

Jarosław MAJCHRZAK, Grzegorz WICZYŃSKI
POLITECHNIKA POZNAŃSKA

Symulacyjna aproksymacja charakterystyki przetwarzania flickermetru dla modulacji amplitudy i częstotliwości

dr inż. Jarosław MAJCHRZAK

Jest pracownikiem naukowym Katedry Sterowania i Inżynierii Systemów Politechniki Poznańskiej. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się na systemach sterowania nieholonomicznych robotów mobilnych oraz modelowaniu, analizie oraz projektowaniu systemów sensorycznych robotów mobilnych, systemów sterowania i kontroli jakości.



e-mail: JaroslawMajchrzak@put.poznan.pl

dr inż. Grzegorz WICZYŃSKI

Pracownik Zakładu Metrologii i Optoelektroniki Instytutu Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Poznańskiej. Zainteresowania naukowe: metrologia ukierunkowana na pomiary przemysłowe i biomedyczne, badania w zakresie oceny jakości energii elektrycznej oraz zastosowania systemów sensorycznych w układach sterowania.



e-mail: gwicz@et.put.poznan.pl

Streszczenie

Flickermetr jest potoczną nazwą układu pomiarowego przeznaczonego do oceny odczuwania migotania światła wywołanego wahaniami napięcia. Normatywna charakterystyka przetwarzania flickermetru jest określona małym licznym zestawem par wartości głębokości modulacji i częstotliwości harmonicznego lub prostokątnego sygnału modulującego dla modulacji amplitudy napięcia wejściowego. Wielkością wyjściową jest wskaźnik krótkookresowego migotania światła P_{st} . W celu dokładniejszego odtworzenia charakterystyki przeprowadzono badania symulacyjne dla modulacji amplitudy i częstotliwości napięcia wejściowego. Zamodelowano elementy toru normatywnego flickermetru, tj. filtry o stałych parametrach zapisane w postaci operatorowej wraz z multiplikatorami, narzędzie do wyznaczania wartości P_{st} , źródło sygnału testowego oraz narzędzia do prezentacji i archiwizacji wyników badań. W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych zrealizowanych przy pomocy standardowych przebiegów testowych dla modulacji amplitudy AM oraz częstotliwości FM. Zamieszczono specyficzne fragmenty wyznaczonych charakterystyk oraz przykład wpływu ograniczenia pasma napięcia wejściowego na wynik pomiaru flickermetrem dla modulacji FM. Wyniki symulacji porównano z nielicznymi punktami normatywnymi. Sformułowano uwagi przydatne w diagnostyce flickermetru.

Słowa kluczowe: flickermetr, wskaźnik P_{st} , modulacja AM i FM

Simulation approximation of flicker meter conversion characteristic for amplitude and frequency modulation

Abstract

Flicker meter is a measurement system for estimation of the disturbances coming from flickering of light caused by the fluctuations of voltage. The disturbances are described on the basis of values of short-term coefficient P_{st} and long-term coefficient P_{lt} of light flickers. The flicker meter system considered in the paper consists of two main components: a signal channel simulating perception processes in the chain: light source-eye-brain and a statistics module. Signal chain's action is a map for bounded number of standard points of characteristic conversion. The simulation works with realization interpolation and extrapolation standard points was advisable. Presented results come from tests for AM and FM modulation. Before using the results, the verification was necessary. The conclusions formulated are useful in flicker meter's diagnostic.

Keywords: flicker meter, P_{st} indicator, FM and AM modulation

1. Wprowadzenie

Jednym ze składników oceny jakości napięcia w sieci elektroenergetycznej jest opis zmienności wartości skutecznej.

Istotne znaczenie mają szybkie zmiany amplitudy i częstotliwości napięcia wpływające na stan pracujących urządzeń. Mogą one skutkować brakiem ciągłości pracy odbiornika lub wpływać na jego sygnał wyjściowy a nawet doprowadzać do trwałych uszkodzeń odbiornika. Odczuwanie migotania światła jest złożonym procesem. Poszczególne bloki układu pomiarowego potocznie nazywanego flickermetrem emulują procesy zachodzące w torze: źródło światła – oko – mózg. Odczuwanie migotania jest subiektywne, dlatego trudno je jednoznacznie opisać analitycznie. W praktyce pomiarowej stosuje się obecnie dwa wskaźniki, będące miarami krótkookresowego P_{st} i długookresowego P_{lt} migotania światła [1, 2] oraz wskaźniki wahań napięcia (amplituda i częstość) [3]. Wskaźniki P_{st} i P_{lt} stanowią normatywną miarę, której celem jest ilościowy (jednowielkościowy) opis odczuwania migotania światła. Specyfikacja normatywna udostępnia ograniczony zbiór punktów charakterystyki przetwarzania flickermetru. W literaturze poruszany jest wpływ modulacji amplitudy AM i fazy PM [4, 5]. Wydaje się celowym opisanie wpływu modulacji częstotliwości FM na wyniki pomiaru flickermetrem. Dlatego przeprowadzono badania symulacyjne, modelując tor sygnałowy flickermetru oraz zadając sygnał wejściowy. Weryfikację wyników symulacji przeprowadzono poprzez porównanie z punktami normatywnymi [1] oraz z wynikami modelowania analitycznego [6]. W artykule zamieszczono wyniki badań symulacyjnych dla modulacji AM i FM dla standardowych sygnałów modulujących. Symulacje przeprowadzono wykorzystując oprogramowanie MATLAB SIMULINK i standardową procedurę rozwiązywania równań różniczkowych ze zmiennym krokiem ODE45. Symulacje przeprowadzono dla czasu obserwacji równego 10 min poprzedzonego czasem ustalenia wynoszącym 3 min (co łącznie odpowiadało czasowi wykonania symulacji ponad 20 min). Do wyszukiwania zadanej wartości P_{st} wykorzystano procedurę iteracyjną.

2. Sygnały testowe

Przyjęto analityczną postać sygnału wymuszenia $u(t)$ dla modulacji AM bez tłumionej fali nośnej:

$$u(t) = x_c(t) \cdot [1 + x(t)] = \sqrt{2} \cos 2\pi f_c t \cdot [1 + x(t)], \quad (1)$$

gdzie:

$x_c(t)$ – sygnał modulowany (nośna),

f_c – częstotliwość sygnału modulowanego (napięcia w sieci elektroenergetycznej),

$x(t)$ – sygnał modulujący (harmoniczny, trójkątny, prostokątny).

W przypadku modulacji AM przebiegiem harmonicznym sygnał $u(t)$ opisuje zależność:

$$u(t) = \sqrt{2} \cos 2\pi f_c t \cdot \left[1 + \left(\frac{\Delta U}{U} \right) \cos 2\pi f_m t \right], \quad (2)$$

gdzie:

f_m – częstotliwość sygnału modulującego,
 $(\Delta U/U)$ – głębokość modulacji AM.

Wymuszenie $u(t)$ dla modulacji FM określa zależność [7]:

$$u(t) = \sqrt{2} \cos[2\pi f_c t + k_{FM} \int x(t) dt], \quad (3)$$

gdzie:

k_{FM} - współczynnik skalujący głębokość modulacji pulsacji nośnej.

Modulację FM opisuje się m.in. następującymi wielkościami [7]:

- pulsacja chwilowa $\Omega_{FM}(t)$

$$\Omega_{FM}(t) = 2\pi f_c + k_{FM} \cdot x(t), \quad (4)$$

- dewiacja pulsacji $\Delta\Omega_{FM}$

$$\Delta\Omega_{FM} = k_{FM} |x(t)|_{\max}, \quad (5)$$

- dewiacja częstotliwości Δf_{FM}

$$\Delta f_{FM} = \frac{k_{FM} |x(t)|_{\max}}{2\pi}. \quad (6)$$

W trakcie badań symulacyjnych wykorzystano model generatora sterowanego napięciowo (voltage-controlled oscillator - VCO), którego sygnał wyjściowy $u(t)$ określa równanie [8]:

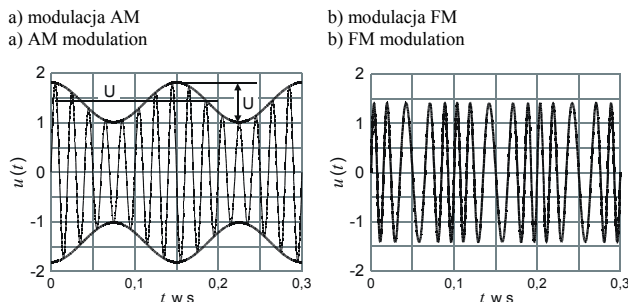
$$u(t) = \sqrt{2} \cos[2\pi f_c t + 2\pi k_{VCO} \int x(t) dt + \varphi], \quad (7)$$

gdzie:

k_{VCO} - współczynnik skalujący głębokość modulacji częstotliwości nośnej,

φ – faza początkowa (w trakcie symulacji $\varphi = 0$).

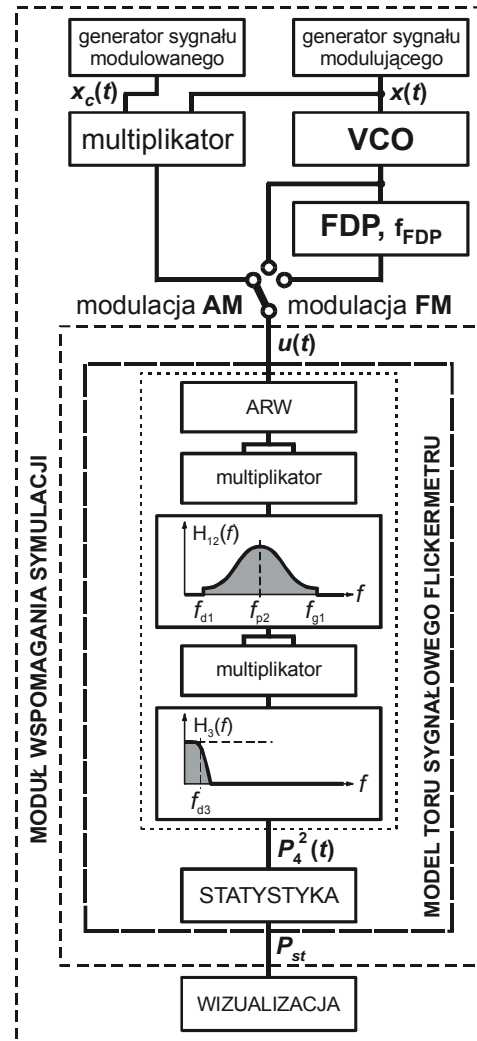
Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe przebiegi sygnałów testowych. Analityczny opis przebiegu z rysunku 1a przedstawia równanie (2) – modulacja AM, a przebiegu z rysunku 1b równanie (7), dla $x(t) = \cos \omega t$ – modulacja FM.



Rys. 1. Przykładowe przebiegi czasowe sygnału $u(t)$
 Fig. 1. Examples of $u(t)$ waveforms

3. Tor pomiarowy

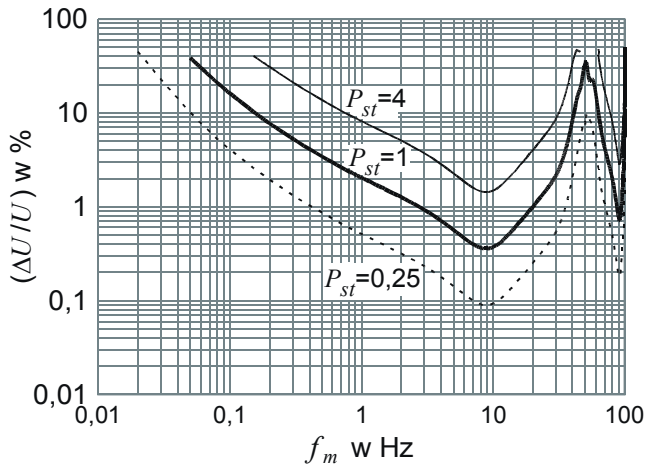
Badania symulacyjne przeprowadzono w torze sygnałowym przedstawionym na rysunku 2. Składa się on z flickermetru określonego normatywnym schematem blokowym [1], zadajnika sygnału $u(t)$ oraz modułu wizualizacji i rejestracji wyników symulacji. Zadajnik sygnału $u(t)$ umożliwia alternatywny wybór symulacji modulacji AM, FM (bez lub z ograniczeniem pasma dolnoprzepustowym filtrem FDP o częstotliwości granicznej f_{FDP}).



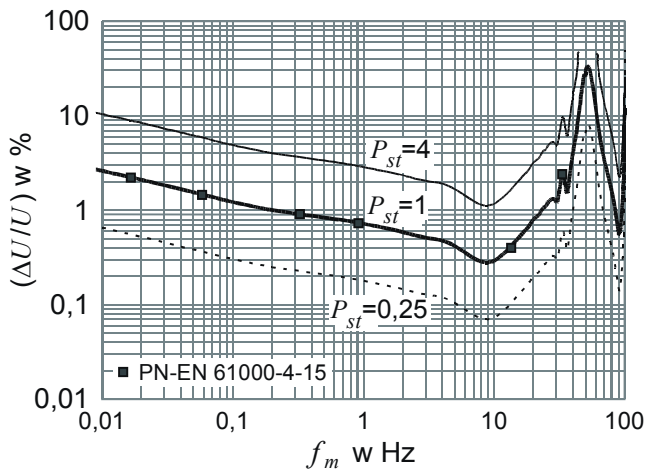
Rys. 2. Schemat blokowy symulatora flickermetru
 Fig. 2. Block scheme of flickermeter simulator

4. Charakterystyki przetwarzania flickermetru dla modulacji AM

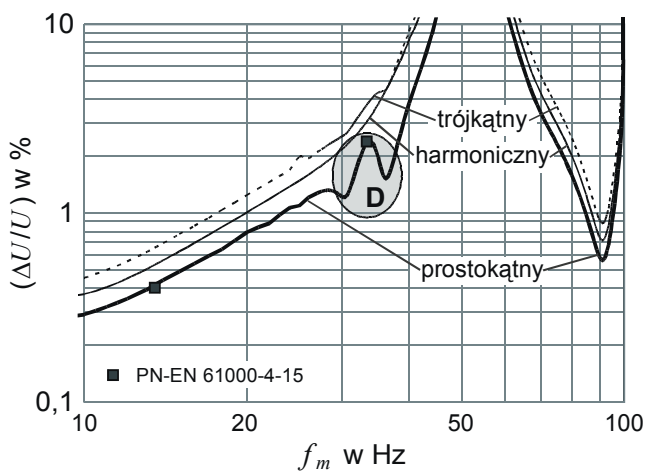
Badania symulacyjne dla modulacji AM wykonano w taki sposób, aby zbudować charakterystykę $(\Delta U/U) = f(f_m, P_{st})$ dla trzech przebiegów czasowych sygnału modulującego: harmonicznego, trójkątnego i prostokątnego oraz wyznaczyć charakterystykę $P_{st} = f((\Delta U/U), f_m)$ dla modulacji przebiegiem prostokątnym. Punkty charakterystyk $(\Delta U/U) = f(f_m, P_{st})$ dla poszczególnych częstotliwości f_m wyznaczano z wykorzystaniem algorytmu iteracyjnego. W artykule zamieszczono wybrane wyniki badań symulacyjnych. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono charakterystyki $(\Delta U/U) = f(f_m, P_{st})$ dla trzech wartości $P_{st} = 0,25, 1$ i 4 dla modulacji przebiegami odpowiednio harmonicznym i prostokątnym. Na charakterystyce dla modulacji przebiegiem prostokątnym występuje specyficzna niemonotoniczność dla częstotliwości f_m od 25 Hz do 37 Hz. Na rysunku 5 przedstawiono charakterystykę $(\Delta U/U) = f(f_m, P_{st}=1)$ dla modulacji przebiegami: harmonicznym, trójkątnym oraz prostokątnym w przedziale częstotliwości f_m zawierającym niemonotoniczność. Zaobserwowana niemonotoniczność (oznaczona symbolem D) występuje tylko dla modulacji przebiegiem prostokątnym. Lokalne maksimum dla $f_m = 33,33$ Hz pokrywa się punktem normatywnym [1] dla tej częstotliwości. Lokalna niemonotoniczność D jest interesującym fragmentem charakterystyki, dogodnym np. do sprawdzania prawidłowości działania toru sygnałowego flickermetru.



Rys. 3. Charakterystyka $(\Delta U/U) = f(f_m, P_{st})$ dla $P_{st} = 0,25; 1$ i 4 i modulacji AM przebiegiem harmonicznym
 Fig. 3. Characteristic $(\Delta U/U) = f(f_m, P_{st})$ for $P_{st} = 0,25; 1$ and 4 and AM harmonic signal

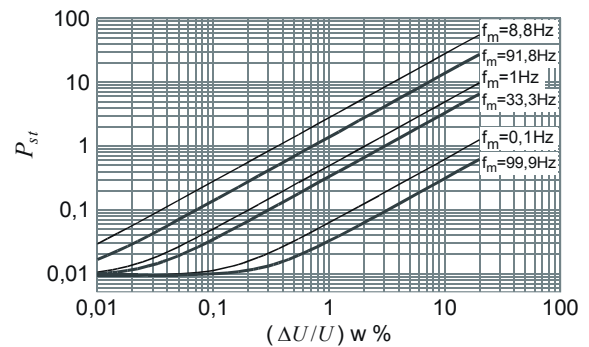


Rys. 4. Charakterystyka $(\Delta U/U) = f(f_m, P_{st})$ dla $P_{st} = 0,25; 1$ i 4 i modulacji AM przebiegiem prostokątnym z naniesionymi punktami normatywnymi [1]
 Fig. 4. Characteristic $(\Delta U/U) = f(f_m, P_{st})$ for $P_{st} = 0,25; 1$ i 4 and AM square signal with a standard points [1]



Rys. 5. Charakterystyka $(\Delta U/U) = f(f_m, P_{st})$ dla $P_{st} = 1$ i modulacji AM przebiegami: harmonicznym, trójkątnym i prostokątnym z naniesionymi punktami normatywnymi [1]
 Fig. 5. Characteristic $(\Delta U/U) = f(f_m, P_{st})$ for $P_{st} = 1$ and AM harmonic, triangle and square signal with plotting standard points [1]

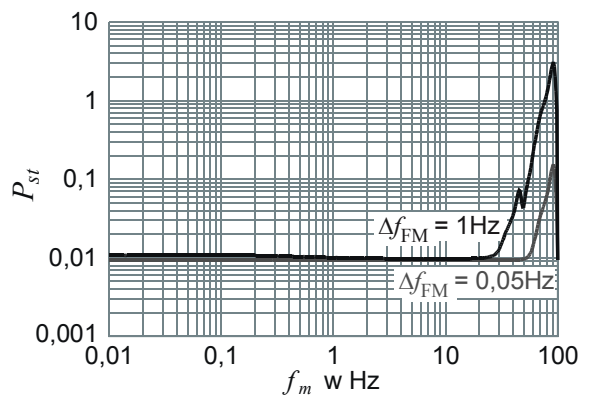
Na rysunku 6 przedstawiono zależność P_{st} od głębokości modulacji $(\Delta U/U)$ dla wybranych częstotliwości f_m i modulacji przebiegiem prostokątnym. Uzyskano liniowe zależności $P_{st} = f((\Delta U/U), f_m)$, które są zgodne z modelem analitycznym [6].



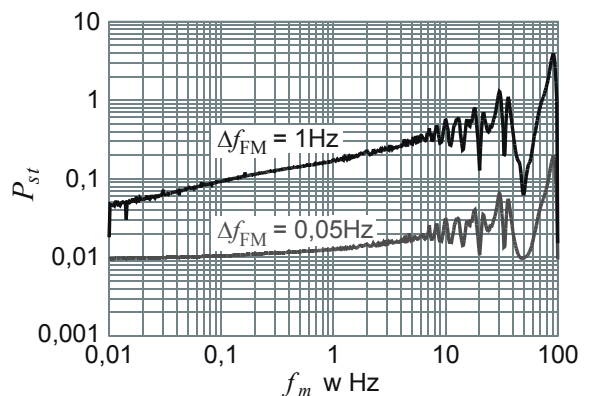
Rys. 6. Charakterystyka $P_{st} = f((\Delta U/U), f_m)$ z modulacją AM przebiegiem prostokątnym
 Fig. 6. Characteristic $P_{st} = f((\Delta U/U), f_m)$ with modulation AM with usage of rectangular signal

5. Charakterystyki przetwarzania flickermetru dla modulacji FM

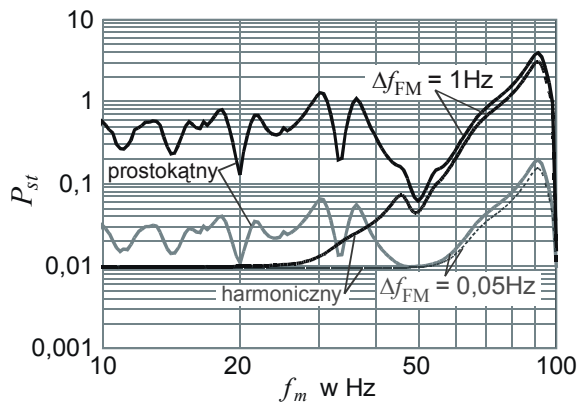
Operacja modulacji częstotliwości FM jest nieliniowa. Utrudnia to odtwarzanie charakterystyki przetwarzania flickermetru, gdyż niezbędna jest specyfikacja sygnału wejściowego uwzględniająca punkt pracy toru sygnałowego. Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono zależność $P_{st} = f(f_m, \Delta f_{FM})$ dla dewiacji częstotliwości $\Delta f_{FM} = 0,05$ Hz oraz $\Delta f_{FM} = 1$ Hz i modulacji przebiegami odpowiednio harmonicznym i prostokątnym. Maksimum wyznaczonych zależności $P_{st} = f(f_m, \Delta f_{FM})$ występuje dla $f_m = 91,8$ Hz. W przypadku modulacji przebiegiem prostokątnym dla $f_m < 50$ Hz zależność jest silnie niemonotoniczna. Na rysunku 9 przedstawiono fragment charakterystyki w przedziale $10 \text{ Hz} \leq f_m \leq 100 \text{ Hz}$ dokładnie prezentującej jej niemonotoniczność.



Rys. 7. Zależność $P_{st} = f(f_m, \Delta f_{FM})$ z modulacją FM przebiegiem harmonicznym
 Fig. 7. Characteristic $P_{st} = f(f_m, \Delta f_{FM})$ with FM with usage of harmonic signal



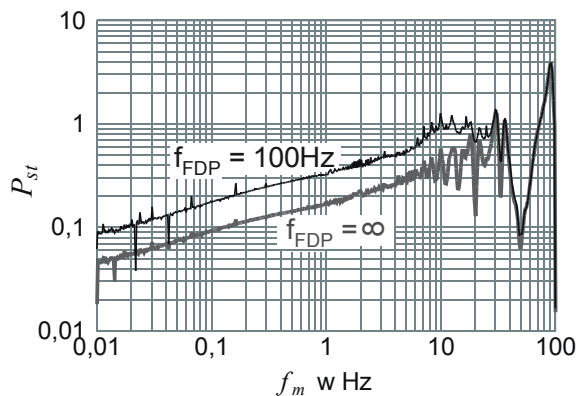
Rys. 8. Zależność $P_{st} = f(f_m, \Delta f_{FM})$ dla modulacji FM przebiegiem prostokątnym
 Fig. 8. Characteristic $P_{st} = f(f_m, \Delta f_{FM})$ for FM with usage of square signal



Rys. 9. Charakterystyka $P_{st} = f(f_m, \Delta f_{FM})$ dla modulacji FM przebiegami harmonicznymi i prostokątnymi dla $10 \text{ Hz} \leq f_m \leq 100 \text{ Hz}$

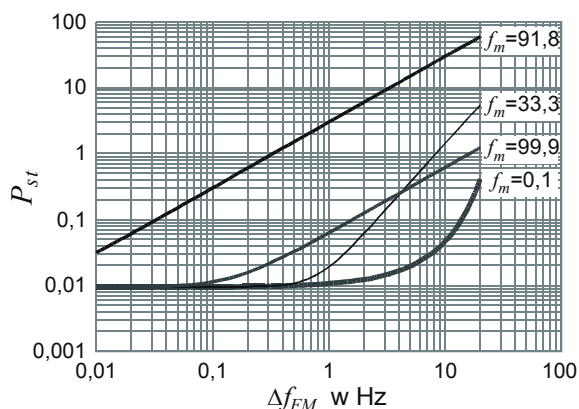
Fig. 9. Characteristic $P_{st} = f(f_m, \Delta f_{FM})$ for FM with usage of harmonic and rectangular signals for $10 \text{ Hz} \leq f_m \leq 100 \text{ Hz}$

Wynikiem modulacji FM w ogólności jest sygnał szerokopasmowy. Zgodnie z [1] „szerokość pasma przepustowego stopnia wejściowego ... nie powinna wprowadzać znaczącego tłumienia co najmniej do 700 Hz”. Wpływ pasma sygnału wejściowego $u(t)$ przedstawiono na rysunkach 10 i 11. Na rysunku 10 zamieszczono $P_{st} = f(f_m, \Delta f_{FM} = 1 \text{ Hz})$ dla sygnału wejściowego $u(t)$ bez ograniczenia pasma i z ograniczeniem pasma filtrem dolnoprzepustowym FDP o częstotliwości granicznej $f_{FDP} = 100 \text{ Hz}$. Wyznaczona w ten sposób charakterystyka pokazuje, być może zaskakująco, że ograniczenie pasma skutkuje wzrostem wartości sygnału wyjściowego P_{st} .



Rys. 10. Charakterystyka $P_{st} = f(f_m, \Delta f_{FM} = 1 \text{ Hz})$ dla modulacji FM przebiegiem prostokątnym bez i z ograniczeniem pasma filtrem FDP o częstotliwości $f_{FDP} = 100 \text{ Hz}$

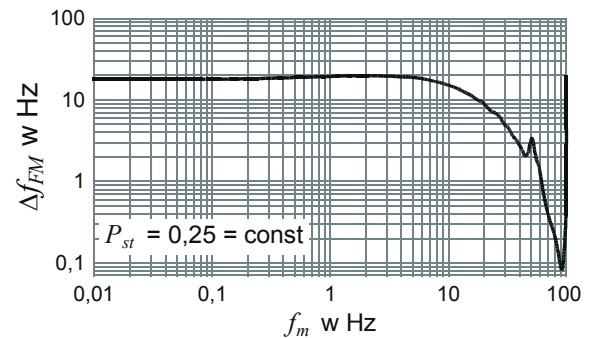
Fig. 10. Characteristic $P_{st} = f(f_m, \Delta f_{FM} = 1 \text{ Hz})$ with FM rectangular signal with and without limitation of the pass FDP with frequency $f_{FDP} = 100 \text{ Hz}$



Rys. 11. Charakterystyka $P_{st} = f(\Delta f_{FM}, f_m)$ dla modulacji FM przebiegiem harmonicznym dla wybranych częstotliwości $f_m = 0,1 \text{ Hz}; 33,33 \text{ Hz}; 91,8 \text{ Hz}; 99,9 \text{ Hz}$

Fig. 11. Characteristic $P_{st} = f(\Delta f_{FM}, f_m)$ for FM with usage of rectangular signal for the choosing frequencies $f_m = 0,1 \text{ Hz}; 33,33 \text{ Hz}; 91,8 \text{ Hz}; 99,9 \text{ Hz}$

Modulacja FM przebiegiem harmonicznym jest operacją prawie liniową, zwłaszcza dla odpowiednio małych wartości dewiacji częstotliwości Δf_{FM} . Na rysunku 11 przedstawiono charakterystykę $P_{st} = f(\Delta f_{FM}, f_m)$ dla następujących wartości częstotliwości harmonicznego przebiegu modulującego f_m : 0,1 Hz, 33,33 Hz, 91,8 Hz i 99,9 Hz. Zgodnie z charakterystyką z rysunku 7, dla odpowiednio małych wartości tłumione jest Δf_{FM} , w omawianym przypadku, dla $\Delta f_{FM} < 0,35 \text{ Hz}$, zachodzi liniowa zależność pomiędzy wartościami P_{st} i Δf_{FM} . Dla większych wartości Δf_{FM} liniowość zanika. Na rysunku 12 przedstawiono charakterystykę $\Delta f_{FM} = f(f_m, P_{st} = 0,25)$. Wartość P_{st} dobrano tak, aby unikać wpływu nieliniowości modulacji FM dla większych wartości P_{st} (skutkujących większymi wartościami Δf_{FM})



Rys. 12. Charakterystyka $\Delta f_{FM} = f(f_m, P_{st} = 0,25)$ dla modulacji FM przebiegiem harmonicznym

Fig. 12. Characteristic $\Delta f_{FM} = f(f_m, P_{st} = 0,25)$ for FM with usage of harmonic signal

6. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wybrane wyniki symulacji numerycznych opisujących działanie toru sygnałowego flickermetru dla modulacji AM lub FM. Omówiono warunki symulacji z wykorzystaniem programu Matlab Simulink. Zamieszczone charakterystyki uzupełniają normatywny opis działania flickermetru. Na uwagę zasługują m.in.:

- niemonotoniczny fragment charakterystyki $(\Delta U/U) = f(f_m)$ dla modulacji AM przebiegiem harmonicznym (rys. 5), będący pozytywnym elementem diagnostyki flickermetru,
- zależność $P_{st} = f(\Delta f_{FM}, f_m)$ dla modulacji FM przebiegiem harmonicznym (rys. 11) wskazująca, że dla typowych zmienności częstotliwości w sieci elektroenergetycznej można stosować uproszczoną analizę jak dla procesów liniowych,
- wpływ ograniczania pasma sygnału wejściowego $u(t)$, przedstawiony na rysunku 10 skutkuje wzrostem wartości wskaźnika P_{st} .

7. Literatura

- [1] PN-EN 61000-4-15, Miernik migotania światła.
- [2] Majchrzak J., Wiczyński G.: Symulacyjna weryfikacja modelu toru sygnałowego flickermetru. PAK, nr 10 bis, 2006, s. 124-129.
- [3] Wiczyński G.: Charakterystyka porównawcza wybranych miar zmienności napięcia w sieci elektroenergetycznej. Automatyka Elektroenergetyczna, nr 3, 2006 s. 28-34.
- [4] Mombauer W.: Flicker caused by phase jumps. European Transactions on Electrical Power, t. 16, 2006, s. 545-567.
- [5] Duda K., Bień A., Szyper M., Zieliński T.: Analysis Of Voltage Disturbances Caused By Simultaneous Amplitude And Phase Modulation In Electric Power Network. mat. XI Internat. Conf. on Harmonics and Quality of Power ICHQP'2004, 2004, s. 199-204.
- [6] Wiczyński G.: Odcinkowa aproksymacja charakterystyki przetwarzania flickermetru. PAK, nr 10 bis, 2006, s. 147-152.
- [7] Szabatin J.: Podstawy teorii sygnałów. WKiŁ, 1990, Warszawa.
- [8] Help for Matlab – The Language for Technical Computing, Ver. 6, Rel. 12, MathWorks 2000.