

Agata Urban

Zmiana charakteru obciążenia układu zasilania 3 kV dc linii kolejowej przy zwiększaniu prędkości pociągów powyżej 200 km/h¹

Koncepcja powstania Centralnej Magistrali Kolejowej została wymuszona poprzez konieczność zwiększenia zdolności przewozowych kolei na obszarach Śląska (rejon centralny i rejon północno-wschodni Polski), co wynikało z coraz większej ilości zadań przewozowych. W związku z tymi okolicznościami w lutym 1970 roku został opracowany plan budowy nowej linii kolejowej na trasie Zawiercie – Grodzisk Mazowiecki – Korytów – Płock – Gdańsk. Linia ta miała mieć charakter magistrali i w przyszłości miała służyć do przeprowadzania ekspresowego ruchu pasażerskiego.

Zgodnie z założeniami planu magistrala miała powstawać w czterech etapach, a czas budowy rozłożony został łącznie na okres dziewięciu lat. Ostatecznie jednak zrealizowane zostały tylko dwie pierwsze części utworzonego projektu, w ramach których powstały następujące odcinki trasy:

- odcinek Zawiercie – Idzikowice (Radzice) o długości ok. 143 km, wybudowany w latach 1971–1974;
- odcinek Idzikowice – Grodzisk Mazowiecki (Warszawa) o długości ok. 80 km, wybudowany w latach 1974–1977.

Nowa linia miała zatem łączną długość około 223 km i stanowiła połączenie pomiędzy Zawierciem a stolicą i zyskała miano Centralnej Magistrali Kolejowej – CMK. W związku z tym, iż przewidywano na niej prowadzenie ruchu pociągów o dużej prędkości, przy opracowywaniu przez Centralny Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Techniki Kolejowej oraz Centralne Biura Studiów i Projektów Budownictwa Kolejowego. parametrów technicznych linii wzorowano się na takich liniach kolejowych jak Paryż – Lyon czy Tokio – Osaka. Miało to zapewnić odwzorowanie (w miarę możliwości technicznych) parametrów układów zasilania, charakteryzujących najbardziej nowoczesne, jak na owe czasy, linie kolejowe. Również układ geometryczny (zarówno w płaszczyźnie poziomej, jak i pionowej) przewidywał ruch pociągów na CMK z prędkością 200–250 km/h, co – w odniesieniu do polskich kryteriów – określone jest mianem kolei dużych prędkości. Obecnie Centralna Magistrala Kolejowa stanowi część międzynarodowego korytarza transportowego E65.

Układ zasilania 3 kV DC

Obecnie istniejący układ zasilania na trasie Centralnej Magistrali Kolejowej generalnie nie uległ zmianom od czasów jej powstania, czyli – jak już wspomniano – od końca lat 70. Na trasie Grodzisk Mazowiecki–Zawiercie znajduje się trzynaście podstacji trakcyjnych, rozmieszczonych średnio co 17,5 km (maksymalnie nawet co 22 km) oraz dwanaście kabin sekcyjnych. Wszystkie podstacje trakcyjne wyposażone są w sześciopulsowe zespoły prostownikowe typu PK 17 i zasilane są napięciem 15 kV. Wyjątek stanowi podstacja trakcyjna Huta Zawadzka, ulokowana na prawie 26. kilometrze trasy (25,9); zastosowane w niej zostały zespoły prostownikowe dwunastopulsowe typu PD 17 oraz zasilanie napięciem 110 kV (transformacja jednostopniowa) [2].

Było to jednocześnie pierwsze zastosowanie transformacji jednostopniowej na sieci PKP. Dodatkowo w podstacji Huta Zawadzka zastosowano wówczas różne, bardziej nowoczesne, rozwiązania techniczne, takie jak filtry typu gamma [2, 4, 5], pozwalające na lepszą eliminację wyższych harmonicznych, których obecność nie tylko pogarsza jakość energii, ale także może negatywnie wpływać na funkcjonowanie urządzeń ruchu kolejowego, oraz dwuczłonową rozdzielnię 3 kV wyposażoną w odłączniki o napędach sterowanych silnikowo, przystosowaną do dużych prądów zwarć.

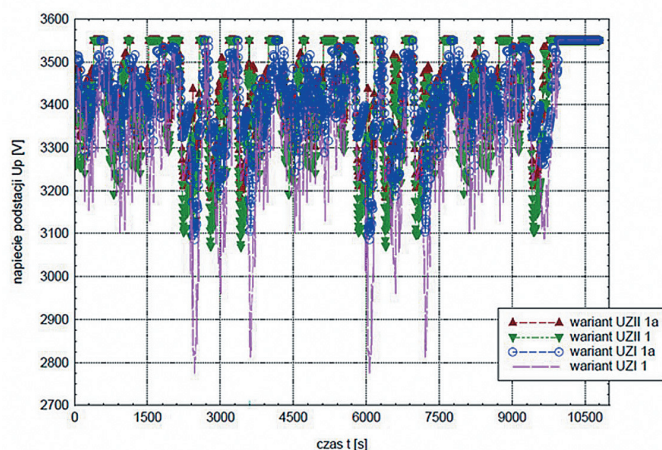
Zakres symulacji i analizowane warianty

W artykule przedstawione są przykładowe wyniki obliczeń dotyczących prac wykonanych w trakcie realizacji pracy [13], jak i wyniki obliczeń uwzględnionych w literaturze przedmiotu [por. 17, 18]. Symulacje przejazdu pociągów zostały wykonane z wykorzystaniem metodyki opracowanej w Zakładzie Trakcji Elektrycznej [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 15, 16]. Przeprowadzono analizy obciążeń podstacji trakcyjnych dla całej trasy pokonywanej przez pociągi, których ruch przeprowadzany jest w ramach konkretnego rozkładu jazdy zadanego uprzednio przez użytkownika.

W ramach prowadzonych badań dotyczących Centralnej Magistrali Kolejowej rozpatrywano kilka wariantów modernizacji układu zasilania:

- * modernizację istniejących podstacji (wymiana zespołów sześciopulsowych na dwunastopulsowe),
- * dobudowę 6 nowych podstacji.

Główną daną, niezbędną do zaplanowania modernizacji linii kolejowej, to zdefiniowana prognoza przewozowa na danej linii. Z punktu widzenia obciążeń energetycznych powinien być to 2–3-godzinny szczyt ruchowy. W ramach wykonywania badań nad układem zasilania założony został ruch pociągów mieszany, czyli zakładający przejazdy pociągów zespołowych o maksymalnej prędkości (przy braku nałożonych ograniczeń prędkościowych) 220 km/h oraz pociągów klasycznych, wyposażonych w lokomotywę o mocy 6,4 MW, o całkowitej masie 350 lub 500 ton o maksymalnej prędkości (przy braku nałożonych ograniczeń prędkościowych) 200 km/h. Odstępy między pociągami zostały opracowane



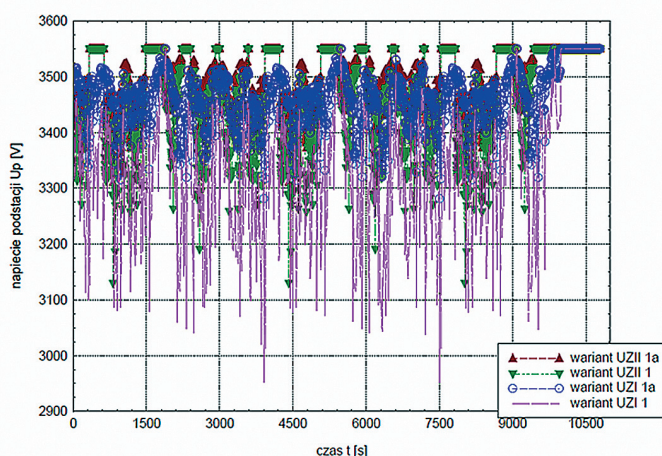
Rys. 1. Wykres przebiegu napięcia na szynach zbiorczych PT A
Źródło: oprac. własne.

na podstawie opisanych wcześniej przejazdów teoretycznych i wyliczone zostały za pomocą opracowanego w programie Matlab skryptu wykonanego na potrzeby realizacyjne projektu [13].

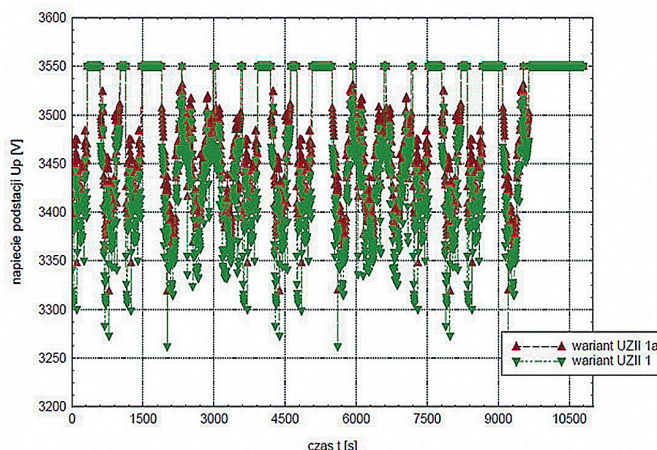
Wyniki analiz symulacyjnych

W ramach przeprowadzania symulacji wyznaczone zostały obciążenia wszystkich podstacji trakcyjnych znajdujących się na trasie linii [2, 13, 17, 18]. Oczywiście jest, że obciążenie podstacji i napięcia na szynach zbiorczych podstacji zmienia się wraz z charakterem ruchu pociągów, ale istotne jest określenie charakteru tych zmian [5, 6, 7, 12, 14, 15, 16, 17, 18]. Parametry opisujące charakter obciążenia pozwalają ocenić prawidłowość doboru mocy urządzeń wyposażenia podstacji. Duże rezystancje wewnętrzne i obniżenie poziomu napięcia na szynach zbiorczych podstacji skutkują ograniczonymi zdolnościami przesyłowymi systemu [6, 7, 11]. Na rys 1 - 5 zamieszczone zostały wykresy ilustrujące przebiegi napięć na szynach zbiorczych podstacji dla różnych wariantów układu zasilania.

Wprowadzenie dodatkowych podstacji trakcyjnych poprawiło parametry układu zasilania. Nowe podstacje zostały zaproponowane w miejscach, gdzie występowały dość duże odległości

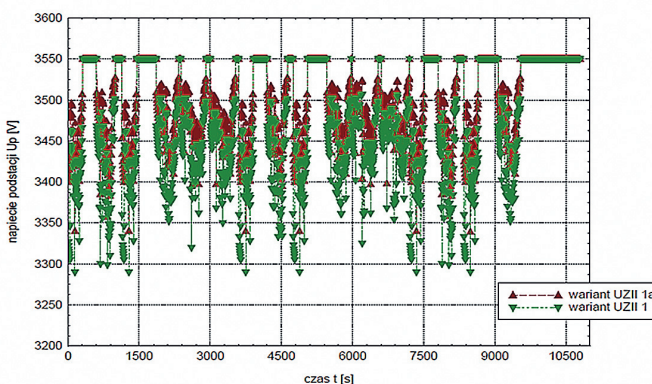


Rys. 3. Wykres przebiegu napięcia na szynach zbiorczych PT B
Źródło: oprac. własne.

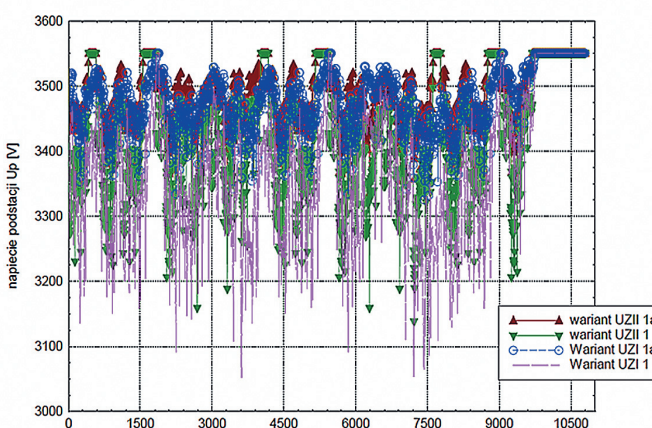


Rys. 2. Wykres przebiegu napięcia na szynach zbiorczych PT X
Źródło: oprac. własne.

między podstacjami; dla stosowanego w Polsce systemu zasilania 3 kV DC dla linii szybkich odległości te powinny wynosić około 10–14 km. Dzięki zastosowanym modernizacjom warunek ten został spełniony. Dodatkowo zwiększenie liczby podstacji pozwoliło na bardziej równomierne rozłożenie obciążenia.



Rys. 4. Wykres przebiegu napięcia na szynach zbiorczych PT Y
Źródło: oprac. własne.

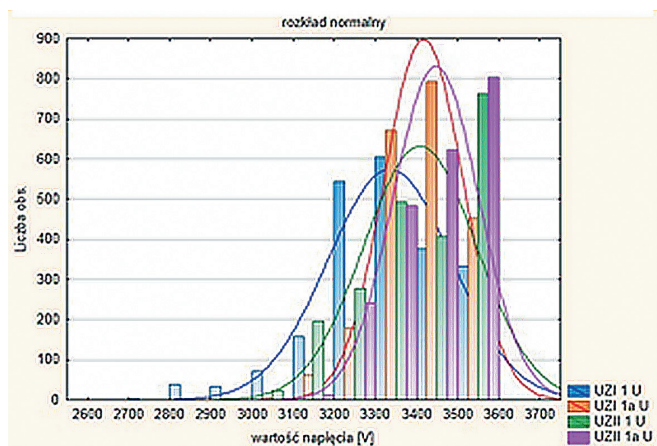


Rys. 5. Wykres przebiegu napięcia na szynach zbiorczych PT C
Źródło: oprac. własne.

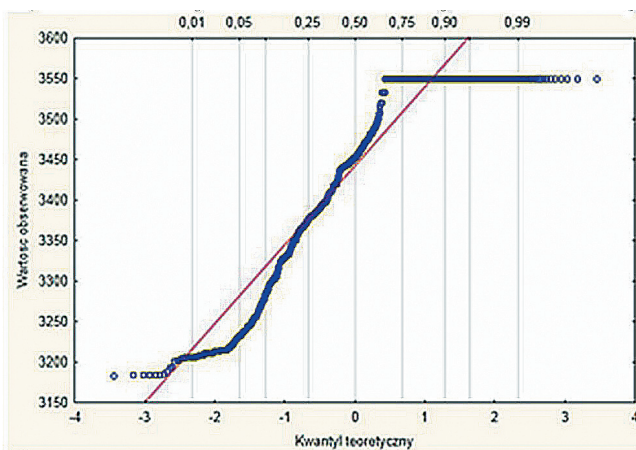
Analiza statystyczna napięcia na szynach zbiorczych 3 kV DC podstacji dla analizowanych wariantów

Zastosowanie metod statystycznych pozwala na porównanie efektów napięciowych modernizacji [1, 2, 3, 5, 6, 7, 11, 12, 13, 16, 17, 18, 19]. Rysunki 6- 15 przedstawiają wykresy histogramowe dla napięć

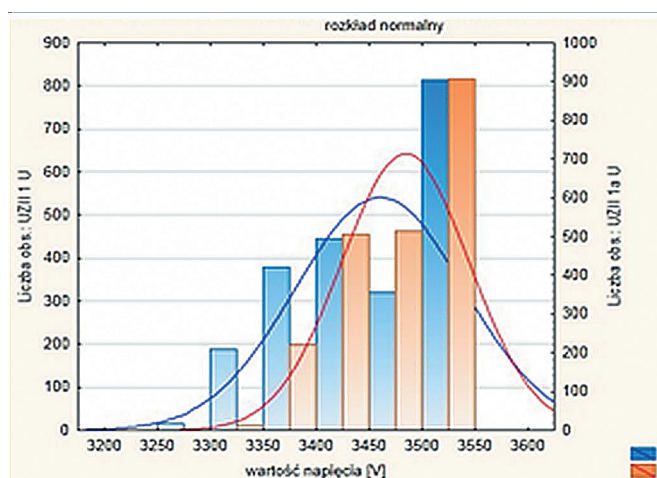
wybranych, uznanych za reprezentatywne dla podstacji trakcyjnych. Dodatkowo do każdego z histogramów został dopasowany odpowiedni rozkład statystyczny i za pomocą wykresów kwantylowych zbadane zostało jego dopasowanie do danego histogramu. Wszystkie histogramy zostały przedstawione na jednym wykresie, aby możliwe było porównanie wszystkich omawianych wariantów.



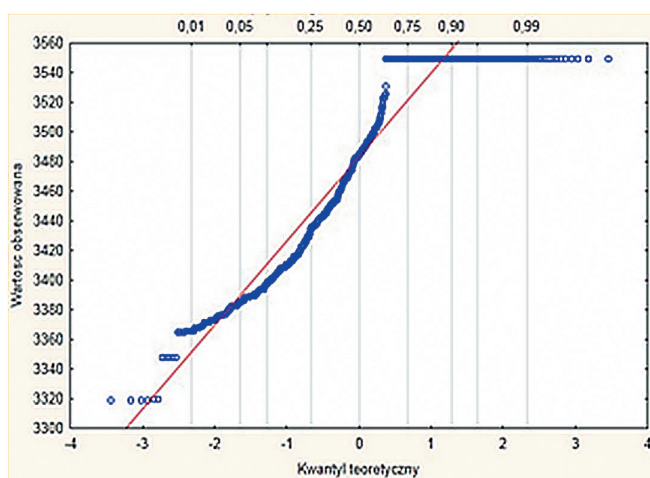
Rys. 6. Histogram napięcia na szynach zbiorczych PT A – porównanie dla różnych wariantów
Źródło: oprac. własne.



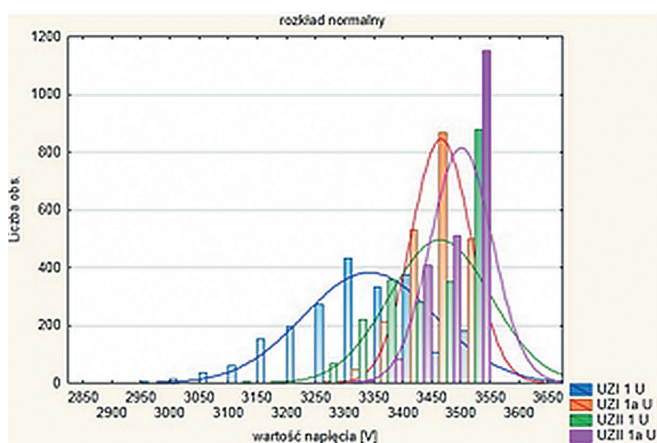
Rys. 7. Wykres kwantyl-kwantyl, PT A – jednego z wariantów
Źródło: oprac. własne



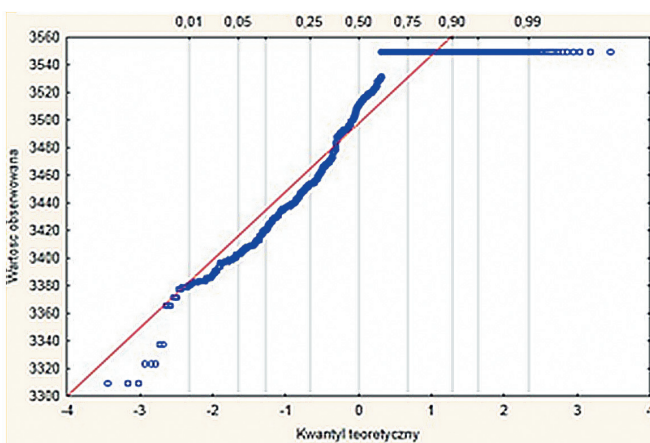
Rys. 8. Histogram napięcia na szynach zbiorczych PT X – porównanie wariantów UZII 1 oraz UZII 1a
Źródło: oprac. własne.



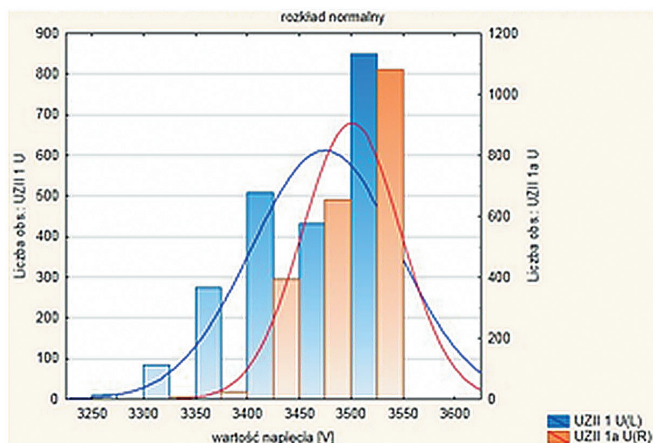
Rys. 9. Wykres kwantyl-kwantyl, PT X – wariant UZII 1a
Źródło: oprac. własne.



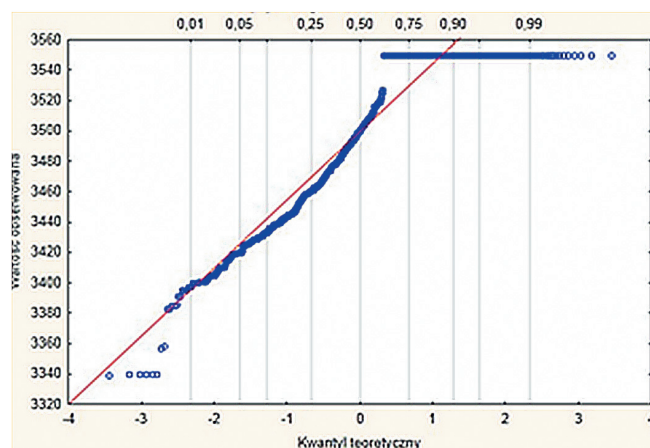
Rys. 10. Histogram napięcia na szynach zbiorczych PT B – porównanie wariantów UZI 1, UZI 1a, UZII 1 oraz UZII 1a
Źródło: oprac. własne.



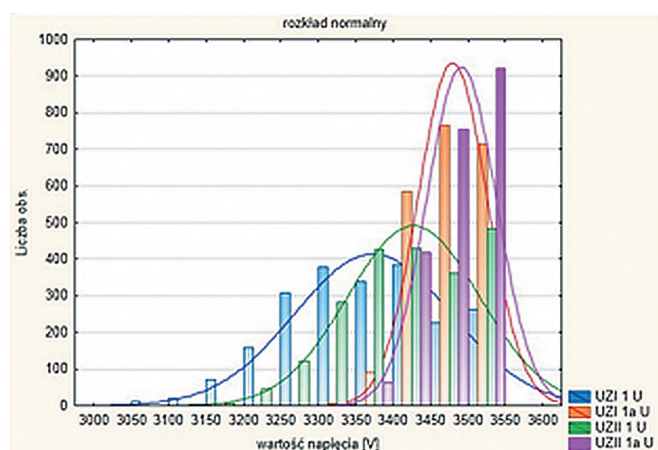
Rys. 11. Wykres kwantyl-kwantyl, PT B – wariant UZII 1a
Źródło: oprac. własne.



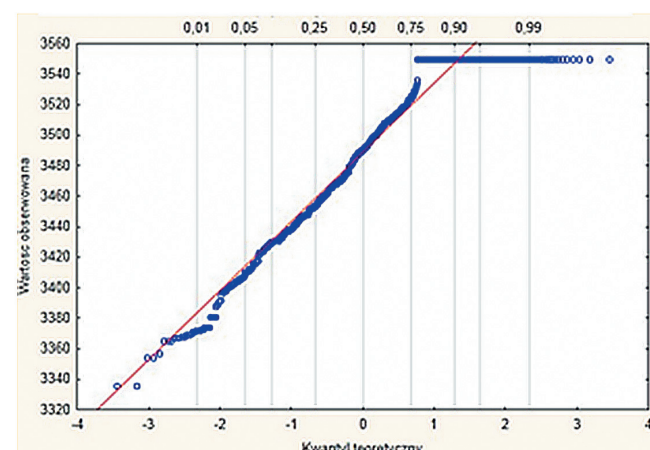
Rys. 12. Histogram napięcia na szynach zbiorczych PT Y – porównanie wariantów UZII 1 oraz UZII 1a
Źródło: oprac. własne.



Rys. 13. Wykres kwantyl-quantyl, PT Y – wariant UZII 1a
Źródło: oprac. własne.



Rys. 14. Histogram napięcia na szynach zbiorczych PT C – porównanie wariantów UZI 1, UZI 1a, UZII 1 oraz UZII 1a
Źródło: oprac. własne.



Rys. 15. Wykres kwantyl-quantyl, PT C – wariant UZII 1a
Źródło: oprac. własne.

W tabelach 1 - 3 zamieszczone zostały zestawienia, prezentujące wartości średnich oraz minimalnych napięć na szynach zbiorczych podstacji oraz odchylenia standardowe.

Na podstawie zamieszczonych wykresów i tabel można zaobserwować, iż wartości napięć podlegają rozkładowi normalnemu (przy założeniu charakteru losowego). Pełna losowość zdarzeń miałaby miejsce w sytuacji, gdy podstacja byłaby obciążona w sposób ciągły, gdyż każda chwila stanu jałowego wprowadza już zdarzenie pewne, ponieważ generowana jest wówczas wartość napięcia stanu jałowego (przyjęto: 3 550 V).

Tab. 2
Zestawienie minimalnych wartości napięcia na szynach zbiorczych PT dla wszystkich wariantów

Nazwa PT	UZI 1	UZI 1a	UZII 1	UZII 1a
—	[V]	[V]	[V]	[V]
PT A	2 773	3 086	3 068	3 068
PT X	—	—	3 262	3 319
PT B	2 953	3 281	3 130	3 310
PT Y	—	—	3 290	3 339
PT C	3 052	3 325	3 138	3 336

Źródło: opracowanie własne

Tab. 1
Zestawienie średnich wartości napięcia na szynach zbiorczych PT dla wszystkich wariantów

Nazwa PT	UZI 1	UZI 1a	UZII 1	UZII 1a
—	[V]	[V]	[V]	[V]
PT A	3 331	3 412	3 404	3 442
PT X	—	—	3 458	3 483
PT B	3 340	3 462	3 461	3 497
PT Y	—	—	3 473	3 499
PT C	3 371	3 476	3 425	3 488

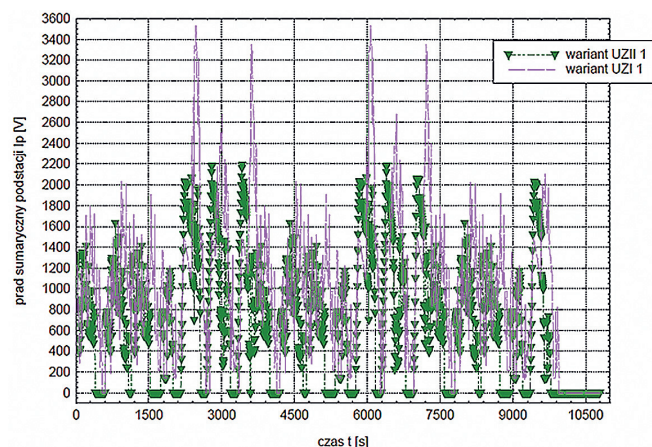
Źródło: opracowanie własne

Tab. 3
Zestawienie odchylenia standardowego napięcia na szynach zbiorczych PT dla wszystkich wariantów

Nazwa PT	UZI 1	UZI 1a	UZII 1	UZII 1a
PT A	149,97	95,88	136,35	103,52
PT X	—	—	79,65	60,38
PT B	112,37	50,97	86,79	52,82
PT Y	—	—	70,40	47,59
PT C	104,00	45,98	87,71	46,57

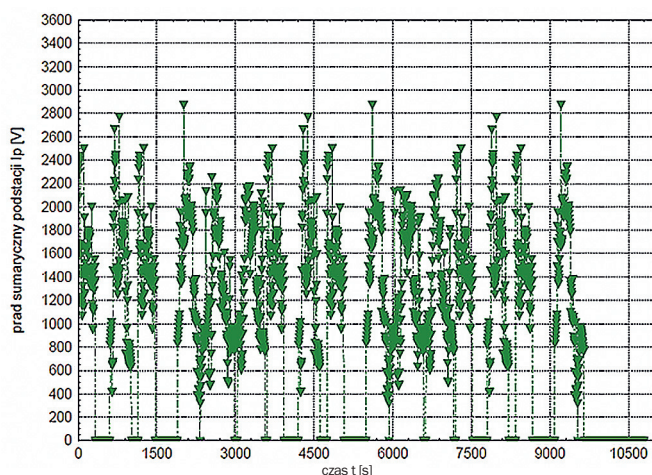
Źródło: opracowanie własne

W rzeczywistości nawet przy braku obciążenia wartość ta nie byłaby stała. Co więcej, na podstawie tabel zestawieniowych można zauważyć, iż wariant UZII 1a, zatem uwzględniający zwiększoną liczbę podstacji oraz zmodernizowanie ich wyposażenia, jest wariantem najbardziej korzystnym z punktu widzenia poziomu napięcia. Kolejne etapy modernizacji zwiększają poziom napięcia średniego, zmniejszają i ograniczają rozrzut wartości przy utrzymaniu charakteru normalnego obciążonego rozkładów



Rys. 16. Wykres przebiegu prądu PT A

Źródło: oprac. własne.



Rys. 17. Wykres przebiegu prądu PT X

Źródło: oprac. własne.

wartości [7, 8, 14, 17]. Oznacza to zwiększenie pewności i stabilności zasilania, co jest niezwykle istotne dla taboru szybkiego z napędem asynchronicznym [7].

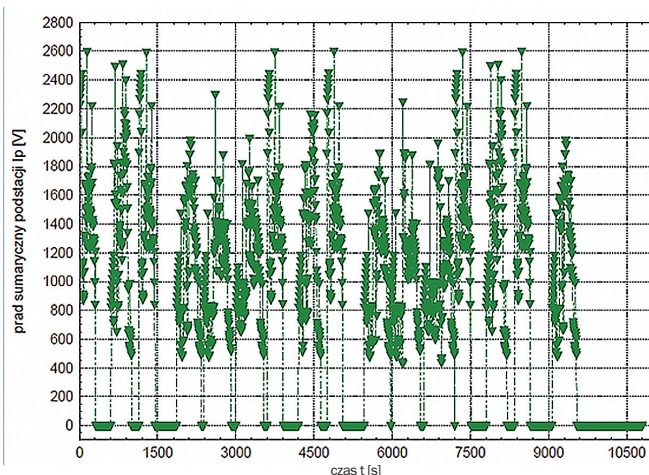
Charakterystyka obciążeń prądowych podstacji

W celu koordynacji obciążeń podstacji i utrzymania odpowiedniego napięcia w sieci trakcyjnej w normie PN-EN 50388 określone zostały maksymalne dopuszczalne wartości prądu pobieranego przez pojazdy. Obowiązują tu kryteria: 2500 A to maksymalny pobór prądu przez pojazd na liniach konwencjonalnych, a także liniach łączących, zaliczanych do linii HS; 3200 A to maksymalny dopuszczalny pobór prądu na modernizowanych liniach prędkości powyżej 200 km/h.

Na podstawie wykresów 16 - 20 można zaobserwować, jak wprowadzenie dodatkowych podstacji w miejsce kabin sekcyjnych spowodowało zmniejszenie obciążenia sąsiednich podstacji.

Analiza statystyczna napięcia obciążeń prądowych podstacji dla analizowanych wariantów

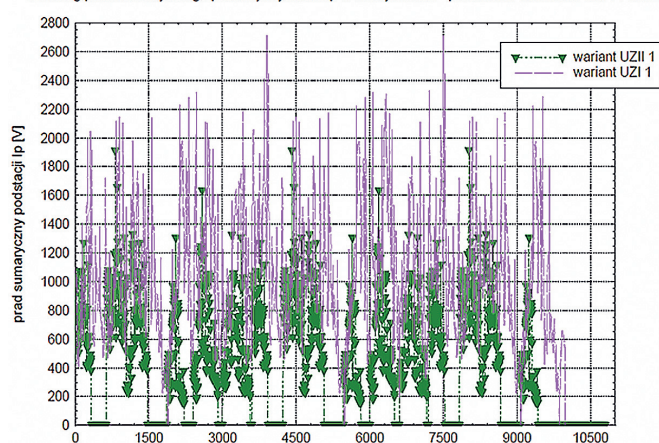
Analiza statystyczna prądu podstacji została wykonana przykładowo w zakresie wariantów UZI 1 oraz UZII 1.



Rys. 19. Wykres przebiegu prądu PT Y

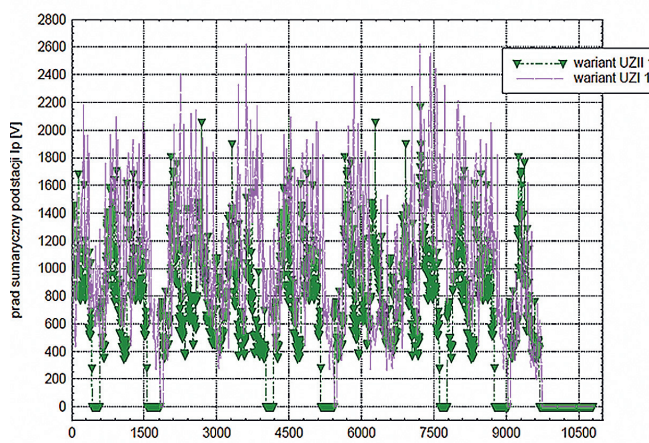
Źródło: oprac. własne.

Przebieg prądu sumarycznego podstacji Mysliborz Ip w funkcji czasu t - porównanie wariantów UZI 1 i UZII 1



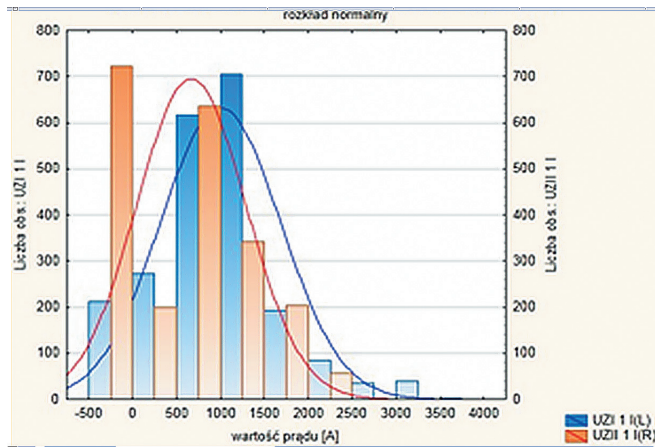
Rys. 18. Wykres przebiegu prądu PT B

Źródło: oprac. własne.

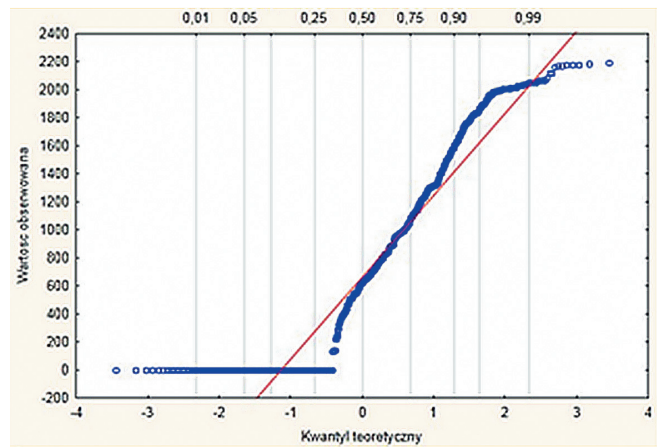


Rys. 20. Wykres przebiegu prądu PT C

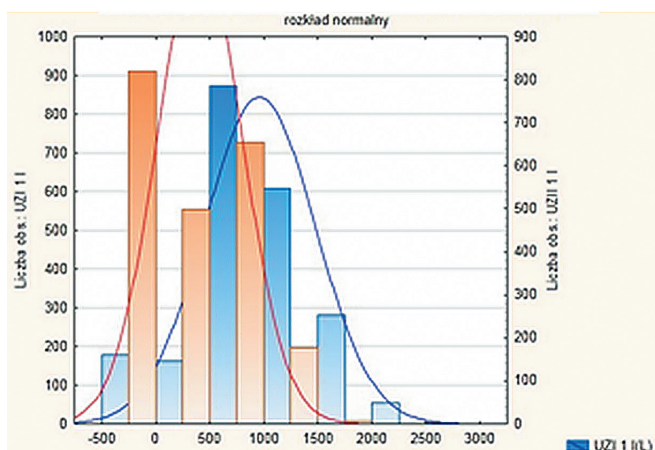
Źródło: oprac. własne.



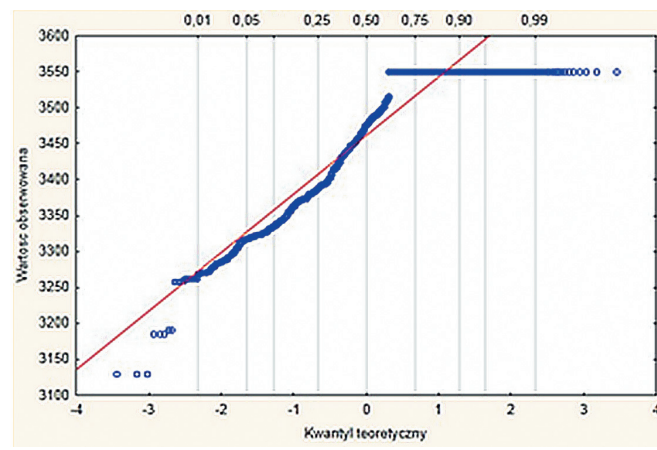
Rys. 21. Histogram prądu PT A – porównanie wariantów UZI 1 oraz UZI 1
Źródło: oprac. własne.



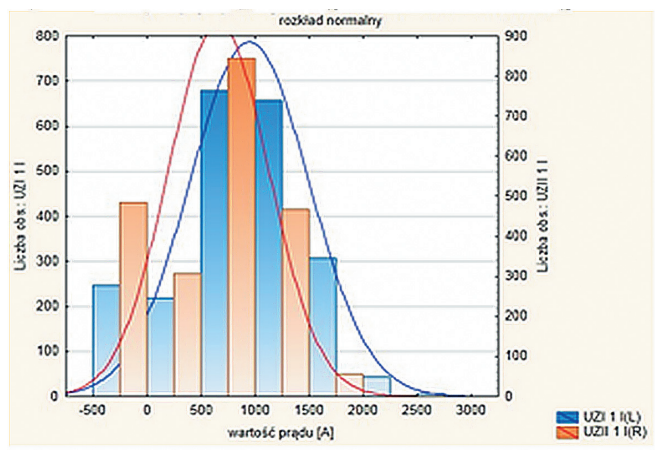
Rys. 22. Wykres kwantyl-kwantyl, PT A – wariant UZI 1
Źródło: oprac. własne.



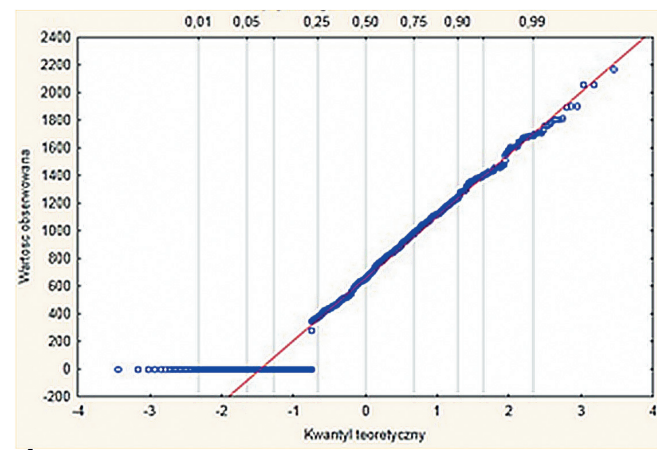
Rys. 23. Histogram prądu PT B – porównanie wariantów UZI 1 oraz UZI 1
Źródło: oprac. własne.



Rys. 24. Wykres kwantyl-kwantyl, PT B – wariant UZI 1
Źródło: oprac. własne.



Rys. 25. Histogram prądu PT C – porównanie wariantów UZI 1 oraz UZI 1
Źródło: oprac. własne.



Rys. 26. Wykres kwantyl-kwantyl, PT C – wariant UZI 1
Źródło: oprac. własne.

Na podstawie wykresów z rysunków 21 - 26 można stwierdzić, iż prądy podstacji podlegają rozkładowi normalnemu w znacznym stopniu, o czym świadczą wykresy kwantylowe. Jedyнным czynnikiem zaburzającym dopasowanie jest występowanie próbek o wartości zerowej, co odpowiada chwilom czasowych, w których dana podstacja nie była obciążona, a to natomiast nie stanowi zdarzenia

losowego. Dlatego też można mniemać, iż usunięcie próbek zerowych (w warunkach rzeczywistych: zwiększenie ruchu i wyeliminowanie pracy jałowej podstacji) zapewniłoby uzyskanie zgodności z rozkładem normalnym. Odnosząc się natomiast do histogramów prądowych, można zaobserwować, na ile wariant dotyczący zwiększenia liczby podstacji trakcyjnych jest bardziej korzystny.

Wnioski

Na podstawie analiz przeprowadzonych za pomocą odpowiednich symulacji komputerowych oraz analiz statystycznych uzyskanych wyników można ocenić wpływ rozpatrywanych modernizacji układu zasilania na charakter obciążenia podstacji danej linii przy zwiększaniu prędkości ruchu pociągów powyżej 220 km/h. Należy jednak pamiętać, iż zdolności przesyłowe systemów zasilania 3 kV DC są ograniczone (w stosunku do systemów AC) i wymagane jest dość gęste rozmieszczenie podstacji trakcyjnych. Zastosowanie odpowiednich metod badań i analiz pozwala na określenie zakresu możliwego etapowania modernizacji pod kątem stopniowego zwiększania ruchu pociągów. Dodatkowym ograniczeniem są, nie przedstawione w niniejszym referacie, kwestie:

- wahań napięcia w sieci trakcyjnej i ich wpływu na parametry trakcyjno-ruchowe pociągów [7],
- poziomów prądów zwarć i nastaw w.s.z. [3],
- zdolności przesyłowych i ograniczeń w wynikających z niepełnej dyspozycyjności układu zasilania [10],
- możliwości przyłączenia nowych podstacji do lokalnej sieci elektroenergetycznej i uzyskiwania w tym zakresie wymaganych decyzji [11].

Właśnie te kryteria mogą znacząco decydować o wymaganym zakresie modernizacji.

Bibliografia:

- [1] Altus J., Novak M., Otcenasova A., Pokorny M., Szelağ A., *Quality parameters of electricity supplied to electric railways*, "Scientific Letters of the University of Žilina-Communications" 2001, No. 2–3.
- [19] Drapik A., Kobielski A., Prusak J., *Selected issues of traction substation load variability*, [w:] Karwowski K., Szelağ A., *Modern electric traction*, Vol. 2: Power supply, Gdańsk University of Technology, Gdańsk 2009.
- [3] Mierzejewski L., Szelağ A., Gałuszewski M., *System zasilania trakcji elektrycznej prądu stałego*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1989.
- [5] Mierzejewski L., Szelağ A., *Filtry wygładzające w podstacjach kolejowych prądu stałego 3kV*, „Technika Transportu Szynowego” 1–2/2000.
- [4] Mierzejewski L., Szelağ A., *Problemy zasilania linii dużych prędkości jazdy*, XII Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej i IV Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie SEMTRAK'2006.
- [2] Mierzejewski L., Szelağ A. i in., *Ocena układu zasilania linii CMK pod kątem wprowadzenia prędkości jazdy pociągów 250km/h i wstępna analiza wprowadzenia jednostopniowej transformacji napięcia w podstacjach trakcyjnych tej linii* [praca ZTE IME PW na zlecenie DG PKP, Warszawa 1996–1997.
- [8] Szelağ A., Buchta K., *Application of statistic and probabilistic methods for assessment of quality of 3kV DC network energy delivery to traction vehicles*, Chapter 4: *Modern Electric Traction*, Vol. 2: Power supply, Politechnika Gdańska, Gdańsk ROK.
- [14] Szelağ A., Buchta K., *Zastosowanie metod statystyczno-probabilistycznych do oceny napięcia w sieciach trakcyjnych 3 kV DC*, Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Nowoczesna trakcja elektryczna w zintegrowanej Europie XXI wieku” MET'2005, Warszawa 2005.
- [10] Szelağ A., Maciołek T., *A 3 kV DC electric traction system modernisation for increased speed and trains power demand – problems of analysis and synthesis*, "Nazwa Czasopisma" 2013, No. 3a(89).
- [13] Szelağ A., Maciołek T., Drażek Z., Patoka M., Burak-Romanowski R., Urban A., Załuska Z., Jefimowski W. i in., *Ekspertyza dotycząca układu zasilania sieci trakcyjnej linii CMK. Etap I i II – 2012–2013* [praca ZTE IME PW na zlecenie PKP Energetyka S.A., Warszawa].
- [11] Szelağ A., Maciołek T., *Elektroenergetyka trakcyjna linii kolejowych w Polsce – uwagi dotyczące procesu projektowania*, „Technika Transportu Szynowego” 2012, nr 7–8.
- [9] Szelağ A., *Metodyka modelowania i badań symulacyjnych zelektryfikowanej linii kolejowej*, „Przegląd Elektrotechniczny” 1988, nr 4.
- [16] Szelağ A., Mierzejewski L., *Ground Transportation Systems*, [w:] *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, Wydawnictwo, New York 1999.
- [15] Szelağ A., Mierzejewski L., *Modelling and verification of simulation results in computer aided analysis of electric traction systems*, International conference on computers in railways COMPRAIL, Bologna 2000.
- [12] Szelağ A., *Weryfikacja modeli symulacyjnych systemu trakcji elektrycznej prądu stałego*, 4th International Scientific Conference „Drives and supply systems for modern electric traction in integrated XXIst century Europe”, MET'99, Warsaw 1999.
- [7] Szelağ A., *Wpływ napięcia w sieci trakcyjnej 3k V DC na parametry energetyczno-trakcyjne zasilanych pojazdów*, Instytut Naukowo-Wydawniczy „Spatium”, Radom 2013.
- [6] Szelağ A., *Zagadnienia analizy i projektowania systemu trakcji elektrycznej prądu stałego z zastosowaniem technik modelowania i symulacji*, „Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Seria Elektryka” 2002, z. 123.
- [17] Urban A., *Analiza obciążeń podstacji trakcyjnych 3 kV DC linii CMK na odcinku Grodzisk Maz.–Zawiercie modernizowanej dla wprowadzenia ruchu pociągów z prędkościami 200–220 km/h*, 2012.
- [18] Załuska Z., *Analiza obciążeń układu zasilania 3 kV DC modernizowanej dla zwiększonych prędkości jazdy pociągów linii kolejowej E-65 na odcinku Warszawa-Gdańsk*, 2012.

Autor:

Mgr inż. **Agata Urban** – Politechnika Warszawska, Instytut Maszyn Elektrycznych, Zakład Trakcji Elektrycznej.

Przypisy

- ¹ Niniejszy referat został wygłoszony na konferencji MET'2013.