

M. DUDZIK<sup>1</sup> (PK), R. MIELNIK<sup>2</sup> (PK), Z.WRÓBEL<sup>3</sup> (PKP PLK S.A.)

<sup>1</sup>Instytut Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Trakcji i Sterowania Ruchem, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155, Kraków, Poland, e-mail: [marekdudzik@pk.edu.pl](mailto:marekdudzik@pk.edu.pl)

<sup>2</sup> Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii, Katedra Diagnostyki Maszyn Elektrycznych, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155, Kraków, Poland, e-mail: [rmiel@pk.edu.pl](mailto:rmiel@pk.edu.pl)

<sup>3</sup>Zakład Linii Kolejowych w Rzeszowie, ul. St. Batorego 26, 35-005, Rzeszów, Poland, e-mail: [zwrobel@prz.edu.pl](mailto:zwrobel@prz.edu.pl)

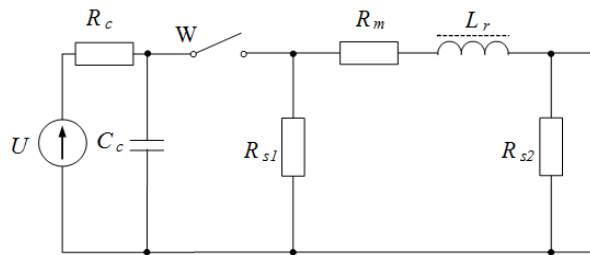
## EFEKTYWNOŚĆ SZTUCZNYCH SIĘCI NEURONOWYCH W MODELOWANIU SYGNAŁU NAPIĘCIA GENERATORA UDARU KOMBINOWANEGO

### Wprowadzenie

Pomiary, wykonywane w warunkach laboratoryjnych, mające na celu sprawdzenie skuteczności działania projektowanych układów ochrony przeciwprzebiegowej są końcowym etapem badań i decydują o dopuszczeniu tych układów do stosowania [12], [13], [15]. Tego typu badania wykonuje się z zastosowaniem między innymi generatora udaru kombinowanego o przebiegu napięciowym 1,2/50 μs,

prądowym 8/20 μs i efektywnej impedancji wyjściowej impedancji 2Ω ± 10%.

Na podstawie dokumentacji generatora oraz normy PN-EN 61000-4 dotyczącej: kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) [10] 5: Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na udary (2014), na rys. 1 przedstawiono schemat zastępczy generatora udaru kombinowanego [9], [10].



Pic. 1. Uproszczony schemat obwodu generatora udaru kombinowanego [9], [10].: U – źródło wysokiego napięcia, CC – kondensator gromadzący energię, RC – rezystancja ładowania; R1, Rs1 i Rs2- rezystory kształtujące czas trwania impulsu, Rm - Rezystor dopasowujący impedancję, Lr – dławik kształtujący czas narastania

### Pomiar sygnału wyjściowego generatora udaru kombinowanego

Dla potrzeb opracowania modelu czasowego sygnału napięcia na wyjściu generatora udaru kombinowanego, przeprowadzono badania eksperymentalne stosując: generator udarowy Haefely PC6-288.1 i filtr Haefely FP 20/3-3.2 [15]. Rejestrację napięć udarów przeprowadzono przy pomocy czterokanałowego oscyloskopu cyfrowego LeCroy LS-140 umożliwiającego rejestrację przebiegów w paśmie częstotliwości do 100MHz, z dokładnością podstawy czasu 0,01 %. Oscyloskop zasilono poprzez transformator separujący typu Tma 630S. Do pomiarów zastosowano sondę LeCroy 6 kV, 50 MΩ, 1000:1.

Błąd pomiaru napięcia sondą wynosił ± 0,1 % dla napięcia stałego i ± 2 % dla napięcia przemiennego o częstotliwości do 100 MHz.

W badaniach charakterystyk układów ochrony przeciwprzebiegowej i ich elementów składowych [15], ważną rolę odgrywa powtarzalność wymuszeń udarowych. W celu sprawdzenia powtarzalności wyników pomiarów, na wstępie wykonano rejestrację dwudziestu pięciu wymuszeń dla każdego udaru napięciowego 1,2/50 μs dla U = 1 kV. Wyniki pomiarów zapisywano w formacie PSPICE®, wybierając ostatecznie ten pakiet jako podstawowe narzędzie obróbki danych. Metodę oznaczania miar odpowiednich przebiegów napięciowych oparto na zależnościach [11]:

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_m(i) \quad (1)$$

$$\sigma_{U_m} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (U_m(i) - \bar{U}_m)^2}{N-1}} \quad (2)$$

$$\sigma_{U_m} = \frac{\sigma_{U_m}}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

gdzie:

$U_m(i)$  - wartość maksymalna kolejnego napięcia pomiaru

$\bar{U}_m$  - wartość średnia wykonanej serii pomiarów.

Wyniki pomiarów udaru napięciowego rejestrowano w przedziałach czasowych  $\Delta t_i = 0,1 \mu s$  (w formacie PSPICE®). Różnice pomiędzy maksymalnymi, mierzonymi wartościami nastawy na generatorze udaru kombinowanego a maksymalną wartością średnią, mieściły się w granicach 1%. Jako wynik końcowy wyznaczono przedział dla wartości:  $\bar{U}_m \pm 2\sigma_{\bar{U}_m}$ . Na podstawie powyższych wyników, a szczególnie niskich wartości odchylenia standardowego na poziomie 0,3% uznano powtarzalność warunków badań.

### Zastowanie sztucznej sieci neuronowej do modelowania sygnału udaru napięciowego z generatora udaru kombinowanego

W badaniach naukowych sztuczne sieci neuronowe znajdują coraz większe zastosowanie [1], [2], [3], [6], [7]. Współcześnie badacze starają się analizować sygnały udaru napięciowego poprzez jego modelowanie oparte o teorię obwodów elektrycznych [4], [12], [14]. Dają one wymierne efekty jednakże prezentowane modele są skomplikowane. Otwiera to drogę badań wykorzystującą sztuczne sieci neuronowych do modelowania wyjściowego sygnału generatora udaru kombinowanego.

Celem przeprowadzonych badań było zamodelowanie funkcji przebiegu czasowego napięcia generatora udaru kombinowanego przy pomocy sztucznych sieci neuronowych. Ma to umożliwić analizę pracy elementów i układów ochrony przeciwprzepięciowej w sieciach neuronowych bez konieczności korzystania z innych programów obliczeniowych.

Obliczenia nad podanym celem zostały przeprowadzone przy następujących ustawieniach:

- maksymalna liczba epok uczenia się: 1000;
- współczynnik błędu treningu sieci: 0;
- współczynnik szybkości uczenia się sieci: 0,01;
- ilość błędnych powtórzeń treningu sieci: 12;
- momentum: 0,9;
- minimalny błąd gradientu treningu sieci: 10-10;
- ilość powtórzeń pomiędzy przedstawieniem wyniku uczenia się sieci: 25;

- maksymalny czas treningu sieci: nieskończoność.

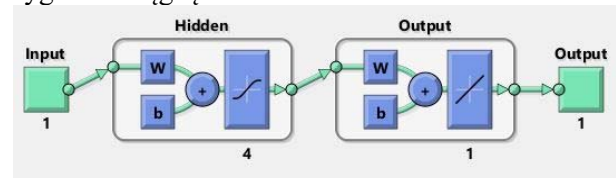
- podział danych treningowych: 70 % trening, 15% walidacja, 15% test.

Do uczenia się sieci neuronowej zastosowano trening sieci jednokierunkowej (do 3 warstw) wg algorytmu Levenberga-Marquardta.

#### 3.1 Dane wejściowe i wyjściowe modelu

Przeprowadzone badania symulacyjne i uzyskane wyniki zostały zrealizowane z wykorzystaniem środowiska Matlab wersji R2011B. Dane do analizy, z wykorzystaniem SSN (Sztucznych sieci neuronowych), zapisano jako dwa wektory po 10000 par liczb. Do przetwarzania danych pomiarowych, wykorzystano sieć neuronową jednowarstwową typu feedforward [1], [3], [6]. Na rysunku 2 pokazano strukturę sieci neuronowej utworzonej w środowisku Simulink. Jest to struktura o jednej warstwie ukrytej (Hidden). Warstwa ta składa się z czterech neuronów. Na wejściu warstwy nie zaimplementowano opóźnień. Funkcją aktywacji w warstwie ukrytej jest funkcja tangensoidalna (tansig). W warstwie wyjściowej (Output) zastosowano liniową funkcję aktywacji.

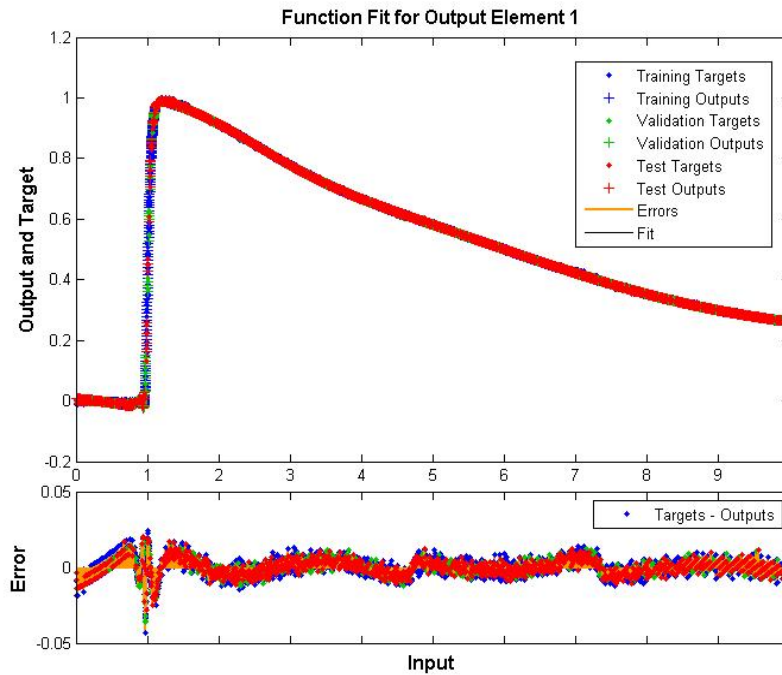
Danymi wejściowymi sieci były próbki (sample) czasu mierzonego sygnału napięcia generatora udaru kombinowanego. Natomiast danymi wyjściowymi były zarejestrowane próbki sygnału napięciowego tego generatora. Przy czym wartości próbek sygnału napięcia zostały wyskalowane w taki sposób, ażeby maksymalna wartość tego sygnału osiągnęła 1.



Pic. 2. . Struktura utworzonej sieci neuronowej. Źródło: opracowanie własne

#### 3.2 Wyniki z przeprowadzanych badań symulacyjnych

Na rysunku 3 przedstawiono wynik aproksymacji otrzymany z procedury uczenia się sztucznej sieci neuronowej. Na rysunku tym kropką oznaczono wartość rzeczywistą uzyskaną z pomiaru (Targets). Krzyżykiem zaznaczono wynik aproksymacji (wartości wyjściowe sieci na zadany sygnał wejściowy). Linie pionowe przedstawiają miarę błędu bezwzględnego pomiędzy wspomnianą wartością rzeczywistą a wynikiem uzyskanym z aproksymacji funkcji. Linia ciągłą zaprezentowano funkcję aproksymującą.



Pic. 3. Wyniki aproksymacji funkcji z wykorzystaniem SSN. Źródło: opracowanie własne

### Podsumowanie

W pracy przedstawiono model czasowego sygnału napięciowego generatora udaru kombinowanego zamodelowanego z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej, typu feedforward o jednej warstwie ukrytej z czterema neuronami. Rezultaty z przeprowadzonych badań na kształtują się poziomem regresji równej 99,9%. Wskazują one, że czasowy sygnał napięciowy generatora udaru kombinowanego może być modelowany przy wykorzystaniu sztucznej inteligencji. Może to posłużyć do stworzenia zupełnie nowej koncepcji związanej ze wspomnianą ochroną, podobnie jak rozwiązania zawarte w patencie [5] i koncepcjach [8].

Autorzy w kolejnych pracach będą podejmować wspomniane analizy wpływu struktury na osiągnięte rezultaty modelowania zjawiska. Początkowo będą to możliwie wszystkie struktury dla jednej warstwy ukrytej.

### REFERENCES

1. I. Chrabąszcz, S. Drapik, M. Dudzik, A. Kaczmarczyk i J. Prusak, „Analiza obciążeń zespołów prostownikowych, dla „inteligentnych” kolejowych podstacji trakcyjnych DC – wstępne badania symulacyjne wybranych przypadków,” *Logistyka 6/2015*, p. 990 – 999.
2. M. Dudzik, D. Łątka, M. Repelewicz, E. Stewarski i A. M. Stręk, „A preliminary feasibility study of a short-term prognosis of mining towers tops’ displacements with the use of artificial neural networks,” *Technical Transactions. Civil Engineering*, 2014.
3. M. Dudzik, S. Drapik i J. Prusak, „Approximation of overloads for a selected tram traction substation

using artificial neural networks,” *Technical Transactions*, pp. 39-50, 2016.

4. G. P. Fotis, I. F. Gonos i I. A. Stathopoulos, „SIMULATION AND EXPERIMENT FOR SURGE IMMUNITY ACCORDING TO EN 61000-4-5,” [Online]. Available: [https://www.atecorp.com/ATECorp/media/pdfs/61000-4-5\\_Abstract.pdf](https://www.atecorp.com/ATECorp/media/pdfs/61000-4-5_Abstract.pdf).

5. A. S. Jagiełło, I. Chrabąszcz, S. Drapik, M. Dudzik, A. Kobielski i J. Prusak, „System do aktywnej regulacji obciążenia zespołów prostownikowych kolejowej podstacji trakcyjnej i sposób aktywnej regulacji obciążenia zespołów prostownikowych kolejowej podstacji trakcyjnej, Numer zgłoszenia: P.411511, Nasz znak: 150102”. Poland 10 03 2015, Zgłaszający: Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki.

6. A. Kobielski, S. Drapik, M. Dudzik i J. Prusak, „Wstępne studium efektywności zastosowania sieci neuronowych w badaniach obciążeń kolejowych podstacji trakcyjnych,” *Technika Transportu Szybowego : TTS*, 2014.

7. A. Malina i M. Dudzik, „WYKORZYSTANIE ALGORYTMÓW SIECI NEURONOWYCH W CELU ZMNIEJSZENIA AMPLITUD WAHAN MOMENTU ELEKTROMAGNETYCZNEGO W METODZIE STEROWANIA WEKTOROWEGO DTC,” *Elektrotechnika w zastosowaniach trakcyjnych : [praca zbiorowa]*, Wydawnictwo PK, 2014.

8. R. Mielnik, „Synteza sterownika układu SZR urządzeń zasilania ruchem kolejowym z wykorzystaniem sieci Petriego oraz środowiska Labview,” *XVII Ogólnopolska Konferencja Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2016, Zakopane*, pp. 379 - 386, 2016.

9. „PC6-288, OPIS OGÓLNY GENERATORA IMPULSÓW UDAROWYCH DUŻEJ ENERGII”.

10. „PN-EN 61000-4: Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 4-5: Metody badań i pomiarów. Badanie odporności na udary,” 2014.

11. „Główny Urząd Miar, Wyrażanie niepewności pomiaru,” *Przewodnik*, © ISO 1995.

12. A. Siwik i Z. Wróbel, „Modelling and Metrological features in overvoltage protection testing efficiency

of lightning arresters applied in the railway feed system". *26th International Conference on Lightning Protection, Poland, Sep. 2002.*

13. Z. Wróbel, „Simulation Possibility of Performance of Avalanche Diode Using a Combination Wave Generator”. *2011 IEEE 20th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 27-30 jun 2011, Gdańsk.*

Received 07.03.2017.

Internal reviewer *Getman G. K.*

14. Z. Wróbel, „Possibility of the modelling of combination waves generators,” *Przegląd Elektrotechniczny PL, ISSN 0033-2097, R. 86 NR 9/2010, 289-292.*

15. Z. Wróbel, „Analiza układów ochrony przeciwprzepięciowej urządzeń sterowania ruchem kolejowym”. *Rozprawa Doktorska, AGH Kraków, 2002.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*

W artykule przedstawiono model generatora udaru kombinowanego w sieciach neuronowych dla potrzeb analizy pracy elementów i układów ochrony przeciwprzepięciowej. Jest to model typu feedforward o jednej warstwie ukrytej z czterema neuronami. Struktura ta przy wykorzystaniu algorytmu Levenberga-Marquardta umożliwia osiągnięcie wysokiej efektywności, nawet w przypadku braku algorytmu optymalizacji struktury sieci. Opracowany model udaru napięciowego siecią neuronową daje możliwość zastąpienia modelu matematycznego generatora. Podejście to umożliwia efektywne wykonywanie obliczeń symulacyjnych skutków przepięć pochodzenia atmosferycznego działających na układy ochrony przeciwprzepięciowych urządzeń elektrycznych.

**Keywords:** generator udaru kombinowanego; modelowanie; sztuczne sieci neuronowe.

### УДК 621.331.3

М. ДУДЗИК (КП)<sup>1</sup>, Р. МІЄЛНІК<sup>2</sup> (ПК), З. ВРУБЕЛ<sup>3</sup> (ПЗЛ С.А.)

<sup>1</sup> Інститут електротехніки та інформатика, факультет управління дорожнього руху та шляхів, Краківський технологічний університет, вул. Варшавська 24, 31-155, Краків, Польща, ел. пошта: marekdudzik@pk.edu.pl

<sup>2</sup> Інститут електромеханічного перетворення енергії, Департамент з електротехніки та технічної діагностики, Краківський технологічний університет, вул. Warszawska 24, 31-155, Краків, Польща, ел. пошта: rmiel@pk.edu.pl

<sup>3</sup>Залізничні лінії в м. Жешув, вул. Св. Баторії 26, 35-005, Жешув, Польща, ел. пошта: zwrobel@prz.edu.pl

## ЕФЕКТИВНІСТЬ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ГЕНЕРАТОРА СИГНАЛУ НАПРУГИ КОМБІНОВАНОГО ХОДУ

Дана стаття представляє побудову моделі часу напруги сигналу генератора поєднання хвиль з використанням нейронних мереж. Обговорювана модель напруги була розроблена з використанням просторових нейронних мереж «feedforward» з одним прихованим шаром з чотирма нейронами. Результати порівняльних випробувань показують високу ефективність алгоритму Левенберга-Маркардта, що використовується в розробленій моделі. Представлена у статті модель генератора поєднання хвиль, описаний в нейронній мережі, може замінити традиційну математичну модель такого генератора

**Ключові слова:** генератор комбінованого ходу; моделювання; штучні нейронні мережі.

Внутрішній рецензент *Гетьман Г. К.*

Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

### УДК 621.331.3

М. ДУДЗИК (КП)<sup>1</sup>, Р. МИЕЛНИК<sup>2</sup> (ПК), З.ВРУБЕЛ<sup>3</sup> (ПЖЛ С.А.)

<sup>1</sup>Институт электротехники и информатика, факультет управления дорожного движения и пути, Краковский технологический университет, ул. Варшавская 24, 31-155, Краков, Польша, эл. почта: marekdudzik@pk.edu.pl

<sup>2</sup> Институт электромеханического преобразования энергии, Департамент по электротехнике и технической диагностики, Краковский технологический университет, ул. Варшавская 24, 31-155, Краков, Польша, эл. почта: rmiel@pk.edu.pl

<sup>3</sup>Железнодорожные линии в г. Жешув, ул. Св. Батории 26, 35-005, Жешув, Польша, эл. почта: zwrobel@prz.edu.pl

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕНЕРАТОРА СИГНАЛА НАПРЯЖЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ХОДА

В настоящей работе представлено построение модели сигнала во времени генератора комбинационных волн с использованием нейронных сетей. Рассматриваемая модель была разработана с использованием «feedforward» нейронных сетей с одним скрытым слоем с четырьмя нейронами. Результаты сравнительных испытаний показывают высокую эффективность алгоритма Левенберга-Марквардта, используемого в разработанной модели. Представленная в статье модель генератора комбинационных волн, описанная в нейронной сети, может заменить традиционную математическую модель такого генератора.

**Ключевые слова:** генератор комбинированного хода; моделирование; искусственные нейронные сети.

Внутренний рецензент *Гетьман Г. К.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*