



Symulacyjne badania parametrów jakościowych napięcia

ADAM GRACZYK, ZYGMUNT KUŚMIEREK

Politechnika Łódzka, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej, Metrologii i Materiałoznawstwa,
90-924 Łódź, ul. B. Stefanowskiego 18/22

Streszczenie. W artykule opisano parametry jakościowe napięcia sieci energetycznej. Przedstawiono model cyfrowego miernika migotania światła, który umożliwia ocenę poziomu wahań napięcia pod kątem komfortu użytkownika energii elektrycznej oraz zaproponowano wzór aproksymacyjny, który pozwala na wyznaczenie wartości wskaźnika krótkookresowego migotania światła P_{st} na podstawie amplitudy wahań napięcia i ich częstotliwości bez konieczności stosowania miernika migotania światła.

Słowa kluczowe: jakość energii elektrycznej, wahania napięcia, miernik migotania światła

Symbole UKD: 621.316

Wstęp

Jakość napięcia zasilającego ma istotne znaczenie dla pracy systemu elektroenergetycznego. Wielkościami charakteryzującymi jakość napięcia są: odchylenie napięcia od wartości odniesienia, odchylenie częstotliwości od wartości znamionowej, odkształcenie przebiegu czasowego napięcia charakteryzowane przez podanie np. współczynnika THD , amplituda wahań napięcia, częstość wahań napięcia.

Parametry jakościowe napięcia są dokładnie scharakteryzowane i opisane w odpowiednich normach i przepisach prawnych [1]. Skutkiem niedotrzymania parametrów jakości napięcia w szczególności zmian jego wartości (wahania) jest migotanie źródeł światła zasilanych takim napięciem. Oddziaływanie migotania światła na organizm ludzki charakteryzuje się przez wyznaczenie współczynników uciążliwości migotania światła — krótkotrwałego P_{st} i długotrwałego P_{lt} .

Mierniki wyznaczające wartości wskaźników P_{st} i P_{lt} są przyrządami specjalistycznymi o skomplikowanej budowie. Dodatkowo ich wysoka cena powoduje, że nie są powszechnie dostępne. Biorąc ten fakt pod uwagę, jak również to, że pojedynczy pomiar wskaźnika P_{st} trwa aż 10 minut, autorzy artykułu opracowali wzór aproksymacyjny, który pozwala obliczyć wartość wskaźnika P_{st} na podstawie amplitudy wahań (względnych wahań napięcia) oraz ich częstości, które mogą być zmierzone na przykład przy wykorzystaniu oscyloskopu. Rozwiązanie to dotyczy na razie wahań sinusoidalnych i prostokątnych, czyli tych, które najczęściej pojawiają się w sieci energetycznej. Zastosowanie proponowanego wzoru pozwala szybko określić bez skomplikowanych przyrządów, czy wahania występujące w sieci mieszczą się w granicach dopuszczonych przez normy [1], czy też są one szkodliwe dla użytkownika energii elektrycznej i mogą wpłynąć negatywnie na jego komfort psychiczny.

Jakość energii elektrycznej

Jakość energii elektrycznej jest w dużym stopniu zdeterminowana jakością napięcia zasilającego. Warunki jakie powinno spełniać napięcie są określone odnośnymi przepisami i normami [1], które opisują takie jego parametry, jak: częstotliwość, kształt czy wartość napięcia na zaciskach odbiornika.

Częstotliwość napięcia jest jedną z podstawowych wielkości związanych z jakością energii elektrycznej. Jej wartość wpływa na pobór mocy zarówno czynnej, jak i biernej w systemie elektroenergetycznym. Zgodnie z normami [1] częstotliwość powinna zawierać się w przedziale od 49,5 do 50,2 Hz. Do parametrów jakościowych dotyczących częstotliwości napięcia zasilającego należą: odchylenie częstotliwości od wartości znamionowej f_n

$$\Delta f = f - f_n \quad (1)$$

lub odchylenie częstotliwości liczone w jednostkach względnych lub procentowych

$$df_{\%} = \frac{\Delta f}{f_n} 100 = \frac{f - f_n}{f_n} 100 \quad (2)$$

wahania częstotliwości napięcia określone amplitudą ΔF lub zbiorem amplitud wahań oraz częstością F_f występowania tych amplitud

$$\Delta F = f_{eks1} - f_{eks2} \quad (3)$$

oraz

$$F_f = \frac{m_f}{T_f}, \quad (4)$$

gdzie: f_{eks1} i f_{eks2} są sąsiednimi ekstremalnymi wartościami częstotliwości zmieniającej się w czasie ze względnie dużą szybkością, np. 0,2 Hz/s;
 m_f — liczba amplitud wahań częstotliwości w czasie T_f , w którym te wahania występują.

Kształt napięcia wg Polskiej Normy PN-72/E-06000 „Maszyny elektryczne wirujące” powinien być praktycznie sinusoidalny, to znaczy powinien mieć kształt taki, aby dowolna wartość chwilowa $U(t)$ nie różniła się więcej od odpowiadającej jej wartości chwilowej pierwszej harmonicznej $U_1(t)$ niż 5% amplitudy pierwszej harmonicznej U_{m1} .

$$\frac{U(t) - U_1(t)}{U_{m1}} \cdot 100 = \frac{\Delta U_m}{U_{m1}} 100 \leq 5\% . \quad (5)$$

Główną przyczyną deformacji przebiegów czasowych napięcia zasilającego jest przepływ w sieci prądów odkształconych zawierających harmoniczne, których źródłem są odbiorniki nieliniowe. Odkształcenie przebiegu czasowego napięcia od przebiegu sinusoidalnego charakteryzuje się przez podanie współczynnika THD , który jest określony wzorem

$$THD_{\%} = \sqrt{\frac{U^2 - U_1^2}{U_1^2}} 100 \quad (6)$$

lub dla przypadku, gdy w analizowanym przebiegu występują tylko wyższe harmoniczne

$$THD_{\%} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}{U_1^2}} 100, \quad (7)$$

gdzie: U_1 — wartość skuteczna 1-harmonicznej;
 U_n — wartość skuteczna n -tej harmonicznej;
 U — wartość skuteczna analizowanego przebiegu.

Oprócz współczynnika THD do oceny odkształcenia napięcia stosuje się również współczynnik udziału poszczególnych harmonicznych

$$HR_{\%} = \frac{U_h}{U_1} 100, \quad (8)$$

gdzie: U_h — wartość skuteczna harmonicznej,

a także tak zwany współczynnik niesinusoidalności

$$k_{\%} = \frac{U_1}{U} 100. \quad (9)$$

Wartość napięcia w różnych punktach sieci rozdzielczej zmienia się w czasie. Przyczyną tego są zmiany obciążenia oraz zakłócenia wynikające z dynamicznego charakteru pracy niektórych odbiorników. Zmiany napięcia w sieci można podzielić na zmiany powolne i szybkie. Te, w których szybkość zmian wartości skutecznej napięcia jest większa od 1% U_n na sekundę, są wahaniami napięcia, natomiast zmiany o szybkości mniejszej nazywamy odchyleniami napięcia.

Odchylenia napięcia charakteryzuje się za pomocą następujących zależności:

$$\Delta U = U - U_n \quad (10)$$

W jednostkach względnych

$$\delta U_{\%} = \frac{\Delta U}{U_n} 100, \quad (11)$$

gdzie: U — wartość skuteczna napięcia na zaciskach odbiornika w określonym punkcie sieci;

U_n — wartość znamionowa napięcia.

Odchylenie napięcia ΔU wyznacza się w określonym przedziale czasu. Stanowi zatem zbiór poszczególnych kolejnych wartości odchylenia. Według EN-PN50160 odchylenie napięcia w sieciach niskiego i średniego napięcia powinno zawierać się w przedziale $\pm 10\%$ napięcia deklarowanego.

Wahania napięcia charakteryzuje się za pomocą następujących wskaźników:

$$\Delta U = U_{eks1} - U_{eks2} \quad (12)$$

lub w jednostkach względnych

$$\delta U_{\%} = \frac{\Delta U}{U_n} 100 = \frac{U_{eks1} - U_{eks2}}{U_n} 100. \quad (13)$$

Częstość wahań napięcia opisuje się

$$F_v = \frac{m_v}{T_v}, \quad (14)$$

gdzie: U_{eks1} , U_{eks2} — są to sąsiednie ekstremalne skuteczne wartości napięcia zmieniające się w czasie z dużą szybkością;

m_v — liczba amplitud wahań napięcia w czasie T_v , w którym te wahania występują.

Wahania zdeterminowane i losowe można scharakteryzować za pomocą tak zwanej energetycznej dawki wahań napięcia

$$D_v = \int_0^{T_v} \Delta U^2 dt. \quad (15)$$

Jednak obecnie do oceny poziomu wahań napięcia wykorzystuje się wskaźniki krótkookresowego P_{st} i długookresowego P_{lt} migotania światła. Wskaźniki P_{st} i P_{lt} oceniają poziom wahań ze względu na komfort użytkownika. Wskaźnik krótkookresowego migotania światła jest wyznaczany dla 10-minutowego okresu obserwacji zmian napięcia sieci energetycznej. Do jego obliczenia wykorzystuje się algorytm pozwalający określić uciążliwość migotania światła, będącego skutkiem wahań napięcia, dla człowieka. Wskaźnik długookresowego migotania światła jest wyznaczany na podstawie kolejnych 12 wartości P_{st} stosownie do zależności

$$P_{lt} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} P_{sti}}{12}}. \quad (16)$$

Pomiar obydwu wskaźników jest realizowany za pomocą miernika migotania światła (*flickermetera*) [2, 3, 4].

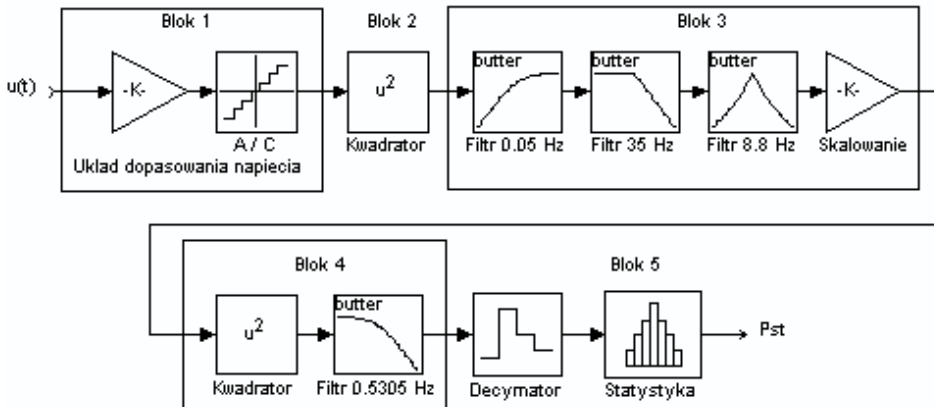
Obecnie ze względu na bardzo specjalistyczny pomiar i złożoną konstrukcję tego przyrządu, rzadko występuje on jako autonomiczny miernik. Zazwyczaj jego funkcje pomiarowe są realizowane przez cyfrowe analizatory parametrów sieci energetycznej, które, oprócz pomiaru wskaźników P_{st} i P_{lt} , umożliwiają pomiar wielu innych parametrów napięcia zasilającego. Przyrządy te odtwarzają cały tor pomiarowy miernika migotania światła, korzystając z algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów, które sprzętowo lub programowo realizują wszystkie bloki analogowego miernika migotania światła.

Niestety ze względu na duży koszt, zarówno analizatory parametrów sieci, jak i autonomiczne mierniki migotania światła nie są przyrządami powszechnie dostępnymi. Biorąc ten fakt pod uwagę, jak również to, że pojedynczy pomiar wskaźnika P_{st} trwa aż 10 minut, autorzy artykułu opracowali wzór aproksymacyjny (opis w dalszej części artykułu), który pozwala obliczyć wartość wskaźnika P_{st} na podstawie amplitudy wahań (względnych wahań napięcia) oraz ich częstotliwości, które mogą być zmierzone na przykład przy wykorzystaniu oscyloskopu. Dotyczy to na razie wahań sinusoidalnych i prostokątnych, czyli tych, które najczęściej pojawiają się w sieci energetycznej. Wzór ten pozwala szybko określić bez skomplikowanych przyrządów, czy wahania występujące w sieci mieszczą się w granicach dopuszczonych przez normy [1], czy też są one szkodliwe dla użytkownika energii elektrycznej i mogą wpłynąć negatywnie na jego komfort psychiczny.

Model cyfrowego miernika migotania światła

Wzór aproksymujący wartości wskaźnika P_{st} został wyznaczony na podstawie badań symulacyjnych przeprowadzonych na modelu cyfrowego migotania światła.

Model ten wykonano, bazując na opisie i schemacie blokowym analogowego przyrządu przedstawionego w normach [2, 3] (rys. 1). Do modelowania zastosowano program Matlab oraz zintegrowany z nim toolbox Simulink. W modelu cyfrowego miernika dodatkowo zamodelowano 16-bitowy przetwornik a/c o zakresie wejściowym ± 10 V oraz układ decymatora, zmniejszający częstotliwość próbkowania z 10 kHz, która została przyjęta dla przetwornika analogowo-cyfrowego i wszystkich filtrów, do częstotliwości 100 Hz, z którą pracuje układ analizy statystycznej (rys. 1).



Rys. 1. Schemat blokowy modelu cyfrowego miernika migotania światła

W schemacie miernika pokazanym na rysunku 1 można wyróżnić 5 bloków.

Blok 1 — układ dopasowania napięcia wejściowego.

Blok 2 — demodulator o charakterystyce kwadratowej, stanowi model żarówki żarowej.

Blok 3 — filtry pasmowe i filtr ważący. Filtr górnoprzepustowy pierwszego rzędu o częstotliwości granicznej 0,05 Hz oraz filtr dolnoprzepustowy Butterwortha 6 rzędu o częstotliwości granicznej 35 Hz odtwarzają charakterystykę postrzegania migotania światła przez oko ludzkie. Filtr ważący modeluje charakterystykę czułości ludzkiego układu percepcji wzrokowej na częstotliwościowe sinusoidalne zmiany napięcia żarówki (60 W, 230 V). Filtr wykazuje największą czułość dla częstotliwości 8,8 Hz.

Blok 4 — człon podnoszący do kwadratu, symuluje nieliniowość percepcji wzrokowej układu oko-mózg. Filtr dolnoprzepustowy pierwszego rzędu o często-

tliwości granicznej 0,5305 Hz, wyznacza średnią wartość sygnału, symulując efekt pamiętania w mózgu.

Bloki: 1, 2, 3 i 4 stanowią tor przetwarzania cyfrowego. Sygnał na wyjściu bloku 4 reprezentuje chwilowy poziom uciążliwości migotania światła.

Blok 5 — układ analizy statystycznej. Wyznacza wartość wskaźnika P_{st} . Szczegółowy opis procedury analizy statystycznej można znaleźć w pracach [5, 6, 7].

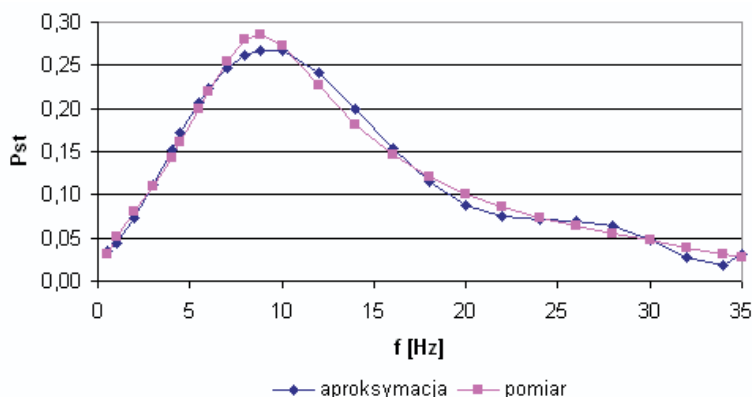
W modelu zastosowano filtry cyfrowe o nieskończonej odpowiedzi impulsowej NOI.

Wyniki testów symulacyjnych

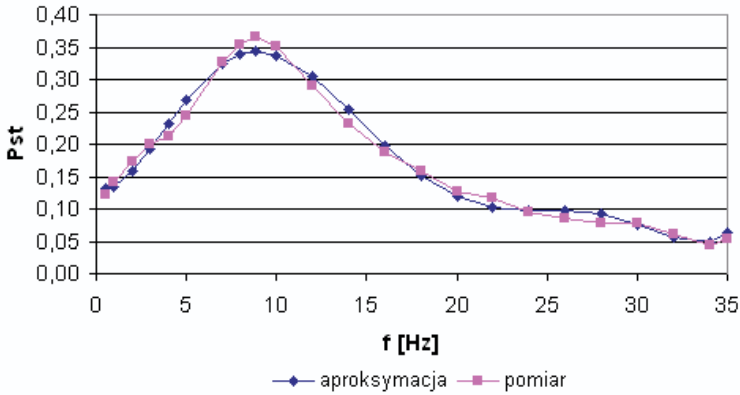
Testy symulacyjne modelu cyfrowego miernika migotania światła przeprowadzono dla sinusoidalnych i prostokątnych wahań napięcia.

Dla każdego z tych wymuszeń wyznaczono szereg wartości wskaźnika P_{st} , zmieniając w kolejnych pomiarach częstotliwość wahań w zakresie od 0,5 Hz do 35 Hz z krokiem co 1 Hz przy stałej wartości względnych wahań napięcia. W testach uwzględniono również wahania o częstotliwości 8,8 Hz jako najbardziej uciążliwe dla człowieka. Przyjęty do testów zakres częstotliwości odpowiada częstotliwościowemu pasmu postrzegania migotania światła przez człowieka.

Procedurę powtórzono dla względnych wahań napięcia o wartościach z zakresu od 0,1% do 5%, przyjmując kolejne wartości co 0,1%. W rezultacie wszystkich testów otrzymano rodzinę charakterystyk zmian wskaźnika P_{st} w zależności od częstotliwości wahań i ich amplitudy. Przykładowe charakterystyki dla względnych wahań o wartości 0,1% pokazano na rysunku 2 dla wahań sinusoidalnych i na rysunku 3 dla wahań prostokątnych.



Rys. 2. Charakterystyki wskaźnika P_{st} w funkcji częstotliwości sinusoidalnych wahań napięcia, przy stałej wartości względnych wahań napięcia równej 0,1%



Rys. 3. Charakterystyki wskaźnika P_{st} w funkcji częstotliwości prostokątnych wahań napięcia, przy stałej wartości względnych wahań napięcia równej 0,1%

Ze względu na ograniczoną liczbę stron artykułu pozostałe wyniki nie zostały zamieszczone w publikacji.

Na podstawie otrzymanych charakterystyk określono wzór aproksymacyjny, dzięki któremu można określić przybliżoną wartość wskaźnika P_{st} na podstawie wartości względnych wahań napięcia i ich częstotliwości. Wzór ten przyjmuje postać:

$$P_{st} = d \left(\begin{array}{l} a_6 f^6 + a_5 f^5 + a_4 f^4 + a_3 f^3 + \\ + a_2 f^2 + a_1 f + a_0 \end{array} \right), \quad (17)$$

gdzie: $a_6 \dots a_0$ — współczynniki wielomianu zależne od kształtu wahań;
 f — częstotliwość wahań w Hz;
 d — względne wahania napięcia w %.

Dla wahań sinusoidalnych współczynniki wielomianu przyjęto odpowiednio:

$a_6 = 2,5836e-7$; $a_5 = -2,8556e-5$; $a_4 = 1,1742 e-3$;
 $a_3 = -2,1396 e-2$; $a_2 = 1,4756 e-1$; $a_1 = -1,6157 e-2$;
 $a_0 = 3,1895e-1$,

natomiast dla wahań prostokątnych:

$a_6 = 2,9646e-7$; $a_5 = -3,2952e-5$; $a_4 = 1,3659e-3$;
 $a_3 = -2,5257e-2$; $a_2 = 1,8289e-1$; $a_1 = -1,6723e-1$;
 $a_0 = 1,3576$.

Wzór i przedstawione współczynniki obowiązują dla wszystkich wartości częstotliwości i amplitud wahań w przyjętym do testów zakresie.

Wnioski

Wyniki wartości P_{st} otrzymane z obliczeń z wykorzystaniem wzoru aproksymacyjnego nie odbiegają znacząco od wyznaczonych na drodze symulacji. Wskazuje to, że zastosowany wzór może być stosowany do szybkiego i prostego oszacowania wartości wskaźnika P_{st} , jeżeli w sieci energetycznej występują wahania sinusoidalne lub prostokątne o stałej częstotliwości i amplitudzie.

Artykuł wpłynął do redakcji 23.04.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w maju 2008 r.

LITERATURA

- [1] PN-EN 50160, Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych, 1998.
- [2] PN-EN 61000-4-15, Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC): Metody badań i pomiarów, Miernik migotania światła, Specyfikacja funkcjonalna i projektowa, 1999.
- [3] IEC 61000-4-15, Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4: Testing and measurement techniques, Section 15: Flickermeter — Functional and design specifications, 1997.
- [4] IEC 60868-0, Flickermeter, Part 0, Evaluation of flicker severity, 1993.
- [5] A. GRACZYK, Z. KUŚMIEREK, *Methods for Improving Accuracy of Calculation of Indicator P_{st} in a Flickermeter*, Proceedings of the 8th International Conference, Electrical Power Quality and Utilisation, Kraków, 21-23 September 2005, 273-280.
- [6] A. GRACZYK, *Analiza właściwości metrologicznych toru przetwarzania cyfrowego miernika migotania światła*, XXXVIII Międzyuczelniana Konferencja Metrologów, Warszawa, 4-6 września 2006; materiały opublikowane w czasopiśmie: *Pomiary Automatyka Kontrola*, nr 9bis/2006, 77-79.
- [7] A. GRACZYK, *Komputerowy system pomiarowy do wyznaczania wskaźników migotania światła*, XVI Sympozjum Modelowanie i Symulacja Systemów Pomiarowych, Krynica, 17-21 września 2006; materiały opublikowane w czasopiśmie: *Pomiary Automatyka Kontrola*, nr 10bis/2006, 114-118.

A. GRACZYK, Z. KUŚMIEREK

Simulations tests of voltage quality parameters

Abstract. Electrical power quality parameters have been described in the paper. A model of a digital flick-ermeter for evaluation of voltage fluctuations, basing on the degree of human irritation, was presented as well as an approximation formula, which allows us to evaluate the short term flicker P_{st} values, on the basis of amplitude and frequency of voltage fluctuations, was given.

Keywords: electrical power quality, voltage fluctuations, flickermeter

Universal Decimal Classification: 621.316

