

JAKUB PIWOWARCZYK

Instytut Elektrotechniki Teoretycznej, Metrologii i Materiałoznawstwa
Politechnika Łódzka

WYKORZYSTANIE ŚRODOWISKA MATLAB DO OCENY DOKŁADNOŚCI ELEKTRONICZNYCH PRZEKŁADNIKÓW PRĄDOWYCH I NAPIĘCIOWYCH

1. WPROWADZENIE

Środowisko MATLAB zostało bardzo rozbudowane względem swojej pierwszej wersji, która ukazała się w 1985 roku. Początkowo program MATLAB (matrix laboratory) wykorzystywano do obliczeń macierzowych. Obecnie został on wzbogacony o nowe biblioteki do rozwiązywania złożonych problemów z różnych dziedzin nauki. Do najpopularniejszych bibliotek należą: Chemometrix Toolbox, Financial Toolbox, Fuzzy Logic Toolbox, Image Processing Toolbox, Mapping Toolbox, Neural Network Toolbox, Higher-Order Spectral Analysis Toolbox, Symbolic Math Toolbox, Partial Differential Equation Toolbox, Simulink, Spline Toolbox oraz Wavelet Toolbox.

Autor w swojej pracy badawczej wykorzystywał Simulink – pakiet do modelowania, symulacji i analizy złożonych układów dynamicznych. W pakiecie tym, oprócz możliwości modelowania obiektów za pomocą tradycyjnych schematów blokowych stosowanych w automatyce, wprowadzono także nowe narzędzia, takie jak np.:

- Simmechanics – biblioteka do modelowania i symulacji systemów mechanicznych,
- Simdriveline – biblioteka do modelowania i symulacji mechanizmów napędowych,
- Simhydraulics – biblioteka do modelowania i symulacji napędów hydraulicznych,
- Simpowersystems – biblioteka do modelowania i symulacji napędów elektrycznych.

Możliwe jest także łączenie schematów blokowych z przedstawionymi wyżej narzędziami Simulinka. W ten sposób można np. zbudować model układu napędowego i zastosować w jego pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego, stworzone przez autora, modele elektronicznych przetworników prądowych lub napięciowych.

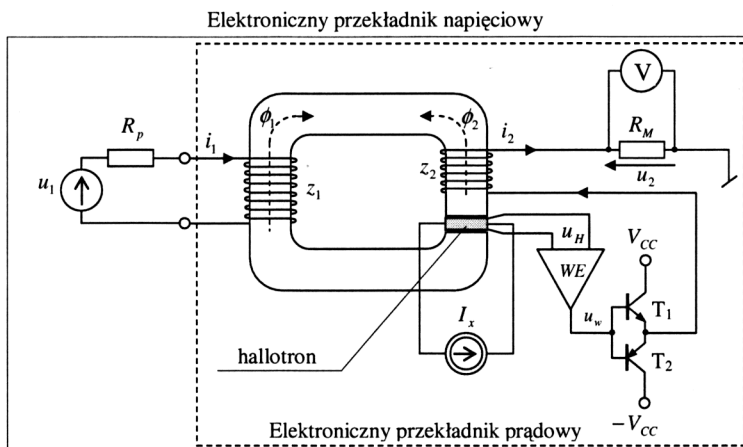
Budowanie i testowanie modeli matematycznych w Simulinku odbywa się w sposób intuicyjny, a zaawansowane metody numeryczne zapewniają wysoką dokładność realizowanych obliczeń. Z tych właśnie powodów autor postanowił wykorzystać program MATLAB do badań elektronicznych przekładników prądowych i napięciowych z czujnikiem Halla w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego. W dalszej części tego opracowania będzie stosowana skrócona nazwa – elektroniczne przekładniki prądowe lub napięciowe.

Elektroniczne przekładniki prądowe i napięciowe są obecnie coraz częściej stosowane w licznikach energii elektrycznej, napędach elektrycznych (np. w tramwajach), przetwornicach do grzania indukcyjnego i pojemnościowego, zasilaczach prądu stałego i przemiennego, prostownikach, falownikach, przekształtnikach energetycznych oraz wielu innych układach pomiarowych.

Aby dokładniej zbadać, jaki jest wpływ sygnałów odkształconych oraz innych czynników, np. zmiany wartości obciążenia na błędy amplitudowe i fazowe elektronicznych przekładników prądowych i napięciowych w funkcji częstotliwości, zbudowano ich modele matematyczne.

2. ELEKTRONICZNE PRZEKŁADNIKI PRĄDOWE I NAPIĘCIOWE

Opracowane przez autora modele matematyczne elektronicznych przekładników prądowych i napięciowych odzwierciedlają funkcjonowanie ich rzeczywistych układów. Poniżej przedstawiono krótki opis tych przekładników.



Rys. 1. Schemat budowy elektronicznych przekładników prądowych i napięciowych

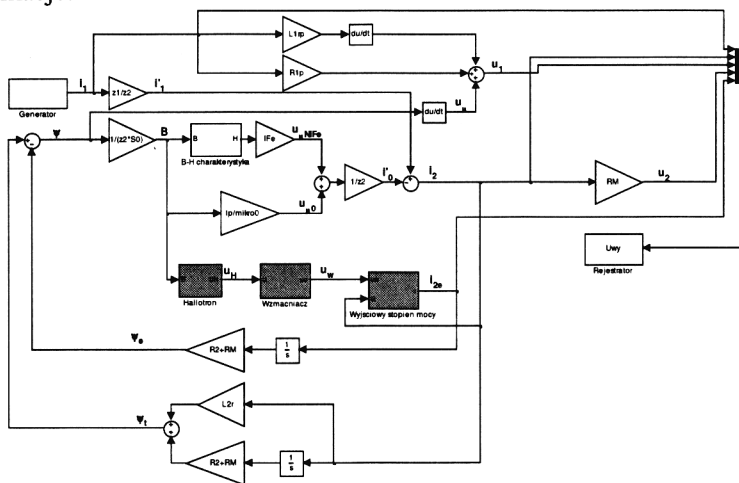
Przekładniki elektroniczne wykorzystują czujniki Halla w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego. Zadaniem hallotronu jest detekcja wypadkowego strumienia magnetycznego w rdzeniu i w szczeliny powietrznej. Czujnik Halla wraz ze wzmacniaczem operacyjnym, układem przeciwstawnie połączonych

tranzystorów komplementarnych T1 i T2 oraz cewką kompensującą stanowią pętlę ujemnego sprzężenia zwrotnego przekładnika elektronicznego. W wyniku pracy tej pętli w uzwojeniu kompensującym wymuszony jest przepływ prądu i_2 . Wartość chwilowa prądu i_2 jest proporcjonalna do wartości chwilowej napięcia wyjściowego hallotronu – u_H . Po uwzględnieniu przekładni zwojowej, prąd i_2 będzie w przybliżeniu równy prądowi pierwotnemu i_1 .

Elektroniczne przekładniki prądowe w stosunku do napięciowych różnią się budową obwodu pierwotnego (rys. 1). Dodatkowo dla elektronicznych przekładników napięciowych należy obliczyć wartość rezystancji włączanej szeregowo z obwodem pierwotnym, znając następujące parametry: spodziewane napięcie systemu, znamionowy prąd pierwotny przekładnika i rezystancję obwodu pierwotnego przekładnika. Modele elektronicznych przekładników prądowych i napięciowych różnią się również opisem matematycznym ich obwodów pierwotnych.

3. MODELOWANIE W PROGRAMIE MATLAB

Na podstawie analizy znanych modeli elektronicznych przekładników [1], [2], [3], [4], przeprowadzonych badań laboratoryjnych oraz modeli klasycznych przekładników [5], [6] opracowano nowe modele elektronicznych przekładników prądowych i napięciowych z czujnikiem Halla w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego [7], [8], [9]. Proces tworzenia tych modeli odbywał się przy wykorzystaniu programu MATLAB-SIMULINK, co pozwoliło na szybkie ich modyfikacje.



Rys. 2. Model elektronicznego przekładnika prądowego opracowany w MATLABie

Model przedstawiony na rysunku 2 stanowi połączenie modelu transformatorowego przekładnika prądowego z modelem układów elektronicznych (bloki z szarym tłem).

Parametry związane z modelem klasycznego przekładnika prądowego, tj.: $R2$, $L2r$, $R1p$, $L1rp$, $z1$, $z2$, RM oznaczają odpowiednio: rezystancję i indukcyjność rozproszenia uzwojenia wtórnego, rezystancję i indukcyjność rozproszenia uzwojenia pierwotnego sprowadzone do obwodu wtórnego, liczby zwojów uzwojeń pierwotnego i wtórnego oraz rezystancję pomiarową.

Właściwości materiału ferromagnetycznego, z którego wykonano rdzeń przekładnika, odwzorowano za pomocą modelu Jilesa-Athertona [10]. Model JA został wybrany ze względu na stosunkowo prostą zasadę działania, średnie zapotrzebowanie na moc obliczeniową oraz możliwość wyznaczenia parametrów tego modelu na podstawie charakterystyki magnesowania materiału magnetycznego. Parametry obwodu magnetycznego, oznaczone symbolami: SFe , $S0$, lFe , lp , $mikro0$, oznaczają odpowiednio przekrój poprzeczny rdzenia i szczeliny powietrznej, średnie długości obwodu magnetycznego oraz szczeliny powietrznej i przenikalność magnetyczną próżni.

Elementy elektroniczne zostały odwzorowane poprzez następujące bloki: *Hallotron*, *Wzmacniacz* oraz *Wyjściowy stopień mocy*. Stosowane w elektronicznych przekładnikach prądowych i napięciowych hallotrony charakteryzują się dużą liniowością w szerokim paśmie częstotliwościowym. Z tego względu czujnik Halla odwzorowano w modelu matematycznym za pomocą stałej hallotronu k_H . Kolejny blok – wzmacniacz odwzorowano poprzez transmittancję (1):

$$G_w(s) = \frac{A_{v0}}{1 + \frac{s}{\omega_g}} \quad (1)$$

gdzie: A_{v0} – stała napięciowy współczynnik wzmocnienia, ω_g – pulsacja graniczna 3 dB pasma częstotliwościowego.

Do przeciwstawnie połączonych tranzystorów komplementarnych zastosowano model Ebersa-Molla, następnie równania tego modelu uzależniono od napięcia wyjściowego u_w wzmacniacza i napięcia wtórnego u_z określonego jako:

$$u_z = L_2 \frac{di_z}{dt} + (R_2 + R_M) i_z. \quad (2)$$

Po przekształceniach otrzymano:

$$i_{ze} = I_{s1} \left[\frac{\exp\left(\frac{u_w - u_z}{\varphi_T}\right) - 1}{\beta_{N1}} + \left(\exp\left(\frac{u_w - u_z}{\varphi_T}\right) - \exp\left(\frac{u_w - V_{CC}}{\varphi_T}\right) \right) \right] + \quad (3)$$

$$- I_{s2} \left[\frac{\exp\left(\frac{u_z - u_w}{\varphi_T}\right) - 1}{\beta_{N2}} + \left(\exp\left(\frac{u_z - u_w}{\varphi_T}\right) - \exp\left(\frac{-V_{CC} - u_w}{\varphi_T}\right) \right) \right]$$

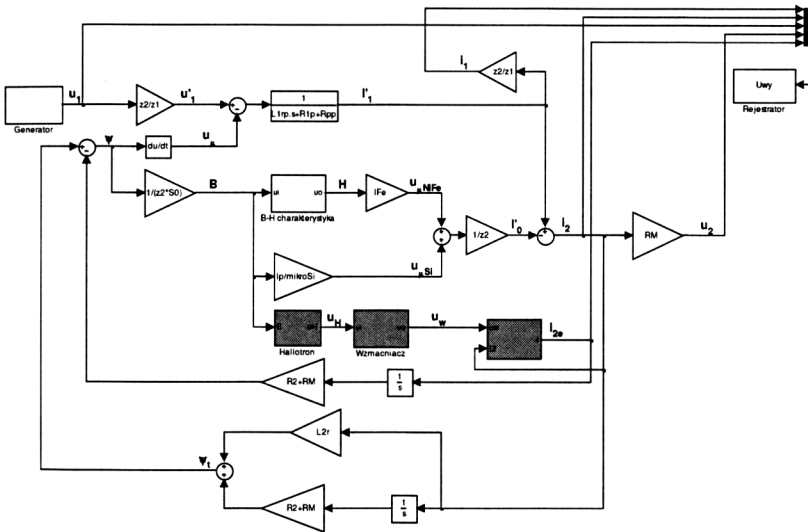
gdzie: φ_T – potencjał elektrokinetyczny, β_{N1} i β_{N2} – współczynniki wzmocnienia prądowego tranzystorów T1 i T2 w układzie WE, $I_s = \alpha_N I_{ES} = \alpha_I I_{CS}$, (α_N , α_I ,

I_S – parametry modelu EM, I_{ES} , I_{CS} – teoretyczne prądy wsteczne diod I_{dE} i I_{dC} modelu EM), L_2 – indukcyjność cewki kompensującej.

W równaniu (3) odwzorowano wpływ nasycenia się przeciwstawnie połączonych tranzystorów komplementarnych na pracę przekładnika elektronicznego. Nasycenie to zostało początkowo zaobserwowane w trakcie badań laboratoryjnych. Wpływ na wielkość tego nasycenia miały takie czynniki, jak: wartość obciążenia oraz rodzaj sygnału odkształconego podawanego na wejście przekładnika. Przebadanie przyczyn nasycenia bloku elektronicznego w rozważanych przekładnikach elektronicznych okazało się niezwykle istotne dla określenia dokładności tych przekładników.

Wpływ pracy bloku elektronicznego na dokładność elektronicznych przekładników prądowych z kompensacją strumienia magnetycznego w rdzeniu można analizować na podstawie przebiegu charakterystyki błędu prądowego tych przekładników. W przebiegu tym występuje charakterystyczne minimum lokalne rozdzielające pasmo przetwarzania na dwa podzakresy [11]. Dolny podzakres tego pasma określają właściwości bloku elektronicznego, którego pierwszym członem jest hallotron. Dla wyższych częstotliwości mierzonego prądu przekładnik elektroniczny zachowuje się, jak transformator prądowy pracujący bez kompensacji strumienia w rdzeniu magnetycznym. Powoduje to znaczne obniżenie dokładności przetwarzania odkształconych przebiegów występujących na wejściu przekładnika.

Model elektronicznego przekładnika napięciowego został przedstawiony na rysunku 3. Różnice w stosunku do modelu z rys. 2 występują w budowie obwodu pierwotnego. Na rysunku 3 pojawia się dodatkowy parametr R_{pp} , który oznacza rezystancję włączoną szeregowo z uzwojeniem pierwotnym, spowodowaną do obwodu wtórnego.



Rys. 3. Model elektronicznego przekładnika napięciowego opracowany w MATLABie

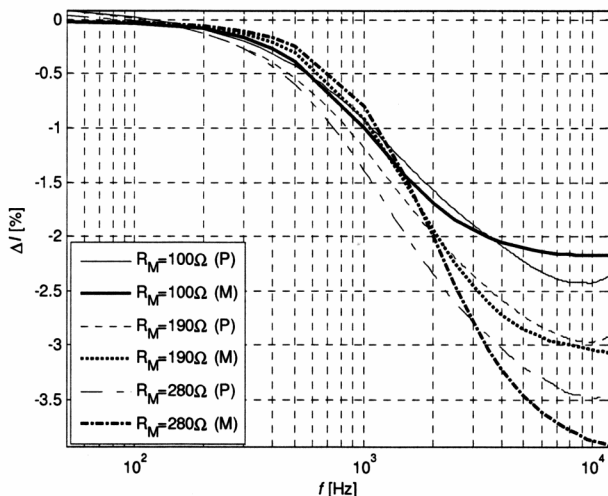
Modele elektronicznych przekładników prądowych i napięciowych wykorzystano do badań symulacyjnych. Wyniki tych badań przedstawiono w rozdziale 4.

4. WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH I SYMULACYJNYCH

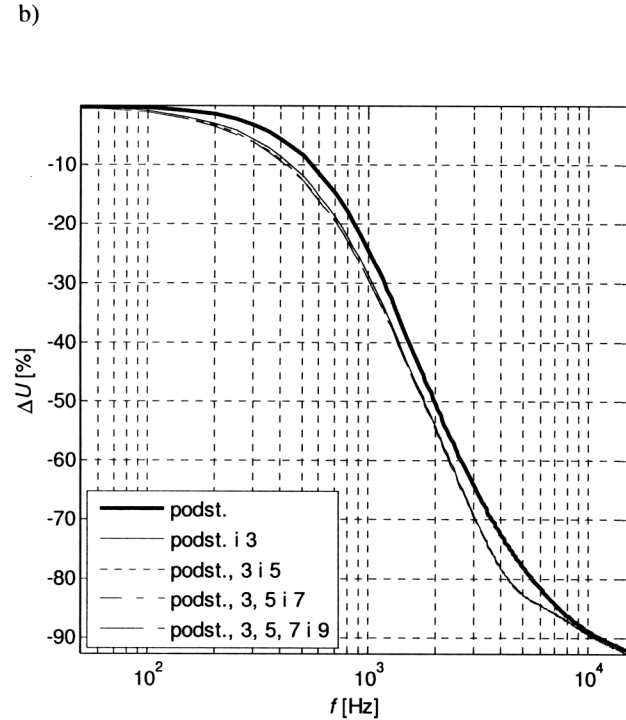
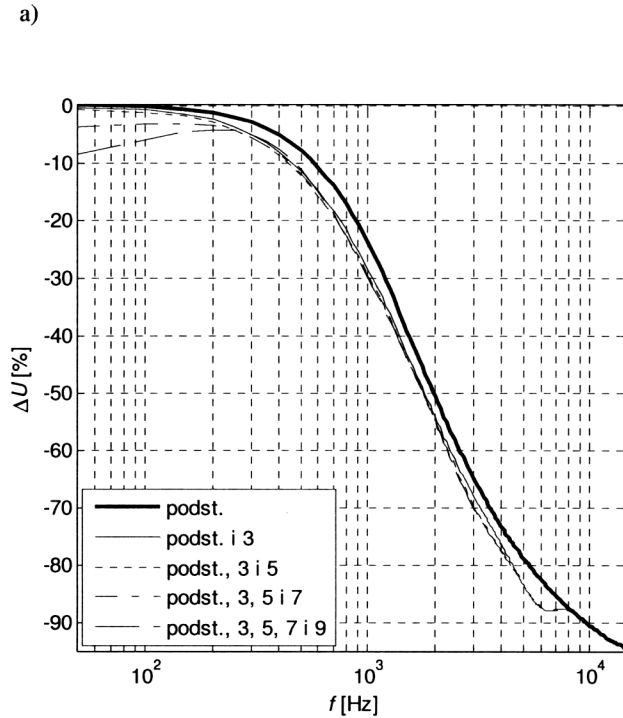
Badania laboratoryjne przeprowadzono dla elektronicznych przekładników prądowych typu: LA25-NP/SP13, LA25-NP, LA55-P oraz napięciowych typu: LV25-P, LV100. Wszystkie przekładniki zostały wyprodukowane przez firmę LEM. Nie oznacza to jednak, że modele prezentowane w niniejszym artykule są nieprzydatne do symulacji przekładników dostarczanych przez inne firmy. Przekładniki pracujące na tej samej zasadzie produkowane są także przez takie firmy, jak: Vacuumschmelze, GMW oraz Honeywell. Przy czym asortyment firmy LEM jest największy.

Dla każdego z ww. przekładników elektronicznych zbadano wpływ zmiany wartości obciążenia oraz rodzaju przebiegu odkształconego na przebieg charakterystyk błędów amplitudowych. Poniżej zaprezentowano wybrane charakterystyki błędów badanych przekładników oraz błędów obliczonych w trakcie symulacji komputerowych.

Na rysunku 4 pokazano wpływ zmiany rezystancji obciążenia na błąd prądowy przekładnika LA25-NP/SP13 przy sinusoidalnym prądzie pierwotnym o wartości skutecznej równej 2 A. Analizując charakterystyki błędów prądowych (rys. 4) można zaobserwować, że wraz ze wzrostem wartości rezystancji pomiarowej R_M i zmianie częstotliwości w granicach do 10^4 Hz nasycenie bloku elektronicznego przekładnika LA25-NP/SP13 występuje dla niższych częstotliwości.



Rys. 4. Charakterystyki błędów prądowych przekładnika LA25-NP/SP13 (P) oraz jego modelu (M) w funkcji częstotliwości



Rys. 5. Charakterystyki błędu napięciowego przekładnika LV 100 (a) oraz jego modelu (b) dla następujących zawartości wyższych harmonicznych: 3. ($0,4 U_{m1}$); 5. ($0,16 U_{m1}$); 7. ($0,064 U_{m1}$) oraz 9. ($0,025 U_{m1}$)

Na rysunku 5 zestawiono charakterystyki błędu napięciowego uzyskane dla przekładnika LV 100 przy odkształconych napięciach pierwotnych o wartości skutecznej równej 100 V oraz o różnych udziałach tych harmonicznych. Oznaczenia na legendach odpowiadają następującym przebiegom testowym:

- $u_1(t) = U_{m1}\sin(\alpha x)$,
- $u_1(t) = U_{m1}\{\sin(\alpha x) + 0,4\sin(3\alpha x)\}$,
- $u_1(t) = U_{m1}\{\sin(\alpha x) + 0,4\sin(3\alpha x) + 0,16\sin(5\alpha x)\}$,
- $u_1(t) = U_{m1}\{\sin(\alpha x) + 0,4\sin(3\alpha x) + 0,16\sin(5\alpha x) + 0,064\sin(7\alpha x)\}$,
- $u_1(t) = U_{m1}\{\sin(\alpha x) + 0,4\sin(3\alpha x) + 0,16\sin(5\alpha x) + 0,064\sin(7\alpha x) + 0,0256\sin(9\alpha x)\}$.

Uzyskanie ww. przebiegów odkształconych było możliwe dzięki zastosowaniu precyzyjnego generatora przebiegów odkształconych, który wykorzystano w opracowanym przez autora, komputerowym systemie pomiarowym [12]. W systemie tym wartości błędów przekładników prądowych i napięciowych wspomaganym elektronicznie wyznaczane są bez udziału przekładnika wzorcowego. Przekładnik ten zastąpiono kalibratorem prądu/napięcia przemiennego współpracującym z generatorem przebiegów odkształconych.

Na rysunku 5 można zaobserwować, że największy wpływ na błąd napięciowy miała trzecia harmoniczna występująca w napięciu pierwotnym. Aby zbadać wpływ udziału trzeciej harmonicznej na błąd napięciowy wykonano kolejne badania laboratoryjne i symulacyjne. Wyniki tych badań są zawarte w pracy [13]. Ponadto na rysunku 5 nie ma charakterystycznego minimum lokalnego, które występowało w przetworniku prądowym. Wynika to z wpływu indukcyjności rozproszenia uzwojenia pierwotnego. Indukcyjność ta została również uwzględniona w modelu matematycznym elektronicznego przekładnika napięciowego przedstawionego na rysunku 3. Wykorzystując opracowany model elektronicznego przekładnika napięciowego, można określić dla jakiej częstotliwości występuje nasycenie wyjściowego stopnia mocy. Zadanie to można zrealizować analizując prąd i_{2e} w funkcji częstotliwości.

Wpływ nasycenia bloku elektronicznego, który był obserwowany na rysunku 4 oraz rysunku 5, można również wyjaśnić analizując zależność 3. Wzrost napięcia u_z występującego w tym wzorze, powodowany zmianą rezystancji obciążenia lub liczbą harmonicznych, powoduje wcześniejsze zmniejszenie się wartości prądu i_{2e} , a tym samym nasycenie bloku elektronicznego.

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono modele elektronicznych przekładników prądowych i napięciowych opracowanych w MATLABie. Pozwoliły one określić przybliżone wartości błędów amplitudowych dla rzeczywistych przekładników elektronicznych przetwarzających sygnały odkształcone. Ponadto opisane modele umożliwiły symulację przekładników elektronicznych w obu ich zakresach pracy, tzn. jako układów wspomaganym elektronicznie oraz klasycznych przekładników prądowych lub napięciowych.

Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych i symulacyjnych ustalono, iż bezpośrednią przyczyną odłączenia bloku elektronicznego jest nasycenie wyjściowego stopnia mocy, utworzonego za pomocą układu dwóch przeciwstawnie symetrycznych tranzystorów komplementarnych. O nasyceniu tego bloku decydują czynniki zweryfikowane laboratoryjnie, takie jak: wartość rezystancji pomiarowej, udział 3-ciej harmonicznej oraz liczba harmonicznych nieparzystych w przetwarzanych przebiegach.

LITERATURA

- [1] **Jin Bin**: Modeling and Implementation of a Smart Current Sensor. *Industrial Electronics, Control, Instrumentation and Automation*, 1992, pp. 1550-1555.
- [2] **Łastowiecki J.**: Układy pomiarowe prądu w energoelektronice. COSiW SEP, Warszawa 2003.
- [3] **Pankau J., Leggate D., Schlegel D.W., Kerman R.J., Skibinski G.L.**: High-frequency modeling of current sensors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 35, No. 6, 1999, pp. 1374-1381.
- [4] **Son D., Sievert Johannes D.**: A New Current Sensor Based on the Measurement of the Apparent Coercive Field Strength. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 38, No. 6, December 1989, pp. 1080-1082.
- [5] **Koszmider A., Olak J., Piotrowski Z.**: Przekładniki prądowe. WNT, Warszawa 1985.
- [6] **Wiszniewski A.**: Przekładniki w elektroenergetyce. WNT, Warszawa 1982.
- [7] **Pacholski K., Piwowarczyk J.**: Model of electronic current and voltage transducer. VI International Scientific and Technical Conference – Efficiency and Power Quality of Electrical Supply of Industrial Enterprises, Mariupol, Ukraine, May 2008, pp. 156-159.
- [8] **Piwowarczyk J., Pacholski K.**: Nowy model elektronicznego przekładnika prądowego z kompensacją strumienia magnetycznego w rdzeniu. KM Kraków, wrzesień 2007.
- [9] **Piwowarczyk J., Pacholski K.**: Transformation of deformed voltage signals in electronic voltage transducers. *Przegląd Elektrotechniczny*, No. 11 (2008), ss. 60-63.
- [10] **Jayasinghe R.P., McLaren P.G.**: Transformer core models based on the Jiles-Atherton algorithm. *Conference on Communications, Power and Computing Proceedings*; Winnipeg, MB, May 22-23, 1997, pp. 121-125.
- [11] **Pacholski K., Piwowarczyk J., Szczęsny A.**: Błędy elektronicznych przekładników prądowych. MSM Rzeszów, październik 2006, ss. 213-222.
- [12] **Pacholski K., Piwowarczyk J., Szczęsny A.**: System pomiarowy do wyznaczania błędów elektronicznych przekładników prądowych. MKM Warszawa, wrzesień 2006.
- [13] **Piwowarczyk J.**: Modele matematyczne skompensowanych elektronicznych przekładników prądowych i napięciowych. Praca doktorska. Politechnika Łódzka, Łódź 2009.

UTILISATION OF MATLAB PROGRAM FOR ERRORS ASSESSMENT OF ELECTRONIC CURRENT AND VOLTAGE TRANSDUCERS

Summary

In the paper electronic current and voltage transducers models (with Hall effect sensor in a feedback loop) were constructed in MATLAB program. First of all, created models enabled to determine approximate values of amplitude errors for real transducers transforming deformed input signals. Moreover, new models imitate two states of work of electronic transducers – with assistance of the electronic block and like a typical current or voltage transformers.

On the basis of performed laboratory test and computer simulations, it was found that the main reason of electronic block cut off is saturation of two complementary connected transistors. The factors that determine the saturation are: the value of load resistance, share of third harmonic and number of harmonics.

Artykuł recenzowany