

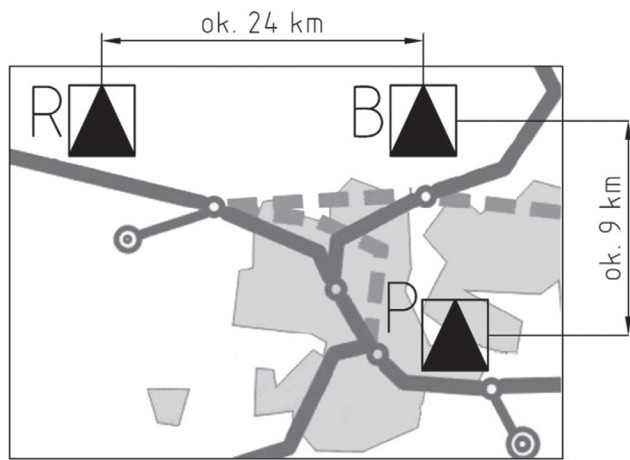
Sławomir Drapik, Andrzej Kobielski, Janusz Prusak

# Wybrane aspekty zmienności obciążeń kolejowych podstacji trakcyjnych

**Przyczyny zmienności obciążeń kolejowych podstacji trakcyjnych są znane [4, 8, 10], natomiast ocena zakresu tej zmienności jest ciągle zagadnieniem aktualnym. Stosowane metody projektowe pozwalają dobrać ilość i typ zespołów prostownikowych w taki sposób, aby zapewnić znaczną rezerwę mocy tych urządzeń.**

Pewnym problemem jest natomiast bardziej precyzyjne określenie przeciążeń, które mogą się pojawiać na wybranych odcinkach zasilania linii kolejowych. Jest to ważne szczególnie w przypadku określania nastaw urządzeń zabezpieczających np. przed zwarciami. Można również przypuszczać, że nadmierne przewymiarowanie zespołów prostownikowych nie jest sprawą korzystną, chociażby ze względu na ich koszty zakupu, a następnie eksploatacji. Warto więc śledzić zakres zmienności obciążeń trakcyjnych na już zelektryfikowanych liniach, aby na podstawie oceny uzyskiwanych wyników formułować uwagi pozwalające bardziej precyzyjnie oceniać tę zmienność w przypadku modernizacji tych linii lub elektryfikacji nowych odcinków [1, 2, 5]. Być może bardziej kompleksowe badania w tym zakresie przyczynią się m.in. do powstania nowych koncepcji, np. w zakresie budowy i znamionowania zespołów prostownikowych, czy też metod inżynierskich pozwalających z wystarczającą dokładnością określać zakres zmian możliwych obciążeń.

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów obciążeń trzech kolejowych podstacji trakcyjnych. Podstacje te znajdują się w obszarze wielkiego miasta (rys. 1), gdzie występują przewozy pasażerskie dalekobieżne, lokalne oraz odbywa się ruch pociągów towarowych. Pomiary, chociażby ze względu na ograniczenia sprzętowe i kadrowe, były wykonane oddzielnie na każdej podstacji. Terminy tych pomiarów nie były od siebie odległe, a więc warunki ich realizacji były bardzo podobne. Podstacje te, z racji ich umiejscowienia (węzłowe), zasilają sieć trakcyjną na wielu odcinkach i poprzez tę sieć są ze sobą połączone.



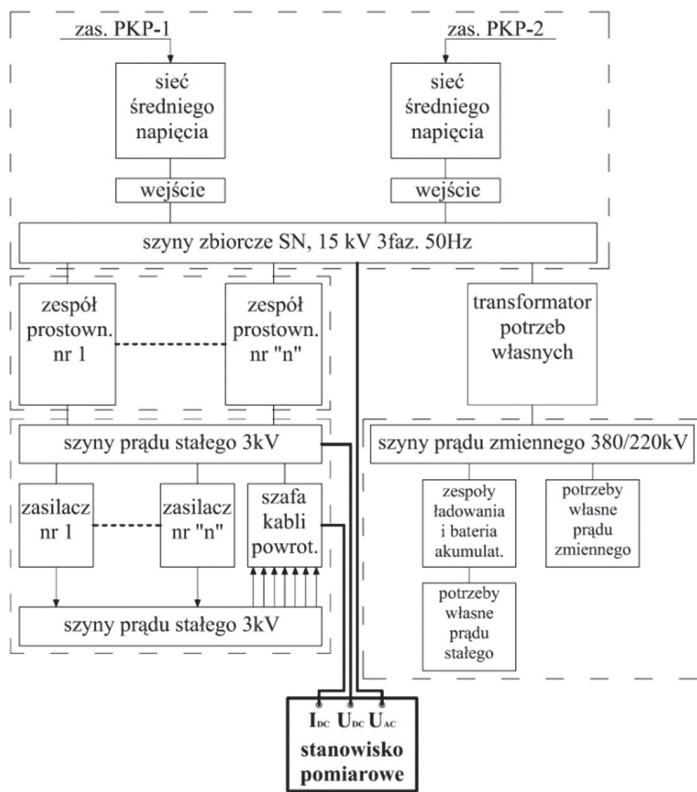
Rys. 1. Usytuowanie podstacji trakcyjnych [11]

## Pomiar obciążeń trakcyjnych

Na rysunku 2 przedstawiono schemat układu pomiarowego pozwalającego rejestrować prąd obciążający podstację trakcyjną oraz wahania napięcia na szynach rozdzielni prądu stałego (DC). Na tymże rysunku zaznaczono również możliwość rejestracji napięcia przemiennego (AC). Częstotliwość rejestracji (próbokowania) wybrano na poziomie 2 kHz. Taka częstość pomiarów sugerowana jest jako minimalna w normie [9].

Uzyskane w ten sposób wyniki, w tym przypadku chwilowe wartości prądu trakcyjnego, w następnej kolejności poddano analizie, która obejmowała określenie parametrów typowo elektrycznych (m.in. współczynniki kształtu i szczytu), jak i wybranych wielkości statystycznych. W ten sposób chciano nieco szerzej ocenić występujące zmienności prądu trakcyjnego [6, 7]. Zarejestrowane chwilowe wartości prądu nie podlegały żadnym wstępnym modyfikacjom, czy przetworzeniom (np. uśrednieniu w zadanych odcinkach czasowych, czy też usuwaniu niektórych wartości, celem ograniczenia częstotliwości). Tak więc w świetle powyższego „obróbce” podlegały przebiegi, które można by określić jako np. „pierwotne”, czy też „podstawowe”.

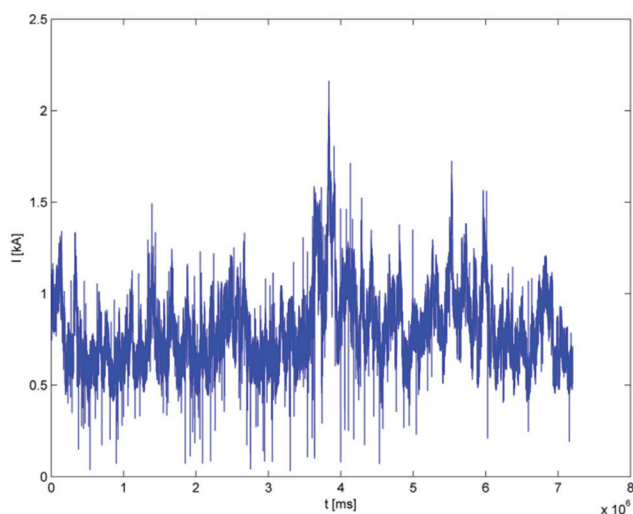
Oczywiście można było dokonać wstępnej „filtracji” [6] zarejestrowanego przebiegu, co ułatwiłoby (skróciło) procesy obliczeń i analiz. Być może, że takie właśnie przygotowanie wyników pomiarów do analiz, przy określonych założeniach, jest jak naj-



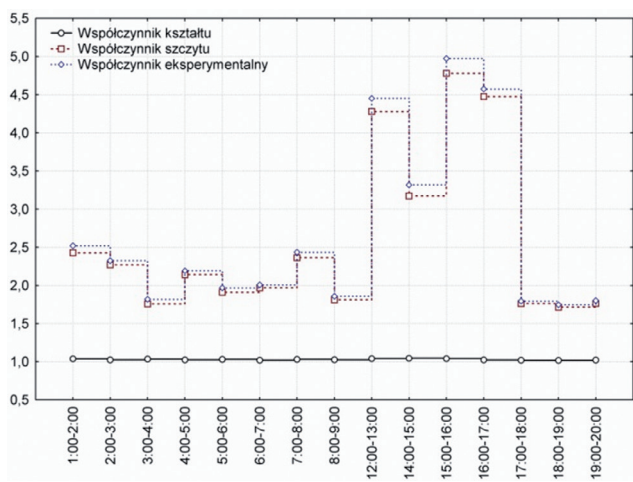
Rys. 2. Schemat blokowy układu pomiarowego

bardziej zasadne, ponieważ uzyska się wystarczająco dokładne wyniki, przy znacznym ograniczeniu czasu wykorzystania środków informatycznych.

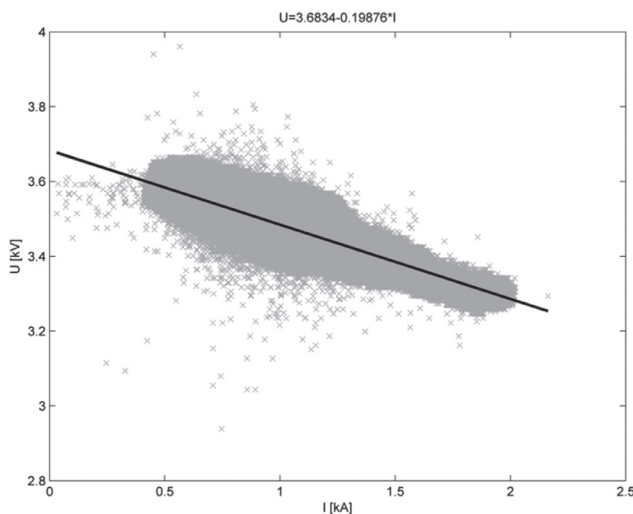
Autorzy uważają, że zaprezentowane w artykule wyniki, uzyskane znacznym nakładem pracy, ze względu na częstotliwość



Rys. 3. Przebieg zmienności prądu w podstacji trakcyjnej R w godz. 06-08



Rys. 4. Parametry elektryczne dla podstacji trakcyjnej R w godz. 01-20



Rys. 5. Wykres korelacji między prądem a napięciem w podstacji trakcyjnej R w godz. 06-08

badanych przebiegów (2 kHz) mogą być traktowane jako wzorcowe i stanowić punkt odniesienia przy wyborze metod mniej pracochłonnych.

Jak wspomniano wykorzystane do analizy dane stanowiły pomiar chwilowych obciążeń badanych podstacji trakcyjnych z częstotliwością próbkowania w wysokości 2 kHz. To oznacza, że na 1 s przypada aż 2000 punktów pomiarowych, co w przypadku badania 1 godz. obciążenia daje 7,2 mln obserwacji.

Przeprowadzanie obliczeń na tak wielkiej liczbie próbek determinuje problem zaspokojenia potrzeb sprzętowych do wykonania odpowiednich analiz. Wykonanie podstawowych czynności statystycznych dla zobrazowania i porównania otrzymanych wyników zajmowało od kilku do kilkunastu, a w skomplikowanych przypadkach nawet kilkudziesięciu minut. W tym celu wykorzystywano różne konfiguracje sprzętowe:

- 1) notebook IBM T40 – Pentium M (1,5 GHz), 2 GB – RAM, 600 MHz;
- 2) PC – Intel Q8600 (2,8 GHz), 4 GB – RAM, 1066 MHz;
- 3) PC – Intel Q9650 (3,0 GHz), 8 GB – RAM, 1333 MHz.

Dla zobrazowania czasochłonności wykonywanych operacji na otrzymanych danych porównano przykładowe wykonanie funkcji regresji dla wyników pomiarów z podstacji B dla godz. 06-07. W przypadku użycia sprzętu z pkt. 1 czas trwania obliczeń wynosi 8 min i 27 s. Wykorzystanie do tego celu konfiguracji z pkt. 2 powoduje skrócenie czasu operacji o prawie 30%. Zaś wykonanie odpowiedniego algorytmu na komputerze z pkt. 3 diametralnie zwiększa wydajność pracy, gdyż obliczenia trwają 1 min i 17 s, co powoduje ponad 6-krotne skrócenie czasu na wykonanie tejże funkcji.

Omówione ograniczenia sprzętowe powodują, że takie czynności stają się bardzo skomplikowane do wykonania. Niektóre analizy, z powodu zbyt dużej pojemności danych stają się trudne do wykonania, a niejednokrotnie pozyskane wyniki nastrożają problemów przy ich eksportowaniu do formy prezentacji.

W związku z opisywanymi problemami, uwidacznia się konieczność budowy autonomicznego oprogramowania dla analizy zmienności obciążeń kolejowych podstacji trakcyjnych, przy wysokiej częstotliwości pobierania próbek. Dzięki temu byłaby możliwość wykonywania porównań i analiz dla wysokiej objętości wyników pomiarów.

## Analiza parametrów elektrycznych i statystycznych wyników pomiarów

Pomimo znacznej zmienności zarejestrowanych prądów trakcyjnych (rys. 3), wartości średnie i skuteczne tych przebiegów różnią się nieznacznie (tab. 1, 2). Współczynnik kształtu, będący ilorazem wartości skutecznej do wartości średniej jest bliski jedności w czasie całego okresu (prawie doba) realizacji pomiaru (rys. 4). Natomiast zauważalna jest znaczna zmienność współczynnika szczytu, będącego ilorazem wartości maksymalnej do wartości skutecznej i współczynnika nazwanego przez autorów eksperymentalnym, a będącym ilorazem wartości maksymalnej do wartości średniej (tab. 1, 2) [10].

W wyniku analizy zależności między prądem obciążenia podstacji trakcyjnej a jej napięciem wyjściowym na szynach rozdzielni DC oszacowano linię regresji, która stanowi charakterystykę zewnętrzną tej podstacji (rys. 5).

Wyniki pomiarów prądów na wybranych trzech podstacjach trakcyjnych poddano również wnikliwej ocenie statystycznej.

Jednym ze skutecznych sposobów oceny własności statystycznych populacji wyników pomiarów jest wykorzystanie tzw. wykresów skrzynkowych, zwanych też w literaturze polskiej jako pudełkowe lub „skrzynka z wąsami” (ang. *Box-and-Whisker Plot, Boxplot*), których twórcą był J.W. Tukey („*Exploratory Data Analysis*”, *Ad-dison-Wesley, MA 1977*).

Wykresy te, oprócz informacji statystycznych, pozwalają także na interpretację graficzną wyników pomiarów.

Cechą charakterystyczną wykresów skrzynkowych jest przedstawienie w zwartej graficznej postaci usytuowanie 50% wyników pomiarów ograniczonych wymiarem pionowym „skrzynki” względem mediany (kwadrat w jej środku) i zarejestrowanych ekstremalnych wartości pomiarowych, zwanych „wąsami”.

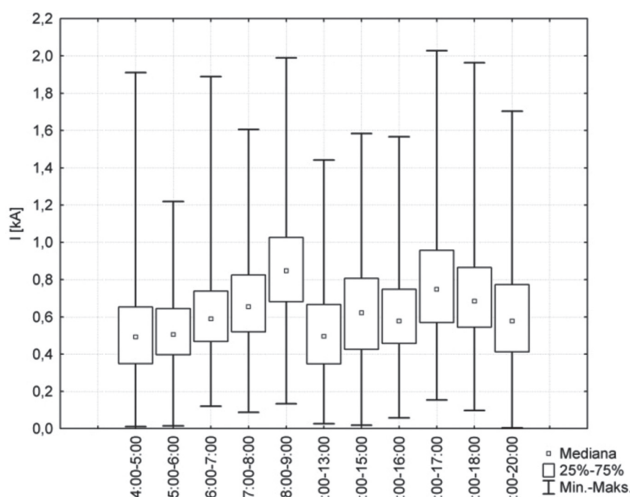
Przedstawione na wykresach skrzynkowych wyniki pomiarów parametrów trzech wybranych podstacji trakcyjnych, oznaczonych jako B (rys. 6), R (rys. 7) i P (rys. 8), obrazują ich najbardziej ogólne charakterystyki statystyczne.

Należy zauważyć, że górne wartości skrajne w poszczególnych godzinach istotnie odbiegają od dolnych, co sugeruje asymetrię rozkładu obciążenia podstacji.

W przypadku podstacji R (rys. 7), jej obciążenie ma znacznie inny charakter niż dwóch pozostałych. W tym przypadku występuje także znacznie większa różnica wartości maksymalnych obciążenia w stosunku do minimalnych (szczególnie w godzinach 15–17).

Uwzględniając różnicę w skalowaniu obu wykresów (rys. 6, 7), należy zauważyć, że w przypadku podstacji R (rys. 7) rozstęp między zarejestrowanymi wartościami ekstremalnymi obciążenia prądowego jest istotnie różny w stosunku do podstacji B (rys. 6).

Podobna tendencja (różnic w obciążeniu podstacji) występuje w przypadku podstacji P, której opisową charakterystykę przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 6. Wykres skrzynkowy obciążenia prądowego podstacji trakcyjnej B w godz. 04–20

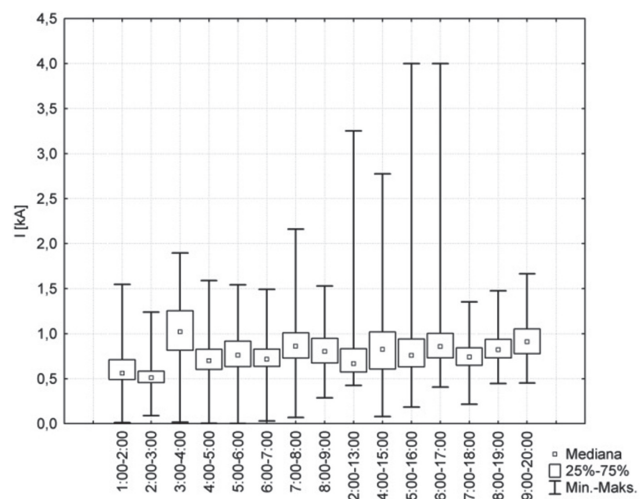
## Parametry elektryczne i statystyczne dla założonego szczytu porannego

Podstacja	Zakres czasowy	B		R		P	
		6.00–7.00	7.00–8.00	6.00–7.00	7.00–8.00	6.00–7.00	7.00–8.00
Wartość średnia	[kA]	0,6191	0,6829	0,7439	0,8881	0,3138	0,4025
Mediana	[kA]	0,5896	0,6544	0,7168	0,8616	0,2912	0,3848
Wartość minimalna	[kA]	0,1208	0,0880	0,0312	0,0704	0,0704	0,1084
Wartość maksymalna	[kA]	1,8888	1,6056	1,4928	2,1624	0,7816	0,8488
Rozstęp	[kA]	1,7680	1,5176	1,4616	2,0920	0,7112	0,7404
Wariancja	[kA]	0,0477	0,0589	0,0212	0,0478	0,0125	0,0159
Odchylenie standardowe	[kA]	0,2184	0,2426	0,1457	0,2186	0,1118	0,1260
Skośność	[–]	0,9333	0,5867	0,7389	0,9710	0,6146	0,4873
Kurtoza	[–]	4,6598	3,4000	3,2639	4,7379	2,8475	2,8445
Współczynnik kształtu	[–]	1,0604	1,0612	1,0190	1,0298	1,0615	1,0478
Współczynnik szczytu	[–]	2,8771	2,2155	1,9692	2,3642	2,3460	2,0125
Współczynnik eksperymentalny	[–]	3,0509	2,3511	2,0066	2,4347	2,4904	2,1087

Tabela 2

## Parametry elektryczne i statystyczne dla założonego szczytu popołudniowego

Podstacja	Zakres czasowy	B		R		P	
		15.00–16.00	16.00–17.00	15.00–16.00	16.00–17.00	15.00–16.00	16.00–17.00
Wartość średnia	[kA]	0,6190	0,7801	0,8043	0,8744	0,3946	0,5292
Mediana	[kA]	0,5784	0,7480	0,7600	0,8592	0,3732	0,5156
Wartość minimalna	[kA]	0,0584	0,1544	0,1872	0,4080	0,0724	0,1592
Wartość maksymalna	[kA]	1,5664	2,0280	3,9992	3,9992	0,8488	0,8488
Rozstęp	[kA]	1,5080	1,8736	3,8120	3,5912	0,7764	0,6896
Wariancja	[kA]	0,0544	0,0734	0,0534	0,0345	0,0187	0,0158
Odchylenie standardowe	[kA]	0,2332	0,2708	0,2311	0,1857	0,1369	0,1258
Skośność	[–]	0,7053	0,6736	1,0056	0,3394	0,7281	0,3160
Kurtoza	[–]	3,2629	3,3508	4,2081	2,9075	3,3196	2,5114
Współczynnik kształtu	[–]	1,0686	1,0586	1,0405	1,0223	1,0585	1,0279
Współczynnik szczytu	[–]	2,3679	2,4558	4,7789	4,4738	2,0322	1,5603
Współczynnik eksperymentalny	[–]	2,5303	2,5996	4,9723	4,5735	2,1510	1,6038

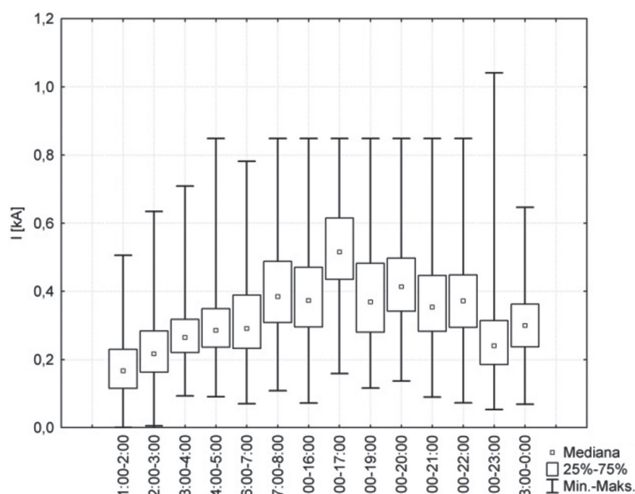


Rys. 7. Wykres skrzynkowy obciążenia prądowego podstacji trakcyjnej R w godz. 01–20

Ze względów aparaturowych i organizacyjnych autorzy nie mieli możliwości wykonania pomiarów obciążenia prądowego opisywanych podstacji trakcyjnych (B, R oraz P) dokładnie w tym samym czasie w trzech różnych miejscach, tym niemniej na wykresie skrzynkowym nr 9 przedstawiono dla porównania wyniki pomiarów wykonanych w różnych dniach, ale w tych samych go-

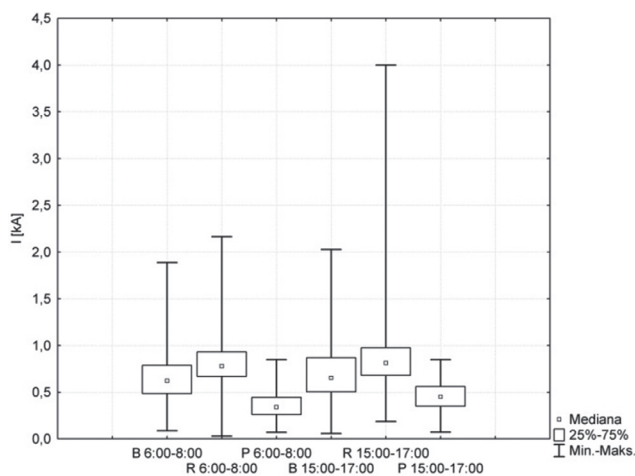
dzinach (przypuszczalne szczytowe przewozy podmiejskie i regionalne: poranny 06–08, popołudniowy 15–17).

Różnice między obciążeniami rozważanych podstacji są bardzo istotne – szczególnie w odniesieniu do wartości skrajnych. Zwraca uwagę maksymalna wartość obciążenia podstacji R w szczycie popołudniowym w stosunku do podstacji P w tych samych porach (ponad czterokrotna wartość). Zwraca także uwagę fakt, że w przypadku podstacji trakcyjnej P wartości prądów obciążających podstację są znacząco mniejsze od obciążeń podstacji B oraz R i to zarówno w przypadku obciążeń szczytu porannego, jak i popołudniowego.



Rys. 8. Wykres skrzynkowy obciążenia prądowego podstacji trakcyjnej P w godzinach 01–23

Przedstawione wykresy skrzynkowe w opisowy sposób ilustrują różnice w obciążeniach podstacji, wynikające z charakteru obciążalności szlaku kolejowego, rozkładu jazdy pociągów pasażerskich, towarowych, ale także z techniki prowadzenia pociągów przez maszynistów oraz przyczyn organizacyjnych, np.: czasowych lokalnych ograniczeń prędkości i innych czynników decydujących o rzeczywistym obciążeniu podstacji.



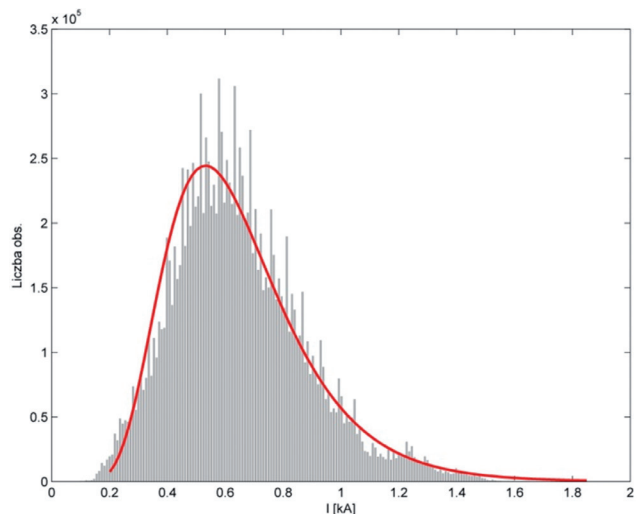
Rys. 9. Porównawcze zestawienie obciążeń podstacji B, R i P w analogicznym czasie szczytu rannego i popołudniowego

Wykresy te, mimo że mają charakter głównie opisowy, sugerują także charakter (asymetrię lub jej brak) rozkładów rejestrowanych wartości prądów obciążenia.

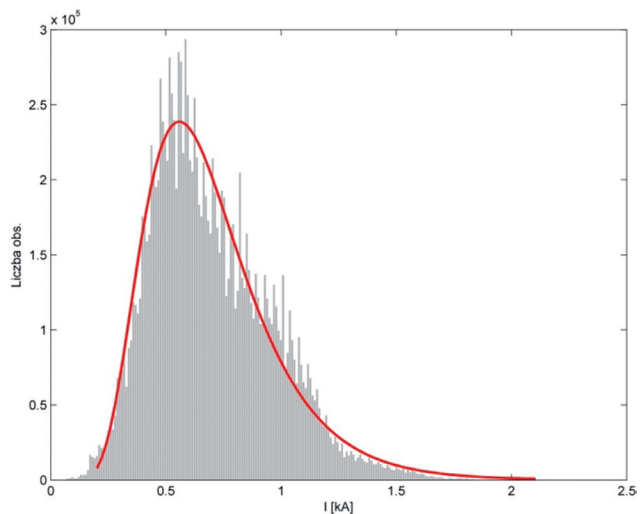
Jak wynika z przedstawionych wykresów skrzynkowych (rys. 5–8) rozkłady wartości prądów w opisywanych podstacjach charakteryzują się znaczną asymetrią, z czego można wnioskować, co do charakteru ich rozkładu.

W wyniku przeprowadzonych analiz dotyczących charakteru rozkładów populacji zarejestrowanych wartości prądów obciążenia rozważanych podstacji trakcyjnych i ich współczynników dopasowania do rozkładów teoretycznych ustalono, że najwyższe wartości współczynników dopasowania dotyczą rozkładu logarytmiczno-normalnego.

Przykłady zgodności rozkładów empirycznych obciążenia prądowego podstacji trakcyjnych z teoretycznym rozkładem logarytmiczno-normalnym przedstawiono na poniższych wykresach.

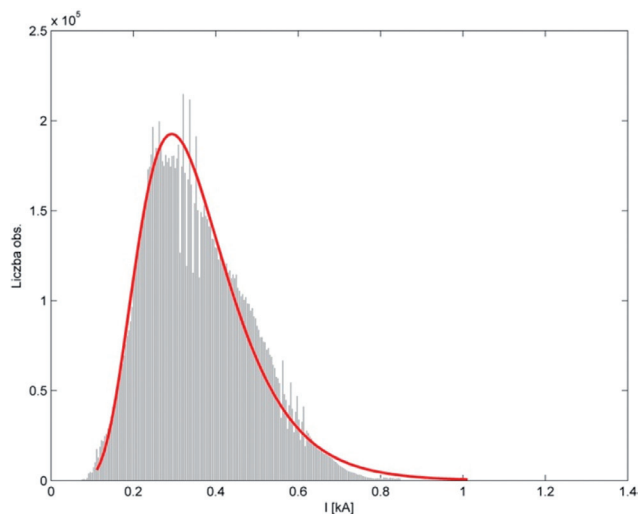


Rys. 10. Empiryczny i teoretyczny logarytmiczno-normalny rozkład wyników pomiarów obciążenia podstacji B (szczyt poranny)

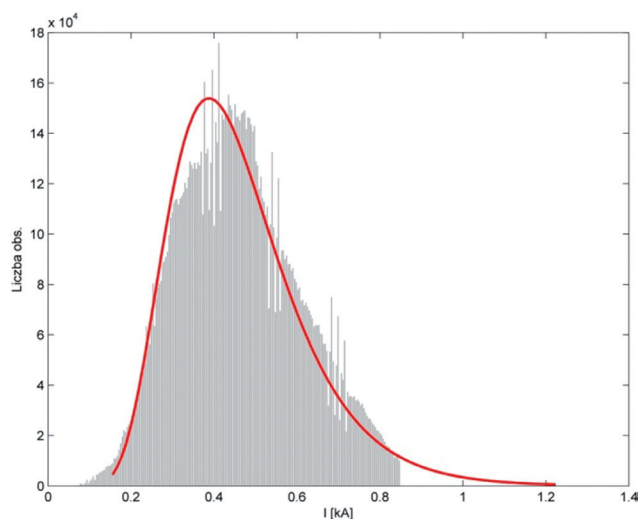


Rys. 11. Empiryczny i teoretyczny logarytmiczno-normalny rozkład wyników pomiarów obciążenia podstacji B (szczyt popołudniowy)

Wstępne oceny statystyczne obserwowanych procesów nie wyczerpują możliwości wykorzystania innych metod i technik z tej dziedziny, szczególnie w ujęciu dynamicznym procesów losowych. W niniejszym artykule, ze względu na pewne ograniczenia edycyjne przedstawiono jedynie standardowe statystyczne procedury analizy niektórych zjawisk rejestrowanych w omawianych trzech podstacjach trakcyjnych.



Rys. 12. Empiryczny i teoretyczny logarytmiczno-normalny rozkład wyników pomiarów obciążenia podstacji P (szczyt poranny)



Rys. 13. Empiryczny i teoretyczny logarytmiczno-normalny rozkład wyników pomiarów obciążenia podstacji P (szczyt popołudniowy)

## Uwagi końcowe

Zastosowanie metod statystycznych do analizy zmienności obciążeń podstacji trakcyjnych pozwala dysponować większą liczbą możliwości do ich oceny, niż przy użyciu tylko wskaźników typowych elektrycznych.

Pogłębiona interpretacja uzyskanych wyników, oceny zmienności obciążeń kolejowych podstacji trakcyjnych, będzie możliwa po uwzględnieniu między innymi rzeczywistych rozkładów jazdy, typów pociągów i profilów tras.

Konkurencja na rynku przewozów może spowodować potrzebę bardziej racjonalnego (oszczędniejszego) między innymi doboru urządzeń do zasilania nieautonomicznej trakcji elektrycznej. Podstawę do rozważań w tym zakresie mogą stanowić wyniki oceny (analizy) obciążeń eksploatowanych podstacji trakcyjnych.

Uzyskanie miarodajnych danych do tych rozważań wymaga zastosowania odpowiednich rygorów ich pozyskania, eliminujących powstawanie błędów pomiarowych. Wskazane jest, aby przy próbkowaniu obciążeń trakcyjnych w podstacji jednocześnie przeprowadzono pomiary napięć na szynach rozdzielni prądu stałego DC, jak i zmiennego AC. Należy również synchronizować ba-

dania, co pozwoli porównać warunki pracy poszczególnych podstacji trakcyjnych między sobą.

Obserwuje się znaczący postęp jakościowy w budowie między innymi układów napędowych lokomotyw i zespołów elektrycznych. Podobnego trendu należałoby oczekiwać również w zakresie rozwoju układów zasilania (zespołów prostownikowych). Przedstawione oceny i analizy obciążeń mogą być przydatne do sformułowania wymagań dla nowych rozwiązań i dalszych badań. □

## Literatura

- [1] Buchta K., Szelaąg A.: *Zastosowanie metod statystyczno-probabilistycznych do oceny napięcia w sieciach trakcyjnych 3 kV DC*. MET'2005 Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Nowoczesna Trakcja Elektryczna w zintegrowanej Europie XXI wieku”. Warszawa, wrzesień 2005.
- [2] Czuchra W., Kobielski A., Prusak J.: *Zmienność napięcia w tramwajowej sieci trakcyjnej – próba oceny metodą statystyczną*. XI Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej i III Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie SEMTRAK 2004. Kraków–Zakopane, październik 2004.
- [3] Gajek L., Kałuszka M.: *Wnioskowanie statystyczne – modele i metody*. WNT, Warszawa 2000.
- [4] Bartodziej G., Ginalski Z., Kałuża E.: *Układy zasilania i podstacje trakcyjne*. Politechnika Śląska, Gliwice 1985.
- [5] Kałuża E., Sikora A.: *Ocena dokładności opracowanej metody prognozowania obciążeń podstacji trakcyjnych*. MET'2005 Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Nowoczesna Trakcja Elektryczna w zintegrowanej Europie XXI wieku”. Warszawa, wrzesień 2005.
- [6] Kobielski A., Popczyk M., Prusak J.: *Analiza statystyczna prądów i napięć na wyjściu tramwajowej podstacji trakcyjnej w aspekcie ochrony przeciwzwarciowej sieci trakcyjnej DC*. XVI Konferencja Naukowo-Techniczna Bezpieczeństwo Elektryczne ELSAF 2007. Szklarska Poręba 19–21.09.2007.
- [7] Kobielski A., Popczyk M., Prusak J.: *Ocena procedur pomiarowych na przykładzie zmienności kolejowych obciążeń trakcyjnych*. SEMTRAK 2006.
- [8] Łuczywek Z., Słaby L.: *Elektromonter podstacji trakcyjnej*. WKiŁ, Warszawa 1972.
- [9] PN-EN 50163: *Zastosowania kolejowe. Napięcia zasilające systemów trakcyjnych*.
- [10] Gałuszewski M., Mierzejewski L., Szelaąg A.: *System zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego*. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [11] [www.malopolskie.pl](http://www.malopolskie.pl)

Sławomir Drapik, [slawomir.drapik@interia.pl](mailto:slawomir.drapik@interia.pl)  
 Andrzej Kobielski, [akobielski@mech.pk.edu.pl](mailto:akobielski@mech.pk.edu.pl)  
 Janusz Prusak, [jprusak@usk.pk.edu.pl](mailto:jprusak@usk.pk.edu.pl)  
 Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków