

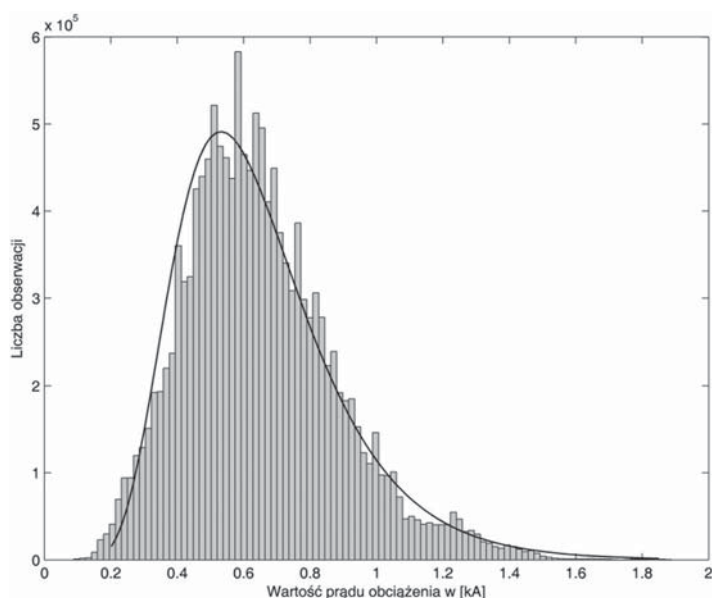
Andrzej Kobielski, Sławomir Drapik, Marek Dudzik, Janusz Prusak

Finalna ocena efektywności metody szeregów czasowych w badaniach kolejowych podstacji trakcyjnych

Charakter obciążeń trakcyjnych zależy od wielu czynników [1, 7, 13], dlatego też od kilku lat analizowano wyniki pomiarów, które były przeprowadzone na trzech kolejowych podstacjach trakcyjnych. Część uzyskanych wyników była już prezentowana w artykułach i referatach konferencyjnych [2–7, 9, 11–12]. Zwracano uwagę na to, że podstacje te współpracowały ze sobą zasilając równoległe węzeł komunikacyjny wielkiej aglomeracji. Stąd wynikała specyfika ich obciążeń objawiająca się pewnym zauważalnym podobieństwem. Ponadto pomiary obciążeń trakcyjnych były realizowane w cyklu jednodobowym, co dla warunków kolejowych jest odcinkiem czasowym raczej krótkim. Ponadto autorzy nie mieli możliwości powtarzania pomiarów. Ograniczony czas i zakres pomiarów spowodowany był względami finansowymi i organizacyjnymi.

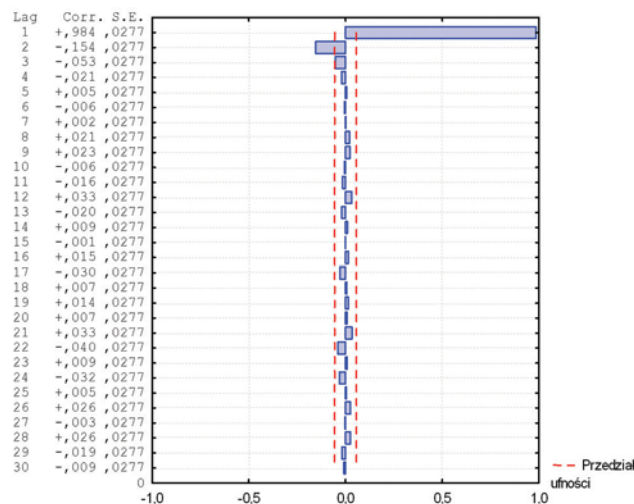
We wstępnej fazie analizy wyników pomiarów wykorzystano klasyczne metody statystyki matematycznej określając typ rozkładów prawdopodobieństwa obciążeń i ich parametrów statystycznych. W wyniku podjętych analiz stwierdzono, że obciążenia te dają się opisać rozkładem logarytmiczno-normalnym [6], co przedstawiono na rysunku 1.

Następnie podjęto próbę wykorzystania szeregów czasowych do budowy modeli czasowych. W wyniku szacowania typu mode-



Rys. 1. Empiryczny i teoretyczny logarytmiczno-normalny rozkład wyników pomiarów obciążenia postacji Batowice (szczyt poranny, godz. 6.00–8.00) [6]

li i ich parametrów uznano, że najbardziej odpowiednim modelem jest model autoregresji nieprzekraczającej rzędu 2. AR(2) [4].



Rys. 2. Funkcja autokorelacji cząstkowej obciążenia podstacji trakcyjnej Batowice (szczyt poranny, godz. 6.00–8.00) [4]

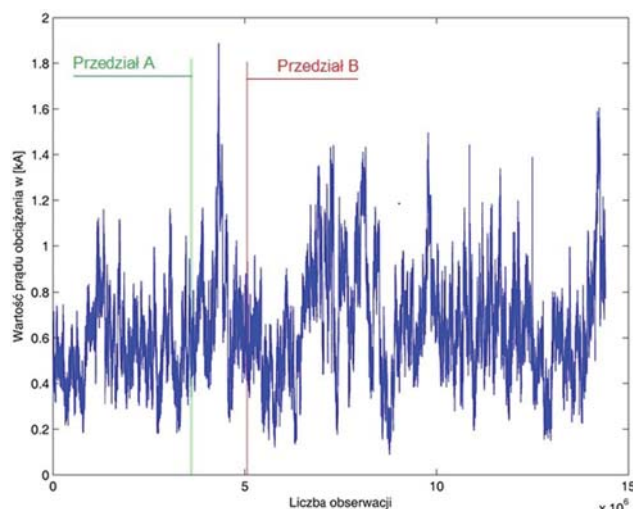
Brane pod uwagę modele różnią się w pewnym zakresie dla analizowanych trzech podstacji trakcyjnych. Jedną z możliwych przyczyn tego stanu są algorytmy (sposoby) „odchudzania” (czyli zmniejszania częstotliwości) oryginalnych wyników pomiarowych (rejestranych z częstotliwością 2 kHz). Dla 24 godzin cyklu pomiarowego dawało to $1,728 \times 10^8$ chwilowych wartości ciągu pomiarowego. Procedura „odchudzania” pomiarów analizowanych w skali makro wynikała z konieczności redukcji liczby wyników w jednostce czasu, ze względów sprzętowych i programowych, branych do analizy wyników, w ujęciu szeregów czasowych.

W związku ze wspomnianymi problemami podjęto kolejną próbę zastosowania, wykorzystanych już uprzednio, metod analizy w tzw. mikroskali – czyli na oryginalnych wartościach pomiarowych (2 kHz), bez „odchudzania”, ale realizowanych dla znacznie krótszych czasów próbkowania.

Na rysunku 3 przedstawiono przebieg zmienności obciążenia kolejowej podstacji trakcyjnej Batowice podczas 2-godzinnej szczytu porannego ($1,44 \times 10^6$ rejestranych punktów pomiarowych). Przebieg był mierzony z częstotliwością 2 kHz – i w tej postaci jest przedstawiony. Pionowe linie zaznaczone na tym rysunku są początkami dwóch przedziałów czasowych A i B (wybranych losowo), długości 2000 punktów pomiarowych. Odpowiada to przedziałowi czasowemu 1 s, który jest zalecany przez normę PN-EN-E-50163:1995 jako przedział, w którym uśredniana jest

wartość np. mierzonego obciążenia trakcyjnego. Przedziały te (A i B) odległe są od siebie o 12 min 4 s.

Dla przedziałów, zaznaczonych na rysunku 3, w dalszej kolejności wykonano wykresy przebiegów obciążeń trakcyjnych i odpowiadających im charakterystyk korelacyjnych (rys. 6–13).



Rys. 3. Przebieg zmienności obciążenia kolejowej podstacji trakcyjnej Bato-wice podczas 2-godzinowego szczytu porannego (godz. 6.00–8.00) [4]

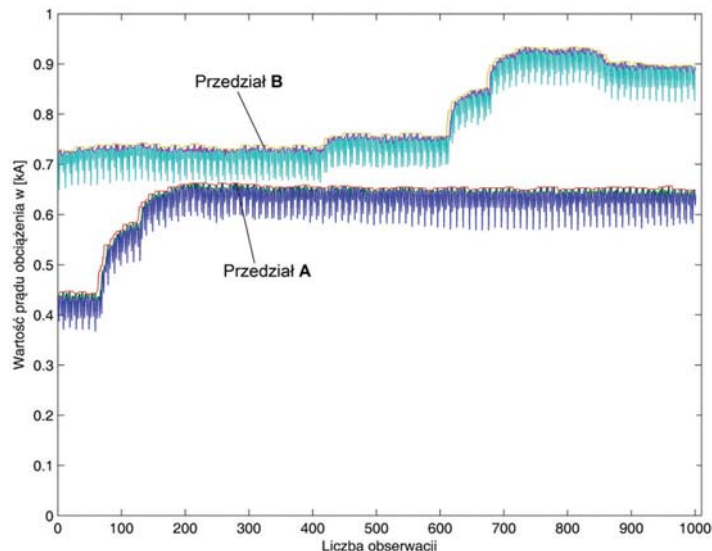
W przedziałach tych (A i B) wyseparowano ciągi wartości wierzchołkowych (widocznych w postaci specyficznych pasm), których przebiegi przedstawiono na rysunku 4. Ciągi wartości „wierzchołkowych” to zbiory górnych wartości górnych obwiedni wartości pomiarowych. Stąd na rysunku 4 ciągi te składają się z 1000 punktów pomiarowych każdy. Do celów porównawczych przedstawiono je tak, jak gdyby trwały jednocześnie. Dzięki temu widać wyraźnie istotną różnicę w charakterze zmienności tych przebiegów, + jak również to, że są to przebiegi dla różnych obciążeń.

Wartości wierzchołkowe z przebiegu rzeczywistego obciążenia (rys. 3) mają ważniejsze znaczenie dla termicznych warunków pracy urządzeń zasilających niż pozostałe niższe wartości. Stąd też te wyższe wartości zostały wybrane jako przedmiot przedstawionych analiz.

Dodatkowo sprawdzono dla tych przebiegów (wierzchołkowych i przekształconych) ich wartości średnie i skuteczne. Nie zauważono istotnych zmian tych wartości między sobą dla poszczególnych wariantów analizowanych przebiegów. Wartości średnia i skuteczna prądu dla przebiegu wierzchołkowego i przekształconego różnią się maksymalnie o 3,9%. Tak więc przebiegi przekształcone mogły być traktowane jako ekwiwalentne w stosunku do wyjściowego (wierzchołkowego).

W pierwszym stopniu przekształcenia ciągu wartości wierzchołkowych założono poszukiwanie maksymalnych i minimalnych zakresów dla uzyskanej obserwacji 1-sekundowej w przedziale $(i-1, i, i+1)$, gdzie i jest indeksem kolejnego punktu obserwacji (pomiaru). Pierwszy i ostatni pomiar odpowiada maksymalnej wartości trzech najbliższych próbek.

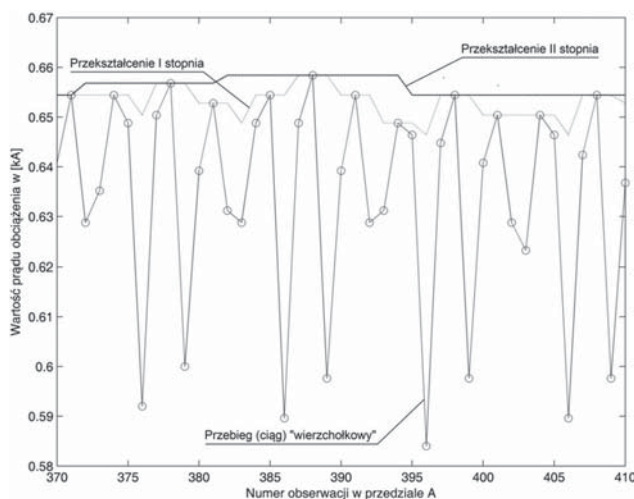
Nowy ciąg wartości x_i w pierwszym stopniu uproszczenia został wygenerowany poprzez kolejny wybór wartości największej ze zbioru trzech kolejnych wartości wierzchołkowych. Proces ten odbywa się krocząco co 1 punkt pomiarowy (co 0,5 ms). W syn-



Rys. 4. Przebiegi ciągów wyjściowych i przekształconych obciążeń trakcyjnych w przedziałach A i B

tetycznym zapisie można to ująć jako: $x_i = x_{\max} = \max\{x_{i-1}, x_i, x_{i+1}\}$, gdzie $i \in \langle 1, 1000 \rangle$.

Natomiast drugi stopień przekształcenia (ciąg wartości y_i) polegał na wykorzystaniu analogicznej procedury, jak w stopniu pierwszym. W drugim stopniu przekształcenia założono poszukiwanie maksymalnych i minimalnych zakresów dla uzyskanych wartości po przetworzeniu pierwszego stopnia w zakresie N kolejnych wartości ciągu wygenerowanego w pierwszym stopniu przekształcenia. Wartość N można zmieniać, dzięki czemu uzyskujemy maksymalne lub minimalne pasmo odniesienia w stosunku do wartości zaobserwowanych. Do celów opisanej analizy przebiegów przyjęto $N = 5$. Ilustrację opisanej procedury przedstawiono poglądowo na rysunku 5.

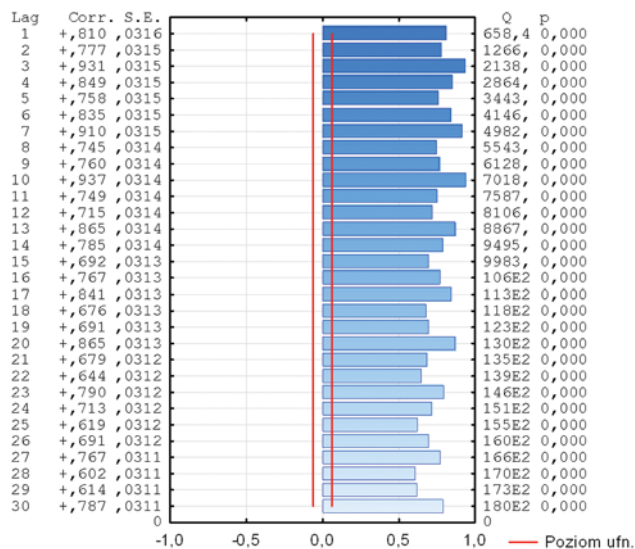


Rys. 5. Poglądowe przedstawienie procedury przekształcania wyników pomiarowych (opis w tekście)

Wyniki analizy przebiegów wierzchołkowych i przekształconych

Otrzymane przebiegi (ciągi pomiarowe) wierzchołkowe i przekształcone w przedziałach A i B poddano podstawowym procedurom teorii szeregów czasowych, jakimi są funkcje autokorelacji i autokorelacji cząstkowej.

Opis matematyczny funkcji autokorelacji i autokorelacji cząstkowej szeregów czasowych przytoczono w [2, 3].



Rys. 6. Funkcja autokorelacji przebiegu wierzchołkowego w przedziale A

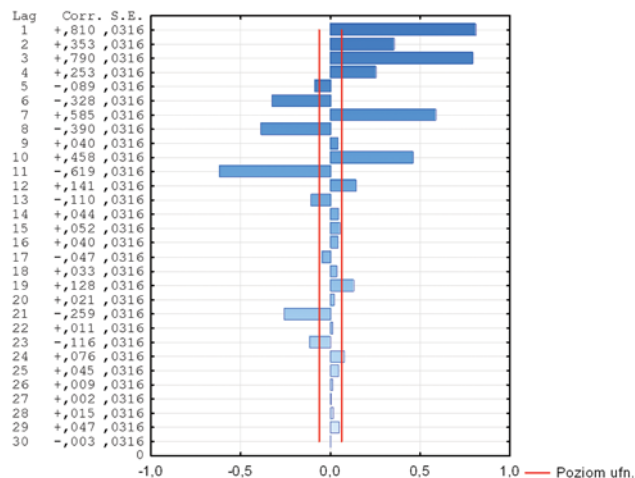
Na rysunkach 6–9 przedstawiono funkcje autokorelacyjne dla przebiegów wierzchołkowych i przekształconych (II st.) w przedziale A, natomiast na rysunkach 10–13 odpowiednio dla przedziału B.

Analizę otrzymanych charakterystyk autokorelacyjnych analizowanych przebiegów przeprowadzono w dwóch aspektach, tj. wpływu:

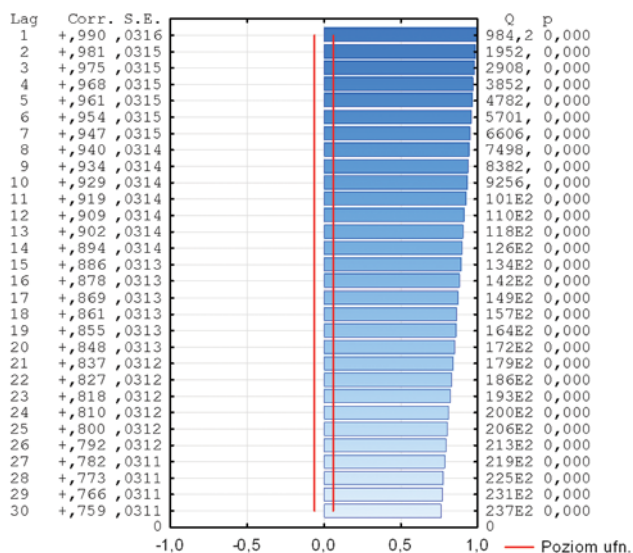
- procedury przekształcenia przebiegów (ciągów) wierzchołkowych na charakter ich przebiegów (ciągów) przekształconych,
- charakteru (kształtu) przebiegów wierzchołkowych w przedziałach A i B na kształt ich charakterystyk autokorelacyjnych.

Funkcja autokorelacji przebiegu wierzchołkowego w przedziale A (rys. 6) ma charakter niemonotonicznej funkcji wolno malejącej ze wzrostem odstępów (ang. *lag*) analizowanych punktów pomiarowych.

Przekształcenie przebiegu wierzchołkowego w przedziale A w przebieg wynikowy powoduje istotną zmianę odpowiedniej funkcji autokorelacji (rys. 8), jako malejącej niemal liniowo funkcji monotonicznej.



Rys. 7. Funkcja autokorelacji cząstkowej przebiegu wierzchołkowego w przedziale A

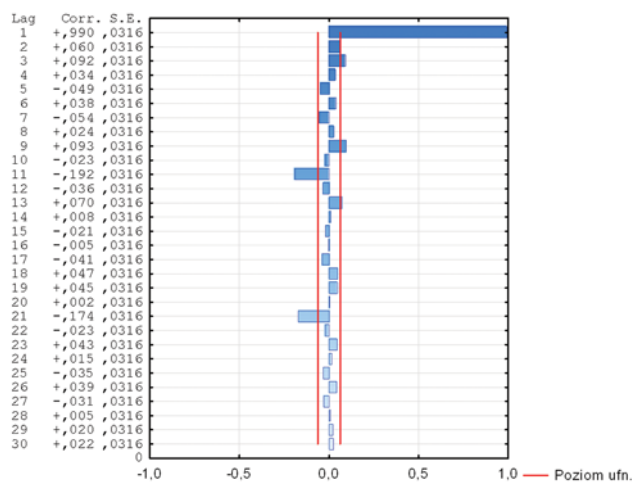


Rys. 8. Funkcja autokorelacji przebiegu przekształconego (II st.) w przedziale A

Procedura przekształcenia przebiegu (ciągu) wierzchołkowego w wynikowy w przedziale A różnicuje bardzo istotnie charakter funkcji autokorelacji cząstkowej (por. rys. 7 i 9).

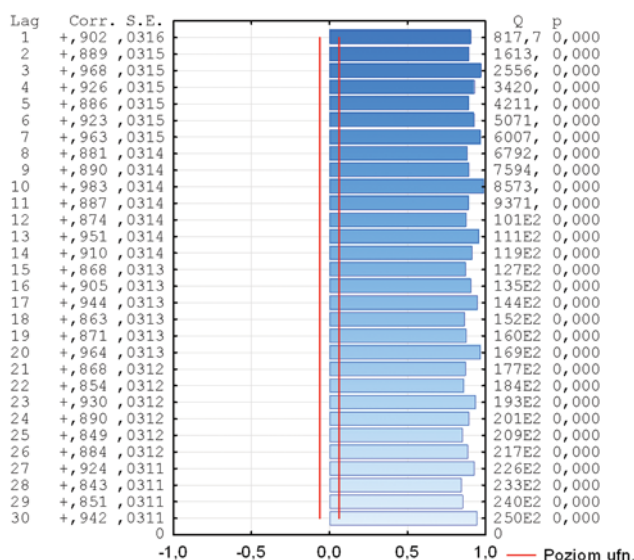
Zróznicowanie to wynika z istotnego wygładzenia kształtu przebiegu wygładzonego, przekształconego w stosunku do wyjściowego wierzchołkowego (rys. 5).

Należy również zauważyć, że funkcje autokorelacji cząstkowych przebiegu wierzchołkowego i przekształconego w rozpatrywanym przedziale A wskazują na pewną okresowość obu przebiegów. Objawia się to występowaniem istotnych prążków odległych od siebie z odstępem (*lag*) równym 10 (prążki z odstępem 1, 11, 21).

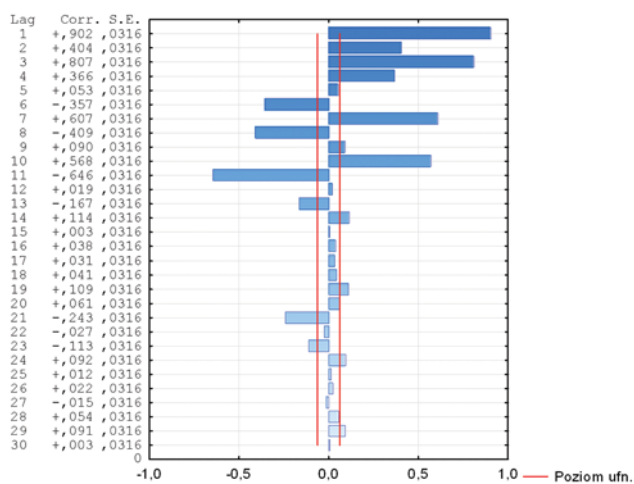


Rys. 9. Funkcja autokorelacji cząstkowej przebiegu przekształconego (II st.) w przedziale A

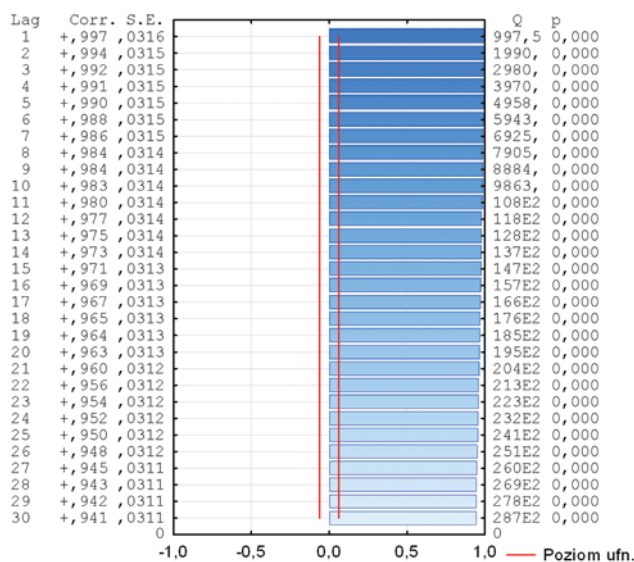
Analogicznie przeprowadzona analiza przebiegów (ciągów) wierzchołkowego przekształconego w przedziale B doprowadziła do bardzo podobnych wyników obserwacji, jak w przypadku przedziału A. Porównując parami odpowiednie wykresy dla przedziałów A i B widać bardzo duże ich podobieństwo. Dotyczy to szczególnie funkcji autokorelacji cząstkowych – ich wykresy są niemal identyczne.



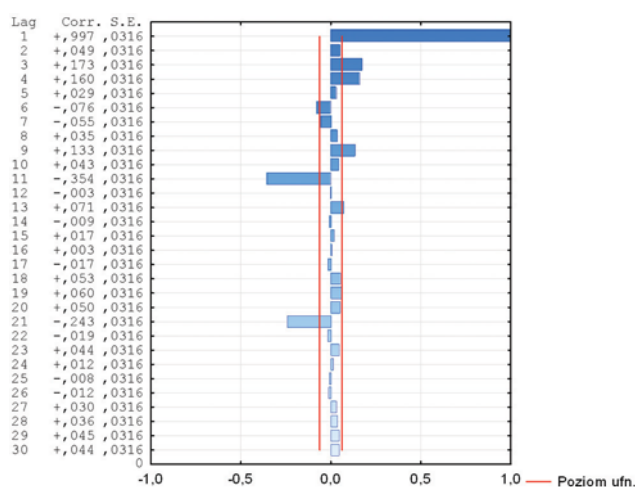
Rys. 10. Funkcja autokorelacji przebiegu wierzchołkowego w przedziale B



Rys. 11. Funkcja autokorelacji częściowej przebiegu wierzchołkowego w przedziale B



Rys. 12. Funkcja autokorelacji przebiegu przekształconego (II st.) w przedziale B.



Rys. 13. Funkcja autokorelacji częściowej przebiegu przekształconego (II st.) w przedziale B.

Z ostatniej z wymienionych obserwacji wynika istotny wniosek dotyczący efektywności zastosowania aparatu teorii szeregów czasowych w analizie przedstawionych przebiegów w przedziałach A i B (w skali „mikro”).

Pomimo istotnego zróżnicowania kształtu i wartości obu analizowanych przebiegów A i B, ich charakterystyki autokorelacyjne są silnie zbliżone. Wynika stąd, że zastosowanie aparatu teorii szeregów czasowych w analizie przedstawionych przebiegów jest nie w pełni efektywne ze względu na utratę informacji dotyczącej zróżnicowania kształtu tych przebiegów.

Zakończenie

Przedstawiona analiza przebiegów wyjściowych i przekształconych ma w pewnym zakresie charakter unikalny ze względu:

- długość analizowanego przedziału czasowego,
- metodykę i narzędzia analizy z zastosowaniem teorii szeregów czasowych.

Znajomość charakteru przebiegów obciążeń w krótkich odcinkach czasowych jest ważna dla urządzeń trakcyjnych o małych termicznych stałych czasowych (np. elementy półprzewodnikowe) oraz urządzeń zabezpieczających.

Zaprezentowane wyniki badań otrzymanych przebiegów obciążeń trakcyjnych (mikroskala) przy użyciu narzędzi teorii szeregów czasowych dowodzą, że nie dają one dostatecznie użytecznych informacji dających się wykorzystać do prognozowania tych przebiegów w skali „makro”.

Jak wynika z kilkuletnich badań prowadzonych przez autorów, do osiągnięcia celu, jakim jest możliwość skutecznego prognozowania obciążeń trakcyjnych podstacji, konieczne jest wykonanie badań tych obciążeń w zwiększonym zakresie i poszukiwanie skuteczniejszych metod prognostycznych – co jest obecnie kolejnym etapem prac. Etap ten zawiera między innymi wstępne studia efektywności zastosowania sieci neuronowych w badaniach obciążeń kolejowych podstacji trakcyjnych [10].

Uzyskane dotychczasowe doświadczenia zespołu badawczego wskazują na konieczność zmiany metodyki badań oraz ich zakresu. Dotychczasowe pomiary dotyczyły rejestracji obciążenia podstacji na „wyjściu”. Do pełnego obrazu zagadnienia należy analizować pracę zasilaczy podstacji z osobna oraz jakość energii elektrycznej w sieciach zasilających podstacje trakcyjne. To ostatnie zagadnienie było tematem pracy [14].

Literatura

- [1] Chrabączyński I., Prusak J., Drapik S.: *Trakcja elektryczna prądu stałego. Układy zasilania*. Podręcznik INPE dla elektryków, zeszyt nr 27. Bełchatów 2009.
- [2] Drapik S., Kobielski A., Prusak J.: *Analiza zmienności obciążeń trakcyjnych w ujęciu szeregów czasowych*. Elektrotechnika 1-E/2011, zeszyt 13, rok 108. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, s. 41.
- [3] Drapik S., Kobielski A., Prusak J.: *Analiza zmienności obciążeń trakcyjnych w ujęciu szeregów czasowych*. XIV Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2010, Zakopane, październik 2010, s. 27.
- [4] Drapik S., Kobielski A., Prusak J.: *Fluktuacja obciążeń podstacji trakcyjnych w ujęciu teorii szeregów czasowych*. Technika Transportu Szynowego 7-8/2010, s. 59.
- [5] Drapik S., Kobielski A., Prusak J.: *Selected issues of traction substation load variability*. [w] Modern Electric Traction. Power Supply, (ed. K. Karwowski, A. Szeląg), Chapter 5, Gdańsk University of Technology, Gdańsk, 2009, s. 47.
- [6] Drapik S., Kobielski A., Prusak J.: *Wybrane aspekty zmienności obciążeń kolejowych podstacji trakcyjnych*. Technika Transportu Szynowego 4/2010, s. 27.
- [7] Drapik S., Kobielski A., Prusak J.: *Wybrane aspekty zmienności obciążeń kolejowych podstacji trakcyjnych*. MET'2009, 9th International Conference Modern Electric Traction. Gdańsk, September 24–26, 2009, Poland, s. 171.
- [8] Kałuża E., Bartodziej G., Ginalski Z.: *Układy zasilania i podstacje trakcyjne*. Politechnika Śląska (skrypty uczelniane 1220). Gliwice 1985.
- [9] Kobielski A., Drapik S., Dudzik M., Prusak J.: *Time series as an aid to research of traction substation load*. SPEEDAM 2012, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. Sorrento, Italy, 20–22 June, 2012, s. 1160.
- [10] Kobielski A., Drapik S., Dudzik M., Prusak J.: *Wstępne studium efektywności zastosowania sieci neuronowych w badaniach obciążeń kolejowych podstacji trakcyjnych*. XIV Międzynarodowa Konferencja QSET 2013. Niepołomice, 5–7 czerwiec 2013 (materiały w postaci elektronicznej).
- [11] Kobielski A., Drapik S., Prusak J.: *Niektóre problemy metodyki badań obciążeń wybranej kolejowej podstacji trakcyjnej metodą szeregów czasowych*. Pojazdy Szynowe 3/2011, s. 113.
- [12] Kobielski A., Prusak J., Popczyk M.: *Ocena procedur pomiarowych na przykładzie zmienności kolejowych obciążeń trakcyjnych*. Elektrotechnika 1-E/2009, zeszyt 15, rok 106. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, s. 133.
- [13] Mierzejewski L., Szeląg A., Gatuszewski M.: *Systemy zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego*. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1993.
- [14] Olczykowski Z.: *Wpływ dynamicznych zmian obciążenia trakcyjnego na parametry jakości energii elektrycznej w sieciach zasilających podstacje*. Elektrotechnika 1-E/2007. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, s. 133.

Artykuł jest rozszerzoną wersją referatu przedstawionego na XV Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2012, odbytej w dniach 18–20 października 2012 r.

dr inż. Andrzej Kobielski
Politechnika Krakowska w Krakowie, Instytut Pojazdów Szynowych
inż. Sławomir Drapik
ZUE S.A. Kraków
mgr inż. Marek Dudzik
dr inż. Janusz Prusak
Politechnika Krakowska w Krakowie, Katedra Trakcji i Sterowania
Ruchem

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
Wydział Elektryczny
INSTYTUT MASZYN ELEKTRYCZNYCH

Plac Politechniki 1
00-661 Warszawa



WARSAW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Faculty of Electrical Engineering
INSTITUTE OF ELECTRICAL MACHINES

Plac Politechniki 1
00-661 Warsaw, Poland

Studia podyplomowe w zakresie Trakcji Elektrycznej

Zasilanie sieciowe pojazdów trakcyjnych

Tematyka studium (wykłady, laboratoria, projekty): Teoria trakcji elektrycznej ■ Elektroenergetyka transportu szynowego i aparatura podstacji trakcyjnych ■ Sieci trakcyjne i odbieraki dla dużych prędkości ■ Obwody główne nowoczesnych pojazdów trakcyjnych ■ Zagadnienia bezpieczeństwa w zelektryfikowanym transporcie szynowym ■ Zasilanie linii tramwajowych ■ Normy polskie i unijne dla podsystemu energia ■ Ekologiczne aspekty systemów transportu zelektryfikowanego ■ Eksploatacja sieci trakcyjnych w Polsce ■ Badania sieci trakcyjnych i odbieraków

Kontakt:

Zakład Trakcji Instytut Maszyn Elektrycznych, Wydział Elektryczny Politechnika Warszawska, 00-661 Warszawa, Plac Politechniki 1 (z dopiskiem Studia Podyplomowe)
tel.: 22 234 74 35, 22 234 73 44, fax 22 629 98 17, iwona.gryz@ee.pw.edu.pl, mirosław.lewandowski@ee.pw.edu.pl

<http://ztu.ime.pw.edu.pl>