

**Małgorzata KUŹNAR**

Politechnika Krakowska, Instytut Pojazdów Szynowych  
al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków  
E-mail: malgorzata.kuznar@mech.pk.edu.pl

## **Zastosowanie SSN do predykcji zużycia węglowych nakładek odbieraka prądu**

### **1 Wstęp**

Odbierak prądu, potocznie zwany pantografem, służy do odbioru prądu z sieci trakcyjnej w celu zasilenia pojazdu trakcyjnego. Ze względu na to, iż jest to element bezpośrednio współpracujący z siecią jezdnią, narażony jest na zużycie eksploatacyjne oraz różnego rodzaju uszkodzenia, które mogą powstać podczas procesu użytkowania.

W kolejnictwie często występującym problemem jest ustalenie przyczyny uszkodzenia odbieraka prądu. Jest to problem istotny ze względu na to, iż za stan sieci trakcyjnej odpowiada zarządca infrastruktury kolejowej, natomiast za stan odbieraka prądu odpowiada przewoźnik. W przypadku uszkodzenia sieci spowodowanej złym stanem technicznym odbieraka prądu koszty naprawy musi ponieść przewoźnik kolejowy. W przypadku, gdy do uszkodzenia dochodzi z powodu niewłaściwego stanu sieci trakcyjnej, koszty leżą po stronie zarządcy infrastruktury. Obecnie w przypadku tego rodzaju zdarzeń zwoływana jest komisja, której celem jest stwierdzenie przyczyny uszkodzenia odbieraka prądu oraz sieci trakcyjnej. W wielu przypadkach jest to temat sporów spowodowany brakiem metod pozwalających na jednoznaczną ocenę przyczyny uszkodzenia odbieraka prądu.

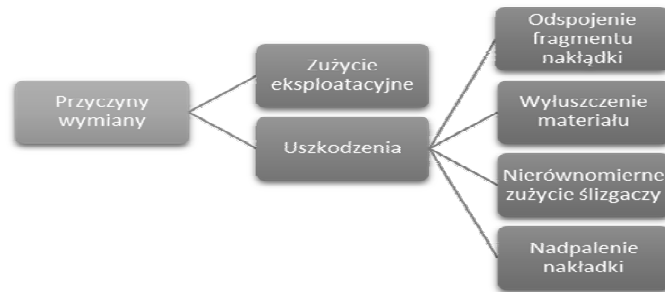
Węglowa nakładka ślizgowa, stanowiąca element bezpośredniej współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną, narażona jest na największe zużycie eksploatacyjne. Przyczyną wymiany nakładek stykowych, poza wspomnianym zużyciem, może być uszkodzenie powierzchni nakładki. Mając dane dotyczące parametrów eksploatacyjnych, m.in. takich jak stopień zużycia nakładki węglowej czy siła docisku ślizgacza do sieci trakcyjnej, oraz danych dotyczących przyczyny wymiany nakładki stykowej oraz odbieraka prądu możliwe byłoby wnioskowanie przyczyny uszkodzenia zarówno nakładki ślizgowej, jak i całego odbieraka.

W niniejszym artykule zestawiono najczęstsze przyczyny wymiany węglowych nakładek stykowych odbieraka prądu z potencjalnymi przyczynami ich uszkodzenia. Zidentyfikowano skalę problemu na podstawie danych z kart pomiarowych odbieraków prądu. Przeanalizowano ponad 1500 pomiarów dotyczących 62 lokomotyw typu EP09 oraz EU07. Odpowiednio przygotowane dane z kart pomiarowych posłużyły jako dane uczące sztuczną sieć neuronową, którą stworzono w celu predykcji stopnia zużycia węglowych nakładek stykowych.

### **2 Przyczyny wymiany oraz uszkodzenia nakładek stykowych**

Liczne prace naukowe dotyczą problemu interakcji pomiędzy siecią trakcyjną a odbierakiem prądu [1]-[10]. W celu utrzymania styku ślizgacza z siecią jezdnią

niezbędne jest utrzymanie odpowiedniej siły nacisku odbieraka prądu. W przypadku zbyt dużej siły powstają mogą uszkodzenia mechaniczne zarówno odbieraka prądu, jak i sieci trakcyjnej, natomiast w przypadku zbyt niskiej siły docisku wytwarzany jest łuk elektryczny, który powoduje nadpalenie, a zatem nadmierne zużycie nakładek węglowych ślizgacza.



Rys.1. Przyczyny wymiany nakładki ślizgowej odbieraka prądu

Fig. 1. Reasons for replacing the current collector contact strip

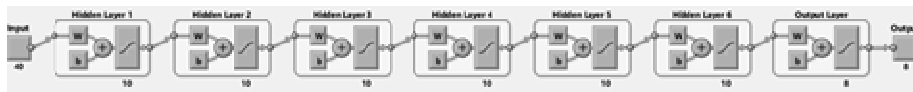
W trakcie użytkowania odbieraka prądu dochodzi do ścierania węglowej nakładki stykowej. W przypadku, gdy grubość nakładki jest mniejsza niż założone w karcie pomiarowej wartości, należy nakładkę wymienić na nową. W praktyce nakładki wymieniane są nieco wcześniej w celu eliminacji sytuacji nadmiernego zużycia nakładki, która mogłaby spowodować bardziej kosztowne uszkodzenia odbieraka prądu i sieci trakcyjnej. Niemniej jednak w sytuacji, gdy nakładka wymieniana jest bez wyraźnych oznak uszkodzenia, mówimy, że przyczyną wymiany nakładki jest zużycie eksploatacyjne. W innym przypadku przyczyną wymiany są różnego rodzaju uszkodzenia. Do najczęściej występujących uszkodzeń nakładek węglowych zaliczyć możemy pęknięcia nakładki, odspojenie fragmentu nakładki, wyluszczenie materiału, nierównomierne zużycie nakładek ślizgacza czy nadpalenie nakładki. Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe przyczyny wymiany nakładki ślizgowej odbieraka prądu.

Każda z przyczyn wymiany spowodowana jest innym uszkodzeniem. Defekty powstałe podczas projektowania oraz wytwarzania nakładki ujawnić się mogą w trakcie użytkowania w postaci odspojenia fragmentu nakładki czy też wyluszczenia spowodowanego wadą materiału. Jak podaje literatura [11, 12], odspojenie nakładki może nastąpić na skutek nadmiernego zużycia eksploatacyjnego czy też uderzenia w przeszkodę usytuowaną na sieci jezdnej (np. w niewłaściwie zamontowany izolator sekcyjny, elementy wieszaka, lód czy elementy otoczenia zewnętrznego, jak gałęzie drzew). Przyczyną nierównomiernego zużycia ślizgacza może być niewłaściwe zamontowanie nakładek węglowych w ślizgaczu bądź też niewłaściwe utrzymanie stanu technicznego mechanizmu docisku ślizgacza do sieci jezdnej. Przyczyną natomiast nadpalenia węglowej nakładki jest łuk elektryczny, który powstawać może w złych warunkach atmosferycznych (opady deszczu, śniegu, oblodzenie sieci trakcyjnej), a także przy zbyt małym docisku ślizgacza do sieci jezdnej [12].

Obecnie karta pomiarowa odbieraków prądu nie uwzględnia między innymi takich informacji jak przyczyna wymiany nakładki stykowej oraz wymiany całego odbieraka prądu, co stanowi problem podczas wnioskowania o potencjalnych przyczynach ich uszkodzenia. Nie mając takich danych, na podstawie stopnia zużycia węglowych nakładek stykowych możliwe jest jednak stworzenie odpowiednich charakterystyk umożliwiających ocenę potencjalnych przyczyn wymiany węglowych nakładek stykowych.

### 3 Symulacja zużycia węglowych nakładek stykowych

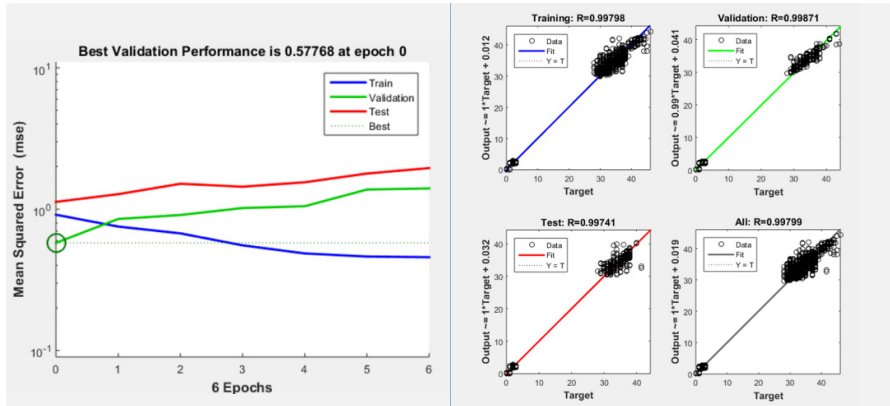
W celu predykcji zużycia węglowych nakładek stykowych odpowiednio przygotowane dane z kart pomiarowych odbieraków prądu posłużyły jako dane uczące sztuczną sieć neuronową. Zastosowano sieć typu Feed-Forward z propagacją wsteczną, zawierającą 6 warstw ukrytych po 10 neuronów w każdej warstwie. Użyto tangensoidalnej funkcji aktywacji oraz algorytmu uczącego Lavenberga-Marqardta. Powyższą strukturę sieci wybrano spośród 10 innych struktur na podstawie najmniejszego błędu średniokwadratowego. Strukturę sieci zaprezentowano na rysunku 2, natomiast wyniki z procesu uczenia przestawiono na rysunkach 3 i 4.



Rys.2. Struktura sztucznej sieci neuronowej

Fig. 2. Structure of an artificial neural network

Analizie poddano dane z 62 różnych lokomotyw, co stanowiło 1537 pomiarów. Pomiaru dokonywano w odstępie miesięcznym i dotyczyły numeru lokomotywy, typu odbieraka prądu, stopnia zużycia nakładki ślizgowej oraz numeru odbieraka. Na podstawie danych z kart pomiarowych przygotowano 733 przypadki uczące zawierające dane z pięciu ostatnich pomiarów – dane z przeglądów P2 z pięciu kolejnych miesięcy (input) oraz pomiary z szóstego miesiąca, które stanowiły wartości docelowe (target). Do symulacji użyto 186 oddzielnie przygotowanych przypadków zawierających dane z pięciu kolejnych miesięcy.



Rys.3. Najmniejszy błąd średniokwadratowy oraz proste regresji  
 Fig. 3. Minimum mean square error and regression plot

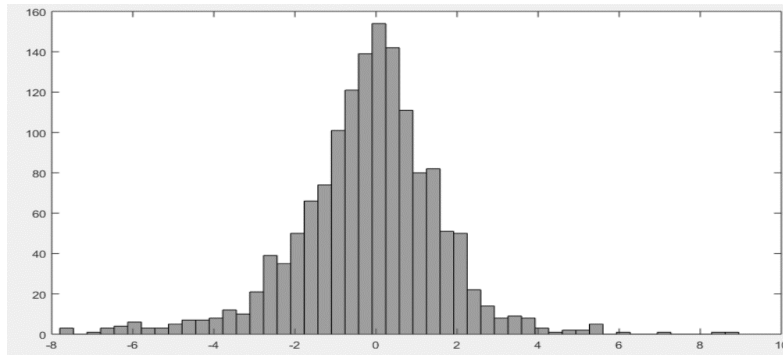
Z wykresów przedstawiających prostą regresji (rys.3) wnioskować można o jakości aproksymacji. W przypadku bezbłędnego odtworzenia przez sieć aproksymowanej funkcji punkty powinny układać się na prostej:

$$O = \alpha * T + \beta, \tag{1}$$

gdzie:

O – dane wyjściowe (output); T – wartości docelowe (target);  $\alpha$  – współczynnik kierunkowy prostej (im bliższy 1 tym funkcja aproksymacji lepiej dopasowana);  $\beta$  – współczynnik przesunięcia.

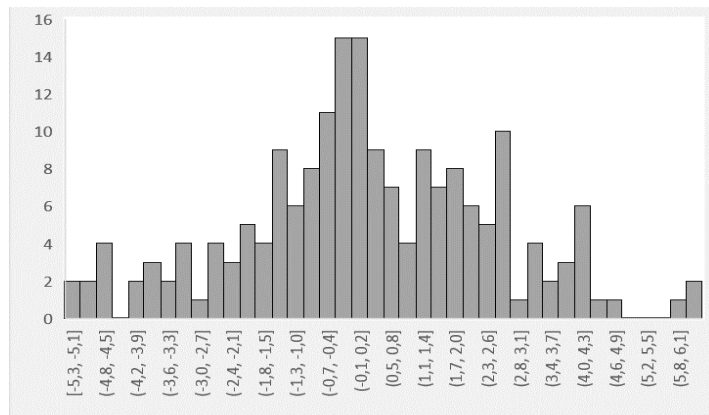
Na załączonych wykresach widoczne jest, że wartości danych wyjściowych (output) w dużym stopniu odpowiadają wartościom docelowym (target). Dla treningu wartość współczynnika  $\beta$  wyniosła 0,012, dla walidacji  $\beta=0,041$ , natomiast podczas testowania  $\beta=0,032$ .



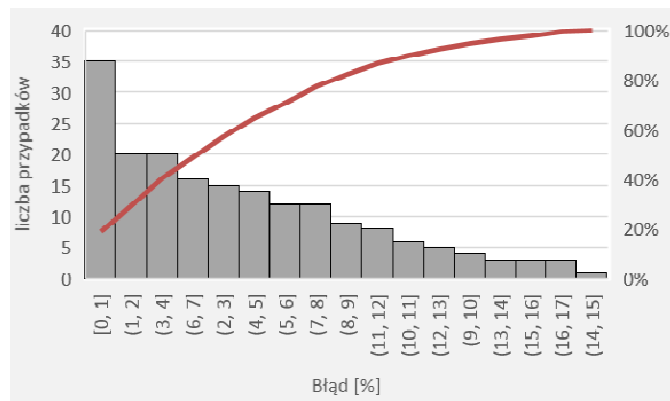
Rys.4. Histogram błędów dla procesu uczenia SSN  
 Fig. 4. Histogram of errors for the ANN learning process

#### 4 Wyniki

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono wyniki symulacji zużycia węglowych nakładek stykowych. Jak wynika z histogramu różnicy pomiędzy wynikami z symulacji a danymi rzeczywistymi, stwierdzić można, iż jest zbliżona liczba wyników niedoszacowanych (180), jak i przeszacowanych (192). Z wykresu Pareto-Lorentza (rys. 6) odczytać można, iż dla 90% zasymulowanych przypadków różnica pomiędzy wartością rzeczywistą nie przekracza 12%. Nieco poniżej 20% otrzymanych wyników mieści się w przedziale błędu od 0 do 1%. Na podstawie zaprezentowanych wyników wnioskować można, iż stworzona sieć neuronowa w satysfakcjonujący sposób umożliwia predykcje zużycia węglowych nakładek stykowych odbieraka prądu.



Rys.5. Histogram różnicy pomiędzy wynikami z symulacji a danymi rzeczywistymi  
Fig. 5. Histogram of the difference between simulation results and real data



Rys.6. Wykres Pareto-Lorentza błędu procentowego  
Fig. 6. Pareto-Lorentz graph of percent error

## 5 Wnioski

Z przeprowadzonych symulacji wynika, iż zastosowanie sztucznej sieci neuronowej typu Feed-Forward z propagacją wsteczną zawierającą 6 warstw ukrytych po 10 neuronów w każdej warstwie daje satysfakcjonujące wyniki dotyczące symulacji zużycia węglowych nakładek ślizgowych. Dzięki zastosowaniu powyższej metody możliwa byłaby częściowa analiza danych archiwalnych, umożliwiającą identyfikację oraz wykluczenie poszczególnych przyczyn wymiany węglowej nakładki stykowej odbieraka prądu.

## Literatura

1. Abdullah M., Michitsuji Y, Nagai M.: Integrated simulation between flexible body of catenary and active control pantograph for contact force variation control, *Journal of Mechanical*, 2010
2. Abdullah M., Michitsuji Y, Nagai M.: Analysis of contact force variation between contact wire and pantograph based on multibody dynamics, *Journal of Mechanical*, 2010
3. Aboshi M.: Precise measurement and estimation method for overhead contact line unevenness, *IEEJ Transactions on Industry Applications*, 2004
4. Aboshi M., Manabe K.: Analyses of contact force fluctuation between catenary and pantograph, *Quarterly Report of RTRI*, 2000
5. Allotta B., Pugi L., Bartolini F.: An active suspension system for railway pantographs: the T2006 prototype, *Engineers, Part F: Journal of Rail*, 2009
6. Allotta B., Pugi L., Rindi A., Papi M.: Innovative solutions for active railway pantograph, *WIT Transactions on The*, 2002
7. Chater E., Ghani D., Giri F., Haloua M.: Output feedback control of pantograph–catenary system with adaptive estimation of catenary parameters, *Journal of Modern Transportation*, 2015
8. Gostling R. J., Hobbs A. E. W.: The interaction of pantograph and overhead equipment: practical applications of a new theoretical method, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 197, no. 1, pp. 61–69, 1983
9. Judek S., Karwowski K., Mizan M.: Diagnostyka i monitoring odbioru prądu z sieci trakcyjnej, *Pojazdy Szynowe*, 2011
10. Stichel S.: Active Control of the Pantograph-Catenary Interaction in a Finite Element Model, 2013
11. Sitarz M., Adamiec A., Mańka A.: Uszkodzenia węglowych nakładek stykowych pantografów kolejowych stosowanych w Polsce, *TTS Technika Transportu Szynowego*, 2016
12. Majewski W.: Zastosowania nakładek węglowych w odbierakach prądu, *Prezentacja Instytutu Kolejnictwa*

## Streszczenie

Odbieraki prądu w pojeździe trakcyjnym służą do poboru prądu z sieci trakcyjnej. Elementem mającym bezpośredni kontakt z przewodem jezdny jest ślizgacz, a dokładniej węglowa nakładka stykowa, narażona zarówno na zużycie eksploatacyjne, jak i różnego rodzaju uszkodzenia związane z użytkowaniem. Jest elementem odbieraka najczęściej wymienianym. W celu ustalenia przyczyny uszkodzenia nakładki konieczna jest znajomość typu uszkodzenia. Przyczyna wymiany nakładki wnioskowana może być na podstawie charakterystyki zużycia węglowych nakładek stykowych. W celu predykcji zużycia węglowych nakładek stykowych zastosowano Sztuczną Sieć Neuronową typu Feed-Forward z propagacją wsteczną o 6 warstwach ukrytych po 10 neuronów w każdej warstwie. Błąd średniokwadratowy dla procesu uczenia sieci wyniósł 0,578, a wyniki dotyczące predykcji zużycia nakładki przedstawiono w artykule.

**Słowa kluczowe:** odbierak prądu, pantograf, węglowa nakładka ślizgowa, diagnostyka, predykcja zużycia, sztuczne sieci neuronowe, SSN

## Application of artificial neural networks for prediction of pantograph carbon strips wear

### Summary

In the traction vehicles, current consumption from the overhead contact line is possible thanks to the current collectors (pantographs). An element that has a direct contact with the contact wire is a slide plate, and more specifically, a carbon contact strips. Affected by both operational wear and various types of damage related to operational maintenance, carbon strip is the element which most commonly need to be exchanged. To determine the cause of damage to the contact strip, it is necessary to know the type of damage. The reason for replacing the carbon contact strip may be claimed on the basis of the wear characteristics. In order to predict the wear of carbon strip, a Feed-Forward Artificial Neural Network with backward propagation of 6 hidden layers and 10 neurons in each layer was applied. The mean square error for the network learning process was 0.578, and the results for the pantograph contact strip wear were presented in the article.

**Keywords:** current collector, pantograph, carbon sliding strip, diagnostics, wear prediction, artificial neural networks, ANN

