

В. В. ВАСИЛЕВСЬКИЙ, О. О. КАПЛІЄНКО, С. І. ШИЛО

ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ВОЛОГОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ МАСЛОНАПОВНЕНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Пропонується застосування нейронної мережі на основі нелінійної авторегресійної моделі з екзогенними входами для прогнозування вологості трансформаторного масла силових маслонаповнених трансформаторів. Із застосуванням інструменту Neural Network Toolbox в середовищі Matlab побудована нейронна мережа, виконано її навчання та тестування. Наведені результати використання побудованої нейронної мережі для прогнозування динаміки вологості трансформаторного масла протягом десяти днів експлуатації. Розглянута можливість використання результатів прогнозування для розрахунку вологості целюлозної ізоляції силового трансформатора.

Ключові слова: силовий трансформатор, трансформаторне масло, штучні нейронні мережі, целюлозна ізоляція, навчання мережі.

В. В. ВАСИЛЕВСКИЙ, А. О. КАПЛИЕНКО, С. И. ШИЛО

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЛАЖНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Предлагается применение нейронной сети на основе нелинейной авторегрессионной модели с экзогенными входами для прогнозирования влажности трансформаторного масла силовых маслонаполненных трансформаторов. С применением инструмента Neural Network Toolbox в среде Matlab построена нейронная сеть, выполнено ее обучение и тестирование. Приведены результаты использования построенной нейронной сети для прогнозирования динамики влажности трансформаторного масла в течение десяти дней эксплуатации. Рассмотрена возможность использования результатов прогнозирования для расчета влажности целлюлозной изоляции силового трансформатора.

Ключевые слова: силовой трансформатор, трансформаторное масло, искусственные нейронные сети, целлюлозная изоляция, обучение сети.

V. V. VASILEVSKIJ, O. O. KAPLIENKO, S. S. SHYLO

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS TO PREDICT THE MOISTURE CONTENT IN OIL-FILLED POWER TRANSFORMERS INSULATION

Purpose. A promising trend is to use neural networks to predict changes in transformer parameters, such as load, temperature of the hottest point, moisture content in cellulose insulation, parameters of transformer oil, etc. The purpose of the article is to develop a model of the relationship of the transformers oil temperature with the degree of its moisture content using a neural network apparatus. **Methodology.** We have applied, tested and trained a neural network based on nonlinear autoregressive exogenous model. **Results.** Using the Neural Network tool, a neural network was built in the Matlab environment. Training and testing of this network was performed using transformer oil parameters, that changes over four months of operation. Results of forecasting of change transformers oil humidity during 10 days of operation are given. The results of the forecast are compared with the actual values of moisture content in transformers oil. The maximum forecast error is 12 percent. **Originality.** For the first time, we have established the possibility of using neural network based on a nonlinear autoregressive model with exogenous inputs to predict the humidity of transformer oil using the temperature data of the upper and lower layers of the transformer oil. **Practical value.** The built neural network allows to perform humidity prediction of transformer oil based on the temperature of its upper and lower layers. The results of the forecast can be applied to calculate the moisture content of the cellulose insulation of a power oil-filled transformer.

Key words: power transformer, transformer oil, artificial neural networks, cellulose insulation, network training.

Вступ. Актуальність проблеми прогнозування залишкового ресурсу силових маслонаповнених трансформаторів обумовлена критичним старінням трансформаторного парку України та тенденцією до переходу від планово-попереджувальної стратегії технічного обслуговування до технічного обслуговування за станом.

В даний момент широкого поширення знайшло застосування систем неперервного контролю трансформаторного обладнання. За допомогою таких систем накопичені значні обсяги інформації щодо контрольованих параметрів трансформаторів протягом періоду їх експлуатації. Ці дані можуть бути використані з метою підвищення точності прогнозування зміни параметрів трансформатора в майбутньому, зокрема, для навчання та тестування штучних нейронних мереж.

Перспективним напрямком є використання нейронних мереж для прогнозування зміни параметрів трансформатора, які безпосередньо впливають на строк його служби, таких як навантаження, температура найбільш нагрітої точки, вологість целюлозної ізоляції, параметри трансформаторного масла і таке інше.

Аналіз основних досягнень. Згідно з визначен-

ням, наведеним в [1], штучні нейронні мережі – математичні моделі, а також їх програмні або апаратні реалізації, побудовані відповідно до принципів подання та обробки інформації в біологічних нейронних мережах. За характером взаємозв'язків нейронні мережі діляться на мережі прямого поширення і рекурентні мережі (мережі із зворотними зв'язками).

Ряд наукових робіт різних авторів присвячений застосуванню нейронних мереж для прогнозування та ідентифікації параметрів трансформаторного обладнання. Можливість прогнозування температури верхніх шарів трансформаторного масла за допомогою нейронних мереж прямого поширення розглянута в [2], для оптимізації параметрів моделі застосовано алгоритм Левенберга – Марквардта. При навчанні нейронної мережі використані статистичні дані щодо режиму охолодження трансформатора, температури навколишнього середовища, навантаження трансформатора і температури масла в попередні моменти часу.

Робота [3] присвячена розробці нечіткої нейронної мережі для інтерпретації хроматографічного аналізу розчинених в маслі газів, також виконаний аналіз мо-

жливості розпізнавання нейронними мережами дефектів в трансформаторі на ранніх стадіях їх розвитку.

Прогнозування інших параметрів трансформаторного масла, таких як вміст фуранів та ступінь окислення за допомогою штучних нейронних мереж наведено в [4, 5].

Проте, в існуючих роботах не розглянуто можливість застосування нейронних мереж для прогнозування вологовмісту ізоляції трансформатора.

Постановка задачі. Завдання даної роботи полягає в розробці з використанням апарату нейронних мереж моделі взаємозв'язку температури верхніх і нижніх шарів трансформаторного масла зі ступенем його зволоженості.

Модель вологообміну в системі целюлозна ізоляція – трансформаторне масло. Наявність води в целюлозній ізоляції впливає на швидкість її старіння. Так, при вологовмісті 2 % від маси паперу в трансформаторі, швидкість старіння целюлози збільшується в 6–16 разів, а при 4 % – в 12–45 разів (нормальній швидкості старіння відповідає значення вологості 0,3 % [6]). Відомим є метод розрахунку зміни вологості целюлозної ізоляції силових маслонаповнених трансформаторів по вимірній вологості трансформаторного масла.

Згідно цього методу розрахункова вологість целюлозної ізоляції в певний момент часу t визначається з виразу [7]:

$$W_c = A \cdot e^{-B \cdot \Theta_h} \cdot p^{k + a \cdot \Theta_h} \quad (1)$$

де W_c – розрахункова вологість целюлозної ізоляції силового трансформатора, %;

A, B, k, a – емпіричні коефіцієнти;

Θ_h – температура найбільш нагрітої точки ізоляції трансформатора, °C;

p – парціальний тиск парів води, мм рт. ст.

В свою чергу, значення парціального тиску парів води залежить від відносної вологості трансформаторного масла за відповідної температури найбільш нагрітої точки:

$$p = \varphi' \cdot 10^{f_4 \cdot (\Theta_h)} \quad (2)$$

де φ' – відносна вологість масла за температури найбільш нагрітої точки, %.

Наведений вираз визначає зміст вологи в целюлозній ізоляції трансформатора при рівноважному стані системи, який характеризується рівністю температур целюлозної ізоляції, трансформаторного масла та охолодного середовища.

Вимірювання вологості масла під час експлуатації здійснюється пристроями контролю параметрів трансформаторного масла, такими як Calisto (виробництва фірми Morgan Schaffer, Канада) і Hydran M2 (виробництва фірми General Electric), для цього використовуються занурені безпосередньо в масло емнісні тонко-плівкові датчики.

У працюючому трансформаторі відбувається постійна міграція вологи між целюлозою та трансформаторним маслом внаслідок зміни температури при змінній навантаженні та атмосферних умов.

Динаміка зміни вологості в системі целюлозна ізоляція – трансформаторне масло для нерівноважного стану може бути представлена в вигляді моделі, на-

дений на рис. 1 [8]. Модель на рис. 1 являє собою діаграму станів (Statechart Diagram). Стан ЦІ→ТМ описує перенос вологи з целюлозної ізоляції в трансформаторне масло. У стані ТМ→ЦІ відбувається перенос вологи з трансформаторного масла в целюлозну ізоляцію, стан ЦІ=ТМ характеризує рівноважний стан системи і є початковим. Переходи між станами здійснюються з урахуванням співвідношень між парціальними тисками парів води в целюлозній ізоляції (p_{paper}) і трансформаторному маслі (p_{oil}).

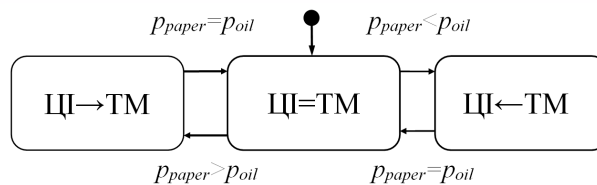


Рис. 1 – Модель вологообміну в системі целюлозна ізоляція – трансформаторне масло

Вхідними даними для моделі (1)-(2) та моделі на рис. 1 можуть служити як значення вологості масла, отримані в результаті прямих вимірювань, так і дані, прогнозовані за допомогою нейронної мережі.

Вибір архітектури та параметрів нейронної мережі. Оскільки дані щодо зміни вологості трансформаторного масла внаслідок зміни теплового режиму трансформатора є часовим рядом, пропонується задіяти мережу на основі нелінійної авторегресійної моделі з екзогенними входами (NARX), яка відноситься до рекурентних нейронних мереж. Відомі два типи архітектури нейронних мереж NARX – послідовно-паралельна та з паралельною. Математична модель мережі NARX із послідовно-паралельною архітектурою має вигляд [9]:

$$\hat{y}(t+1) = f(x(t-1), \dots, (t-d), y(t-1), \dots, (t-d)) \quad (3)$$

де $\hat{y}(t+1)$ – прогнозоване значення y для моменту часу $t = t+1$;

$x(t-1)$ – вхідні дані нейронної мережі;

$y(t-1)$ – фактичні значення вихідних даних нейронної мережі;

d – значення параметру затримки (*number of delays*).

Математична модель нейронної мережі з паралельною архітектурою:

$$\hat{y}(t+1) = f(x(t-1), \dots, (t-d), \hat{y}(t-1), \dots, (t-d)) \quad (4)$$

де $\hat{y}(t-1)$ – прогнозовані значення вихідних даних нейронної мережі.

Мережі типу NARX виконують прогнозування базуючись як на попередніх значеннях незалежних вхідних даних, так і на попередніх значеннях фактичних $y(t-1)$ або прогнозованих $\hat{y}(t-1)$ вихідних даних. При навчанні та тестуванні мережі доцільним є використання послідовно-паралельної архітектури, коли на вхід подаються фактичні попередні значення $y(t-1)$, що дозволяє підвищити точність навчання нейронної мережі.

З метою реалізації нейронної мережі використано інструмент Neural Network Toolbox в середовищі Matlab. Даний програмний засіб дозволяє будувати мережі які складаються з двох шарів, в якості функції активації в першому шарі використовується сигмоїд-

на функція (*sigmoid function*), у другому шарі – лінійна функція (*linear function*). Структура нейронної мережі типу NARX, реалізована в середовищі Matlab наведена на рис. 2.

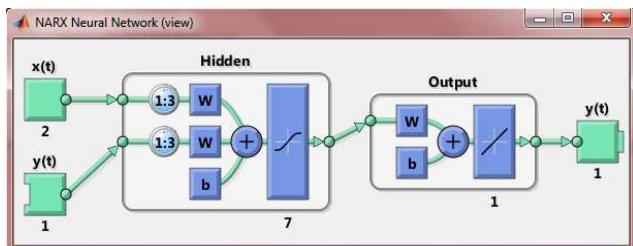


Рис. 2 – Структура мережі NARX з послідовно-паралельною архітектурою в середовищі Matlab

Для навчання та тестування нейронної мережі використані значення наступних параметрів трансформатора:

x_1 – температура верхніх шарів трансформаторного масла, °C;

x_2 – температура нижніх шарів трансформаторного масла, °C;

x_3 – виміряна абсолютна вологість трансформаторного масла, г/т;

x_4 – значення абсолютної вологості трансформаторного масла в момент часу $t=t-1$, г/т.

Вихідним параметром мережі y є прогнозоване значення вологості трансформаторного масла, г/т.

Навчання та тестування нейронної мережі. В табл. 1 наведений фрагмент вибірки вихідних даних, які використані для навчання та тестування побудованої нейронної мережі.

В середовищі Neural Network Toolbox є можливість використання алгоритмів навчання нейронних мереж, це метод нелінійної оптимізації Левенберга – Марквардта (*Levenberg-Marquard*), метод Байєсової регуляризації (*Bayesian Regularization*) та метод сплучених градієнтів (*Scaled Conjugate Gradient*).

Для вирішення поставленого завдання достатню точність і швидкість розрахунку забезпечує метод Левенберга – Марквардта. Значення параметру затримки d (*number of delays*) обрано рівним 3, кількість

нейронів прихованого шару (*number of hidden neurons*) – 7.

Навчання мережі виконано з використанням статистичних даних про зміну температури та вологості трансформаторного масла протягом чотирьох місяців експлуатації. Загальний об'єм вибірки становить 80 000 значень кожного параметру x_n . Кількість циклів навчання склало близько 200 епох. Значення середньоквадратичної похибки розрахунку (MSE), отримане в результаті навчання нейронної мережі дорівнює $4,18 \cdot 10^{-3}$.

Таблиця 1 – Фрагмент даних, що використовуються для навчання та тестування нейронної мережі

Номер вимірювання	Температура верхніх шарів трансформаторного масла, °C	Температура нижніх шарів трансформаторного масла, °C	Значення вологості трансформаторного масла, г/т
1	24,3	-14,5	7,3
2	24,3	-14,6	7,3
3	24,3	-14,7	7,1
4	24,3	-14,8	7,1
5	24,3	-14,8	7,0
6	24,3	-14,8	7,2
7	24,4	-14,8	7,2
8	24,3	-14,8	7,2

Для тестування мережі використаний фрагмент масиву вихідних даних не задіяний у навчанні нейронної мережі, об'єм якого склав 15 % від загального об'єму вибірки (12 000 значень кожного параметру x_n). Величина похибки MSE, отримана в результаті тестування мережі становить $3,25 \cdot 10^{-3}$.

На графіках рис. 3 наведені результати прогнозування зміни вологості трансформаторного масла протягом 10 днів експлуатації, які отримані з використанням побудованої нейронної мережі. Виконано порівняння результатів прогнозу з фактичними значеннями вологості масла. З графіку на рис. 4, видно, що максимальна помилка прогнозу складає до 12 %.

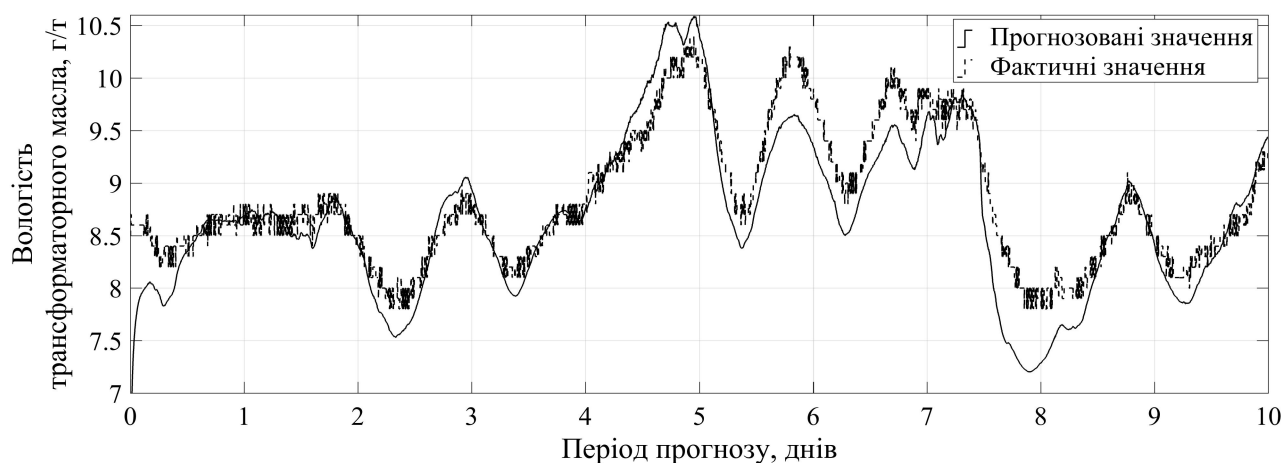


Рис. 3 – Результати прогнозування зміни вологості трансформаторного масла за допомогою побудованої нейронної мережі

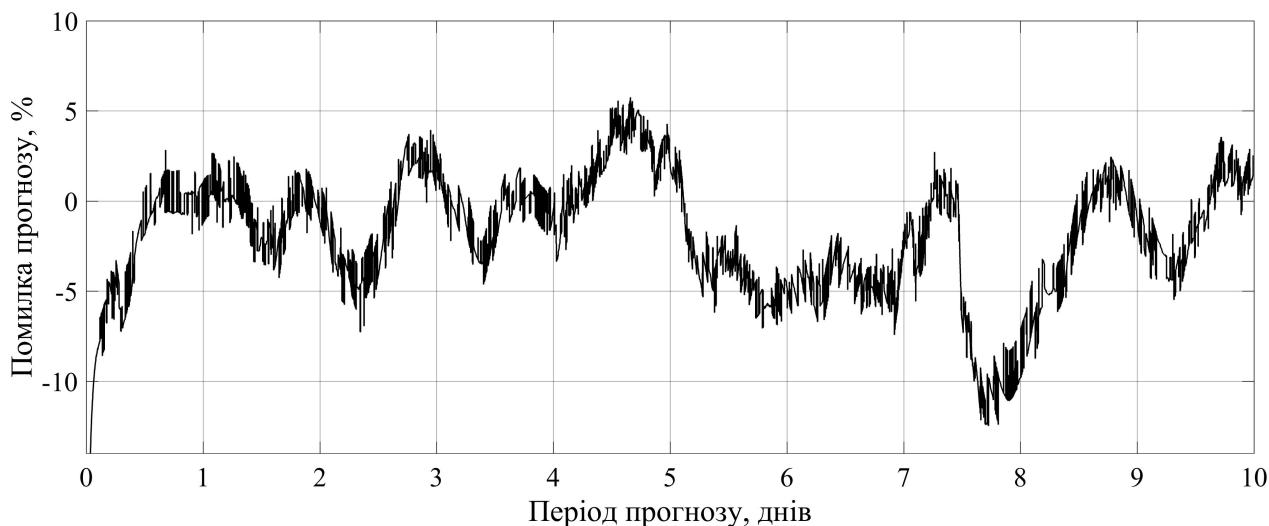


Рис. 4 – Розрахунок помилки прогнозу

Величину помилки прогнозу можна пояснити тим, що при побудові нейронної мережі не враховуються наступні параметри: режим і тип охолодження трансформатора, температура охолодного середовища і таке інше.

Висновки.

1. За допомогою інструменту Neural Network Toolbox в середовищі Matlab побудована нейронна мережа на основі нелінійної авторегресійної моделі з екзогенними входами, виконано навчання та тестування цієї мережі з використаннями даних про зміну параметрів трансформаторного масла протягом чотирьох місяців експлуатації.

2. Отримані результати демонструють можливість застосування апарату нейронних мереж для прогнозування зміни вологості трансформаторного масла силових маслонеповнених трансформаторів.

3. Подальше підвищення точності результатів прогнозування може бути отримано шляхом розробки нечіткої нейронної мережі та розширення вихідних даних для навчання та тестування розробленої мережі.

Список літератури

1. Субботін С. О. Олійник А. О. Нейронні мережі: навч. посіб. // Запоріжжя. ЗНТУ, 2014 г. – 132 с.
2. Конограй С. П. Прогнозирование температуры верхних слоев масла силового трансформаторного оборудования с помощью нейронных сетей // Вісник НТУ "ХПІ". – 2010. – № 55. – С. 43-48.
3. Бондаренко В. Е., Шутенко О. В. Разработка нечеткой нейронной сети для интерпретации результатов анализа растворенных в масле газов // Електротехніка і електромеханіка – 2017. – № 2. – С. 49-56. doi: 10.20998/2074-272X.2017.2.08
4. Шутенко О. В. Прогнозирование значений показателей качества трансформаторного масла с помощью нейро нечеткой системы ANFIS // Світлотехніка та електроенергетика. – 2008. – № 4. – С. 49-56.
5. Sakthivel G., Arun Sankar S. Furan Prediction in Transformer Oil using Artificial Neural Network // International Journal of Computer Applications. – 2013. – № 4. – pp. 18-23.
6. Силовые трансформаторы. Справочная книга / под. ред. С. Д. Лизунова, А. К. Лоханина. М: Энергоиздат, 2004. – 616 с.
7. Мордкович А. Г. Система управления, мониторинга и диагностики трансформаторного оборудования СУМТО // ЭЛЕКТРО.

Електротехніка, електроенергетика, електротехническая промышленность. – 2007. – №6. – С. 23–28.

8. Василевский В. В. Модель динамики влажности в системе "Бумажная изоляция – Трансформаторное масло" в нестационарных тепловых режимах силового трансформатора // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – №13 – С.17 – 20.
9. Boussaada, Zina & Curea, Octavian & Ahmed, Remaci & Camblong, Haritza & Najiba, Mrabet Bellaaj A Nonlinear Autoregressive Exogenous (NARX) Neural Network Model for the Prediction of the Daily Direct Solar Radiation // Energies. – 2018. – Vol.11 – pp 1 – 21. doi: 10.3390/en11030620

References (transliterated)

1. Subbotin S. O. Oliynyk A. O. Neyronni merezhi: navch. posib [Neural Networks: A Tutorial] Moscow, ZNTU, 2014, 132 p.
2. Konogray S. P. Prognozirovanie temperatury verkhnikh sloev masla silovogo transformatornogo oborudovaniya s pomoshch'yu neyronnykh setey [Prediction of the temperature of the upper layers of oil power transformer equipment using neural networks] *Vistnyk NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "KhPI"*, 2010, no. 55, pp. 43-48.
3. Bondarenko V. E., Shutenko O. V. Razrabotka nechetkoy neyronnoy seti dlya interpretatsii rezul'tatov analiza rastvorenykh v masle gazov [Development of fuzzy neural network for the interpretation of the results of dissolved in oil gases analysis] *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no. 2, pp. 50-56. doi: 10.20998/2074-272X.2017.2.08
4. Shutenko O. V. Prognozirovanie znacheniy pokazateley kachestva transformatornogo masla s pomoshch'yu neyro nechetkoy sistemy ANFIS [Forecasting of meanings of parameters of quality transformer oil with the help neural fuzzy system UNFIS] *Svitlotekhnika ta elektroenergetyka – Lighting Engineering & Power Engineering*, 2008, no. 4, pp. 49-56.
5. Sakthivel G., Arun Sankar S. Furan Prediction in Transformer Oil using Artificial Neural Network *International Journal of Computer Applications*, 2013, vol. 4, no. 7, pp. 18-23.
6. Lizunov S. D., Lokhanin A. K. Silovye transformatory. Spravochnaya kniga [Power transformers. Reference book] Zaporizhzhya, Energoizdat, 2004, 616 p.
7. Mordkovich A. G. Sistema upravleniya, monitoringa i diagnostiki transformatornogo oborudovaniya SUMTO [The control system, monitoring and diagnostics of transformer equipment SUMTO] *ELEKTRO. Elektrotekhnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost' – ELECTRO. Electrical engineering, electric power industry, electrical industry*, 2007, no. 6, pp. 23-28.
8. Vasilevskiy V. V. Model' dinamiki vlazhnosti v sisteme "Bumazhnaya izolyatsiya – Transformatornoe maslo" v nestatsionarnykh teplovykh rezhimakh silovogo transformatora [Dynamics model of moisture in paper insulation-transformer oil system in non-stationary thermal modes of the power transformer] *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no. 13, pp. 17-20.

9. Boussaada, Zina & Curea, Octavian & Ahmed, Remaci & Camblong, Haritza & Najiba, Mrabet Bellaaj A Nonlinear Autoregressive Exogenous (NARX) Neural Network Model for the

Prediction of the Daily Direct Solar Radiation *Energies*, 2018, Vol.11, pp 1 – 21. doi: **10.3390/en11030620**

Поступила (received) 16.10.2019

Відомості про авторів /Сведения об авторах / About the Authors

Василевський Володимир Валентинович (Василевский Владимир Валентинович, Vasilevskij Vladimir Valentinovich) – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри електричних та електронних апаратів, Національний університет "Запорізька політехніка", тел. +38 (050) 889-30-73, e-mail: Lisses@ukr.net.

Каплієнко Олександр Олегович (Каплиенко Александр Олегович, Kapliyenko Oleksandr Olehovych) – старший викладач кафедри електричних та електронних апаратів, Національний університет "Запорізька політехніка", тел. +38 (050) 465-02-22, e-mail: alexandr.kaplienko@gmail.com.

Шило Сергій Іванович (Шило Сергей Иванович, Shylo Serhiy Ivanovych) – старший викладач кафедри електричних та електронних апаратів, Національний університет "Запорізька політехніка", тел. +38 (066) 670-51-54, e-mail: sergey.shilo@gmail.com.