

Grzegorz WICZYŃSKI*

PORÓWNANIE MIAR WAHAŃ NAPIĘCIA

Do podstawowych składników oceny jakości energii elektrycznej należą wielkości charakteryzujące zmienność napięcia w sieci elektroenergetycznej. Należą do nich miary przeznaczone do oceny uciążliwości wahań napięcia i wspierające identyfikację źródeł zmienności napięcia. W pracy przedstawiono porównanie trzech najczęściej używanych miar: maksymalnych U_{\max} i minimalnych U_{\min} wartości skutecznych napięcia, wskaźnika krótkookresowego migotania światła P_{st} oraz wskaźników wahań napięcia. W części specyfikującej poszczególne miary (uzupełnionej o wskaźnik ΔV_{10}) zamieszczono ich krótkie opisy. W głównej części pracy omówiono zależność wybranych miar wahań napięcia od częstotliwości f_m sygnału modulującego amplitudę i częstotliwość. Sformułowano obserwacje określające możliwości diagnostyczne poszczególnych miar. Ze względu na złożoność problematyki miar wahań napięcia praca nie wyczerpuje zagadnienia. Jest tylko jednym z etapów pogłębiania wiedzy o miarach wahań napięcia.

1. WPROWADZENIE

Ocena jakości energii elektrycznej (JEE) to procedura porównująca zmierzone i zarejestrowane wartości określonego zestawu wielkości z wartościami referencyjnymi. Ocena JEE podlega specyfikacji prawnej, normatywnej lub wynika z wymagań technicznych adekwatnych dla danego punktu pomiarowego. Niezachowanie JEE może skutkować zakłóceniami pracy odbiorników lub ich wyłączeniem. Do najczęstszych objawów zakłóceń należy nieciągłość (niestabilność) pracy odbiorników. W przypadku źródeł światła przejawia się to migotaniem światła. Do podstawowych składników oceny JEE należą wielkości opisujące zmienność napięcia. Szczególnie istotne są szybkie zmiany napięcia (czyli wahań napięcia) mogące zakłócać pracę zasilanych odbiorników. Problematyka wahań napięcia wywołujących migotanie światła występuje w literaturze od początku XX wieku [6]. Nabiera ona znaczenia wraz z rozwojem i rozpowszechnieniem różnego rodzaju odbiorników energii elektrycznej będących z jednej strony źródłami wahań a z drugiej układami podatnymi na zmienność napięcia. Oddziaływanie uciążliwych odbiorników na sieć zależy od ich właściwości oraz parametrów sieci elektroenergetycznej. W zależności od mocy wykrywalne oddziaływanie występuje w obwodach wszystkich napięć. Podatność

* Politechnika Poznańska.

odbiornika na wahania napięcia zależy od jego właściwości. Do odbiorników szczególnie podatnych należą różnego rodzaju źródła światła oraz układu pomiarowo-sterujące.

Pomiar i ocena zmienności napięcia w sieci elektroenergetycznej jest złożonym zadaniem pomiarowym. Jego realizacja wymaga stosowania miar w możliwie prosty i czytelny sposób opisujących zmienność napięcia przy jednoczesnym uwzględnieniu ich oddziaływania na potencjalne odbiorniki. Dostępność miar wahań napięcia uzależniona jest od możliwości pomiarowych użytego analizatora JEE. W literaturze występują różne miary zmienności napięcia [3, 8]. Do podstawowych miar, zdaniem autora, należy zaliczyć:

- maksymalne U_{\max} i minimalne U_{\min} wartości skuteczne napięć (fazowych i przewodowych),
- wskaźniki krótkookresowego P_{st} i długotrwałego P_{lt} migotania światła,
- wskaźnik ΔV_{10} ,
- wskaźniki wahań napięcia.

Ponadto w literaturze wymieniane są następujące miary: energetyczna dawka wahań D_v , oraz energia E_{Tw} i moc P_{Tw} wahań napięcia [3].

Wymienione miary różnią się sposobem pomiaru. Z powodu tych różnic odmiennie odwzorowują zmienność napięcia oraz charakteryzują się różnymi możliwościami diagnostycznymi. Żadna z nich nie zapewnia w pełni realizacji celu diagnostycznego polegającego na jednoznacznej ocenie uciążliwości wahań napięcia i wskazaniu potencjalnych uciążliwych odbiorników energii elektrycznej. Efektywna realizacja procesu diagnostycznego wymaga zrozumienia specyfiki poszczególnych miar. W związku z tym przeprowadzono porównanie wybranych miar zmienności napięcia. Można to zrealizować w różny sposób. W pracy porównanie przeprowadzono poprzez wyliczenie najważniejszych obserwacji zależności poszczególnych miar od częstotliwości sygnału modulującego amplitudę i częstotliwość.

2. PODSTAWOWE MIARY WAHAŃ NAPIĘCIA

2.1. Maksymalne U_{\max} i minimalne U_{\min} wartości skuteczne napięć

Wartości maksymalna U_{\max} i minimalna U_{\min} wartości skutecznej opisują zmiany napięcia $U(t)$ za pomocą największej i najmniejszej wartości w okresie dyskryminacji. W wyniku tego pomijane są takie informacje jak wartości pośrednie, częstość i szybkość zmian napięcia. Wartość skuteczna $U(t)$ charakteryzuje okresowy sygnał w przedziale czasu będącym całkowitą wielokrotnością okresu tego sygnału. Teoretycznie wartość skuteczna $U(t)$ może być wyznaczana co dowolnie krótki odstęp czasu. Jednak z praktycznych względów jest ona wyznaczana co półokres synchronizując się przejściami przez

zero. Wartości skuteczne wykorzystywane do opisu zmienności $U(t)$ zazwyczaj wyznaczone są co półokres w przedziale czasu równym okresowi napięcia.

Wartości U_{\max} i U_{\min} informują o zmianach wartości skutecznej napięcia. Dokładniej opisując wartości te nie są miarą wahań napięcia. Z doświadczenia autora wynika, że w większości sytuacji pomiarowych wartości U_{\max} i U_{\min} odwzorowują zmiany uciążliwości wahań napięcia. Dlatego są pożytecznym narzędziem diagnostycznym wspierającym badanie zmienności napięcia. Ważną zaletą tej miary jest dostępność w wynikach pomiarów większości analizatorów jakości energii elektrycznej. Możliwości diagnostyczne ulegają wzmocnieniu podczas jednoczesnego stosowania wartości maksymalnych i minimalnych napięć i prądów [5].

2.2. Wskaźniki krótkookresowego P_{st} i długotrwałego P_{lt} migotania światła

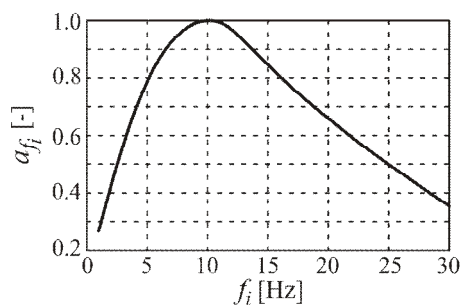
Wskaźniki krótkookresowego P_{st} i długotrwałego P_{lt} migotania światła są normatywną miarą wahań napięcia [10, 8] wymienioną w zestawie parametrów jakościowych energii elektrycznej [11]. Sposób pomiaru wskaźników specyfikuje norma PN-EN 61000-4-15 [9]. Do pomiaru wskaźnika P_{st} służy miernik migotania światła (o potocznej nazwie flickermeter). Wartość tego wskaźnika wyznaczana jest w kolejnych 10 minutowych przedziałach czasu. Wskaźnik P_{lt} obliczany jest na podstawie 12 następujących po sobie wartości P_{st} . Opisuje on uśrednioną za dwie godziny umowną uciążliwość migotania światła wywołanego wahaniami napięcia. Wartość wskaźników określają uciążliwość migotania światła w odpowiednich warunkach pomiarowych (np. dla określonego źródła światła). Ocena uciążliwości wahań napięcia ze względu na wywoływane migotanie światła polega na porównaniu wartości wskaźnika z wartościami granicznymi. W obwodach MV i LV przyjmuje się wartość graniczną równą 1 a w obwodach HV równą 0,8 [11, 8]. Dla zmienności napięcia odtwarzalnej modulacją amplitudy (AM) wartość wskaźnika P_{st} zależy od częstotliwości f_m , amplitudy ($\Delta U/U$) i kształtu obwiedni napięcia [3]. Przy stałych częstotliwości i kształcie obwiedni wartość P_{st} jest w przybliżeniu liniowo zależna od amplitudy obwiedni [8]. Z kolei zależność wskaźnika P_{st} od częstotliwości, przy stałych amplitudzie i kształcie obwiedni, jest nieliniowa.

2.3. Wskaźnik ΔV_{10}

Wskaźnik ΔV_{10} jest miarą uciążliwości wahań stosowaną w krajach Dalekiego Wschodu. Wartość tego wskaźnika obliczana jest według następującej zależności [1]:

$$\Delta V_{10} = \sqrt{\sum_i (a_i \cdot \Delta v_i)^2} \quad (1)$$

gdzie: Δv_i – amplituda składnika o częstotliwości f_i wyrażona w jednostkach względnych, a_i – współczynnik skalujący dla częstotliwości f_i .
Wartość współczynnika a_i określa zamieszczona na Fig. 1 charakterystyka $a_i=f(f_i)$.



Rys. 1. Krzywa widzenia $a_i = f(f_i)$ [2]

Maksimum tej charakterystyki wypada dla $f_i = 10$ Hz. Zatem występuje różnica w odczuwaniu migotania światła pomiędzy tą charakterystyką a charakterystyką amplitudową filtra pasmowoprzepustowego w normatywnym torze sygnałowym flickermetru (o częstotliwości środkowej $f_p = 8,8$ Hz) wynosząca 1,2 Hz. Wahania napięcia są nieuciążliwe, jeżeli spełnione są dwa warunki: wartość maksymalna ΔV_{10} jest mniejsza od 0,45% oraz wartość średnia jest mniejsza od 0,32% [1]. Poważnym utrudnieniem w praktycznym wykorzystaniu wskaźnika ΔV_{10} są problemy w wyznaczeniu wartości częstotliwości i amplitudy poszczególnych składników. Wymagany jest pomiar sub/interharmonicznych. Na ich podstawie określone są wartości częstotliwości i amplitudy składników występujących w (1).

2.4. Wskaźniki wahań napięcia

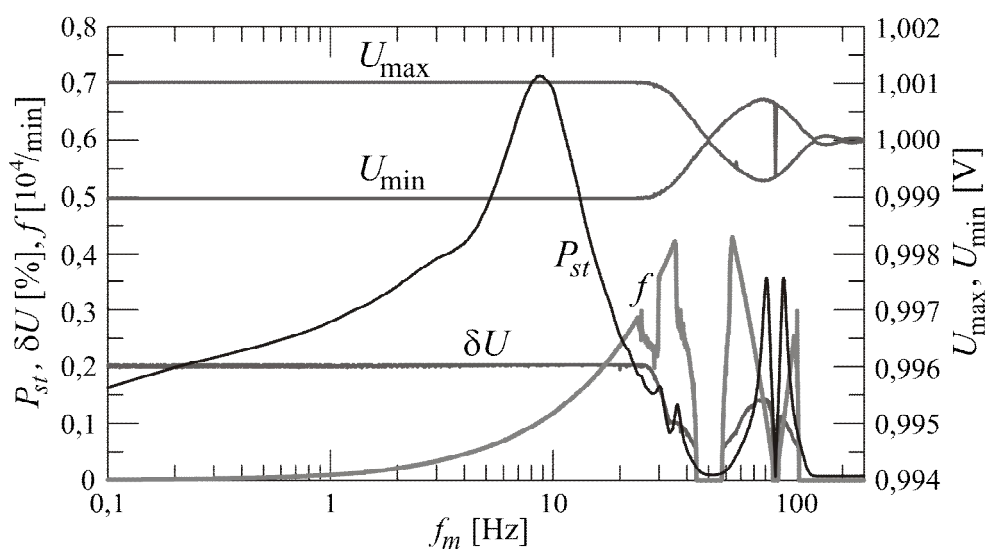
Wskaźniki wahań napięcia, amplituda δU i częstość f wahań napięcia, są miarą zmienności wartości skutecznej napięcia [4, 7, 8]. Wartości wskaźników δU i f wyznaczone są na podstawie zbioru wahań δV . Wartość δV opisuje pojedynczą zmianę wartości skutecznej. Częstości wahań f określone są w przedziałach zliczania odniesionych do wartości δU . Zmienność napięcia w sieci elektroenergetycznej najczęściej odpowiada skutkom modulacji amplitudy. Dla tego typu zmienności wskaźniki wahań δU i f prawidłowo opisują stan sieci do pewnej wartości granicznej częstości zmian napięcia. Proces dyskryminacji wskaźników wahań napięcia i zależność tych wskaźników od różnego rodzaju zmienności napięcia przedstawiono w [8].

Prawidłowe zastosowanie tej miary wahań napięcia w diagnostyce sieci elektroenergetycznych wymaga odpowiedniego zrozumienia przebiegu procesu pomiarowego. Ponadto bardzo pomocne jest doświadczenie praktyczne. Wartości

wskaźników δU , δV i f dostarczają bezpośrednich informacji o zmienności napięcia oraz są silną przesłanką do identyfikacji źródeł wahań napięcia. Częstość wahań napięcia f pozwala oszacować częstość zmian stanu przyczyny wywołującej zmienność napięcia. Przykładowo, jeżeli zmierzono $f=120 \text{ }^1/\text{min}$ to można przypuszczać, że poszukiwany odbiornik zmiana swój stan co 0,5s (co może odpowiadać modulacji amplitudy sygnałem o $f_m=1 \text{ Hz}$). Wskaźniki δU i δV w połączeniu z informacją o impedancji obwodu pozwalają oszacować zmienność prądu. Na tej podstawie można przybliżyć właściwości elektryczne poszukiwanego odbiornika.

3. PORÓWNANIE MIAR WAHAŃ NAPIĘCIA

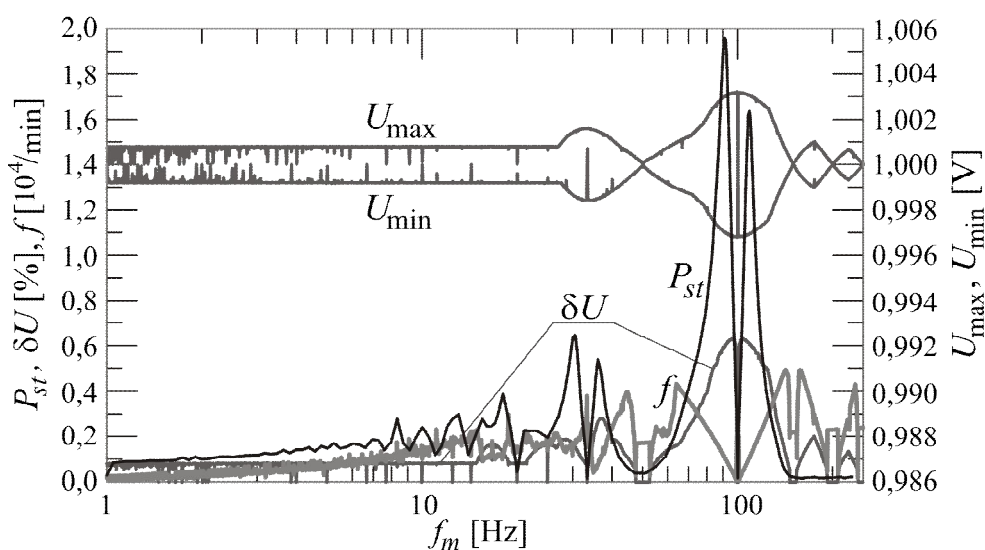
Pomiędzy uprzednio wymienionymi miarami zachodzą podobieństwa i różnice. Porównanie tych miar może być przeprowadzone z różnych punktów widzenia. Poniżej zostanie przedstawione porównanie na podstawie zależności wartości trzech miar (ze względu na brak dostępnej jednoznacznej definicji pominięto wskaźnik ΔV_{10}) od częstotliwości sygnału modulującego f_m amplitudę (rys. 2) i częstotliwość (rys. 3).



Rys. 2. Zależność P_{st} , δU , f , U_{max} i U_{min} od częstotliwości f_m sygnału modulującego amplitudę dla głębokości modulacji $(\Delta U/U)=0,2\%$

Obserwując zależność miar wahań napięcia od częstotliwości f_m sygnału modulującego amplitudę przy stałej głębokości modulacji $(\Delta U/U)=const$ z rys. 2 można zauważyć, że:

- różnica ($U_{\max}-U_{\min}$) jest zgodna z głębokością modulacji ($\Delta U/U$) dla częstotliwości f_m mniejszych od 25 Hz,
- dla częstotliwości f_m mniejszych od 22 Hz zachodzi zgodność amplitudy δU z głębokością modulacji ($\Delta U/U$) oraz częstotliwości f z częstotliwością modulacji f_m ,
- występuje zbieżność różnicy ($U_{\max}-U_{\min}$) i amplitudy wahań δU ,
- uciążliwość migotania światła określona wskaźnikiem P_{st} zmienia w przedziale częstotliwości f_m od 0,1 Hz do 150 Hz, występują trzy lokalne ekstrema zależności $P_{st}=f(f_m)$ dla $f_m=8,8$; 91,2 i 108,8 Hz, znikoma uciążliwość występuje dla $f_m \approx 50$ Hz oraz $f_m > 150$ Hz,
- niemożliwe jest wnioskowanie o uciążliwości migotania światła wywołanego wahaniami napięcia na podstawie wartości U_{\max} i U_{\min} , wskaźnika δU lub f (przy czym należy pamiętać o możliwości wykorzystania charakterystyk amplitudowo-częstotściowych wahań napięcia do oceny uciążliwości),
- wartość wskaźnika P_{st} nie umożliwia określenia amplitudy i częstotliwości wahań napięcia.



Rys. 3. Zależność P_{st} , δU , f , U_{\max} i U_{\min} od częstotliwości f_m sygnału modulującego częstotliwość dla dewiacji częstotliwości $\Delta f_{FM}=0,5$ Hz

Porównanie wykresów z rys. 2 i 3 wykazuje, że zmienności napięć odwzorowywane modulacją amplitudy i częstotliwości są znacząco odmienne. Na podstawie zależności miar wahań napięcia od częstotliwości f_m sygnału modulującego częstotliwość przy stałej dewiacji częstotliwości $\Delta f_{FM}=\text{const}$ z rys. 3 można zauważyć, że:

- dla tego typu zmienności napięcia uciążliwe migotanie światła występuje dla częstotliwości f_m zbliżonych do 100Hz, występują dwa lokalne ekstrema zależności $P_{st}=f(f_m)$ dla $f_m=91,2$ i $108,8$ Hz, znikoma uciążliwość występuje dla $f_m < 50$ Hz oraz $f_m > 150$ Hz, istotny jest brak ekstremum dla $f_m=8,8$ Hz (co odróżnia od zmienności odwzorowywanej modulacją amplitudy);
- wzrost wskaźnika P_{st} skorelowany jest z przyrostami różnicy ($U_{\max}-U_{\min}$) i amplitudy wahań δU ,
- niemożliwe jest wnioskowanie o uciążliwości migotania światła wywołanego wahaniami napięcia na podstawie wartości U_{\max} i U_{\min} oraz wskaźników wahań napięcia δU lub f ,
- wartości różnicy ($U_{\max}-U_{\min}$), amplitudy wahań δU oraz wskaźnika P_{st} nie umożliwiają określenia dewiacji częstotliwości i częstotliwości sygnału modulującego, co skutkuje tym, że badane miary wahań napięcia nie są skutecznym narzędziem specyfikującym parametry źródła zmienności napięcia (dla tego typu zmienności napięcia).

4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono porównanie trzech najczęściej używanych miar wahań napięcia: maksymalnych U_{\max} i minimalnych U_{\min} wartości skutecznych napięcia, wskaźnika krótkookresowego migotania światła P_{st} oraz wskaźników wahań napięcia, amplitudy δU i częstości f . W części specyfikującej poszczególne miary (uzupełnionej o wskaźnik ΔV_{10}) zamieszczono ich krótkie opisy. W głównej części pracy na rys. 2 i 3 pokazano wykresy zależności porównywanych miar od częstotliwości f_m sygnału modulującego amplitudę i częstotliwość. Na tej podstawie sformułowano obserwacje określające możliwości diagnostyczne poszczególnych miar. Zaobserwowano m.in., że tylko wskaźnik P_{st} prawidłowo (czyli normatywnie) określa uciążliwość napięcia (w pracy odwołano się tylko do zależności $P_{st}=f(f_m)$ pomijając charakterystykę amplitudowo-częstościową wahań napięcia). W przypadku zmienności napięcia odwzorowywanej modulacją amplitudy efektywnym narzędziem diagnostycznym wspomagającym identyfikację uciążliwych odbiorników są wskaźniki wahań napięcia, amplituda δU i częstość f . Są one efektywnym narzędziem dla częstotliwości f_m sygnału modulującego amplitudę mniejszych od 25Hz. Jednocześnie zaobserwowano, że brak takiego narzędzia dla napięcia odwzorowywanego modulacją częstotliwości.

Przedstawione w pracy porównanie pokazuje, że brak jednej uniwersalnej miary wahań napięcia. Tym samym uzasadnione jest wykorzystywanie różnych miar. Korzystanie z nich wymaga zrozumienia ich specyfiki. Złożoność problematyki powoduje, że niniejsza praca nie wyczerpuje zagadnienia i jest tylko jednym z etapów pogłębiania wiedzy o miarach wahań napięcia.

LITERATURA

- [1] Aoki M., Standard Method For Measurement of Voltage Fluctuations, Proc. of 9th Int. Congress UIE, 1980, pp. 3-12.
- [2] Hong Y.-Y., Lee L.-H., Stochastic Voltage-Flicker Power Flow, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 15, Number 1, ISSN 0885-8977, 2000, pp. 407-411.
- [3] Kowalski Z., Jakość energii elektrycznej, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2007.
- [4] Owen E.L., Power Disturbance And Power Quality – Light Flicker Voltage Requirements, Record of the IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Denver, 1994, s. 2303–2309.
- [5] Otokański P., Wiczyński G., The usage of voltage and current fluctuation for localization of disturbing loads supplied from power grid, Przegląd Elektrotechniczny, Volume 87, Number 1, ISSN 0033-2097, 2011, s. 107–111.
- [6] Simons K., Das Flackern des Lichtes in Electricischen Beleuchtungsanlagen, ETZ, Volume 37, pp. 453–455, Volume 38, 465-468, Volume 39, 474–476, 1917.
- [7] Walker M.K., Electric Utility Flicker Limitations, IEEE Trans. on Industry Applications, 1979, IA-15(6), s. 644–655.
- [8] Wiczyński G., Badanie miar wahań napięcia w sieciach elektrycznych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2010.
- [8] PN-EN 50160, Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych, 1998.
- [9] PN-EN 61000-4-15, Miernik migotania światła, 2011.
- [10] PN-EN 61000-4-30, Metody badań i pomiarów – Metody pomiaru jakości energii, 2011.
- [11] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. (Dz.U. Nr 93, poz. 623, z dnia 29 maja 2007 r.).

COMPARISON OF VOLTAGE FLUCTUATION MEASURES

Voltage fluctuation measures in power network are the basic components of the evaluation of power quality. These measures include among other the measures designed to assess the voltage fluctuations obnoxiousness and to support the identification of the sources of voltage variation. The paper presents a comparison of three mostly used measures: the U_{\max} maximum and U_{\min} minimum value of the true RMS voltage, short-term flicker index P_{st} and indicators of voltage fluctuations, i.e. δU amplitude and f frequency. Each measure is briefly described in a part specifying the particular measures which has been supplemented by the ΔV_{10} indicator. The main part of the paper discusses a relationship between the selected voltage fluctuation measures and the modulating amplitude and frequency signal f_m frequency. Conclusions which define the diagnostic capabilities of particular measures, were formulated. Due to the complexity of the voltage fluctuations measurements, this work does not exhaust the problem. It is only one of the stages to broaden the knowledge about the measures of the voltage fluctuations.