532. Available at: [http://www.mega-billing.com/files/metodika\\_vtrat.pdf](http://www.mega-billing.com/files/metodika_vtrat.pdf)
12. Osipov, D. S. (2005). Recording of heating of current-carrying parts in the calculation of the power loss and power at non-sinusoidal modes of electric power systems. Omsk: RGB.
13. Glebov, A. A. (2007). Model of short-term forecasting of power consumption by using neuro-fuzzy systems. Astrakhan: RGB, 21.
14. Bakulevskiy, V. (2016). Research into the influence of climatic factors on the losses of electric energy in overhead power transmission lines. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5/8 (83), 4–8. doi: 10.15587/1729-4061.2016.80072
15. Borovikov, V. P. (Ed.) (2008). Neural networks. Statistica Neural Networks. Methodology and technology of modern data analysis. Moscow, Hotline-Telecom, 392.
16. Neural networks. STATISTICA Neural Networks (2001). Moscow: Hotline-Telecom, 654.

*Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Бойко А. А.  
Дата надходження рукопису 03.11.2016*

**Бакулєвський Володимир Леонідович**, викладач, голова циклової комісії, Циклова комісія електротехнічних дисциплін, Механіко-технологічний технікум Одеської національної академії харчових технологій, вул. Чорноморського козацтва, 12, м. Одеса, Україна, 65003, E-mail: bakulevsky\_80@mail.ru

**Bakulevskiy Vladimir**, Lecturer, Head of cyclic commission, The cycle commission of electrotechnical disciplines, Mechanics and Technology College of Odessa National Academy of Food Technologies, Chornomors'kogo kozactva str., 12, Odesa, Ukraine, 65003, E-mail: bakulevsky\_80@mail.ru