

# Wpływ charakteru obciążenia z zakładów przemysłowych na parametry jakościowe dostaw energii elektrycznej z linii WN/SN

## Wprowadzenie teoretyczne

Kamil Kołodziej

Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. Wincentego Pola 2, 35-021 Rzeszów

**Streszczenie:** Artykuł stanowi wprowadzenie do zagadnienia jakości energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych WN/SN zasilających zakłady przemysłowe. W artykule na wstępie została omówiona problematyka związana z wpływem nieliniowych odbiorników energii elektrycznej na przemysłowe sieci elektroenergetyczne. Kolejno przedstawiona została charakterystyka badanej sieci 110/6 kV, jej kluczowe elementy, a także zasilane zakłady oraz konfiguracja torów pomiarowych i analizatorów sieci. W punkcie tym przedstawiony został schemat zasilania GPZ na potrzeby zakładów przemysłowych, w którego polach zasilających dokonano pomiarów po stronie 6 kV. Następnie w celu lepszego zrozumienia praktycznych pomiarów przytoczony został, symetryczny układ napięć i prądów służący za model teoretyczny. Przy tym zdefiniowane i omówione zostały takie parametry jak: współczynniki asymetrii napięć i prądów, moc czynna, bierna i pozorna według definicji Budeanu, współczynniki zawartości harmonicznym THD oraz TTHD dla napięć i prądów oraz wskaźniki krótko- i długookresowego migotania światła. Wpływ wszystkich parametry zostanie przeanalizowane przy omawianiu wyników pomiarów badań przeprowadzonych w zakładach przemysłowych. Artykuł kończy się zebraniem wniosków oraz podsumowaniem.

**Słowa kluczowe:** GPZ 110/6 kV, jakość energii elektrycznej, analiza parametrów zasilania, zasilanie zakładów przemysłowych

## 1. Wprowadzenie

Jakość dostaw energii elektrycznej jest ważnym kryterium dotyczącym energii elektrycznej. Ma kluczowe znaczenie po stronie dostawcy oraz odbiorcy. Dostawca musi spełnić szereg kryteriów związanych z parametrami energii elektrycznej, które określa rozporządzenie [11]. Odbiorca musi dotrzymywać warunków umowy z dostawcą. Warunki te są uzależnione od tego, do jakiej grupy przyłączeniowej zaliczany jest zarówno dostawca jak i odbiorca. Rozpatrując aspekt dużych zakładów przemysłowych należących do II czy III grupy przyłączeniowej zasilanych z sieci dystrybucyjnej 110 kV lub 1–110 kV, para-

metry jakościowe energii elektrycznej odgrywają istotne znaczenie w procesie rozliczania z dostawcą energii elektrycznej.

Drugim istotnym zagadnieniem związanym z jakością energii elektrycznej, patrząc z perspektywy przedsiębiorstwa przemysłowego, jest duża liczba maszyn i urządzeń zainstalowanych na ich obszarze, które często podlegają skomplikowanym algorytmom sterowania. Ma to na celu np. poprawę efektywności energetycznej danego urządzenia, czy zwiększenie jego funkcjonalności i wydajności. Obecnie znaczna część z nich zbudowana jest na bazie elementów półprzewodnikowych. Urządzenia te są często nieliniowymi odbiornikami energii elektrycznej czy mocy biernej. Oznacza to, że pobierają z linii elektroenergetycznej prądy odkształcone o dużej zawartości harmonicznym.

Odształcenia prądów oraz ich asymetria powodują z kolei odkształcenia napięć zasilających oraz wzrost strat mocy w urządzeniach elektroenergetycznych. Przepływ mocy biernej (głównie indukcyjnej) wpływa na pogorszenie współczynnika mocy. Dodatkowo dla niektórych typów maszyn i urządzeń występują krótkotrwałe piki prądowe znacznych wartości, które powodują dodatkowe zakłócenia i fluktuacje napięcia w danej sieci elektroenergetycznej. Wszystko to składa się na pogor-

### Autor korespondujący:

Kamil Kołodziej, kamil2222pl@wp.pl

### Artykuł recenzowany

nadesłany 28.09.2019 r., przyjęty do druku 28.05.2020 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

szczenie parametrów zasilania, czym stwarza realne zagrożenie nieprawidłową pracą a nawet uszkodzeniem urządzeń wrażliwych na zakłócenia.

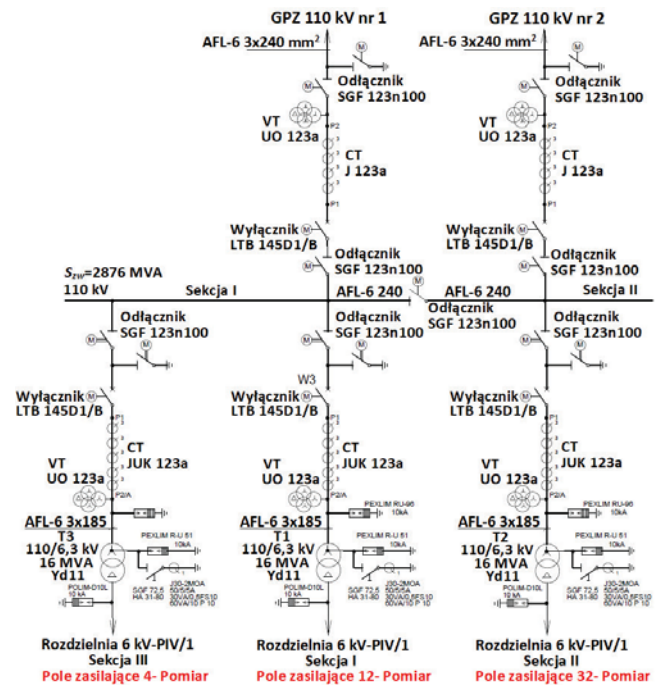
Coraz większe znaczenie dla zakładów przemysłowych mają również aspekty jakościowe. Jest to szczególnie ważne wszędzie tam, gdzie prowadzony jest skomplikowany proces produkcyjny lub obróbczy zadaną dokładnością, którego zakłócenie bądź przerwanie jest nieodwracalne w skutkach i przekłada się na straty finansowe zakładu produkcyjnego. Zakłady produkcyjne decydują się więc na szereg działań mających na celu analizę jakości energii elektrycznej. Działania te polegają na ciągłym monitorowaniu, wykrywaniu oraz ostrzeganiu o ewentualnych zakłóceniach oraz źródłach ich powstawania, a także na monitoringu podstawowych parametrów i ich dopuszczalnych wartości odchyłek.

Analizy prowadzone są od GPZ (główny punkt zasilania) o napięciu np. 110 kV aż do rozdzielni głównych, oddziałowych czy poszczególnych odbiorników nN (niskie napięcie) 0,4 kV. W tym celu wykorzystywane są analizatory sieci, które dokonują zaawansowanej analizy parametrów ilościowych i jakościowych przepływającego prądu. Dzięki protokołom komunikacyjnym (Modbus TCP/IP, RTU, Profinet) dane z urządzeń przesyłane są do głównego serwera z dedykowanym oprogramowaniem, gdzie są obrabiane i przechowywane. W przypadku rozbudowanych systemów dane te mogą być zbierane jednocześnie z dużej liczby urządzeń. Pozwala to na lepsze zarządzanie systemem oraz wykrywanie anomalii [1]. Artykuł ten stanowi wprowadzenie teoretyczne do analizy praktycznych pomiarów parametrów zasilania dla zakładów przemysłowych. Zakłady te zasilane są z sieci dystrybucyjnej 110 kV przez trzy transformatory 110/6 kV o łącznej mocy 48 MVA. Praktyczna analiza tych pomiarów zawarta zostanie w kolejnym artykule.

## 2. Charakterystyka badanej sieci 110/6 kV dla potrzeb zakładów przemysłowych

W dobie wysoko zautomatyzowanych zakładów przemysłowych o skomplikowanych procesach produkcyjnych pewność, niezawodność oraz ciągłość zasilania jak również jego odpowiednia jakość jest podstawowym wymaganiami stawianym sieci zasilającej. Ze względu na znaczne moce przyłączeniowe dochodzące do kilkudziesięciu MVA zakłady te zasilane są najczęściej z sieci WN (wysokie napięcie) lub SN (średnie napięcie) najczęściej 110 kV lub 15 kV (rys. 1).

GPZ zasilany jest z dwóch linii 110 kV nr 1 oraz 2 (dla celów ochrony danych rys. 1 został uogólniony). Linie wysokiego napięcia stanowią linie napowietrzne jednotorowe na stalowych konstrukcjach wsporczych, chronione przewodami odgromowymi na całej długości. Obydwie linie mają przewody robocze 3 × AFL-6 240 mm<sup>2</sup>. Powyższa stacja GPZ transformuje napięcie 110 kV na 6 kV przy wykorzystaniu trzech transformatorów o łącznej mocy



Rys. 1. Schemat zasilania GPZ na potrzeby zakładów przemysłowych  
Fig. 1. GPZ power supply diagram for industrial plants

48 MVA (tab. 1). Transformatory są połączone w grupę Yd11 o napięciu zwarcia 11,5%. Prąd nominalny strony pierwotnej każdego z transformatorów wynosi 84 A natomiast strony wtórnej 1466,3 A.

Od strony wtórnej transformatorów tory prądowe są wprowadzone do budynku stacji trzema liniami na pola zasilające zespoły szynowe, które zasilają łącznie 53 pola. Kolejno pola odpływowe przez kable ziemne SN zasilają na poszczególnych obiektach zainstalowane w nich transformatory 6/0,4 kV, które odpowiadają za dostarczanie energii do rozdzielni głównych. Rozdzielnie główne z kolei poprzez szynoprzewody i tory silno-prądowe zasilają wszystkie odbiorniki zainstalowane na obiektach.

Rozpatrując stację GPZ, w części praktycznej przedstawione zostaną dane pomiarowe zebrane z torów prądowych 6 kV, na zasilaniu zespołów szynowych sekcji I, II oraz III każdego z transformatorów. Pomiar oraz rozliczanie zakładów przemysłowych z dostawą energii elektrycznej realizowany jest po stronie 110 kV, a poniższe zakłady traktowane są jako całość. Podczas analizy istotnym czynnikiem wpływającym na różnicę w jakości zasilania na poszczególnych torach był charakter poszczególnych odbiorców energii elektrycznej:

- Zakład 1 – obrabiarki CNC, spawarki laserowe, piece do wygrzewania, zgrzewarki – odbiorniki nieliniowe – pomiar w polu zasilającym 12;

Tab. 1. Charakterystyka transformatorów w stacji GPZ  
Tab. 1. Characteristics of transformers in the GPZ station

Nazwa stacji	Oznaczenie transformatora	Przekładnia transformatora [kV/kV]	Moc transformatora [MVA]
Stacja GPZ	T1	110/6	16
	T2	110/6	16
	T3	110/6	16

**Tab. 2. Podstawowe parametry pomiarowe analizatora UMG 511 według normy EN61000 [2]**

Tab. 2. Basic measurement parameters of the UMG 511 analyzer according to EN61000 [2]

Podstawowe pomiary	
Dokładność pomiaru napięcia	0,1%
Dokładność pomiaru prądu	0,2%
Dokładność pomiaru energii czynnej (kWh <sub>...</sub> /5 A)	0,2 S
Częstotliwość próbkowania	20 kHz
RMS – wartość chwilowa	
Napięcie, prąd, częstotliwość	•
Moc czynna, bierna, pozorna/całkowita i na fazę	•
Współczynnik mocy/całkowity i na fazę	•
Pomiar energii	
Energia czynna, bierna i pozorna [L1, L2, L3, L4, Σ L1–L3, Σ L1–L4]	•
Liczba taryf	8
Rejestracja wartości średnich	
Napięcie, prąd/ aktualna i maksymalna	•
Czynna, bierna i pozorna moc/aktualna i maksymalna	•
Częstotliwość/ aktualna i maksymalna	•
Jakość energii	
Harmoniczne/ napięcie i prąd	1–63
Harmoniczne/ moc czynna i bierna	1–63
Współczynnik zniekształceń THD-U w %	•
Współczynnik zniekształceń THD-I w %	•
Asymetria napięcia	•
Składowa prądu i napięcia, zgodna, przeciwna i zerowa	•
Migotanie krótko i długookresowe	•
Stany przejściowe	> 50 μs
Zdarzenia/funkcja rejestratora błędów	•
Krótkotrwałe przerwy	20 ms
Funkcja oscylacyjna (kształt fali U i I)	•
Tętnienia napięcia	•
Zapis pod- i nadnapięcia	•
Rejestracja danych pomiarowych	
Pamięć (Flash)	256 MB
Średnie, minimalne, maksymalne wartości	•
Liczba kanałów pomiarowych	8
Komunikaty alarmowe	•
Znaczniki czasu	•
Uśrednianie RMS, arytmetyka	•

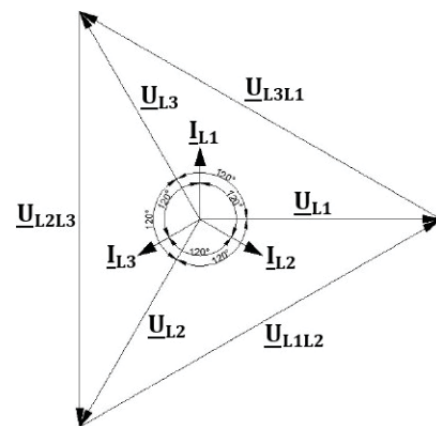
- Zakład 1 jw. – odbiorniki nieliniowe- pomiar w polu zasilającym 32;
- Zakład 2 – zakład metalurgiczny – piec hutniczy indukcyjny – odbiorniki nieliniowe – pomiar w polu zasilającym 4.

Do celów pomiarowych w polach zasilających sekcje I, II oraz III stosowane są analizatory sieci, do których podłączone są dzielniki napięciowe (pomiar dla SN) oraz przekładniki prądowe TPU 44.23 1500/5A. W omówionym przypadku dla każdego z torów zainstalowane są analizatory sieci klasy A Janitza UMG 511, które stanowią zaawansowane narzędzia pomiarowe dostarczające dużej ilości danych potrzebnych do oceny parametrów ilościowych oraz jakościowych energii elektrycznej. Najważniejsze parametry pomiarowe tego typu analizatora zestawiono w tabeli 2.

### 3. Analizyczne rozważania mierzonych parametrów

#### 3.1. Symetryczny układ napięć i prądów

Analiza parametrów sieci energetycznej wymaga zdefiniowania ich modeli matematycznych. Konieczne jest zdefiniowanie układu symetrycznego napięć i prądów, który posłuży za model teoretyczny w praktycznych rozważaniach.



**Rys. 2. Wykres wektorowy symetrycznego układu napięć i prądów [1, 3]**  
Fig. 2. Vector diagram of the symmetrical voltage and current system [1, 3]

Z rysunku 2 wynikają podstawowe zależności:

$$\underline{U}_{L1} = \underline{U}_{L1} \quad (1)$$

$$\underline{U}_{L2} = a^2 \underline{U}_{L1} \quad (2)$$

$$\underline{U}_{L3} = a \underline{U}_{L1} \quad (3)$$

$$\underline{U}_{L1L2} = \underline{U}_{L1L2} \quad (4)$$

$$\underline{U}_{L2L3} = a^2 \underline{U}_{L1L2} \quad (5)$$

$$\underline{U}_{L3L1} = a \underline{U}_{L1L2} \quad (6)$$

$$\underline{I}_{L1} = \underline{I}_{L1} \quad (7)$$

$$\underline{I}_{L2} = a^2 \underline{I}_{L1} \quad (8)$$

$$\underline{I}_{L3} = a \underline{I}_{L1} \quad (9)$$

gdzie:  $\underline{U}_{L1}$ ,  $\underline{U}_{L2}$ ,  $\underline{U}_{L3}$  – napięcia fazowe,  $\underline{U}_{L1L2}$ ,  $\underline{U}_{L2L3}$ ,  $\underline{U}_{L3L1}$  – napięcia międzyfazowe,  $\underline{I}_{L1}$ ,  $\underline{I}_{L2}$ ,  $\underline{I}_{L3}$  – prądy fazowe,  $a$  – operator obrotu o  $120^\circ$ ,  $a^2$  – operator obrotu o  $240^\circ$ .

Układ trójfazowy jest symetryczny napięciowo, jeśli wektory napięć fazowych są przesunięte względem siebie o  $120^\circ$  oraz ich wartości skuteczne są sobie równe. Wynika z tego, że w układzie symetrycznym suma wartości zespolonych napięć fazowych jest równa 0. Identyczne warunki można zapisać dla napięć międzyfazowych oraz prądów fazowych płynących w obwodzie elektrycznym.

### 3.2. Asymetria napięć i prądów

Z zależności (1)–(9) wynika, że układ jest niesymetryczny, gdy napięcia lub prądy nie są przesunięte w fazie o wartości operatorów obrotu  $a$  i  $a^2$  lub gdy ich wartości skuteczne nie są sobie równe [1, 3].

Aby opisać ilościowo zjawisko asymetrii napięć i prądów stosuje się współczynniki asymetrii. Jednym ze sposobów ich wyznaczenia jest analityczny rozkład układu trójfazowego wektorów napięć i prądów na sumę składającą się z trzech symetrycznych układów: kolejności zgodnej, przeciwnej oraz zerowej. Zazwyczaj współczynniki te odnoszą wartości składowej kolejności przeciwnej lub/i zerowej do wartości składowej symetrycznej kolejności zgodnej [1, 3]. Dla napięć współczynniki asymetrii określają następujące zależności:

$$\alpha_{u_2} = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\% \quad (10)$$

$$\alpha_{u_0} = \frac{U_0}{U_1} \cdot 100\% \quad (11)$$

$$\alpha_u = \frac{|U_2 + U_0|}{U_1} \cdot 100\% \quad (12)$$

gdzie:  $U_1, U_2, U_0$  – składowe wartości skutecznych napięcia kolejności zgodnej, przeciwnej i zerowej,  $\alpha_{u_2}, \alpha_{u_0}, \alpha_u$  – kolejno współczynniki asymetrii przeciwnej, zerowej i całkowitej napięć fazowych.

Analogicznie można opisać współczynniki asymetrii prądów:

$$\alpha_{i_2} = \frac{I_2}{I_1} \cdot 100\% \quad (13)$$

$$\alpha_{i_0} = \frac{I_0}{I_1} \cdot 100\% \quad (14)$$

$$\alpha_i = \frac{|I_2 + I_0|}{I_1} \cdot 100\% \quad (15)$$

gdzie:  $I_1, I_2, I_0$  – składowe wartości skutecznych prądu kolejności zgodnej, przeciwnej i zerowej,  $\alpha_{i_2}, \alpha_{i_0}, \alpha_i$  – kolejno współczynniki asymetrii przeciwnej, zerowej i całkowitej prądów fazowych [1,4].

W przypadku napięć międzyfazowych zaburzenie ich symetrii jest powodowane przez wystąpienie składowej symetrycznej przeciwnej, składowa zerowa nie występuje. Wprowadza się tylko jeden współczynnik asymetrii napięć międzyfazowych.

$$\alpha_{um} = \frac{U_{m2}}{U_{m1}} \cdot 100\% \quad (16)$$

gdzie:  $U_{m1}, U_{m2}$  – składowe wartości skutecznych napięcia kolejności zgodnej i przeciwnej,  $\alpha_{um}$  – współczynniki asymetrii napięć międzyfazowych. Zależności te umożliwiają opisanie asymetrii napięć i prądów badanej sieci.

### 3.3. Teoria mocy Budeanu

Aby dokonać opisu przesyłanej energii należy skorzystać z jednej z teorii mocy. Jedną z najpowszechniej dotychczas stosowanych teorii to teoria mocy według I. Budeanu. Opiera się na rozłożeniu przebiegów napięć i prądów przy wykorzystaniu szeregu Fouriera. Przebiegi odkształcone okresowe napięć i prądów opisują następujące szeregi trygonometryczne:

$$u = U_0 + \sqrt{2} \sum_{h=1}^{\infty} U_h \cos(h\omega t + \Psi_h) = U_0 + \sqrt{2} \operatorname{Re} \left( \sum_{h=1}^{\infty} U_h e^{jh\omega t} \right) \quad (17)$$

$$i = I_0 + \sqrt{2} \sum_{h=1}^{\infty} I_h \cos(h\omega t + \Psi_h - \varphi_h) = I_0 + \sqrt{2} \operatorname{Re} \left( \sum_{h=1}^{\infty} I_h e^{jh\omega t} \right) \quad (18)$$

gdzie:  $h$  – rząd harmonicznej,  $U_h, I_h$  – kolejno skuteczna wartość napięcia i prądu  $h$ -tej harmonicznej,  $U_0, I_0$  – składowe stałe w napięciu i prądzie,  $\Psi_h$  – faza początkowa  $h$ -tej harmonicznej napięcia,  $\varphi_h$  – przesunięcie fazowe między  $h$ -tą harmoniczną napięcia i prądu [5].

W przypadku braku składowych stałych w chwilowych wartościach napięć i prądów dla odbiornika jednofazowego wzory na moc czynną, bierną i pozorną według teorii Budeanu przyjmują postać:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \cos \varphi_h \quad (19)$$

$$Q_B = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \sin \varphi_h \quad (20)$$

Dla przebiegów sinusoidalnych, tak zdefiniowana moc bierna, będzie zawierała jedynie składową podstawową, która będzie stanowiła część urojoną zespolonej mocy pozornej:

$$\underline{S}_1 = \underline{U}_1 * \underline{I}_1 = U_1 I_1 e^{j\varphi_1} = P_1 + jQ_{B1} \quad (21)$$

gdzie:  $U_1, I_1$  – kolejno skuteczna wartość napięcia i prądu składowej podstawowej,  $\varphi_1$  – przesunięcie fazowe między składową podstawową napięcia i prądu.

Moduł mocy zespolonej z równania (21) spełnia natomiast zależność:

$$|S_1| = S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_{B1}^2} = \sqrt{(U_1 I_1 \cos \varphi_1)^2 + (U_1 I_1 \sin \varphi_1)^2} = U_1 I_1 \quad (22)$$

Dla przebiegu niesinusoidalnego moc pozorną jednofazowego odbiornika określa iloczyn skutecznych wartości napięć i prądów:

$$S = U \cdot I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (23)$$

Z porównania wzorów (22) i (23) wynika, że:

$$S - S_1 \geq 0 \quad (24)$$



Jedynie dla przebiegów nieodkształconych relacja (24) staje się równością i tylko w takim przypadku moc pozorna jest równa modułowi mocy zespolonej. Dla przebiegów odkształconych teoria Budeanu przewiduje wielkość nazywaną deformacją  $D$ :

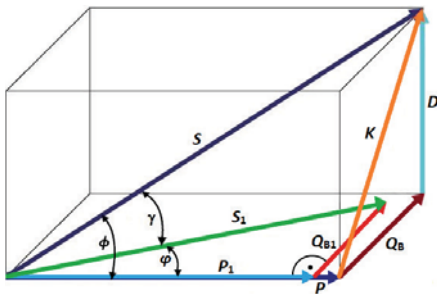
$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2} \quad (25)$$

W przypadku ogólnym zachodzi równość:

$$S = \sqrt{P^2 + Q_B^2 + D^2} = \sqrt{P^2 + K^2} \quad (26)$$

$$K = \sqrt{Q_B^2 + D^2} \quad (27)$$

gdzie:  $K$  – moc dystorsji,  $D$  – moc deformacji [5].



Rys. 3. Wielościan mocy, według Budeanu, jednofazowego obwodu z przebiegami sinusoidalnymi i odkształconymi [5]  
Fig. 3. Power polyhedron, according to Budeanu, of a single-phase circuit with sinusoidal and distorted waveforms [5]

Między kątami wielościanu mocy jednofazowego odbiornika nieliniowego zasilanego ze źródła napięcia okresowego zachodzi zależność:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1}, \quad PF = \frac{P}{S}, \quad \cos \gamma = \frac{S_1}{S} \quad (28)$$

Podobnie jak dla obwodu jednofazowego – moc czynną, bierną i pozorną dla obwodu trójfazowego definiują zależności:

$$P_{L_1+L_3} = \sum_{n=L_1}^{L_3} \sum_{h=1}^{\infty} U_{hn} I_{hn} \cos \varphi_{hn} \quad (29)$$

$$Q_{B\ L_1+L_3} = \sum_{n=L_1}^{L_3} \sum_{h=1}^{\infty} U_{hn} I_{hn} \sin \varphi_{hn} \quad (30)$$

Dla przebiegów sinusoidalnych moc zespolona przyjmuje postać:

$$\underline{S}_{L_1+L_3} = \sum_{n=L_1}^{L_3} (\underline{U}_{1n} * \underline{I}_{1n}) = \sum_{n=L_1}^{L_3} (U_{1n} I_{1n} e^{j\varphi_{1n}}) = \sum_{n=L_1}^{L_3} (P_{L_1+L_3} + jQ_{B\ L_1+L_3}) \quad (31)$$

gdzie:  $n$  – numer kolejnej fazy,  $U_1, I_1$  – kolejno skuteczna wartość napięcia i prądu składowej podstawowej,  $\varphi_1$  – przesunięcie fazowe między składową podstawową napięcia i prądu [5].

Moduł mocy zespolonej spełnia zależność:

$$\begin{aligned} |\underline{S}_{L_1+L_3}| &= S_{L_1+L_3} = \sqrt{P_{L_1+L_3}^2 + jQ_{B\ L_1+L_3}^2} = \\ &= \sum_{n=L_1}^{L_3} \left( \sqrt{(U_{1n} I_{1n} \cos \varphi_{1n})^2 + (U_{1n} I_{1n} \sin \varphi_{1n})^2} \right) = U_{1n} I_{1n} \end{aligned} \quad (32)$$

Dla przebiegów niesinusoidalnych moc pozorną trójfazowego odbiornika można opisać iloczynem skutecznych wartości napięć i prądów:

$$S_{L_1+L_3} = U_n \cdot I_n = \sum_{n=L_1}^{L_3} \left( \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_{hn}^2} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_{hn}^2} \right) \quad (33)$$

Realizacja obowiązująca dla układów symetrycznych z przebiegami sinusoidalnymi

$$S_{L_1+L_3} = \sqrt{P_{L_1+L_3}^2 + Q_{B\ L_1+L_3}^2} \quad (34)$$

nie sprawdza się dla wartości mocy biernej  $Q_{B\ L_1+L_3}$  opisanej zależnością (30), gdyż

$$S_{L_1+L_3} > S_{L_1+L_3} \quad (35)$$

Dla układu wielofazowego symetrycznego podobnie jak dla układu jednofazowego można wprowadzić analogiczne zależności na wartość mocy odkształcenia (deformacji)  $D$ . Z przedstawionych rozważań wynika, że moc bierna (wzór 20, 30) nie prowadzi do bilansu mocy czynnej, biernej i pozornej jak w układach jednofazowych z przebiegami sinusoidalnymi lub wielofazowych symetrycznych z przebiegami sinusoidalnymi. W układach generujących wyższe harmoniczne prądu o niewielkich względnych wartościach prowadzi się kompensację tylko podstawowej harmonicznej prądu biernego, czyli kompensację mocy biernej. Jeżeli zawartość wyższych harmonicznych w prądach fazowych przekracza dopuszczalny poziom wynikający z dopuszczalnego odkształcenia napięcia lub nadmiernej wartości skutecznej prądu fazowego, stosuje się filtry wyższych harmonicznych prądu [12]. Teoria mocy Budeanu dla jednofazowych lub trójfazowych symetrycznych zasilanych sinusoidalnie obwodów nieliniowych poprawnie opisuje z wystarczającą dokładnością bilans energetyczny oraz rozdziela moc dystorsji na dwa różne technicznie minimalizowane składniki, moc bierną związaną z podstawową harmoniczną prądu i moc odkształcenia związaną z wyższymi harmonicznymi prądów.

Poza teorią Budeanu istnieją inne opracowania tego zagadnienia związane z teorią mocy chwilowych, które przedstawiają inny opis danego problemu. [5]. Ze względu jednak na objętość i cel artykułu nie będą one omawiane.

### 3.4. THD napięć i prądów

Współczynnik  $THD$  jest to względna skuteczna wartość wszystkich wyższych harmonicznych odniesiona do podstawowej harmonicznej. Dla przebiegu niesinusoidalnego jest opisana zależnością:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (36)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (37)$$

gdzie:  $U_1, I_1$  – kolejno skuteczna wartość napięcia i prądu składowej podstawowej,  $U_h, I_h$  – kolejno skuteczna wartość napięcia i prądu  $h$ -tej harmonicznej.

### 3.5. TTHD napięć i prądów

W przypadku występowania w przebiegach składowych nieokresowych lub składowych o częstotliwościach niebędących pełnymi wielokrotnościami podstawowej częstotliwości napięcia skuteczna wartość napięcia (prądu) jest większa niż to wynika z zawartości wyższych harmonicznych. W takim przypadku miarą odkształcenia przebiegu jest TTHD:

$$TTHD_U = \frac{\sqrt{U_{RMS}^2 - U_1^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (38)$$

$$TTHD_I = \frac{\sqrt{I_{RMS}^2 - I_1^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (39)$$

gdzie:  $U_1, I_1$  – kolejno skuteczna wartość napięcia i prądu składowej podstawowej,  $U_{RMS}, I_{RMS}$  – kolejno skuteczna wartość napięcia i prądu wyższych harmonicznych i interharmonicznych [1, 5, 7].

### 3.6. TDD prądów

Współczynnik całkowitego zniekształcenia zapotrzebowania prądu określa stosunek wartości skutecznej sumy składowych harmonicznych prądu bez udziału składowej podstawowej do maksymalnej wartości skutecznej prądu obciążenia. Współczynnik ten jest wyrażany jako:

$$TDD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \cdot 100\% \quad (40)$$

gdzie:  $I_L$  – maksymalna wartość skuteczna prądu obciążenia,  $I_h$  – skuteczna wartość prądu  $h$ -tej harmonicznej.

Współczynnik ten jest wyznaczany jako średnia za okres 15 lub 30 minut [11]. Taka wersja wskaźnika, w przeciwieństwie do  $THD$ , generuje poprawne wyniki nawet dla sygnałów niezawierających składowej podstawowej (np. prądu w przewodzie neutralnym) [6, 8, 9].

### 3.7. Wskaźnik krótkookresowego migotania światła

Wskaźnik krótkookresowego migotania światła  $P_{st}$  można przedstawić za pomocą zależności:

$$P_{st} = \sqrt{k_{0,1}P_{0,1} + k_1P_1 + k_3P_3 + k_{10}P_{10} + k_{50}P_{50}} \quad (41)$$

gdzie:  $k_{0,1} \dots k_{50}$  – współczynniki wagowe, których wartości wynikają z przyjętych procedur obliczeniowych;  $P_{0,1} \dots P_{50}$  – poziomy migotania, dla których określone jest prawdopodobieństwo ich przekroczenia.

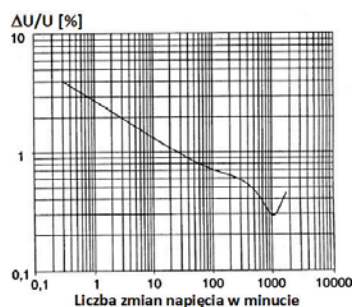
Jako wystarczające (z praktycznego punktu widzenia) uznano pięć poziomów lub inaczej percentyli, które wynoszą:

$P_{0,1}$  – poziom przekroczony w trakcie 0,1% czasu obserwacji; współczynnik wagi  $k_{0,1} = 0,0314$ ;

- $P_1$  – poziom przekroczony w trakcie 1% czasu obserwacji; współczynnik wagi  $k_1 = 0,00525$ ;
- $P_3$  – poziom przekroczony w trakcie 3% czasu obserwacji; współczynnik wagi  $k_3 = 0,0657$ ;
- $P_{10}$  – poziom przekroczony w trakcie 10% czasu obserwacji; współczynnik wagi  $k_{10} = 0,28$ ;
- $P_{50}$  – poziom przekroczony w trakcie 50% czasu obserwacji; współczynnik wagi  $k_{50} = 0,08$ .

Wskaźnik  $P_{st}$  wyznaczany jest z krótkim okresem obserwacji wynoszącym dziesięć minut. Jest to czas dostatecznie długi, aby krótkotrwałe, sporadycznie występujące zmiany napięcia nie miały zbyt znaczącego wpływu na ostateczny wynik pomiaru, a wystarczająco krótki, aby umożliwić szczegółowy opis odbiornika zaburzającego o długim cyklu pracy.

W wyniku przeprowadzonych badań przez Międzynarodową Unię Zastosowań Elektrotechniki (UIE) stwierdzono, że wahania napięcia odpowiadające wskaźnikowi  $P_{st} = 1\%$  napięcia zasilania stanowią dopuszczalny limit ze względu na negatywne skutki na organizm ludzki (rys. 4 [10]).



Rys. 4. Krzywa  $P_{st} = 1$  (dla prostokątnych równoodległych zmian napięcia) [10]

Fig. 4. Curve  $P_{st} = 1$  (for rectangular equidistant voltage changes) [10]

### 3.8. Wskaźnik długookresowego migotania światła

Wskaźnik długookresowego migotania światła  $P_{lt}$  można przedstawić za pomocą zależności:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{n=1}^{12} \frac{P_{stn}^3}{12}} \quad (42)$$

gdzie:  $P_{stn}$  – kolejne wartości wskaźnika krótkookresowego migotania światła  $P_{st}$ .

Przez  $P_{lt}$  należy rozumieć wskaźnik obliczany na podstawie sekwencji 12 kolejnych wartości wskaźników krótkookresowego migotania światła  $P_{st}$  (mierzonych przez 10 minut) występujących w okresie 2 godzin [11].

## 4. Podsumowanie

Artykuł jest wprowadzeniem teoretycznym do praktycznej analizy jakości energii elektrycznej w sieci zasilającej WN/SN dla zakładów przemysłowych. W części tej omówiono podstawowe parametry odnoszące się do jakości energii elektrycznej oraz sposoby ich analitycznego opisu. Wychodząc od symetrycznego układu napięć i prądów można dojść do opisu np. współczynników asymetrii. W przypadku teorii mocy w artykule tym zdecydowano się na opis teorii według I. Budeanu ze względu na prawdopodobne jej zastosowanie w analizatorach parametrów sieci elektroenergetycznej. Niestety teoria mocy Budeanu ma również istotne błędy, które zostały zauważone przez pro-

fesora Czarneckiego [13] w końcu XX wieku. Istnieją bowiem szczególne przypadki, które wskazują na niejednoznaczność teorii mocy Budeanu. Według tej teorii, zgodnie z (19) i (20), moc bierna  $Q_B$  jest sumą mocy biernych pojedynczych harmonicznych dla  $h$ -tej harmonicznej. Wiadomo natomiast, że w rzeczywistych obwodach elektrycznych przesunięcie fazowe może przyjmować wartości z zakresu  $-\pi/2 \geq \varphi_h \geq \pi/2$ . Zatem wywnioskować można, że moc  $P$  może osiągać wartości nieujemne, natomiast  $Q_B$  zarówno dodatnie jak i ujemne wartości. Wynika z tego przypadek, w którym sumaryczna moc  $Q_B$  osiągnie zero nawet wtedy, gdy zauważalne będą oscylacje mocy dla pewnych harmonicznych między źródłem a odbiornikiem. W teorii tej nie występuje więc związek między oscylacją energii w obwodach z przebiegami niesinusoidalnymi a mocą bierną  $Q_B$ . Wartość  $Q_B$  dla poszczególnych harmonicznych rozpatrywana indywidualnie określa amplitudę oscylacji energii związanej z istnieniem  $h$ -tej harmonicznej prądu. Rozpatrując natomiast sumę  $h$ -tych harmonicznych nie można uzyskać informacji o tych oscylacjach. Dr inż. Konrad Zajkowski w swoim artykule [14] podaje kilka matematycznych przypadków, które udowadniają niespójności tej teorii. Mimo tych wad do dnia dzisiejszego nie przedstawiono innej interpretacji mocy  $Q_B$ . Nie udało się także przyporządkować żadnego zjawiska fizycznego adekwatnego do tej mocy. Ze względu jednak na dużą popularność tej teorii jest ona stosowana do dnia dzisiejszego w wielu urządzeniach pomiarowych. Wykorzystano ją również w urządzeniach, których użyto podczas realizowanych pomiarów w GPZ dla obiektów przemysłowych.

Oczywiście istnieją również inne opracowania teorii mocy, takie jak teoria Fryzego czy opracowanie IEEE 1459-2010 [15]. Teoria Fryzego, podobnie jak teoria mocy Budeanu w pewnych szczególnych przypadkach prowadzi do błędnych interpretacji, co również omawia dr Zajkowski w swoim artykule [14]. Opracowanie IEEE 1459-2010 stanowi jedynie standard, który przez część naukowców nie został uznany za ostateczną i adekwatną formę opisu danego zagadnienia. Tak więc forma oraz poprawność opisu teorii mocy jest wciąż tematem otwartym i szeroko omawianym. W pracy tej mimo wskazanych niejednoznaczności teorii mocy Budeanu zdecydowano się na jej omówienie ze względu na wykorzystane urządzenia pomiarowe, które dokonują pomiarów w oparciu o tę teorię.

W artykule przedstawiono i opisano takie parametry, jak współczynniki zawartości harmonicznych THD oraz TTHD dla napięć i prądów oraz wskaźniki krótko- i długookresowego migotania światła. Wartości tych parametrów stanowią istotną informację podczas eksploatacji sieci zasilającej. Ich ciągły monitoring pozwala na wykrywanie istotnych zmian czy zakłóceń w badanej sieci.

## Bibliografia

- Kołodziej K., *Analiza parametrów sieci wewnętrzzakładowej przy wykorzystaniu systemu BMS i PME*, „Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej”, Nr 61, 2018, 35–40, DOI: 10.32016/1.61.07.
- Nota katalogowa analizatora sieci Janitza UMG511, Janitza electronics GmbH, Lahnau 2011.
- Kowalski Z., *Jakość energii elektrycznej*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2007.
- Robak S., Pawlicki A., Pawlicki B., *Asymetria napięć i prądów w elektroenergetycznych układach przesyłowych*, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki, 2014.
- Piróg S., *Energoelektronika: układy o komutacji sieciowej i o komutacji twardej*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków 2006.
- Canturk S., Balci M.E., Hocaoglu M.H., *On the definition of apparent power*, “Electrical Power Quality and Utilisation, Journal”, Vol. XVIII, No. 2, 2015.
- Bolkowski S., *Teoria obwodów elektrycznych*, Wyd. X, PWN, Warszawa 2017.
- Hanzelka Z., *Jakość energii elektrycznej, część 4 – Wyższe harmoniczne napięć i prądów*, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2001.
- Karafotis P.A., Christodoulou-Galanopoulos K.N., Siagkas D.O., Georgilakis P.S., *Power Quality Indices for Electrical Power Systems under Non-Stationary Disturbances*, National Technical University of Athens, 2018, DOI: 10.1109/ICHVE.2018.8642257.
- Barancki A., Płatek T., Niewiadomski M., *Harmoniczne prądy: problemy pomiarowe*, „Elektro info”, Nr 7, 2003, 60–63.
- Dz. U. z 2007 r. Nr 93, poz. 623, Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego.
- PN-EN 50160: 2010, Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych.
- Czarnecki L.S., *What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion powers and why it should be abandoned*, “IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement”, Vol. IM-36, No. 3, 1987, 834–837, DOI: 10.1109/TIM.1987.6312797.
- Zajkowski K., *Wady teorii mocy w obwodach jednofazowych według Budeanu i Fryzego*, „Autobusy: eksploatacja i testy”, R. 17, Nr 12, 2016, 1500–1504.
- IEEE 1459-2010 standard, New York 2010.

# Impact of the Load Character from Industrial Plants for the Quality Parameters of Electricity Supply from the HV/MV Line

## Theoretical Introduction

**Abstract:** This article, as part 1, is an introduction to the issue of electricity quality in HV/MV power networks supplying industrial plants. In the beginning, the article discusses issues related to the impact of non-linear loads on industrial power networks. The characteristics of the 110/6 kV network tested were presented subsequently, its essential elements, as well as powered plants and configuration of measurement tracks and network analyzers. This section presents the scheme for supplying GPZ for the needs of industrial plants, in which supply fields measurements were taken on the 6 kV side. Then, to better understand practical measurements, a symmetrical voltage and current system were used as a theoretical model. At the same time, such parameters as voltage and current asymmetry coefficients, active, reactive and apparent power according to the Budeanu definition, THD and TTHD harmonic coefficients for voltages and currents as well as short and long-term flickering indicators have been defined and discussed. All these parameters will be subjected to in-depth analysis in part 2 when discussing the measurement results from the industrial plants tested. The article ends with the collection of conclusions and a summary.

**Keywords:** main power point 110/6 kV, quality of electricity, analysis of power supply parameters, power supply of industrial plants

### mgr inż. Kamil Kołodziej

kamil2222pl@wp.pl

ORCID: 0000-0002-3086-5801

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej. W 2014 r. uzyskał tytuł inżyniera na kierunku Elektronika i Telekomunikacja. W 2016 r. uzyskał tytuł magistra na kierunku Elektrotechnika. Od 2016 r. jest doktorantem na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej w dyscyplinie elektrotechnika. Od 2014 r. związany z branżą przemysłową i energetyczną. Główne zainteresowania naukowe obejmują zagadnienia związane z jakością energii elektrycznej, efektywnością energetyczną a także nowoczesnymi systemami sterowania i nadzoru typu SCADA, BMS, PME stosowanymi w obszarach przemysłowych i energetycznych.

