

MODELE ŹRÓDEŁ SYGNAŁÓW WAHAŃ NAPIĘCIA SIECI ZASILAJĄCYCH W ZASTOSOWANIU DO WZORCOWANIA MIERNIKÓW MIGOTANIA ŚWIATŁA¹⁾

Models of Sources of Voltage Oscillation Signals Used in the Application of Flickermeter Calibration

Andrzej BIENŃ Michał SZYPER

Akademia Górniczo-Hutnicza

Streszczenie: Zjawisko migotania światła powstaje na skutek powolnej zmienności (wahań) amplitudy napięcia sieci elektroenergetycznych zasilających źródła światła. Wahań te mają charakter niestacjonarny. Zmienność amplitudy prądu wpływa na wahań napięcia sieci głównie poprzez spadek napięcia na wewnętrznej impedancji układu zasilania.

Przedstawiony problem dotyczy wzorcowania flickermeterów, tj. przyporządkowania obliczonym wartościom miar P_{ST} lub P_{LT} skali i zakresu, w zależności od parametrów $\Delta U/U$ oraz f_0 wahań napięcia. Ponieważ wzorcowanie jest dwuargumentowe, tj. według $\Delta U/U$ oraz f_0 , zakłada się ustaloną zależność pomiędzy tymi wielkościami tak, żeby dla każdej pary wartości: $(\Delta U/U, f_0)$ otrzymać $P_{ST} = 1$. W pracy wykazano, że taki sposób wzorcowania flickermeterów może prowadzić do trudności i niejednoznaczności w ocenie zależności pomiędzy zmierzonymi wartościami miary P_{ST} a względną amplitudą $\Delta U/U$ i częstotliwością f_0 , ponieważ w rzeczywistych warunkach powstawania zmodulowanego sygnału napięcia sieci modulacja nie jest liniowa względem czynnika modulującego. Stosowany obecnie sposób wzorcowania flickermeterów, jest natomiast oparty na liniowej modulacji napięcia sieci. Skutkiem tej rozbieżności może być powiększenie przedziału niepewności określenia P_{ST} jako miary jakości energii elektrycznej.

Abstract: A flicker phenomenon is caused by the slow oscillation of voltage amplitude in a power supply network. These oscillations are of a nonstationary character.

Voltage oscillations, mainly created by mains voltage drops within the impedance of the supply system, are influenced by the variability of the current amplitude.

The problem deals with flickermeter calibration. This means an assignment of scale and range to the calculated values of measures P_{ST} or P_{LT} respectively, in dependence on the parameters $\Delta U/U$ and voltage oscillations f_0 . Because of the fact that calibration is a dual method using both $\Delta U/U$ and f_0 , we assume a fixed relation between these parameters as to obtain $P_{ST}=1$ for each pair of parameters $(\Delta U/U, f_0)$.

The paper shows that the flickermeter calibrations presented leads to difficulties and ambiguities in the evaluation of the relationship between the measured values of P_{ST} and both the relative amplitude $\Delta U/U$ and the frequency f_0 .

In reality, the modulation of a modulated voltage signal is non linear with regard to modulating factor.

The way of flickermeter calibration applied is based on the linear modulation of the network voltage.

Divergence between calibration and real network conditions can cause the enlargement of the uncertainty interval of measure P_{ST} as a measure of the quality of electric energy.

1) Badania finansowane przez Komitet Badań Naukowych w ramach projektu badawczego Nr 8 T 10C 001 14.

1. WSTĘP

Zjawisko migotania światła powstaje na skutek powolnej zmienności (wahań) amplitudy napięcia sieci elektroenergetycznych zasilających źródła światła. Wahania te spowodowane są między innymi obciążaniem sieci prądem odbiorników energii o dużej mocy, ponieważ niektóre z tych odbiorników, a więc i pobierany przez nie prąd, mają charakter niestacjonarny (niespokojny). Zmienność amplitudy prądu wpływa na wahania napięcia sieci głównie poprzez spadek napięcia na wewnętrznej impedancji układu źródła zasilania, tj. na transformatorze zasilającym oraz w sieci.

Widmo wahającego się napięcia sieci ma charakter pasmowy i zawiera się w granicach ok. ± 25 Hz względem częstotliwości 50 Hz. Mechanizm powstawania takiego widma polega na amplitudowej modulacji iloczynowej napięcia sieci, przy czym czynnik modulujący zależy od zmiennych impedancji obciążenia sieci sygnałem wymuszonego prądu. Zjawiska o wyższej częstotliwości (poza wyżej wymienionym pasmem), towarzyszące wahanom napięcia sieci, pomijamy.

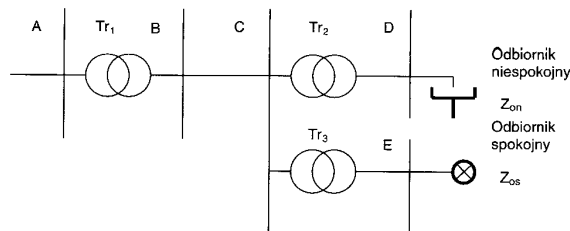
Wahający się sygnał napięcia sieci przetwarzany jest na prądy źródeł światła, a następnie na zmienne natężenie światła tych źródeł. Zjawisko to ma charakter demodulacji sygnału napięcia sieci na nieliniowościach źródeł, a więc przesunięcia widma sygnału do pasma 0–25 Hz. Występuje także tłumienie tego sygnału przez dynamiczne (inercyjne) właściwości źródeł światła.

Powstająca w ten sposób uporczywa niskoczęstotliwościowa zmienność natężenia światła powoduje między innymi ujemne skutki fizjologiczne w postaci zmęczenia wzroku i obniżenia sprawności umysłowej. Z tej przyczyny, dla oceny jakości energii elektrycznej dostarczanej odbiorcom, istotne znaczenie ma wyznaczanie miary uporczywości migotania, oznaczanej przez P_{ST} lub P_{LT} (krótko lub długookresowej), zdefiniowanej w dokumentach [2] jako miara statystyczna. Urządzenia pomiarowe (flickermetry) zbudowane na podstawie tych dokumentów wykonują zasadniczo na mierzonym sygnale napięcia sieci trzy następujące operacje:

- 1) przetwarzanie tego sygnału na sygnał natężenia światła za pomocą fizycznego źródła światła lub jego modelu,
- 2) przetwarzanie sygnału natężenia światła na model sygnału odbieranego przez mózg ludzki, za pomocą modelu zjawisk fizjologicznych oko-mózg,
- 3) przetwarzanie modelu sygnału odbieranego przez mózg na miarę statystyczną P_{ST} lub P_{LT} , za pomocą algorytmu obliczania „skumulowanej funkcji prawdopodobieństwa” (CPF), z zastosowaniem arbitralnie przyjętych wartości współczynników.

Należy podkreślić, że efekty fizjologiczne mierzone wymienionymi wyżej miarami zależą zarówno od względnych wartości zmian amplitudy $\Delta U/U$ wahań napięcia sieci (gdzie: U — wartość amplitudy, a ΔU — przyrost wartości amplitudy napięcia sieci), jak i od częstotliwości f_0 tych wahań. Maksimum wrażliwości fizjologicznej występuje przy częstotliwości około 8,8 Hz.

Problem, który chcemy przedstawić, dotyczy wzorcowania flickermeterów, tj. przyporządkowania obliczonym wartościom miar P_{ST} lub P_{LT} skali i zakresu, w zależności od



Rys. 1. Uproszczony schemat struktury sieci elektroenergetycznej, w której mogą wystąpić wahania napięcia powodujące migotanie światła

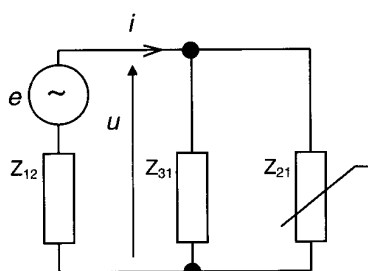
parametrów $\Delta U/U$ oraz f_0 wahań napięcia. Według wspomnianego dokumentu [2] wzorcowanie polega na wprowadzaniu na wejście przyrządu sygnału wzorcowego, w postaci sinusoidy o częstotliwości podstawowej 50 Hz, zmodulowanej iloczynowo sinusoidalnym lub prostokątnym sygnałem wahań o zmiennej względnej amplitudzie $\Delta U/U$ zawartej w przedziale 0,25% do 2,34%, i zmiennej częstotliwości f_0 , zawartej w przedziale 0,5 Hz do 25 Hz. Czynnik modulujący zależy liniowo od zmiennego parametru. Ponieważ wzorcowanie jest dwuargumentowe, tj. według $\Delta U/U$ oraz f_0 , zakłada się ustaloną zależność pomiędzy tymi wielkościami tak, żeby dla każdej pary wartości: $(\Delta U/U, f_0)$ otrzymać $P_{ST} = 1$. W ten sposób ustalana jest skala przyrządu. Zakresy zmienności miary P_{ST} określa się dla sześciu granicznych wartości $\Delta U/U = \{0,5; 1; 2; 5; 10; 20\}$ % dla częstotliwości 8,8 Hz, dla której wrażliwość fizjologiczna jest największa. Miarę P_{LT} określa się na podstawie P_{ST} [2].

Wykażemy, że taki sposób wzorcowania flickermeterów może prowadzić do trudności i niejednoznaczności w ocenie zależności pomiędzy zmierzonymi wartościami miary P_{ST} a względną amplitudą $\Delta U/U$ i częstotliwością f_0 , ponieważ w rzeczywistych warunkach powstawania zmodulowanego sygnału napięcia sieci modulacja **nie jest liniowa** względem czynnika modulującego.

2. MODEL MODULACJI NAPIĘCIA W SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ

Wysuniętą wyżej tezę wykażemy na często spotykanym przykładzie sieci, w której niestacjonarne i stacjonarne odbiorniki energii elektrycznej zasilane są przez oddzielne transformatory ze wspólnego punktu. W tym celu, za prof. Z. Kowalskim [1], zastosujemy uproszczoną strukturę sieci, przedstawioną na rysunku 1.

Wprowadzimy teraz szereg założeń upraszczających, umożliwiających prostą analizę zjawiska modulacji napięcia sieci w punkcie C. Niestacjonarne obciążenie sieci Z_{on} jest zasilane przez transformator Tr_2 , natomiast obciążenie stacjonarne (źródła światła) przez transformator Tr_3 . Przyjmujemy, że obciążenie niestacjonarne może się zmieniać w czasie w bardzo szerokim zakresie i w dowolny sposób. Założymy, że transformator Tr_1 ma w każdej fazie określoną impedancję wewnętrzną na zaciskach uzwojenia wtórnego, zatem sieć w punkcie B jest w pewnym stopniu podatna na wpływ zmienności prądu obciążenia — to znaczy jest „miękk-



Rys.2. Uproszczony schemat zastępczy sieci w punkcie C

ka”, natomiast w punkcie A jest „sztywna”. Przyjmujemy, że w punkcie C sieć jest w pełni symetryczna, tak od strony zasilania, jak i obciążenia, możemy zatem w przybliżeniu układ trójfazowy zastąpić układem jednofazowym. Analizę wahań napięcia w punkcie C przeprowadzimy przyjmując, że impedancje obciążenia transformatorów Tr_2 i Tr_3 transformują się do stron pierwotnych. Zastępczy jednofazowy model sieci w punkcie C ma zatem postać jak na rysunku 2.

Zastępcze impedancje oznaczają:

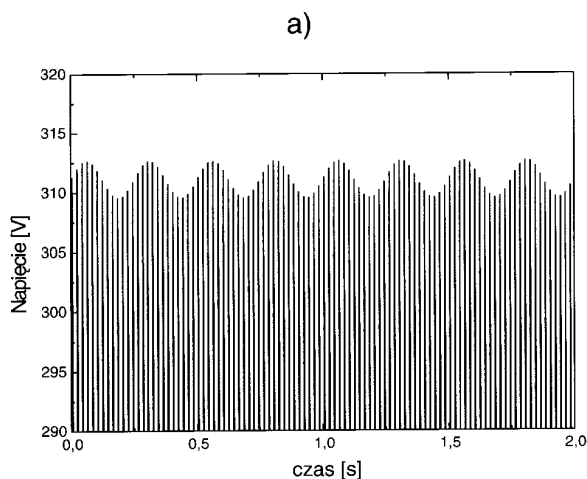
Z_{12} — impedancja zastępcza źródła napięcia e , tj. impedancja zastępcza strony wtórnej transformatora Tr_1 , łącznie z siecią,

Z_{31} — stacjonarna impedancja obciążenia na zaciskach strony pierwotnej transformatora Tr_3 , tj. na szynach C,

Z_{21} — niestacjonarna impedancja obciążenia na zaciskach strony pierwotnej transformatora Tr_2 , tj. na szynach C.

Oceńmy wpływ zmienności impedancji Z_{21} na zmienność napięcia sieci u w punkcie C. Z rysunku 2 wynika zależność:

$$u = e \cdot \frac{Z_{21}}{Z_{21} + Z_{12} \left(1 + \frac{Z_{21}}{Z_{31}} \right)} \quad (1)$$



Wprowadzimy oznaczenie na zmienność impedancji Z_{21} :

$$Z_{21} = Z'_{21} + \Delta Z_{21}(t) = Z'_{21} [1 + \alpha(t)] \quad (2)$$

$$\alpha(t) = \frac{\Delta Z_{21}(t)}{Z'_{21}} \quad (3)$$

gdzie: Z'_{21} jest składową ustaloną, $\Delta Z_{21}(t)$ składową zmienną, natomiast $\alpha(t)$ jest bezwymiarową składową zmienną impedancji Z_{21} . Po przekształceniach otrzymujemy:

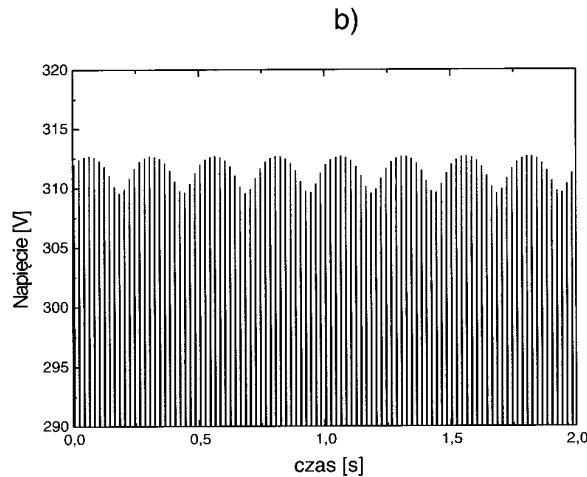
$$u = e \cdot \frac{1 + \alpha(t)}{\frac{Z_{12}}{Z'_{21}} + [1 + \alpha(t)] \left(1 + \frac{Z_{12}}{Z_{31}} \right)} = e \cdot a_s(t) \quad (4)$$

gdzie: $a_s(t)$ jest czynnikiem modulującym, charakterystycznym dla przedstawionego układu.

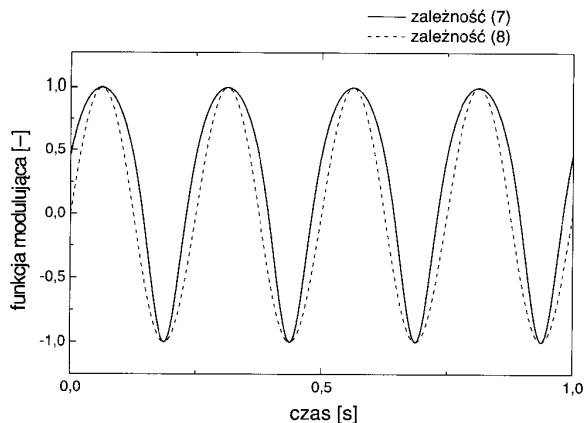
Dla dalszego uproszczenia analizy, które nie zmienia istoty postawionej tezy, założymy, że w przypadku każdej z wymienionych impedancji składowe reakcyjne są dominujące, to jest składowe rzeczywiste są do pominięcia. Wtedy wszystkie stosunki impedancji w wyrażeniach (3) i (4) są liczbami rzeczywistymi, co umożliwi łatwą ocenę ich wpływu na przebieg sygnału napięcia sieci.

Już pobieżna analiza wyrażenia (4) wskazuje, że czynnik modulujący $a_s(t)$ jest nieliniową funkcją względnej zmiany składowej $\alpha(t)$ niestacjonarnej impedancji Z_{21} . W celu określenia wpływu tej nieliniowości na efekt modulacji założmy sinusoidalną zmienność $\alpha(t)$:

$$\alpha(t) = \alpha_m \sin \omega_0 t = \alpha_m \sin 2\pi f_0 t, \quad 0 \leq f_0 \leq 25 \text{ Hz} \quad (5)$$



Rys.3. Napięcia sieci zmodulowane zgodnie z zależnością (8) — liniowo (a), zgodnie z zależnością (7) — nieliniowo (b)



Rys. 4. Przykładowe przebiegi czasowe obwiedni sygnałów napięcia sieci u : dla sygnału wzorcowania zmodulowanego liniowo zgodnie z (8) oraz zmodulowanego nieliniowo zgodnie z (7). Dla pokazania różnicy przebiegi przeskalowano do wartości względnej, tak aby amplitudy obu przebiegów wynosiły 1

oraz:

$$e = e_m \sin \Omega t = e_m \sin 2\pi Ft, \quad F = 50 \text{ Hz} \quad (6)$$

Oznaczając $\beta = \frac{Z_{12}}{Z_{21}}$, $\gamma = \frac{Z_{12}}{Z_{31}}$ otrzymujemy następujące wyrażenie na napięcie sieci u zmodulowane czynnikiem modulującym $a_s(t)$ niesinusoidalnie zmiennym i zależnym od parametrów α_m, β, γ :

$$u = e_m \sin \Omega t \cdot \frac{1 + \alpha_m \sin \omega_0 t}{\beta + (1 + \alpha_m \sin \omega_0 t) \cdot (1 + \gamma)} = a_s(t) \cdot e_m \sin \Omega t \quad (7)$$

Jeśli porównać wyrażenie (7) z sygnałem u_r wzorcowania flickermetera określonym we wspomnianym dokumencie [2] jako:

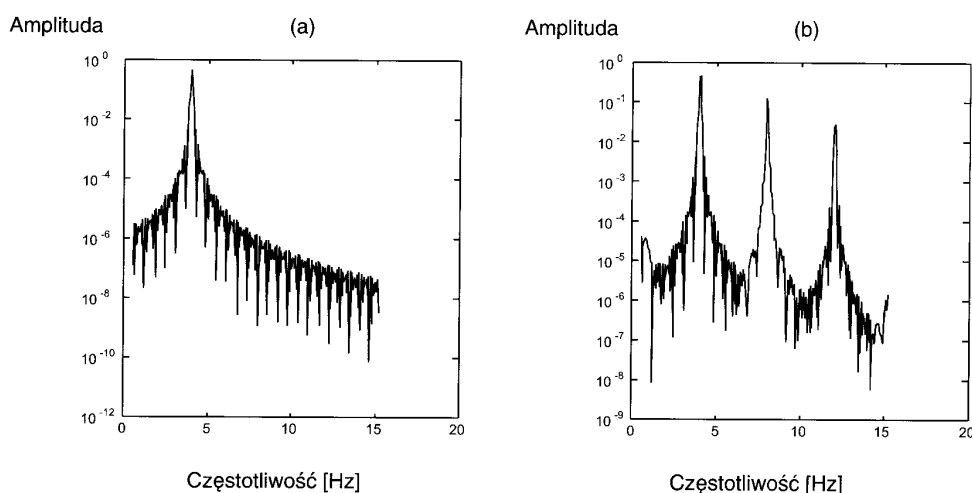
$$u_r = e_m \sin \Omega t \cdot (1 + a_m \sin \omega_0 t) \quad (8)$$

gdzie: a_m — jest głębokością modulacji, można przypuszczać, że w obydwu przypadkach dla takich samych wartości $\Delta U/U$ oraz f_0 wartości miary P_{ST} mogą być różne.

3. BADANIA SYMULACYJNE OBYDWU MODELI MODULACJI

W celu liczbowego porównania wyrażeń (7) i (8) dobieramy tak ich parametry, żeby w obydwu przypadkach głębokość modulacji, to jest względna wartość amplitudy wahań napięcia, była jednakowa i wynosiła $\Delta U/U = 0,5\%$ dla częstotliwości $f_0 = 4 \text{ Hz}$. Wybór obydwu tych wartości jest zgodny z tabelą wzorcowania flickermeterów według dokumentu [2]. Wartości parametrów wyrażeń (7) i (8) wynoszą: $\alpha_m = 0,048$, $\beta = 0,1$, $\gamma = 0,1$, $a_m = 0,005$. Przebiegi czasowe tak obliczonych sygnałów u oraz u_r przedstawione są na rysunku 3. Rysunki 4 oraz 5 przedstawiają przebiegi czasowe sygnałów obwiedni (tj. sygnałów modulujących) oraz ich widma.

Jak wynika z rysunku 5, nieliniowa modulacja napięcia sieci jest przyczyną pojawiania się dodatkowych składowych widma obwiedni. W omawianym przypadku dla częstotliwości modulacji 4 Hz pojawia się stosunkowo duża składowa 8 Hz, dla której wrażliwość fizjologiczna, modelowana za pomocą flickermetera jest prawie maksymalna. Wartość miary P_{ST} otrzymana jako wynik pomiaru uporczywości migotania światła za pomocą standardowo wzorcowanego przyrządu, nie odpowiada warunkom jego typowej pracy.



Rys. 5. Widma sygnałów obwiedni napięcia sieci u : dla sygnału wzorcowania zmodulowanego liniowo (a) oraz zmodulowanego nieliniowo (b), uzyskane dla przebiegów z rysunku 3

Badania symulacyjne przeprowadzone na modelu flicker-metera wykazały, że przyrząd wzorcowany na wartość $P_{ST}=1$ dla parametrów sygnału wzorcowego (0,5%, 4 Hz) wykazywał dla „modelu sieciowego” modulacji wartość P_{ST} około 1,8.

4. WNIOSKI

Z zastosowaniem uproszczeń przedstawiliśmy tezę prowadzącą do wniosku, że stosowany sposób wzorcowania flickermeterów może prowadzić do trudności w ocenie zależności pomiędzy miarą uporczywości migotania światła P_{ST} a parametrami wahań mierzonego sygnału napięcia sieci. Przyczyną jest inny sposób modulacji tego napięcia w układach rzeczywistych niż stosowany przy wzorcowaniu. Skutkiem tej rozbieżności może być powiększenie przedziału niepewności określenia P_{ST} jako miary jakości energii elektrycznej.

LITERATURA

1. Kowalski Z. *Wahania napięcia w układach elektroenergetycznych*. WNT, Warszawa 1985.
2. Normy: IEC 868, EN 60868, BS EN 60868.



Dr inż. Andrzej Biń

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w 1979 roku. Jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym w Zakładzie Metrologii Wydziału EAIiE. Opublikował ponad 40 prac dotyczących zagadnień projektowania i budowy systemów pomiarowych. Jest konstruktorem kilku unikalnych systemów pomiarowych. Aktualnie prowadzone przez niego badania i prace projektowe skupiają się wokół zastosowania szybkich systemów cyfrowych, opartych na procesorach sygnałowych, do pomiarów wielkości związanych z energią elektryczną. Jest członkiem SEP, IEEE oraz Towarzystwa Przyjaciół Sztuk Pięknych w Krakowie. Ulubionym wakacyjnym zajęciem jest turystyka piesza.



Prof. dr hab. inż. Michał Szyper

Od roku 1962 pracuje w Zakładzie Metrologii na Wydziale EAIiE AGH, a w latach 1981–1999 zakładem tym kierował. Opublikował około 70 prac naukowych, w tym, jako współautor, 2 książki. Wykonał kilkadziesiąt prac badawczych o charakterze aplikacyjnym. Wypromował 7 doktorów i recenzował 14 prac doktorskich i habilitacyjnych. Wielokrotnie uczestniczył w pracach sekcji T10C KBN Miernictwo Interdyscyplinarne. Jest członkiem Komitetu Metrologii PAN, w którym pełni funkcję przewodniczącego sekcji Aparatura i Systemy Pomiarowe obecnej kadencji. Zakres działalności badawczej prof. Szypera obejmuje badania modelowe systemów pomiarowych, cyfrową technikę pomiarową, przetwarzanie sygnałów oraz opracowanie nowych rozwiązań sprzętowych i programowych systemów pomiarowych, w tym w szczególności układów do pomiarów jakości energii elektrycznej.