

ZBIGNIEW OLCZYKOWSKI*

**WPLYW DYNAMICZNYCH ZMIAN
OBCIĄŻENIA TRAKCYJNEGO NA PARAMETRY JAKOŚCI
ENERGII ELEKTRYCZNEJ W SIECIACH
ZASILAJĄCYCH PODSTACJE**

**INFLUENCE OF DYNAMIC CHANGE OF TRACTION
LOAD ON ELECTRIC POWER QUALITY PARAMETERS
IN SUBSTATION SUPPLYING SYSTEMS**

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów podstawowych parametrów jakości energii elektrycznej pomierzone w sieciach zasilających podstacje oraz obwodach potrzeb nietrakcyjnych. Pokazano wpływ dynamicznych zmian obciążenia trakcji prądu stałego na zmiany tych parametrów. Przyczynami występowania zjawisk, które decydują o jakości energii elektrycznej w sieci prądu przemiennego są: specyficzna budowa podstacji trakcyjnych prądu stałego (transformacja energii prądu przemiennego na prąd stały) oraz charakter ich obciążenia (dynamiczne zmiany obciążenia związane z prowadzeniem ruch pociągów). Do negatywnych skutków energetycznych związanych ze specyfiką systemu zasilania trakcji prądu stałego zaliczyć można m.in.: odkształcenie napięcia oraz prądu pobieranego z systemu energetyki zawodowej wywołane nieliniowym charakterem podstacji trakcyjnych, wahania napięcia w systemie zasilającym podstacje spowodowane zmianą obciążeń trakcyjnych, przekroczenia mocy wynikające z procesu rozruchu jednostek kolejowych.

Słowa kluczowe: jakość energii elektrycznej, odbiorniki nieliniowe, zmiany napięcia, harmoniczne prądu, potrzeby nietrakcyjne

Abstract

In this paper, results of the measurement of electric power quality parameters measured both in substation and nontraction supplying systems have been presented. The influence of dynamic change of the load of DC traction supplying system on the change of power quality parameters has been shown. On the basis of obtained measurements, it is possible to say that following factors had a major influence on the basis parameters of electric power quality: circuit of traction substation, the load of traction substation, character and variability of the load of traction substation, character and power of receivers connected to the nontraction network. Deformation of the voltage curve at the connecting point of nontraction transformer depends mainly on the current fed by traction vehicles. It is necessary to point out that nontraction receivers have a major impact on electric power quality at the low short-circuit power. According to requirements contained in the norm concerning the electric power quality, the control of electric power quality provided by the nontraction network should be carried out. Therefore nontraction receivers should satisfy requirements concerning the character and the power of installed receivers (limitation in installing unquiet receivers).

Keywords: electric power quality, nonlinear receivers, voltage distortion, current harmonics, nontraction supplying systems

* Dr inż. Zbigniew Olczykowski, Instytut Systemów Transportowych, Wydział Transportu, Politechnika Radomska.

1. Wstęp

Tematyka artykułu związana jest z problematyką jakości energii elektrycznej, w szczególności z zasilaniem odbiorców zakłócających (jakim jest trakcja elektryczna). Przedstawiono tutaj analizę wpływu zmian obciążenia podstacji trakcyjnej na parametry charakteryzujące jakość energii elektrycznej zarówno w sieciach zasilających podstacje, jak i w liniach potrzeb własnych oraz potrzeb nietrakcyjnych. Otrzymane wyniki odniesiono do obowiązującego Rozporządzenia przyłączeniowego [7] oraz normy PN-EN-50160 [5].

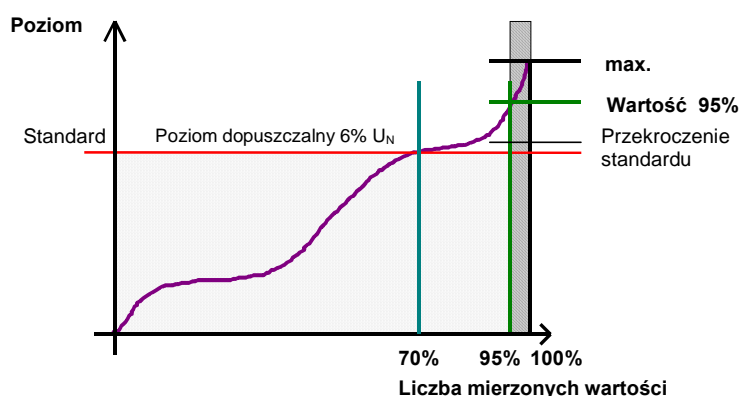
Podstacje trakcyjne stanowią źródło energii dla pojazdów trakcyjnych, przetwarzając energię pobieraną z systemu elektroenergetycznego na energię elektryczną prądu stałego. Oprócz dostarczenia odpowiedniej energii do zasilania sieci trakcyjnej z podstacji zasilane są obwody oświetleniowe, ogrzewania, automatyki itp. Służą do tego oddzielne transformatory, tzw. potrzeb własnych lub potrzeb nietrakcyjnych.

Podstacje trakcyjne zasilane są z dwóch różnych niezależnych linii (w analizowanych w artykule przypadkach o napięciach 15 kV i 30 kV), co związane jest z wymogiem zachowania ciągłości zasilania. Układ trakcyjny jest ściśle powiązany z układem zasilania linii energetycznych. Ewentualny brak napięcia w sieci energetycznej automatycznie przenosi się na linię trakcyjną, co powoduje konieczność rezerwowania zasilania. Istnieje jednak i zależność odwrotna. Zastosowany układ zespołów prostownikowych lub zmiany obciążenia podstacji po stronie prądu stałego wpływają na jakość energii elektrycznej w liniach zasilających podstacje oraz mogą powodować zakłócenia w pracy odbiorników energii elektrycznej po stronie niskiego napięcia zasilanych z transformatorów potrzeb własnych i potrzeb nietrakcyjnych. Z sieci potrzeb nietrakcyjnych zasilane są np. urządzenia na stacjach kolejowych. PKP Energetyka sp. z o.o., posiadając odpowiednie koncesje, sprzedaje poprzez te linie energię elektryczną innym odbiorcom.

2. Kryteria oceny jakości energii elektrycznej

Jako kryterium oceny jakości energii elektrycznej przyjęto normę PN-EN-50160, która dotyczy parametrów napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych. W normie określono parametry napięcia w złączach sieci rozdzielczych niskiego (do 1 kV) i średniego napięcia (od 1 do 35 kV). Zapisy normy dotyczą wartości mierzonych w punkcie dostawy (PWP – punkcie wspólnego przyłączenia z publiczną siecią rozdzielczą) oraz normalnych warunków pracy sieci. Zalecenia zawarte w normie precyzują wartości dopuszczalne w sieciach nN i SN następujących parametrów napięcia zasilającego: częstotliwości sieciowej, wartości napięcia, zmian napięcia, szybkich zmian napięcia, wskaźników migotania światła, zapadów napięcia, krótkich przerw w zasilaniu, długich przerw w zasilaniu, chwilowych przepięć o częstotliwości sieciowej między przewodami pod napięciem i ziemią, przejściowych przepięć między przewodami pod napięciem i ziemią, asymetrii napięcia zasilającego, harmonicznych napięcia, sygnału napięciowego do transmisji informacji nałożonego na napięcie zasilające. Na podstawie PN-EN-50160 [1] opracowane zostały polskie przepisy określające podstawowe parametry jakości energii elektrycznej, a w szczególności ostatnia wersja Rozporządzenia przyłączeniowego [7].

Analizując zmiany obciążenia w długim przedziale czasowym, przyjęto dziesięciominutowe interwały pomiarów (zgodnie z PN-EN-50160), zaś przy dynamicznych zmianach obciążenia podstacji, trwających kilka minut, zastosowano zmniejszone interwały pomiarów parametrów jakości energii elektrycznej. W przypadku miernika Qwave były to odstępy jednosekundowe, zaś w przypadku miernika Memobox pięćosekundowe. W odstępach jednosekundowych mierzono również wartość prądu po stronie stałoprądowej.



Ryc. 1. Sposób wyznaczania 95-procentowej wartości pomiarów

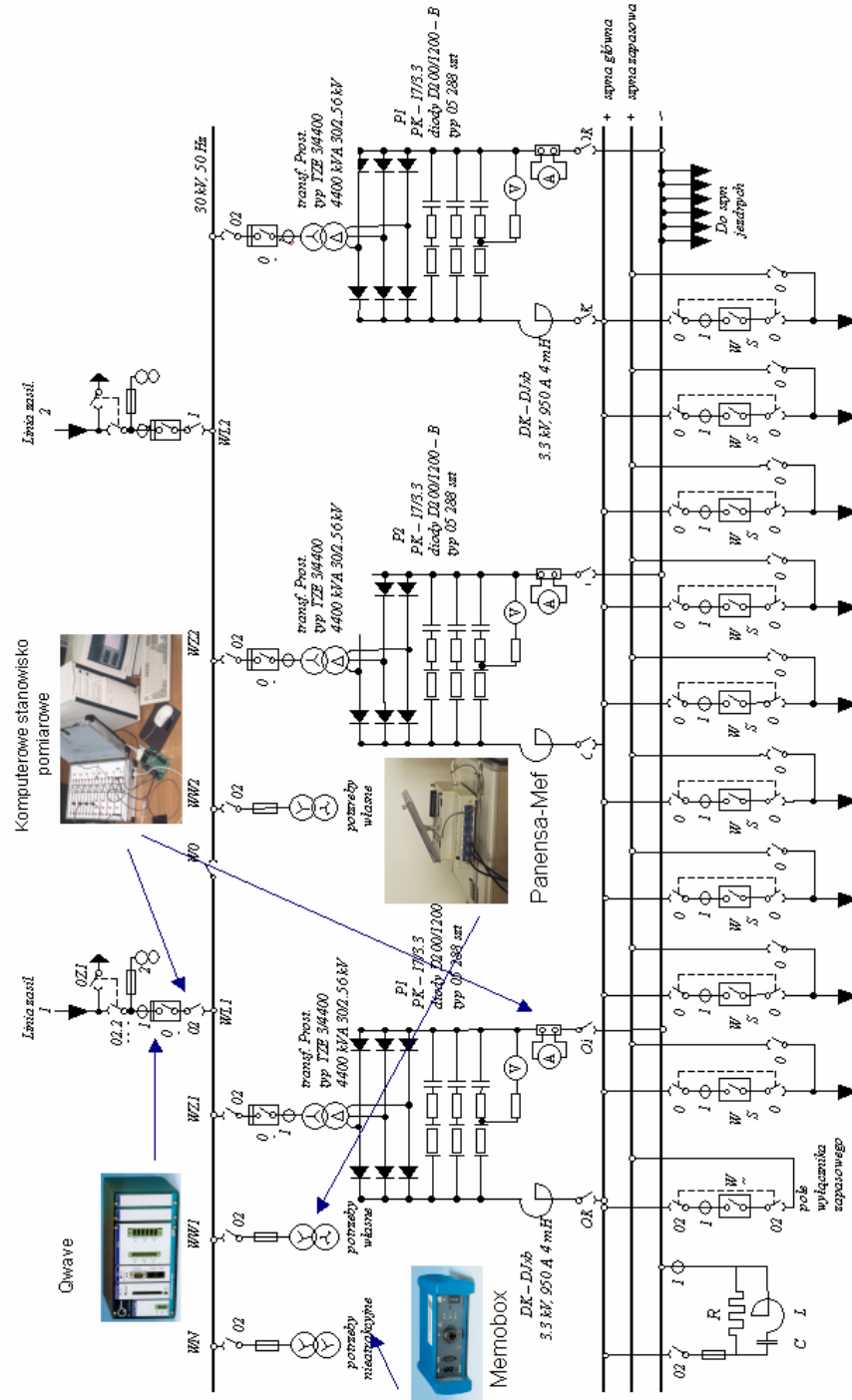
Fig. 1. Defining 95-% value of measurements

Zgodnie z normą PN-EN-50160, pomiar w punkcie, w którym określana jest jakość energii, powinien trwać co najmniej tydzień. Związane jest to z tym, że niektóre z parametrów, np. wskaźniki migotania światła, zmiany napięcia zasilającego, harmoniczne napięcia poddawane są analizie statystycznej, czyli jako wielkość odniesienia przyjmowane są poziomy przekroczone przez 95% czasu obserwacji. Łączy się to z wyeliminowaniem wartości ekstremalnych, mogących występować tylko przez niewielki okres pomiaru.

3. Zastosowana aparatura i miejsca pomiarów

W pomiarach zastosowano mierniki parametrów jakości energii elektrycznej: Memobox 800 [2], Qwave [6] oraz miernik migotania światła – MEF [4]. Do rejestracji przebiegów prądów i napięć po stronie zmiennoprądowej oraz prądu po stronie stałoprądowej wykorzystano stanowisko pomiarowe oparte na komputerowych kartach pomiarowych [3]. Mierniki zostały przyłączone bezpośrednio do sieci nN, zaś do sieci SN poprzez przekładniki prądowe i napięciowe.

Na rycinie 2 pokazano fragment układu zasilania podstacji oraz miejsce przyłączenia mierników podczas jednego z cykli pomiarowych.

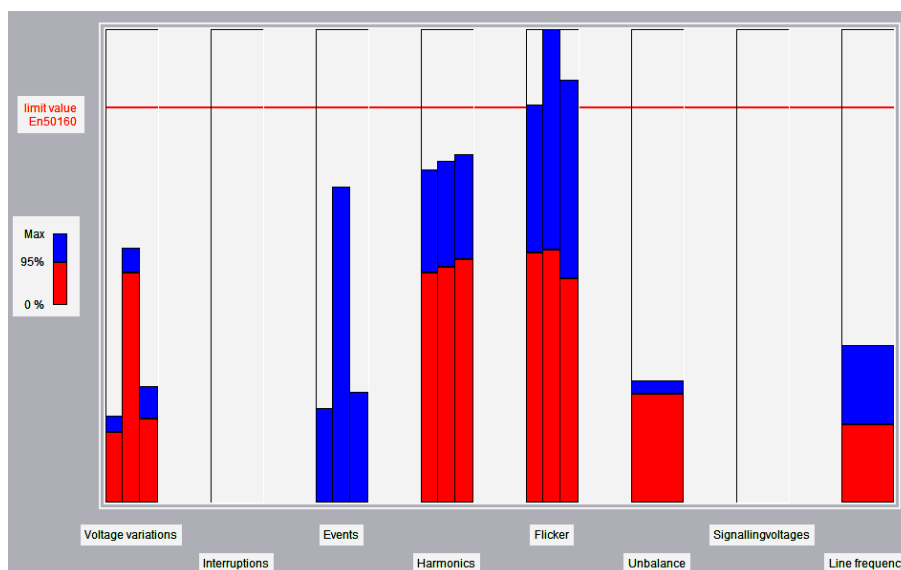


Ryc. 2. Miejsce pomiarów parametrów jakości energii elektrycznej

Fig. 2. Places of the measurement of electric power quality

4. Analiza wyników pomiarów

Prezentowane wyniki pochodzą z przeprowadzonych cykli pomiarowych, które obejmowały podstacje trakcyjne z przekształtnikami sześć- i dwunastopulsowymi. Ze względu na ograniczoną objętość artykułu zaprezentowano tylko najciekawsze pomiary.



Ryc. 3. Sumaryczne zestawienie parametrów sieci pomierzonych w linii zasilającej podstację

Fig. 3. Specification of network parameters in line supplying the substation

4.1. Sieci zasilające podstację

Na rycinie 3 przedstawiono sumaryczne zestawienie parametrów sieci, pomierzonych w linii 30 kV, zasilającej podstację trakcyjną. Z ryciny tej wynika, że w sieci występowały wahania napięcia powodujące migotanie światła, co objawiło się zwiększoną wartością wskaźnika P_{lt} . Migotanie światła jest zjawiskiem związanym z wpływem niewielkich, lecz nagłych zmian napięcia na odbiorniki oświetleniowe. W efekcie szybkozmiennych wahań napięcia następuje zmiana mocy pobieranej przez odbiornik oraz zmiana strumienia świetlnego, dostrzegalna i męcząca dla oka ludzkiego. Przyrządem, który rejestruje migotanie światła jest miernik migotania światła (*flickermeter*). W mierniku migotania światła, ze względu na losowy charakter występowania zjawiska migotania światła, znajduje się blok statystycznego szacowania poziomów migotania. Opierając się na analizie statystycznej, miernik odtwarza dwa wskaźniki:

- P_{st} (*Probability Short Term*) – wskaźnik krótkookresowego migotania światła,
- P_{lt} (*Probability Long Term*) – wskaźnik długookresowego migotania światła.

Te dwie wielkości tworzą nowe bezwymiarowe jednostki pomiaru migotania.

Wskaźnik P_{st} określa wahania napięcia za okres 10 minut. Czas ten został tak dobrany, by był wystarczająco długi, aby na pomiar nie miało wpływu występowanie izolowanych

(przypadkowych) wahań napięcia; przedział 10 minut jest natomiast wystarczająco krótki, aby mógł charakteryzować obciążenie cechujące się gwałtownymi zmianami mocy.

Wskaźnik długookresowego migotania światła, P_{fl} , określa zaburzenia wynikające z pracy odbiornika o długim cyklu roboczym. Jego wartość wyznacza się z analizy zbioru dwunastu kolejnych wartości P_{st}

$$P_{fl} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{st}^3}{12}}$$

Norma PN-EN-50160 [5] oraz Rozporządzenie przyłączeniowe [7] określają dla linii nN dopuszczalną wartość migotania światła na poziomie $P_{fl} = 1$.

Zwiększone jest również odkształcenie krzywej napięcia. Graniczne wartości wynikające z normy PN-EN-50160 nie zostały jednak przekroczone.

W tabelicy 1 przedstawiono zarejestrowane zapady napięcia z zaznaczonym czasem ich trwania oraz wielkością poszczególnych zapadów. Nie wszystkie zakłócenia spowodowane były gwałtownymi zmianami prądów pobieranych przez podstację.

Tabela 1

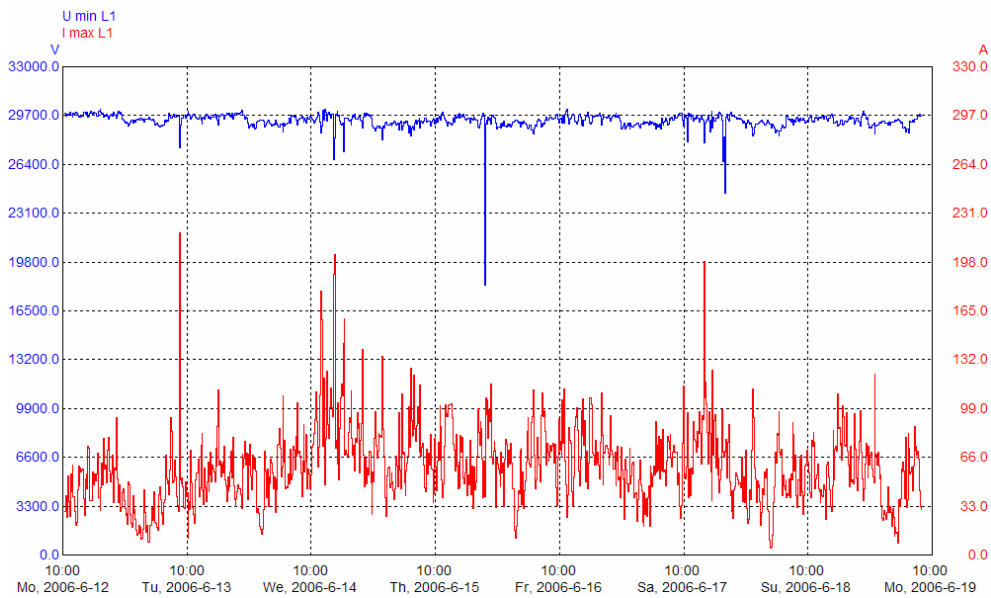
Zestawienie liczby zapadów napięcia

Phase L1, L2, L3	< 20 ms	20... < 100 ms	100... < 500 ms	0,5... < 1 s	1... < 3 s	3... < 20 s	20... < 60 s	>= 1 min
Surge > 10,00%	107	6						
Dip > 10,00%								
10... < 15%	8	1						
15... < 30%	5		2					
30... < 60%			3					
60... < 99%								
Interruption								

Pojawienie się zapadów powodowało gwałtowne zmiany napięcia, których przebieg wraz z przebiegiem prądu pobieranego przez podstację przedstawiono na ryc. 4. Natomiast występowanie migotania światła zilustrowano na ryc. 5 (zwiększona wartość krótkookresowego wskaźnika migotania).

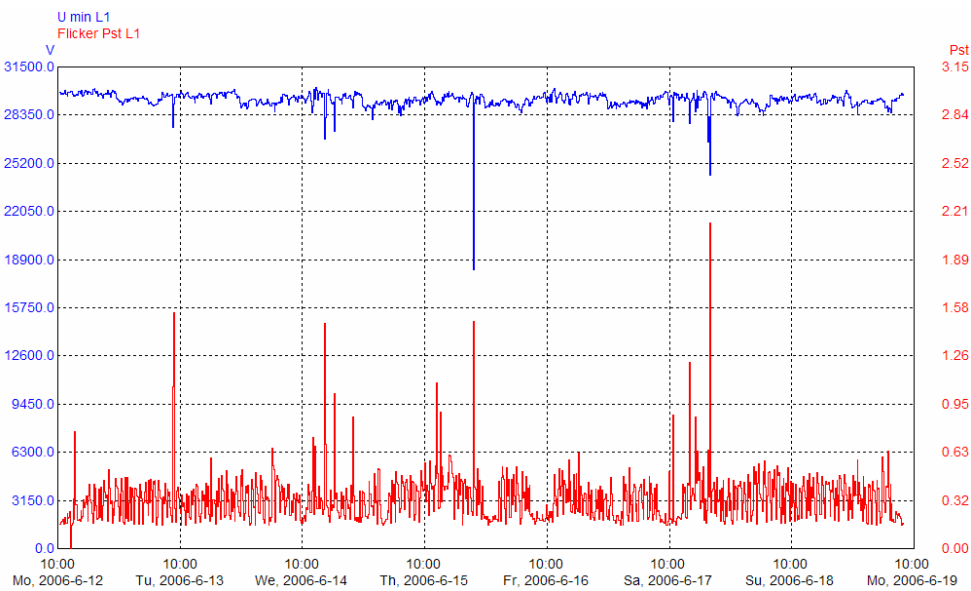
W przeciwieństwie do typowych odbiorów zakłócających, powodujących powstawanie szybkozmiennych wahań napięcia (piece łukowe, spawarki), sieć trakcyjna generuje wahania napięcia wynikające ze zwarć i przepięć łączeniowych po stronie prądu stałego, rozruchów ciężkich składów pociągów pobierających zmienną moc przy przełączaniu poszczególnych stopni rezystorów rozruchowych.

Na poziom wskaźników migotania światła ma również wpływ dynamika zmian obciążenia podstacji trakcyjnej. Na rycinie 6 przedstawiono przebieg krótkookresowego wskaźnika migotania światła P_{st} i napięcia zasilającego podstację. Rozruch pociągu skutkuje natychmiastowym wzrostem poziomu migotania światła, co z kolei związane jest ze zmianami poziomu napięcia zarówno po stronie stałoprądowej, jak i po stronie sieci zasilającej podstację trakcyjną.



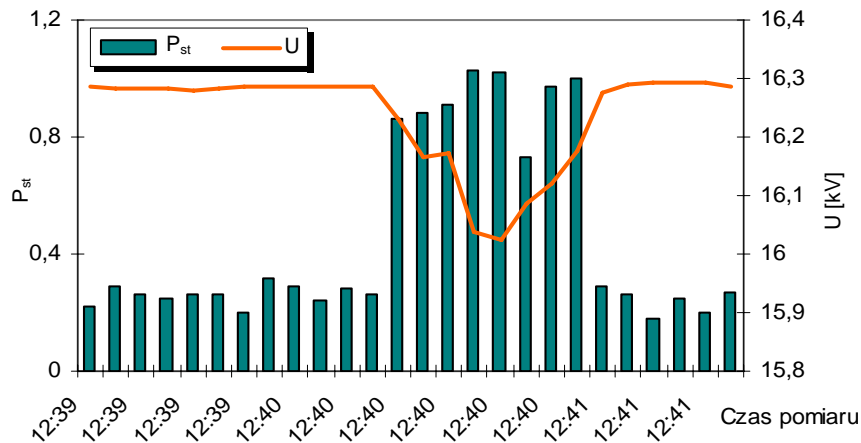
Ryc. 4. Zmiany napięcia oraz prądu pomierzone w sieci zasilającej podstację

Fig. 4. Voltage and current changes measured in line supplying the substation



Ryc. 5. Zmiany napięcia oraz krótkookresowego wskaźnika migotania P_{st} zarejestrowane w sieci zasilającej podstację

Fig. 5. Voltage and flicker coefficient P_{st} changes measured in line supplying the substation



Ryc. 6. Przebiegi krótkookresowego wskaźnika migotania światła P_{st} oraz napięcia zasilającego podstację pomierzone w czasie rozruchu pociągu

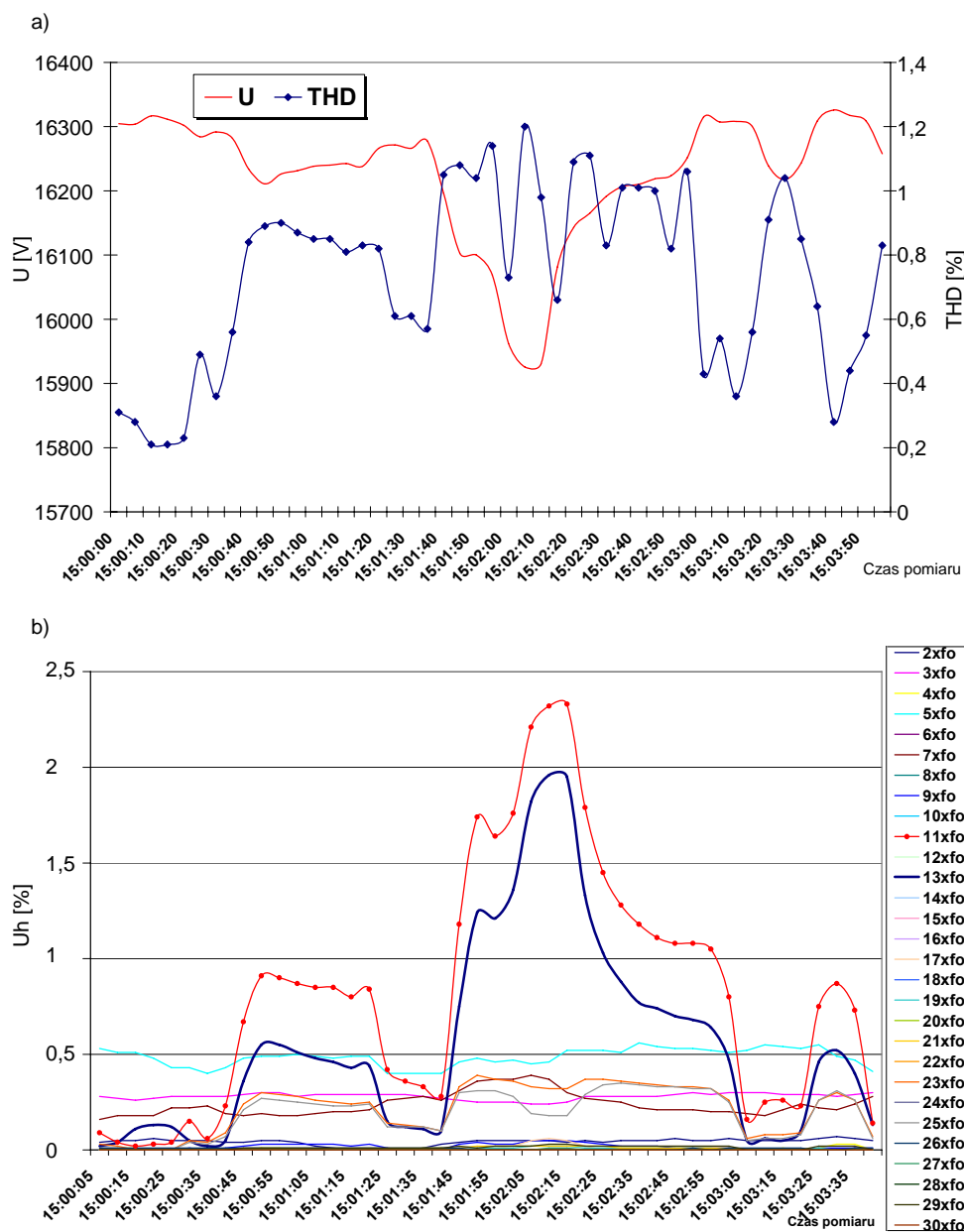
Fig. 6. Flicker and voltage changes measured in line supplying the substation during starting process of the train

Istnieje również związek pomiędzy odkształceniem napięcia po stronie SN wywołwanym zmianą obciążenia podstacji a odkształceniem krzywej napięcia. Na rycinie 7a pokazano zmiany napięcia oraz współczynnika THD, zaś na ryc. 7b zmiany U_h napięcia (do 30 harmonicznej) pomierzone przy dynamicznych zmianach obciążenia w linii zasilającej podstację trakcyjną z dwunastopulsowym zespołem prostownikowym.

Przy niewielkim obciążeniu podstacji prąd pobierany przez nią pozostaje stabilny a współczynnik THD na niskim poziomie. Rozruch pociągu skutkuje wzrostem prądu, co objawia się jednoczesnym wzrostem współczynnika THD. Największą wartość współczynnika THD pomierzono przy maksymalnej wartości prądu pobieranego podczas rozruchu pociągu. Podczas hamowania, kiedy wartość prądu maleje, zmniejsza się również współczynnik THD. Widoczne są charakterystyczne harmoniczne (11 i 13) generowane przez zespoły prostownikowe pracujące w układzie dwunastopulsowym.

4.2. Obwody potrzeb własnych

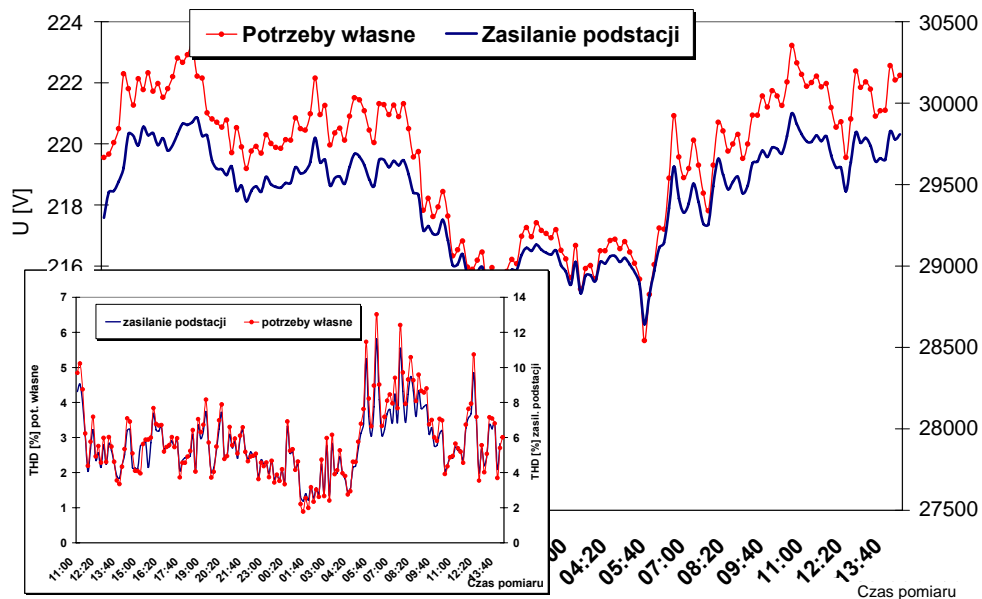
Głównym zadaniem podstacji trakcyjnej jest zamiana napięcia zmiennego na stałe oraz dostarczenie go do kolejowej sieci trakcyjnej. Dodatkowym zadaniem podstacji trakcyjnej jest zasilanie różnych obiektów niezwiązanych z trakcją elektryczną, np. energią elektryczną prądu przemiennego o napięciu 230/400 V do zasilania urządzeń pomocniczych podstacji – potrzeby własne, do czego służą dwa transformatory potrzeb własnych, z których jeden jest rezerwowy (ryc. 2). Przez te transformatory zasilane są obwody pomocnicze mające zasadniczy wpływ na pracę podstacji trakcyjnej (np. obwody zabezpieczeń, sterowania, sygnalizacji), przy czym w większości zasilane są one napięciem stałym. Na pracę tych urządzeń (szczególnie starszego typu) w niewielkim stopniu ma wpływ jakość energii zasilającej podstację oraz zakłócenia związane ze zmiennym obciążeniem podstacji. Wprowadzanie nowoczesnych zabezpieczeń, urządzeń sterowania, urządzeń do transmisji danych podnosi jednak wymagania co do jakości zasilania.



Ryc. 7. Zmiany napięcia, współczynnika THD (a) oraz U_h napięcia (b) pomierzone w linii zasilającej podstację trakcyjną przy dynamicznych zmianach obciążenia podstacji

Fig. 7. Changes of voltage, harmonic deformation coefficient THD (a) and voltage harmonics (b) recorded in line supplying during starting process of the train

Zmiany napięcia w obwodach potrzeb własnych powiązane są ściśle ze zmianami napięcia w linii zasilającej podstację. Na rycinie 8 przedstawiono przebiegi napięcia oraz współczynnika THD (w pomniejszeniu) pomierzone równocześnie w obwodach potrzeb własnych i linii zasilającej podstację.

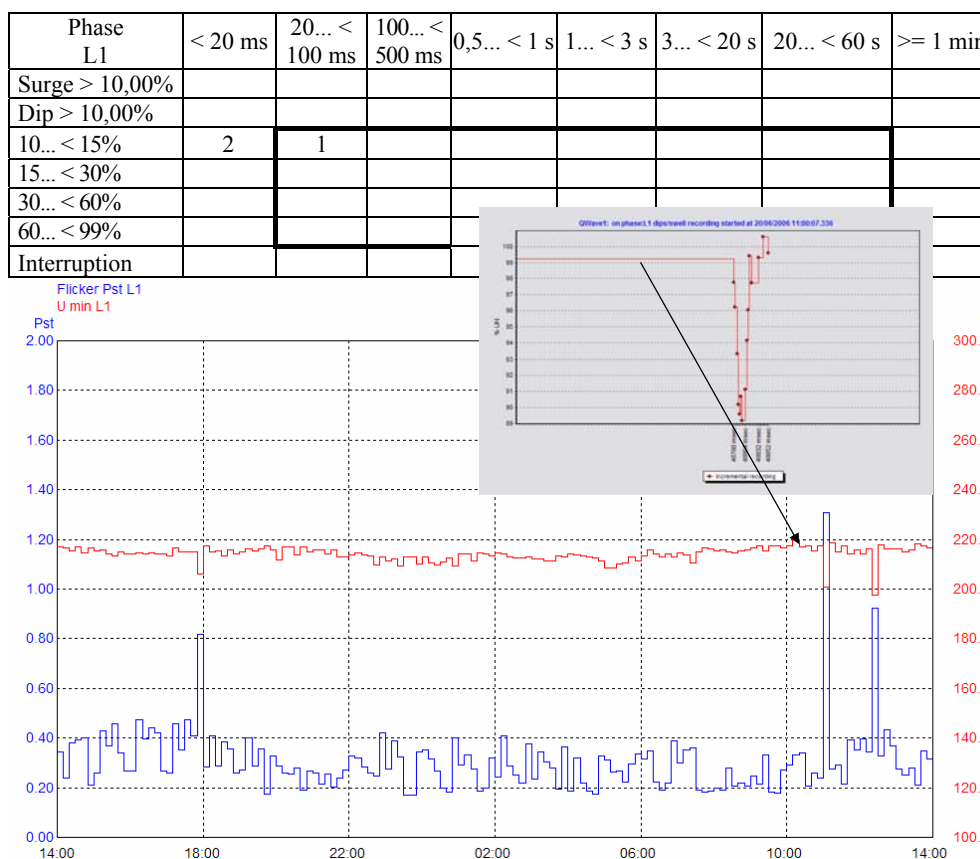


Ryc. 8. Zmiany napięcia oraz współczynnika THD (w pomniejszeniu) zarejestrowane w linii zasilającej podstację oraz obwodach potrzeb własnych

Fig. 8. Changes of voltage and harmonic deformation coefficient THD (reduced) recorded in line supplying the substation and own need nets

W obwodach potrzeb własnych, w czasie pomiarów, zarejestrowano również zapady napięcia. Na rycinie 9 pokazano zmiany napięcia, współczynnika migotania światła oraz zestawienie zapadów napięcia występujące w czasie pomiarów w obwodach potrzeb własnych, w fazie L1. Na rycinie tej przedstawiono również jeden z zapadów zarejestrowanych w fazie L1 linii zasilającej podstację. Zakłócenia powstające w linii SN wpływają bezpośrednio na jakość energii elektrycznej w obwodach potrzeb własnych.

Zapady napięcia są najczęściej występującymi zakłóceniami w systemie elektroenergetycznym, przy czym ich eliminacja jest bardzo trudna, szczególnie przy dużych mocach odbiorników zakłócających oraz nieregularnym charakterze zmian obciążenia.



Ryc. 9. Zapady napięcia zarejestrowane w obwodach potrzeb własnych i linii zasilającej podstację (rysunek w pomniejszeniu)

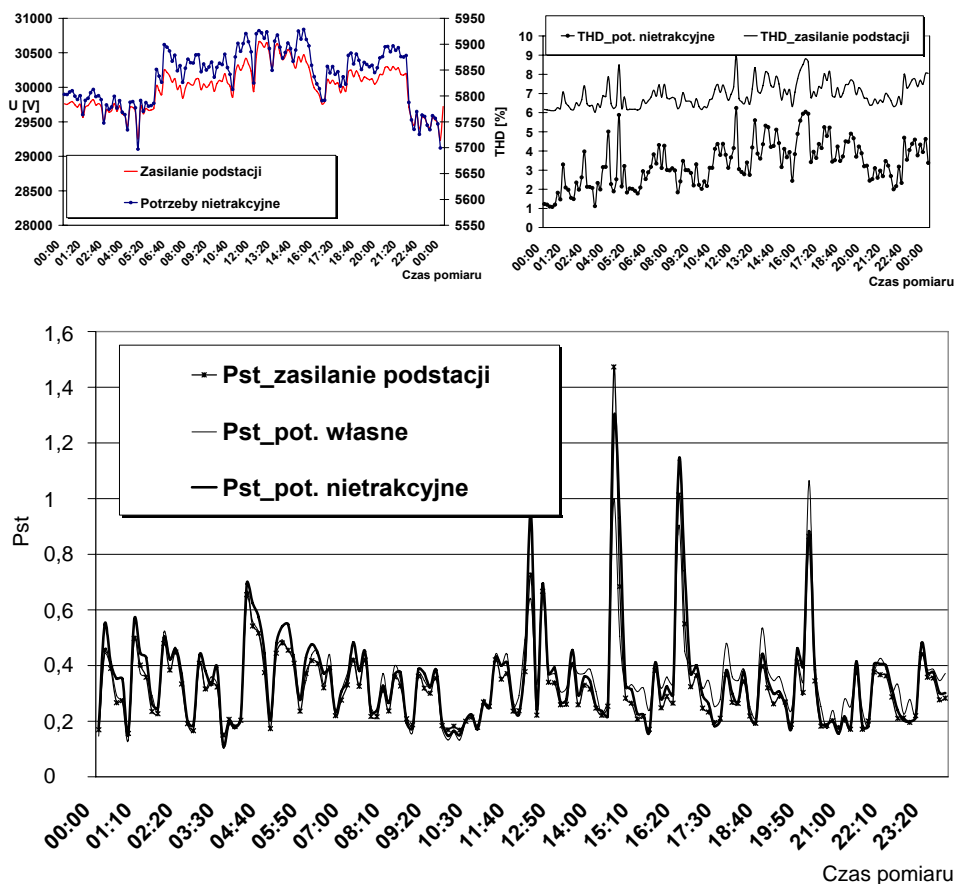
Fig. 9. Voltage dips recorded in own need nets and in line supplying the substation

4.3. Linie potrzeb nietrakcyjnych

PKP Energetyka sp. z o.o., będąca firmą o zasięgu ogólnokrajowym, zapewnia ciągłość zasilania sieci trakcyjnej i urządzeń elektroenergetyki nietrakcyjnej. Dzięki koncesjom Urzędu Regulacji Energetyki na dystrybucję, przesył i obrót energią elektryczną sprzedaje energię elektryczną, konkurując z innymi spółkami dystrybucyjnymi, szczególnie w tych rejonach, gdzie pozwalają na to możliwości urządzeń oraz korzystne usytuowanie w pobliżu odbiorców energii elektrycznej [8].

W przeciwieństwie do urządzeń przyłączanych do obwodów potrzeb własnych, z linii potrzeb nietrakcyjnych zasilane są odbiorniki o bardzo różnym charakterze (o zmiennym poborze mocy, pobierające prądy odkształcone, wrażliwe na zakłócenia). Z tego też powodu w większym stopniu niż w obwodach potrzeb własnych, zapewnione powinny być odpowiednie parametry napięcia zasilania. Jak pokazano w dalszej części artykułu, również na obwody potrzeb nietrakcyjnych wpływają zakłócenia wynikające z zastosowanych

zespołów prostownikowych (ograniczenie 5 i 7 harmonicznej przy zespołach dwunastopowych) oraz ze zmian obciążenia podstacji. Dodatkowo nakładają się zakłócenia powodowane przez odbiorniki przyłączone do obwodów potrzeb nietrakcyjnych. Ma to szczególne znaczenie w przypadku niewielkich mocy zwraciwych w punkcie PWP.



Ryc. 10. Zmiany wybranych parametrów jakości energii elektrycznej zarejestrowane w sieciach: zasilających podstację, potrzeb nietrakcyjnych i potrzeb własnych

Fig. 10. Change of chosen of parameters quality electric energy recorded in line supplying the substation, nontraction and own need nets

Na rycinie 10 przedstawiono przebiegi napięcia, współczynnika THD pomierzone w linii zasilającej podstację i linii potrzeb nietrakcyjnych oraz zmiany wskaźników migotania światła P_{st} zarejestrowane jednocześnie w sieciach: zasilających podstację, potrzeb nietrakcyjnych i potrzeb własnych.

5. Podsumowanie

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że na podstawowe parametry jakości energii elektrycznej mają wpływ m.in.: układ pracy podstacji trakcyjnej, wartość obciążenia podstacji trakcyjnej, charakter i zmienność obciążenia podstacji, charakter i moce odbiorników przyłączonych do obwodów potrzeb nietrakcyjnych. Na wielkość odkształcenia krzywej napięcia w największym stopniu wpływa prąd pobierany przez zespoły trakcyjne, przy czym przy niewielkiej mocy zwarciowej w PWP wpływ mogą mieć odbiory nietrakcyjne pobierające znaczne prądy odkształcone. Dynamiczne zmiany obciążenia trakcyjnego są przyczyną powstawania szybkozmiennych wahań napięcia powodujących powstawanie zjawiska migotania światła, dostrzegalnego w układach oświetleniowych obwodów zasilanych z transformatorów potrzeb nietrakcyjnych i potrzeb własnych. Ze względu na wymagania norm związanych z jakością energii elektrycznej zasilanie odbiorców pozatrakcyjnych z obwodów potrzeb nietrakcyjnych wymaga prowadzenia kontroli jakości energii elektrycznej w tych obwodach. Odbiorcy pozatrakcyjni powinni zatem spełniać wymagania dotyczące charakteru i mocy zainstalowanych u siebie odbiorników (ograniczenia w możliwości przyłączania odbiorników niespokojnych).

Literatura

- [1] European Standard EN 50160, *Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution*, 1994.
- [2] Memobox 800, *Voltage characteristics monitor*, Lem Elems AG 2003.
- [3] Olczykowski Z., Wojciechowski J., *Pomiary podstawowych parametrów jakości energii elektrycznej z wykorzystaniem mierników wirtualnych*, Prace Naukowe Politechniki Radomskiej, Elektryka nr 2, Radom 2002.
- [4] Panensa S.A., *Flicker and Flicker-Meters. Operator manual*, Corcelles/NE, 1994.
- [5] PN-EN-50160: 2002 – Charakterystyki napięcia w publicznych sieciach rozdzielczych.
- [6] *QWave, Power Quality RTU*, Lem Norma GmbH, 2000.
- [7] Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 20 grudnia 2004 r. w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych, ruchu i eksploatacji tych sieci, DzU Nr 2, poz. 6 z 2005.
- [8] <http://www.pkp.pl>.