

PROPAGACJA ZABURZEŃ NAPIĘCIA GENEROWANYCH PRZEZ TRAKCJĘ PRĄDU STAŁEGO

Piotr **Starula**^{1*}, Zbigniew **Olczykowski**²

¹ Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny, Wydział Transportu, Elektrotechniki i Informatyki, Malczewskiego 29, 26-600 Radom, Polska, p.starula@pkpenergetyka.pl

* Corresponding author

² Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny, Wydział Transportu, Elektrotechniki i Informatyki, Malczewskiego 29, 26-600 Radom, Polska, z.olczykowski@uthrad.pl

Streszczenie – Trakcja elektryczna prądu stałego należy do największych odbiorców energii elektrycznej zasilanych z systemu elektroenergetycznego. Przyjęty w Polsce system trakcyjny wymaga przekształcenia napięcia przemiennego systemu elektroenergetycznego na napięcie stałe. Odbywa się to na podstacjach trakcyjnych, gdzie zainstalowane są spełniające to zadanie przekształtniki. Pojazdy trakcyjne charakteryzują się znacznymi mocami jednostkowymi oraz dynamicznie zmieniającym się obciążeniem. Wszystko to powoduje, że system trakcyjny generuje szereg zaburzeń napięcia. W artykule przedstawiono analizę propagacji zaburzeń napięcia generowanych przez podstację trakcyjną zarówno do systemu elektroenergetycznego jak i linii potrzeb własnych oraz potrzeb nietrakcyjnych.

Słowa kluczowe – jakość energii, trakcja elektryczna, wyższe harmoniczne, zaburzenia napięcia

WSTĘP

Ze względu na zmienne obciążenia oraz specyfikę zasilania (napięciem stałym) elektryczne pojazdy trakcyjne generują wiele zaburzeń mających wpływ na jakość energii elektrycznej. Zaburzenia te obejmują linie i stacje zasilające, systemy trakcji kolejowej oraz inne pojazdy zasilane z linii systemu trakcyjnego [1,2]. Ponadto, wiele problemów związanych z jakością energii elektrycznej może przenosić się na niższy poziom napięcia trakcji kolejowej [3]. Jest to szczególnie ważne w przypadku przetwarzania parametrów energii między układami zasilania prądu przemiennego i prądu stałego. Prowadzi to występowania wyższych harmonicznych oraz do wahań i zapadów napięcia w systemie prądu stałego oraz prądu przemiennego [4].

Propagacja zaburzeń generowanych przez trakcję systemu 3kV DC jest bardzo złożonym zjawiskiem, które wymaga zastosowania kompleksowego podejścia przy wykorzystaniu technik pomiarowych, modelowania oraz symulacji komputerowych [5-9].

W publikacji [10] przedstawiono analizę oddziaływania podstacji trakcyjnej z sześciopulsowymi przekształtnikami. W niniejszym artykule przedstawiono zagadnienia dotyczące zaburzeń generowanych przez podstację trakcyjną z przekształtnikami dwunastopulsowym.

Ze względu na złożoność oddziaływań systemów zasilania trakcji elektrycznej, skupiono się głównie na badaniu zjawisk wywołujących zaburzenia generowane przez system trakcyjny.

I. KRYTERIA OCENY JAKOŚCI ENERGII

Parametry charakteryzujące jakość energii elektrycznej to zbiór wielkości, które opisują właściwości procesu dostarczania energii do użytkownika w normalnych warunkach pracy. Parametry te określają napięcie zasilające oraz ciągłość zasilania odbiorcy, a na ich wartości mogą wpływać zarówno dostawcy, jak i odbiorcy energii elektrycznej.

Wśród parametrów opisujących jakość energii elektrycznej znajdują się wielkości podlegające procesom normalizacji. Są to m.in.:

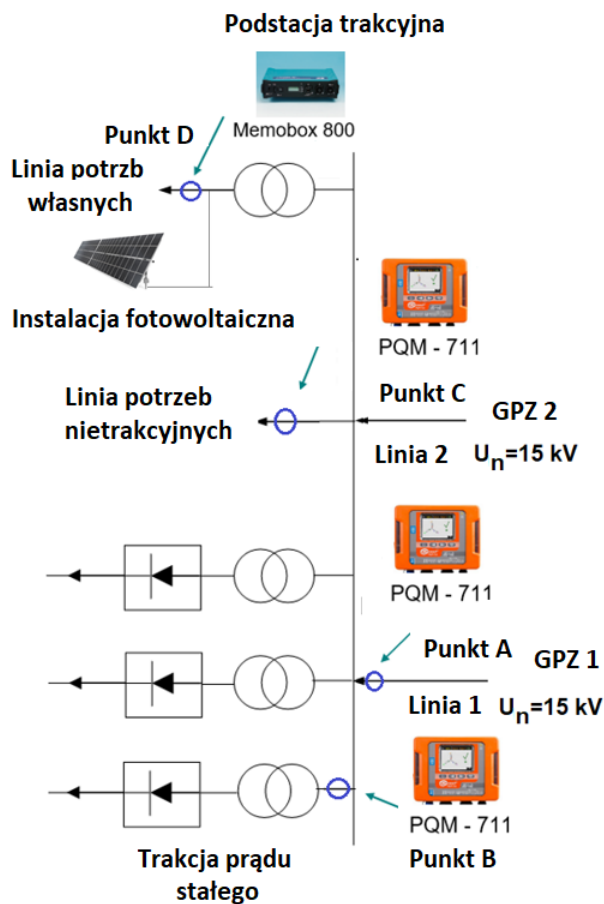
- częstotliwość napięcia
- zmiany wartości skutecznej napięcia
- asymetria napięcia
- poziom migotania światła
- wyższe harmoniczne napięcia

Wartości tych parametrów są regulowane przez normy oraz odpowiednie akty prawne [11]. W Polsce wartości parametrów charakteryzujących jakość energii elektrycznej w sieciach publicznych określa Rozporządzenie [12].

II. SPOSÓB PRZEPROWADZENIA POMIARÓW

W pracy zaprezentowano analizę wyników pomiarów parametrów jakości energii zarejestrowanych jednocześnie w czterech punktach linii podstacji trakcyjnej. Punkty przyłączenia analizatorów zostały przedstawione na rysunku 1.

Do pomiaru wskaźników jakości energii elektrycznej użyto trzech analizatorów PQM 711 oraz analizatora Memobox 800.



Rys. 1. Miejsca podłączenia analizatorów

Pomiary w linii zasilającej podstację trakcyjną, linii zasilającej przekształtniki trakcyjne oraz linii potrzeb nietrakcyjnych został dokonany z wykorzystaniem przekładników napięciowych i przekładników prądowych. Na Rysunku 2 przedstawiono sposób podłączenia analizatora PQM-711 do linii zasilającej podstację trakcyjną – Punkt A.

Zaciski napięciowe analizatora przyłączono do strony wtórnej przekładników napięciowych 15kV/100V. Do strony wtórnej przekładników prądowych przyłączono wejścia prądowe analizatora, wykorzystując dedykowane cęgi prądowe C-6A.



Rys. 2. Podłączenie analizatora PQM – 711 – linia zasilająca podstację trakcyjną – Punkt A

W linii potrzeb własnych (o napięciu $U_n=0,4kV$) dokonano bezpośredniego pomiaru napięcia. Do pomiaru prądów wykorzystano cęgi giętkie LEM-Flex. Sposób podłączenia analizatora Memobox 800 przedstawiono na Rysunku 3 – Punkt 4.



Rys. 3. Podłączenie analizatora Memobox 800 – obwody potrzeb własnych podstacji trakcyjnej – Punkt D

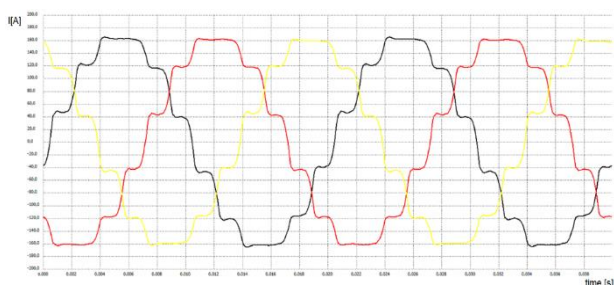
Podczas badań zastosowano trzy cykle pomiarowe z różnymi interwałami rejestracji danych. Pierwszy z nich obejmował pomiary z zastosowaniem sekundowych interwałów. Pozwoliło to na ocenę zaburzeń napięcia generowanych przy dynamicznie zmieniającym się obciążeniu podstacji trakcyjnej, przykładowo przy rozruchu ciężkich składów napędzanych. Kolejne, dwa cykle pomiarowe przeprowadzone zostały z zastosowaniem 10-minutowych interwałów pomiarów. Pozwoliło to na ocenę jakości energii w obwodach podstacji trakcyjnej, według obowiązującego w Polsce Rozporządzenia [12].

III. ANALIZA WYNIKÓW POMIARÓW

Pomiary wskaźników jakości energii elektrycznej (w obwodach podstacji trakcyjnej) wykonane zostały w ramach prac badawczych prowadzonych w Katedrze Elektrotechniki i Energetyki, Wydziału Transportu, Elektrotechniki i Informatyki oraz badań związanych z pracą inżynierską jednego z autorów artykułu. Do pomiarów wykorzystana została zakupiona w ostatnim czasie nowoczesna aparatura badawcza (analizatory jakości energii elektrycznej – PQM firmy SONEI). W wyniku badań zgromadzono szereg danych pomiarowych, których częściową analizę przedstawiono w niniejszym artykule.

Z uwagi na zastosowanie na podstacjach trakcyjnych przekształtników zamieniających napięcie zmienne na napięcie stałe problemem staje się odkształcenie prądu pobieranego przez podstację trakcyjną.

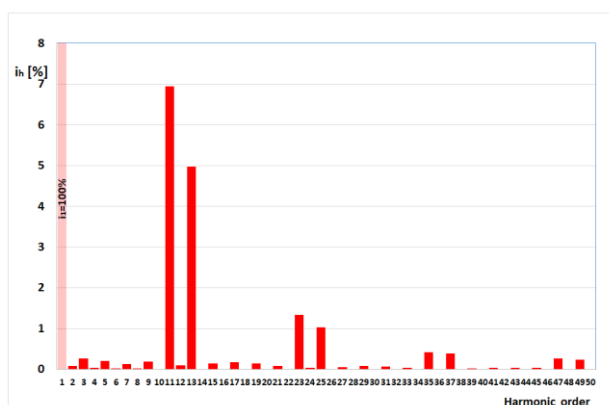
Na Rysunku 4 przedstawiono przebiegi prądu zarejestrowane w linii zasilającej podstację trakcyjną.



Rys. 4. Przebiegi prądów zarejestrowane w linii zasilającej podstację trakcyjną – Punkt A

Widoczne jest odkształcenie od przebiegu sinusoidalnego. Odkształcenie prądu związane jest z zastosowaniem przekształtników na podstacji trakcyjnej.

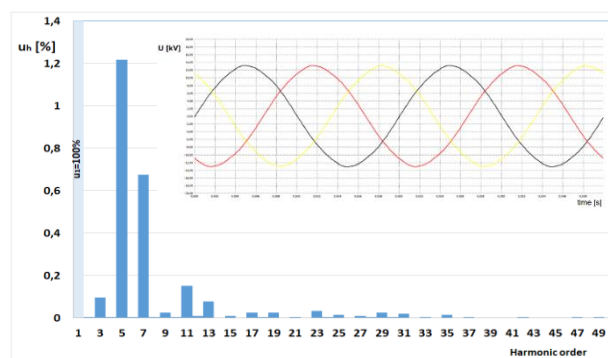
Widmo prądów jest charakterystyczne dla dwunastopulswych przekształtników – Rysunek 5.



Rys. 5. Widmo prądu zarejestrowanego w jednej z faz linii zasilającej podstację

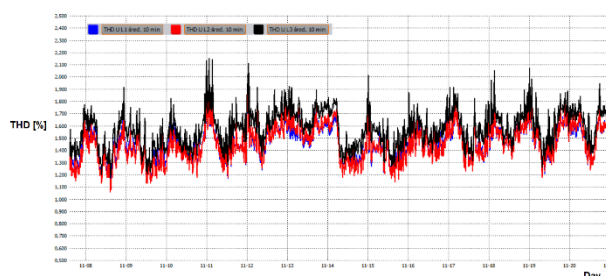
Odształcone prądy, przepływając przez impedancję elementów sieci powodują odkształcone spadki napięcia.

Spadki napięcia odejmując się od napięcia zasilającego (źródłowego) powodują odkształcenia napięcie w punkcie zasilania podstacji – Rysunek 6 – Punkt A.



Rys. 6. Przebiegi napięcia i widmo harmonicznych napięcia zarejestrowane w Punkcie A

Zniekształcenie napięcia w punkcie wspólnego przyłączenia (PWP) jest spowodowane zarówno przez obciążenia stacji trakcyjnej, jak i przez inne odbiorniki nieliniowe, które są zasilane z systemu elektroenergetycznego. Zmiany współczynnika zniekształceń harmonicznych THD zwykle mają charakterystyczny przebieg, który jest uzależniony od zmian obciążenia w układzie elektroenergetycznym. Rysunek 7 przedstawia typowy przebieg zmian współczynnika THD zarejestrowany w ciągu tygodnia pomiarów.

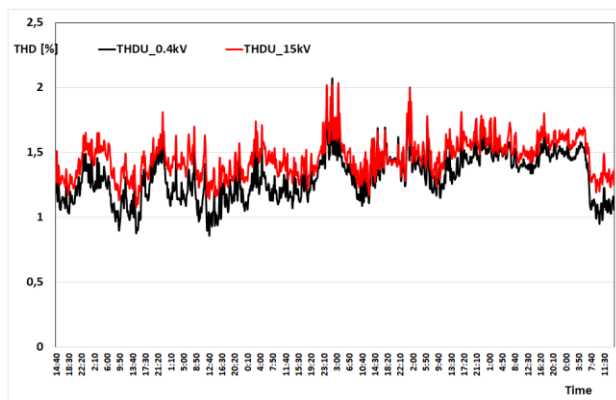


Rys. 7. Zmiany współczynnika THD zarejestrowane w ciągu tygodnia w linii zasilającej podstację trakcyjną

Mogą wystąpić dodatkowe, gwałtowne zmiany odkształcenia napięcia wynikające ze zmienności obciążenia podstacji trakcyjnej.

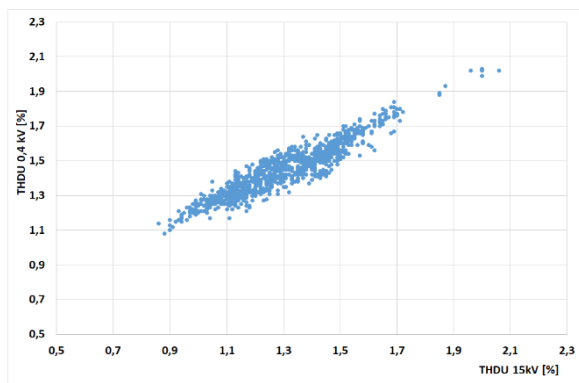
Punkt PWP podstacji trakcyjnej (Punkt A) jest również punktem zasilania linii potrzeb nietrakcyjnych. Oznacza to, że zaburzenia napięcia w PWP generowane są do linii potrzeb nietrakcyjnych i potrzeb własnych.

Na Rysunku 9 przedstawiono zmiany współczynnika THDu zarejestrowane jednocześnie w linii zasilającej podstację trakcyjną (Punkt A) oraz obwodach własnych podstacji (punkt D).



Rys. 8. Zmiany współczynnika THDU zarejestrowanego w ciągu tygodnia w obwodach własnych podstacji oraz linii zasilania podstacji trakcyjnej

Na Rysunku 9 pokazano korelację między zmianami $THDU$ na poziomie $U_n=15kV$ a $THDU$ na poziomie $U_n=0,4kV$. Współczynnik korelacji r_{THDU} wynosi 0,933.

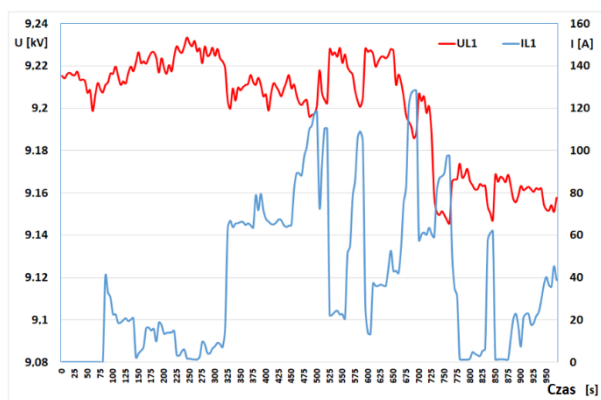


Rys. 9. Korelacja między THDU zarejestrowanym w ciągu tygodnia w obwodach własnych podstacji a linią zasilania podstacji trakcyjnej

O stopniu odkształcenia napięcia w obwodach własnych podstacji trakcyjnej i linii potrzeb nietrakcyjnych decyduje głównie propagacja zaburzeń generowanych przez obciążenie wynikające z ruchu pojazdów trakcyjnych.

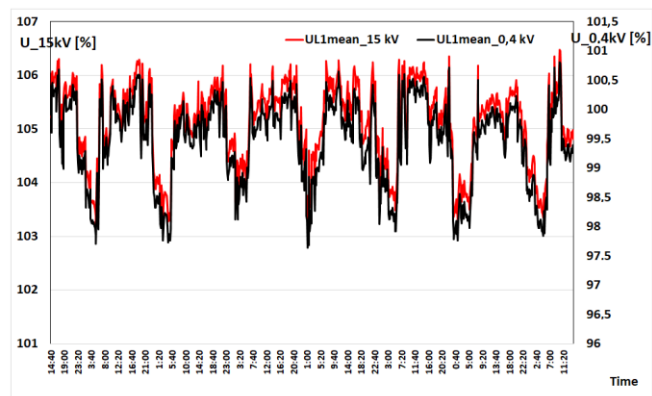
Kolejnym zaburzeniem generowanym przez trakcję elektryczną są gwałtowne zmiany wartości napięcia. Główne przyczyny to: dynamiczne zmiany obciążenia podstacji wynikające n.in. z rozruchu jednostek trakcyjnych, szczególnie o dużych mocach jednostkowych oraz zaburzenia w trakcji prądu stałego.

Na Rysunku 10 przedstawiono zmiany wartości skutecznej napięcia oraz prądu zarejestrowane w linii zasilającej podstację podczas rozruchu jednostki trakcyjnej. Dynamiczny wzrost prądu powoduje gwałtowną zmianę napięcia.



Rys. 10. Zmiany wartości skutecznej napięcia oraz prądu zarejestrowane w linii zasilania podstacji trakcyjnej

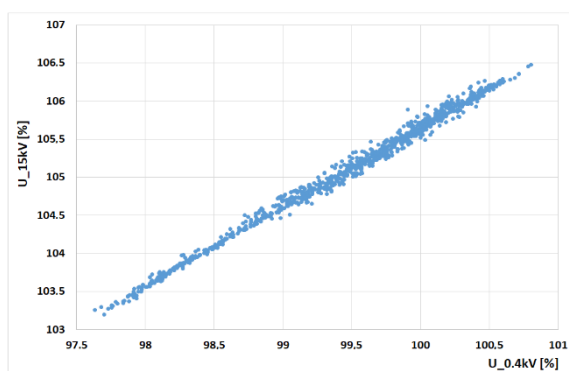
Na Rysunku 11 przedstawiono zmiany wartości skutecznej napięcia zarejestrowane jednocześnie (w ciągu tygodnia) w linii zasilającej potrzeby nietrakcyjne – Punkt B oraz linii potrzeb własnych – Punkt D.



Rys. 11. Zmiany wartości skutecznej napięcia oraz prądu zarejestrowane w linii zasilania podstacji trakcyjnej

Współczynnik korelacji określający zależność zmian między napięciami $U_n - 15kV$ i $U_n - 0,4kV$ wynosi $r_{UAD}=0.996$ – rysunek 12.

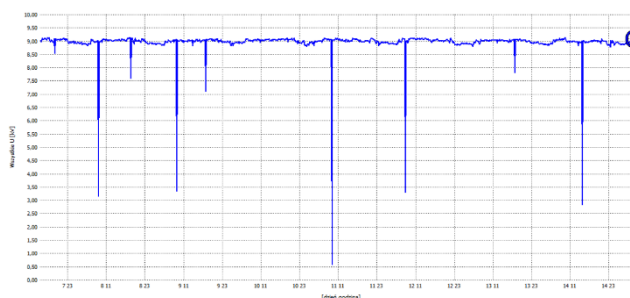
Oznacza to, że zmiany wartości skutecznej napięcia w linii potrzeb własnych (linia $U_n - 0,4kV$) są ściśle powiązane ze zmianami napięcia w linii zasilającej podstację trakcyjną. W przypadku wzrostu obciążenia po stronie prądu stałego następuje zmniejszenie napięcia w PWP. Zaburzenie to jest propagowane do obwodów własnych podstacji o napięciu 0,4kV.



Rys. 12. Zmiany wartości skutecznej napięcia oraz prądu zarejestrowane w linii zasilania podstacji trakcyjnej

Z uwagi wrażliwe odbiorniki zapewniające bezpieczeństwo ruchu pojazdów trakcyjnych bardzo istotnym jest zapewnienie stałej wartości napięcia zasilającego. Pojawiające się zapady napięcia są jednym z zaburzeń, które mogą powodować zakłócenia pracę odbiorników, głównie automatyki i urządzeń informatycznych.

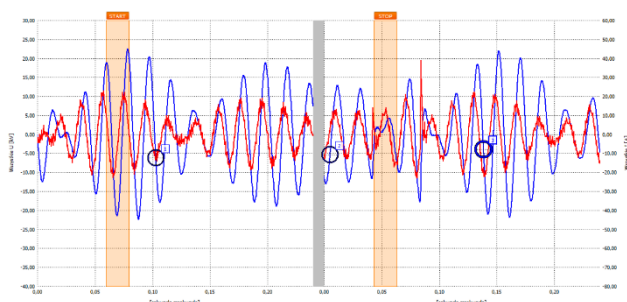
Na Rysunku 13 przedstawiono zapady napięcia zarejestrowane w jednej z faz linii zasilającej podstację trakcyjną.



Rys. 13. Zapady napięcia zarejestrowane w linii zasilającej podstację trakcyjną

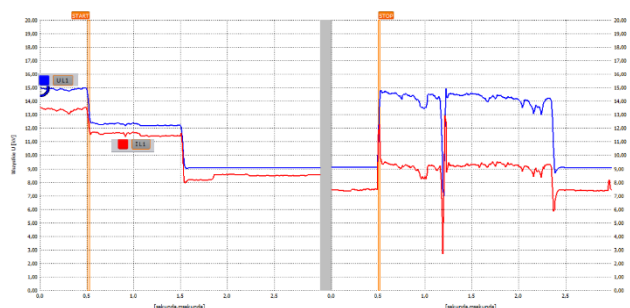
Zaburzenia powstające w linii zasilającej podstację mają bezpośredni wpływ na jakość energii elektrycznej w obwodach nietrakcyjnych. Spadki napięcia należą do najczęstszych zakłóceń w systemie elektroenergetycznym, a ich eliminacja jest bardzo trudna, szczególnie w przypadku dużych mocy odbiorników zakłócających i nieregularnych zmian obciążenia.

Rysunek 14 ilustruje przebieg napięcia i prądu podczas wystąpienia zakłócenia w fazie L1. Czas trwania zaburzenia wynosi poniżej 0,5 sekundy. Wraz z malejącym napięciem, zmniejsza się również prąd. Na podstawie tych danych można wnioskować, że przyczyną tego zaburzenia nie są odbiorcy zasilani z linii potrzeb nietrakcyjnych.



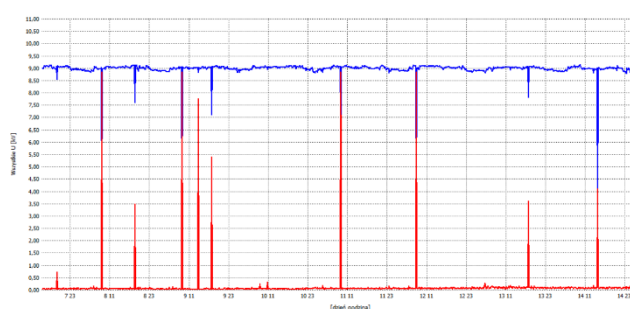
Rys. 14. Oscylogramy napięć i prądów zarejestrowane zgodnie z potrzebami nietrakcyjnymi – L1

Na rysunku 15 przedstawiono inny przykład zmian wartości skutecznej napięcia i prądu zarejestrowanych podczas wystąpienia zakłóceń w fazie L1.



Rys. 15. Przedstawione zmiany wartości skutecznej napięć i prądów zarejestrowanych w fazie L1, zgodnie z potrzebami nietrakcyjnymi.

Jednym ze skutków zapadów napięcia pokazanych na Rysunku 16 jest pojawienie się zjawiska migotania światła m.in. w obwodach własnych i nietrakcyjnych. Objawia się to zwiększoną wartością wskaźnika migotania światła P_{st} .



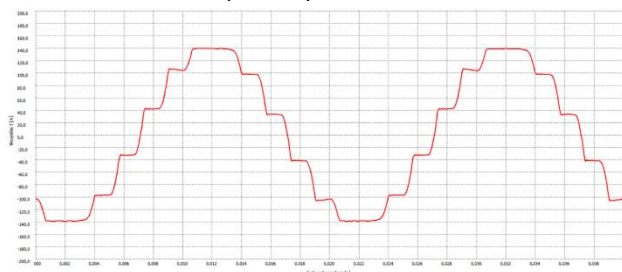
Rys. 16. Zmiany wartości skutecznej napięcia oraz wskaźnika migotania światła P_{st} zarejestrowane w linii potrzeb nietrakcyjnych

Zjawisko migotania światła może być widoczne lub dokuczliwe przez użytkowników odbiorników oświetleniowych zasilanych z linii potrzeb własnych i linii potrzeb nietrakcyjnych.

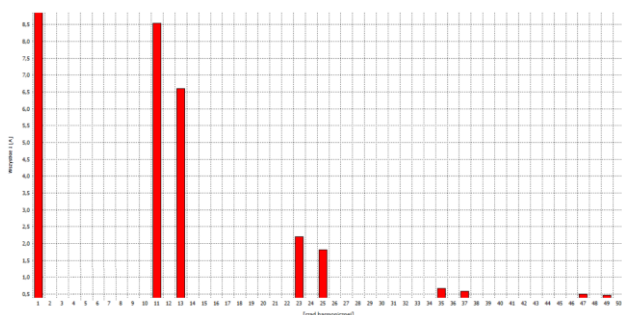
IV. OCENA WYNIKÓW POMIARÓW

Trakcja elektryczna, ze względu na swoje duże zapotrzebowanie na energię elektryczną, stanowi jeden z największych odbiorców zasilanych z systemu elektroenergetycznego. Podstacje trakcyjne są źródłem zakłóceń wpływających na jakość energii w systemie elektroenergetycznym, z którego są zasilane. Jednym z takich zakłóceń jest zmiana napięcia zasilającego podstawę trakcyjną. Zmiany te charakteryzują się dużą dynamiką, szczególnie podczas rozruchu dużych jednostek trakcyjnych. Zakłócenia są propagowane na inne linie, w tym na linie zasilające odbiorników nietrakcyjnych. Wzrost zużycia energii przez podstawę trakcyjną, wynikający z ruchu pociągów, powoduje wzrost wartości prądu w linii zasilającej.

Analiza pomiarów wskaźników charakteryzujących jakość energii w podstacji trakcyjnej pozwala jednoznacznie stwierdzić, że obciążenie podstacji ma istotny wpływ na jakość napięcia w linii SN 15 kV. Współczynnik THD oraz zmiany napięcia w linii zasilającej podstawę potwierdzają, że przy małych obciążeniach prąd pobierany przez stację pozostaje na stabilnym poziomie, a współczynnik THD jest niski. Jednak rozruchy jednostek trakcyjnych powodują wzrost prądu, co z kolei wpływa na wzrost współczynnika THD. Należy zwrócić szczególną uwagę na odkształcenie prądu – Rysunek 17 oraz charakterystyczne harmoniczne – Rysunek 18 generowane przez zestawy prostowników pracujących w układzie dwunastopulsowym.



Rys. 17. Przebieg prądu zarejestrowanego w linii zasilającej zespoły prostownikowe – Punkt B



Rys. 18. Widmo harmonicznych prądu zarejestrowanego w linii zasilającej zespoły prostownikowe – Punkt B

Podczas analizy wykonanych pomiarów szczególną uwagę należy zwrócić na parametry zasilania linii

nietrakcyjnych. Systemy nietrakcyjne mają dużą różnorodność poboru mocy i są bardziej wrażliwe na zakłócenia. Dlatego, dla tego typu obwodów należy zapewnić odpowiednie parametry napięcia zasilania. Zastosowanie zestawów prostowników do układów prądu stałego ma wpływ na zakłócenia występujące w obwodach nietrakcyjnych. Dodatkowym źródłem zakłóceń wynikających z niskiej mocy zwarciowej pomocniczego punktu przyłączeniowego podstacji są zakłócenia powodowane przez odbiorniki podłączone do obwodów potrzeb nietrakcyjnych.

Głównymi zakłóceniami w linii potrzeb nietrakcyjnych są zniekształcenia napięcia harmonicznym oraz zmiana wartości krótkotrwałego migotania Pst. Wpływ dynamiki obciążeń na stację trakcyjną wpływa na zmiany napięcia i wartość krótkotrwałego migotania światła Pst. Zmiany wskaźnika Pst rejestrowane w sieci zasilania podstacji wynikają z rozruchu pociągu, co jest związane ze zmianami poziomu napięcia zarówno po stronie DC, jak i po stronie sieci zasilania podstacji trakcyjnej.

V. WNIOSKI

Analizując wpływ układu trakcyjnego prądu stałego na obwody pomocnicze stwierdzono, że zmiany napięcia w obwodach pomocniczych są ściśle związane ze zmianami napięcia w linii zasilającej stację. Pomiary wykazały, że zmiany napięcia i wartości THD w linii zasilającej podstawę mają bezpośredni wpływ na jakość energii elektrycznej w obwodach potrzeb własnych i potrzeb nietrakcyjnych.

Dodatkowo, analiza wykonanych pomiarów wykazała, że istnieje bezpośredni wpływ na jakość energii elektrycznej w obwodach pomocniczych z powodu zakłóceń w liniach średniego napięcia 15 kV. Spadki napięcia są ściśle związane z zakłóceniami w linii 15 kV. Jest to istotne, ponieważ zaburzenia napięcia mogą prowadzić do różnych problemów, takich jak awarie urządzeń czy zagrożenie bezpieczeństwa pracy systemów, w tym wpływających na bezpieczeństwo ruchu pociągów. Dlatego, zapewnienie właściwej jakości napięcia w obwodach pomocniczych jest niezwykle ważne. W tym celu należy zadbać o odpowiednie parametry napięcia zasilania oraz zastosować odpowiednie filtry i układy regulacji, aby zmniejszyć wpływ zakłóceń na jakość energii elektrycznej.

PROPAGATION OF VOLTAGE DISTURBANCES GENERATED BY DC TRACTION

Abstract: DC electric traction is one of the largest consumers of electricity supplied from the power system. The traction system adopted in Poland requires the transformation of the alternating voltage of the power system into direct voltage. This is done at traction substations, where converters that fulfill this task are installed. Traction vehicles are characterized by significant unit power and dynamically changing load. All this causes the traction system to generate a number of voltage

disturbances. The article presents an analysis of the propagation of voltage disturbances generated by the traction substation to both the power system and the auxiliary and non-traction lines.

Key words: power quality, electric traction, higher harmonics, voltage disturbances

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Brenna, F. Foiadelli, and D. Zaninelli, *Electrical Railway Transportation Systems*, Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018.
- [2] Y. Oura, Y. Mochinaga, and H. Nagasawa, "Railway electric power feeding systems," *Jpn. Railway Transp. Rev.*, no. 16, pp. 48–58, Jun. 1998.A.
- [3] Steimel, "Power-electronic grid supply of AC railway systems", w: *Proc. 13th Int. Conf. Optim. Elektryczność. Elektron. (OPTIM)*, maj 2012, s. 16–25
- [4] A. Delle Femine, D. Gallo, D. Giordano, C. Landi, M. Luiso i D. Signorino, *Ocena jakości zasilania w kolejowych systemach zasilania trakcją*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 69, 5, 2020 r
- [5] Szelać A, Nikšić M.; *Advances in Electric Traction System*, *Energies* 16 (3), 1346, 2023
- [6] Żelazny R.; *Quality Of Electricity In Power Lines For Receivers PKP Polish Railway Lines S.A.*, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej* 297, *Elektrotechnika* 37, *RUTJEE*, z. 37 (1/2018), 37-48, 2018, s. doi: 10.7862/re.2018.3
- [7] Pawełek R.; *Impact of the traction substation on the power grid* (in Polish: *Oddziaływanie podstacji trakcyjnej na sieć elektroenergetyczną*), *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN, 0033-2097, R. 90 No 7, 234-238.2014, doi:10.12915/pe.2014.07.52
- [8] Sikora A., Kulesz B.; *Dependence Of Traction Voltage Quality On Transformer-Rectifier System*, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* Nr 80,63-67, 2008
- [9] Pomykała A. Szelać A.; *Reduction of Power Consumption and CO2 Emissions as a Result of Putting into Service High-Speed Trains: Polish Case*, *Energies* 15(12), 4206; 2022, <https://doi.org/10.3390/en15124206>
- [10] Olczykowski Z., Kozyra J.: *Propagation of Disturbances Generated by DC Electric Traction*, 15, 18, *Energies*, 2022
- [11] PN-EN 50160; *Parametry napięcia zasilania w publicznych sieciach elektroenergetycznych*. Polski Komitet Normalizacyjny: Warszawa, Polska, 2014. Dostępne online: <https://sklep.pkn.pl/pn-en-50160-2010p.html> (dostęp: 14.07.2023)
- [12] *Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu*. Dostępne online: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=wdu20070930623> (data dostępu: 14.07.2023).