

Wpływ zasilania silnika PM na wzrost poziomu wibracji maszyny – diagnostyka na podstawie analizy częstotliwościowej sygnałów własnych

Marcin Barański

1. Wstęp

Silniki ze wzbudzeniem od magnesów trwałych charakteryzują się wysoką sprawnością spośród większości maszyn elektrycznych wirujących, którą utrzymują w szerokim zakresie prędkości obrotowych, co stanowi jedną z głównych zalet tych maszyn. Inną zaletą jest najwyższy stosunek mocy do masy.

Maszyny tej konstrukcji posiadają również wady, które próbuje się eliminować lub ograniczać na etapie projektu. Zdaniem autora, z punktu widzenia użytkownika negatywną cechą maszyn PM jest moment zaczepowy, który przekłada się na tętnienia momentu. Tętnienia te mogą się nasilać w przypadku asymetrii obciążenia, zasilania, asymetrii szczeliny powietrznej oraz w innych stanach niepoprawnej pracy maszyny.

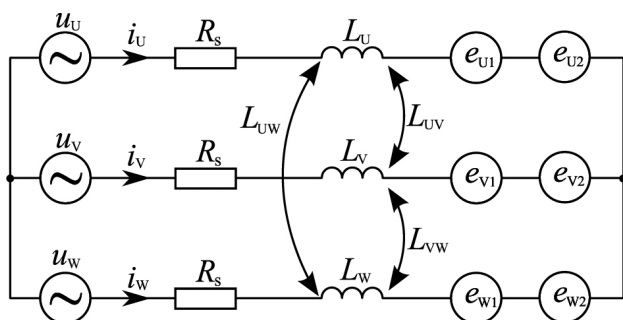
W przypadku asymetrii zasilania silnika wirujące pole magnetyczne przybiera kształt eliptyczny zamiast kołowego. Występują wtedy dodatkowe momenty harmoniczne przeciwnej kolejności, które wpływają na wartość chwilową momentu wypadkowego, powodując jego pulsację. Towarzyszy temu wzrost poziomu wibracji oraz intensywny hałas, co utrudnia, a może nawet uniemożliwić pracę maszyny [3].

2. Model matematyczny asymetrycznie zasilanej maszyny PM

W literaturze modele maszyn synchronicznych z magnesami trwałymi dla ustalonego stanu pracy przedstawiane są głównie w osiach współrzędnych „d, q”. Umożliwia to posługiwanie się stałymi wartościami reaktancji X_d i X_q . W przedstawionym modelu (1–5) nie korzysta się z transformacji. Uwzględnia się reaktancje jako funkcje kąta położenia wirnika [4].

Założenia:

- uzwojenie trójfazowe, połączone w gwiazdę, symetryczne;
- stan pracy ustalonej.



Rys. 1. Schemat zastępczy

Streszczenie: W artykule przedstawiono wpływ asymetrii zasilania silnika ze wzbudzeniem pochodzącym od magnesów trwałych na generację drgań w rozpatrywanej maszynie. W pracy przedstawiono model matematyczny asymetrycznie zasilanej maszyny z magnesami trwałymi oraz wyniki badań laboratoryjnych. Autor przedstawił przebiegi czasowe momentu oraz prądu wraz z analizą częstotliwościową. Dodatkowo przedstawiono przebiegi czasowe prędkości drgań dla symetrycznego oraz asymetrycznego zasilania silnika – zarówno dla biegu jałowego, jak również dla stanu obciążenia. W podsumowaniu przedstawiono również autorskie równanie matematyczne, które stanowi pewnego rodzaju marker dla rozpatrywanego zjawiska. Umożliwia to jego zdiagnozowanie na podstawie analizy częstotliwościowej sygnału własnego. Metoda diagnostyczna bazująca na przedstawionej zależności została opatentowana.

Słowa kluczowe: maszyna elektryczna, magnesy trwałe, diagnostyka, drgania

🇬🇧 SUPPLY ASYMMETRY OF PM MOTOR AS A VIBRATION SOURCE – DIAGNOSTICS BASED ON FREQUENCY ANALYSIS OF OWN SIGNALS

Abstract: An influence of supply asymmetry of PM motor for the generation of vibrations in the tested machine is described in this article. There are shown mathematical model and laboratory test results. The waveforms of torque and current and frequency analysis for laboratory tests are presented in the paper. The waveforms of vibration speed for idle run and load state are also presented. The mathematical equation – a marker for this disruption is presented in the summary. The method was patented.

Keywords: electrical machine, permanent magnets, diagnostics, vibration

$$u_U(t) = R_s i_U(t) + L_U(\theta(t)) \frac{di_U(t)}{dt} + L_{UV}(\theta(t)) \frac{di_V(t)}{dt} + L_{UW}(\theta(t)) \frac{di_W(t)}{dt} + e_{U1}(t) + e_{U2}(t) \quad (1)$$

$$u_V(t) = R_s i_V(t) + L_V(\theta(t)) \frac{di_V(t)}{dt} + L_{UV}(\theta(t)) \frac{di_U(t)}{dt} + L_{VW}(\theta(t)) \frac{di_W(t)}{dt} + e_{V1}(t) + e_{V2}(t) \quad (2)$$

$$u_W(t) = R_s i_W(t) + L_W(\theta(t)) \frac{di_W(t)}{dt} + L_{UW}(\theta(t)) \frac{di_U(t)}{dt} + L_{VW}(\theta(t)) \frac{di_V(t)}{dt} + e_{W1}(t) + e_{W2}(t) \quad (3)$$

$$T(t) = \frac{(e_{U1}(t) + e_{U2}(t))i_U(t) + (e_{V1}(t) + e_{V2}(t))i_V(t) + (e_{W1}(t) + e_{W2}(t))i_W(t)}{\omega(t)} \quad (4)$$

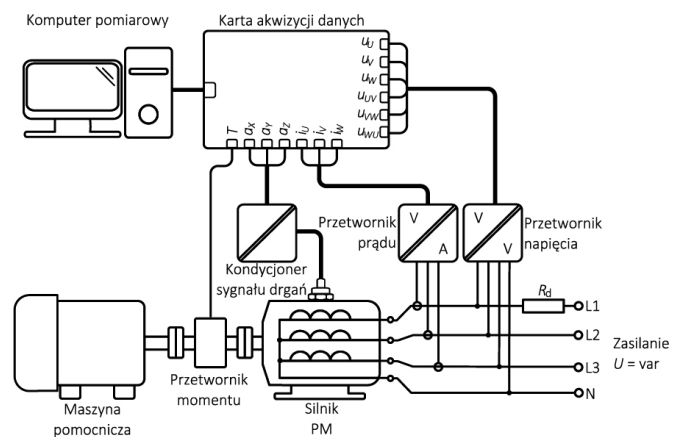
$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (5)$$

gdzie:

- e_{U1}, e_{V1}, e_{W1} – siła elektromotoryczna indukowana w danej fazie;
- e_{U2}, e_{V2}, e_{W2} – siła elektromotoryczna zaburzenia;
- i_U, i_V, i_W – prądy w poszczególnych fazach maszyny;
- u_U, u_V, u_W – napięcia na zaciskach maszyny;
- L_U, L_V, L_W – indukcyjności własne poszczególnych pasm;
- L_{UV}, L_{VW}, L_{UW} – indukcyjności wzajemne;
- R_s – rezystancja fazy;
- ω – prędkość kątowna;
- θ – kąt położenia wirnika;
- t – czas;
- T – moment elektromagnetyczny.

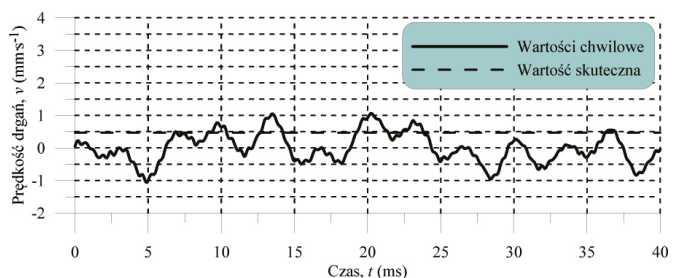
3. Badania laboratoryjne

Analizę niesymetrycznego zasilania silnika synchronicznego ze wzbudzeniem pochodzącym od magnesów trwałych przedstawiono, wykorzystując wyniki badań maszyny typu: SMzsg132M-4 ze stojanem o liczbie żłobków: $Q_s = 36$, bez skosu. Wirnik natomiast w wykonaniu ze skosem skokowym odpowiadającym magnetycznie skosowi w stojanie o jedną podziałkę żłobkową stojana, posiadającym magnesy umieszczone na powierzchni (SPM). Parametry maszyny: $P_N = 6,5$ kW, $U_N = 65$ V, $I_N = 72,1$ A, $n_N = 1500$ 1/min, $\eta_N = 87,0\%$. Badania przeprowadzono dla asymetrii zasilania: $U_U = 39,1$ V, $U_V = 36,2$ V, $U_W = 36,8$ V w oparciu o układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 2. Na rysunkach 3-7 przedstawiono przebiegi prędkości drgań oraz momentu obciążenia przy symetrycznym oraz asymetrycznym zasilaniu silnika wzbudzanego magnesami trwałymi. Przebiegi prędkości drgań przedstawiono zarówno dla biegu jałowego silnika, jak i w stanie jego obciążenia. Porównanie wartości momentu oraz prędkości drgań umieszczono w tabelach 1 i 2. Przebiegi czasowe zostały przedstawione dla jednego pełnego obrotu maszyny.



Rys. 2. Układ pomiarowy

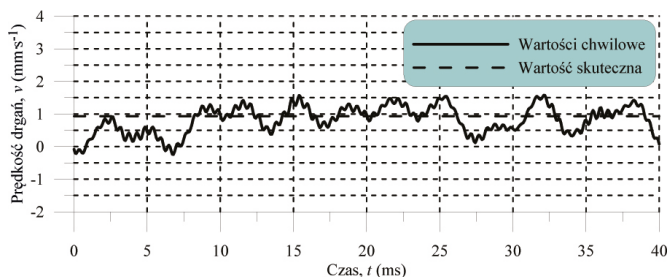
Przebiegi czasowe prędkości drgań oraz wartości zebrane w tabeli 1 pokazują, że asymetria zasilania silnika ze wzbudzeniem od magnesów trwałych, pracującego na biegu jałowym



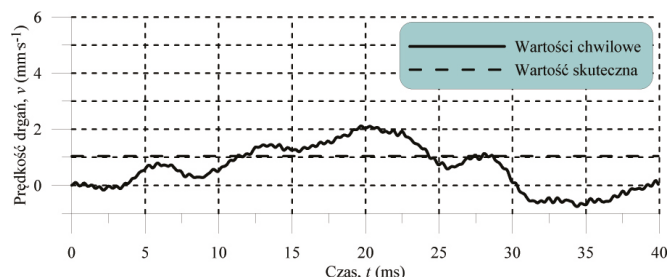
Rys. 3. Przebieg prędkości drgań przy symetrii zasilania - bieg jałowy

powoduje zwiększenie poziomu wibracji maszyny – wartość skuteczna prędkości drgań w tym przypadku wzrosła o 98%.

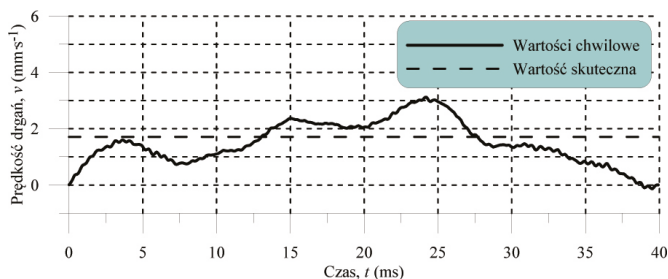
Analiza wartości zestawionych w tabeli 2 pokazuje, iż niesymetria zasilania silnika ze wzbudzeniem od magnesów trwałych przekłada się na zwiększenie pulsacji momentu (111%) i powoduje to wzrost wibracji maszyny (64%).



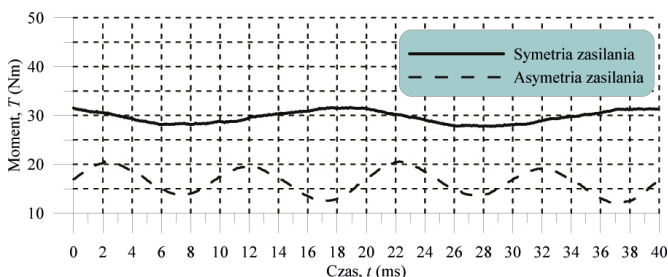
Rys. 4. Przebieg prędkości drgań przy asymetrii zasilania - bieg jałowy



Rys. 5. Przebieg prędkości drgań przy symetrii zasilania - stan obciążenia



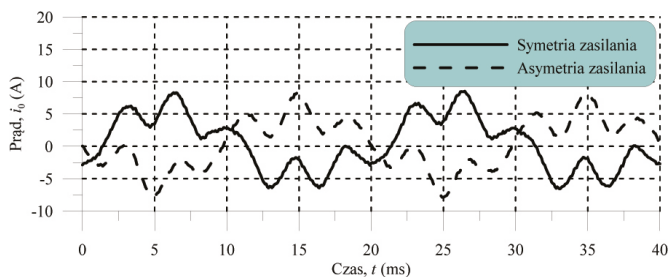
Rys. 6. Przebieg prędkości drgań przy asymetrii zasilania - stan obciążenia



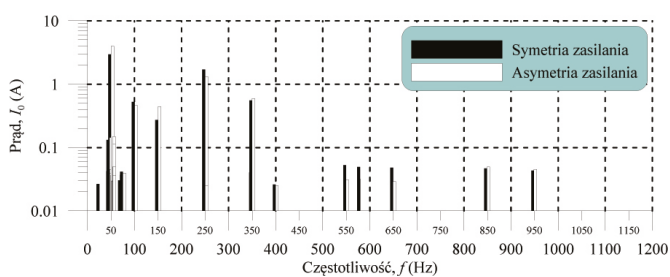
Rys. 7. Przebieg momentu przy symetrii i asymetrii zasilania

Badania przeprowadzono w taki sposób, aby nie przekraczać prądu znamionowego silnika dla każdej z faz, dlatego przy asymetrycznym zasilaniu średni moment ma mniejszą wartość.

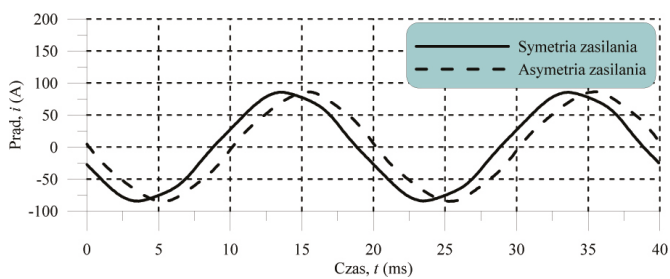
Poniżej przedstawiono porównanie przebiegów czasowych prądów (rys. 8 i 10) dla symetrycznego oraz niesymetrycznego zasilania silnika z magnesami trwałymi oraz porównanie widm częstotliwościowych – rysunki 9 oraz 11.



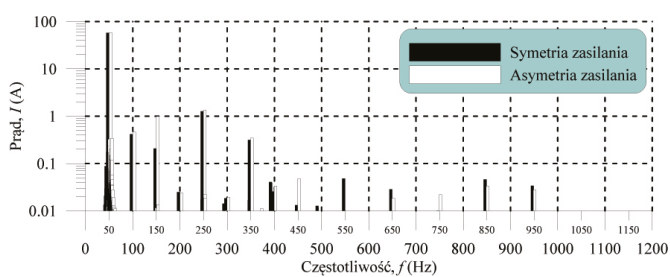
Rys. 8. Przebieg prądu przy symetrii i asymetrii zasilania - bieg jałowy



Rys. 9. Widmo częstotliwościowe prądu przy symetrii i asymetrii zasilania - bieg jałowy



Rys. 10. Czasowy przebieg prądu przy symetrii i asymetrii zasilania - stan obciążenia



Rys. 11. Widmo częstotliwościowe prądu przy symetrii i asymetrii zasilania - stan obciążenia

Tabela 1. Prędkość drgań przy symetrii i asymetrii zasilania – bieg jałowy

	Symetria	Asymetria
v (mm/s)	0,47	0,93
v_{max} (mm/s)	1,07	1,59

Tabela 2. Moment i prędkości drgań przy symetrii i asymetrii zasilania – stan obciążenia

	Symetria	Asymetria
T_{max} (Nm)	31,53	20,46
T_{min} (Nm)	27,76	12,50
T_{pp} (Nm)	3,77	7,96
T (Nm)	29,65	16,33
v (mm/s)	1,04	1,71
v_{max} (mm/s)	2,14	3,13

Tabela 3. Wartości skuteczne prądu biegu jałowego dla 3 harmoniczej

Składowa	Symetria	Asymetria
$I_{0,150}$ (mA)	271,2	445,8

Tabela 4. Wartości skuteczne dla poszczególnych składowych – stan obciążenia

Składowa	Symetria	Asymetria
I_{150} (mA)	206,0	992,0
I_{450} (mA)	13,0	47,0
I_{750} (mA)	10,0	22,0

Na podstawie wyników w tabeli 3 można zauważyć, że przy niesymetrycznym zasilaniu silnika PM następuje wzrost wartości 3 harmoniczej prądu o 64%.

Na podstawie wyników w tabeli 4 stwierdzić można, że przy niesymetrycznym zasilaniu silnika PM następuje wzrost wartości niektórych składowych prądu. Dla trzeciej harmoniczej zaobserwowano zwiększenie wartości o 382%.

4. Podsumowanie

Przedstawione wyniki badań ukazują, że asymetria zasilania silnika wzbudzanego magnesami trwałymi powoduje pojawienie się zwiększonej pulsacji momentu, co ma swoje odzwierciedlenie w zwiększeniu poziomu wibracji. W przedstawionym przykładzie wartość prędkości drgań przy zastosowanej asymetrii zasilania zwiększyła się o 98% na biegu jałowym oraz o 64% w stanie obciążenia.

Opisana analiza problemu pozwoliła opisać równaniem matematycznym (6) zestaw częstotliwości harmoniczych w sygnałach własnych maszyny, a więc wyznaczyć marker dla opisanego zjawiska [5].

$$f_k = (2k - 1) \frac{n p}{20} \quad (6)$$

gdzie:

f_k – szukane k -te harmoniczne;

p – liczba par biegunów;

k – liczba naturalna;

n – prędkość obrotowa.

Na podstawie analizy prądu zauważyć można, iż zarówno w przypadku biegu jałowego, jak również stanu obciążenia trzecia harmoniczna zwiększyła swoją wartość – odpowiednio o 64% oraz o 382%.

Wyselekcjonowanie równania (6) pozwoliło na uzupełnienie przedstawionego wcześniej modelu matematycznego, co może ułatwić analityczną analizę powyższego zagadnienia.


$$e_{U2}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} (E_k \cdot \sin(2\pi \cdot f_k \cdot t + \varphi_k)) \quad (7)$$

$$e_{V2}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} (E_k \cdot \sin(2\pi \cdot f_k \cdot t + \varphi_k - \frac{2\pi}{3})) \quad (8)$$

$$e_{W2}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} (E_k \cdot \sin(2\pi \cdot f_k \cdot t + \varphi_k + \frac{2\pi}{3})) \quad (9)$$

Literatura

- [1] GORYCA Z., ZIÓŁEK M., MALINOWSKI M.: *Moment zaczepowy wielobiegunowej maszyny z magnesami trwałymi*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 88/2010.
- [2] PISTELOK P., ROSSA R.: *Generatory synchroniczne z magnesami trwałymi dedykowane dla małych elektrowni wodnych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 2/2015.
- [3] BARAŃSKI M.: *Problem drgań w generatorach wzbudzanych magnesami trwałymi przy pracy z asymetrycznym obciążeniem – analiza sygnałów własnych*. „Przegląd Elektrotechniczny” 11/2015.
- [4] BARAŃSKI M., DECNER A., POLAK A.: *Selected Diagnostic Methods of Electrical Machines Operating in Industrial Conditions*. IEEE TDEI, 5/2014.
- [5] BARAŃSKI M., GLINKA T.: *Sposób diagnozowania drgań wzbudzanych asymetrią obciążenia w prądnicach elektrycznych z magnesami trwałymi*. Zgłoszenie patentowe P. 411942.

 Marcin Barański

Institut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL

Katowice

artykuł recenzowany

Wybrane stany przejściowe silników indukcyjnych

Adam Sołbut

1. Wstęp

Modelowanie numeryczne różnych stanów pracy maszyn elektrycznych jest obecnie wygodnym i często używanym rozwiązaniem umożliwiającym przewidywanie zachowania się rzeczywistych maszyn przy różnych warunkach zasilania i obciążenia [1]. Do budowy programów symulacyjnych często wykorzystuje się pakiety oprogramowania komercyjnego, takie jak np. środowisko Matlab/Simulink, PSpice i inne. Alternatywnym rozwiązaniem jest tworzenie własnych oryginalnych aplikacji z wykorzystaniem języków ogólnego przeznaczenia (C, C++, C#). W niniejszym artykule do tworzenia programu symulacyjnego użyto oryginalnej, autorskiej biblioteki klas [3, 4] napisanych w języku C++. Aplikacje tworzone na podstawie niniejszej biblioteki charakteryzują się wieloma zaletami, takimi jak np. możliwość zapisu wyników modelowania do formatu plików akceptowanego przez autorski program Anagraf.

2. Obsługa programu

2.1. Uwagi ogólne

Program przeznaczony jest do modelowania pracy silnika indukcyjnego w wybranych stanach dynamicznych. Możliwy jest podgląd wybranych wielkości w postaci przebiegów wybranych wielkości w osi 0Y i w osi 0X. W programie wykorzystano ogólnie znany model maszyny indukcyjnej [2] z modyfikacjami umożliwiającymi prezentację wybranych zagadnień wykorzystywanych w pracy inżyniera. Program umożliwia m.in. dokonywanie zmian parametrów silnika w czasie symulacji. Możliwa jest także zmiana warunków początkowych zmiennych stanu, jak i skokowa zmiana wartości. Możliwy jest podgląd wybranych wielkości w modelu dynamicznym oraz jednocześnie odpowiednik tych wielkości obliczanych ze schematu zastępczego w stanie ustalonym oraz ze wzoru Klossa.

2.2. Obsługa programu

Po uruchomieniu programu „Asynch_c” na ekranie komputera pojawi się okno pokazane na rys. 1. Wybór poszczególnych opcji programu możliwy jest poprzez wciśnięcie przycisków na pasku narzędzi lub wybór opcji menu.

Domyślnie ustawiona jest opcja automatycznego dopasowania skali. W przypadku wyłączenia tej opcji należy ustawić zakres skali dla obu osi poprzez wpisanie wartości wielkości maksymalnych i minimalnych (Min i Max). W celu porównania różnych wielkości lub tych samych wielkości obliczonych z różnych modeli matematycznych możliwy jest wybór przebiegów dodatkowych w osi 0Y – możliwe są trzy dodatkowe wielkości

Streszczenie: W artykule przedstawiono możliwości modelowania stanów przejściowych silników klatkowych zasilanych napięciem sinusoidalnym z wykorzystaniem oryginalnego oprogramowania (asynch.c). Program umożliwia prezentację przebiegów dynamicznych na tle charakterystyk mechanicznych obliczanych na podstawie pełnego schematu zastępczego oraz równania Klossa. Możliwe jest także modelowanie wielu różnych sposobów zasilania maszyny indukcyjnej oraz różnych sposobów hamowania (jednofazowego, dynamicznego), nawrotu silnika oraz uwzględnienie dowolnej niesymetrii napięcia zasilającego. Do budowy programu symulacyjnego użyto autorskich rozwiązań programowych, ułatwiających tworzenie programów symulacyjnych na podstawie zapisu problemu w postaci nieliniowych równań stanu. Oryginalne rozwiązania programowe umożliwiają zmianę parametrów oraz wartości zmiennych stanu w czasie symulacji.

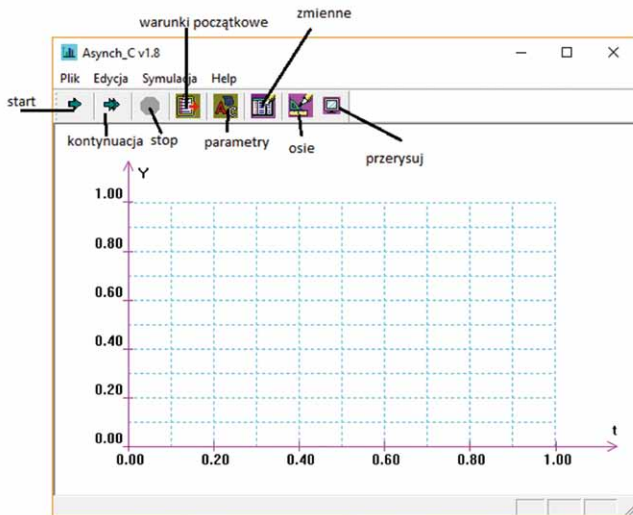
Słowa kluczowe: maszyny indukcyjne, stany przejściowe

SELECTED TRANSIENT STATES OF INDUCTION MOTORS

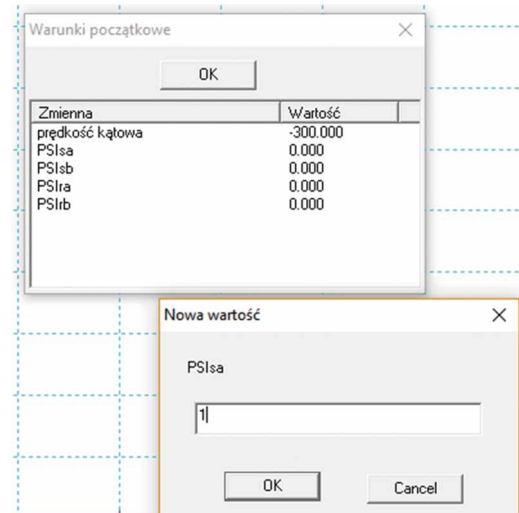
Abstract: *Sinusoidal voltage-fed squirrel-cage motor transient states modeling possibilities using original author's software (asynch.c) are presented in the paper. The program provides dynamic waveforms presentation, on the background of mechanical characteristics, calculated based on equivalent circuit and the Kloss's equation. Modeling of many different induction motor's supplying methods, braking methods (1-phase, dynamic), motor's reversion and any kind of supplying voltage asymmetry is also possible. For simulation program realization, original author's programming solutions providing simulation algorithms building have been used, basing on non-linear state equations description. Original programming solutions provide parameter and state variables values changing during the simulation time.*

Keywords: induction machines, transient state

(Y1 – czerwony, Y2 – zielony i Y3 – niebieski). Główny przebieg w osi 0Y ma kolor czarny. Okno posiada także przycisk umożliwiający wybór opcji zaawansowanych (rys. 3). W ramach paska narzędzi dostępne są opcje podobne jak w opcji menu „symulacja”:



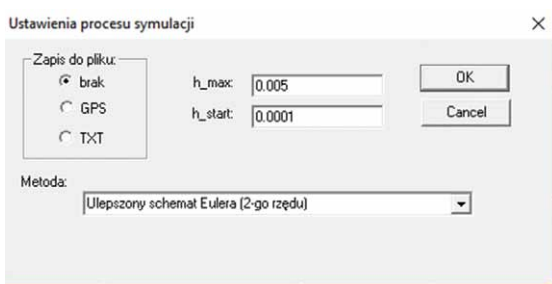
Rys. 1. Okno główne programu asynch_c



Rys. 4. Widok okna po wyborze opcji „warunki początkowe”



Rys. 2. Widok okna po wciśnięciu przycisku (opcji menu) „start”



Rys. 3. Widok okna po wciśnięciu przycisku „zaawansowane”

- **start**: uruchamia proces symulacji z wcześniejszym wyborem wielkości do podglądu graficznego, ustawienie opcji związanych z grafiką, czasem symulacji oraz wyborem innych opcji istotnych dla sposobu wykonywania modelowania numerycznego (rys. 2);
- **kontynuacja**: zwiększenie czasu symulacji o następny okres czasu wybranego przy starcie i wykonanie obliczeń dla tak zwiększonego czasu;
- **stop**: zatrzymuje proces symulacji w dowolnej chwili, umożliwiając zmianę parametrów, zmiennych stanu i innych opcji;

- **warunki początkowe**: umożliwia zmianę wartości początkowych na zmienne stanu – domyślnie są to wielkości równe zero;
- **parametry**: okno (rys. 4) dopuszcza zmianę wartości parametrów modelu matematycznego oraz parametrów określających sposób zasilania i obciążenia maszyny;
- **zmiennie**: okno pokazane na rys. 6 umożliwia zmianę wartości zmiennych stanu w dowolnym momencie czasu (po zatrzymaniu symulacji) oraz podgląd wartości pozostałych zmiennych używanych w programie;
- **osie**: okno zmiany parametrów osi (skala ręczna/automatyczna i inne);
- **przerysuj**: przycisk powoduje przerysowanie zawartości okna graficznego.

Wciśnięcie przycisku *start* uruchamia okno (rys. 2), w którym możemy dokonać wyboru wielkości rysowanych na ekranie w osi OY i OX . Dodatkowo ustawiany jest okres czasu (czas symulacji), dla którego będzie wykonywany proces symulacji.

Opcje zaawansowane umożliwiają wybór metody numerycznego rozwiązywania równań różniczkowych (*metoda*), ustawienie wartości kroku całkowania (początkowego h_{start} i maksymalnego h_{max}). Znaczenie tych wielkości jest uwarunkowane wyborem metody całkowania. Domyślnie obliczenia wykorzystują ulepszony schemat Eulera 2. rzędu o stałym kroku całkowania. W przypadku chęci dokonywania dokładniejszych analiz matematycznych lub dokładniejszej analizy przebiegów i ich prezentacji w wybranych fragmentach czasu możliwy jest zapis wszystkich zmiennych do pliku w formatach akceptowanych przez program ANAGRAF. Format tekstowy (TXT) umożliwia wykorzystanie wyników modelowania także w innych aplikacjach komputerowych. Domyślnie zapis do pliku jest wyłączony.

Kolejny przycisk (warunki początkowe – rys. 4) pozwala na ustawienia wartości początkowych zmiennych stanu. Domyślnie wartości te są równe zero. Oczywiście jest, że mogą to być tylko wartości używane w programie jako zmienne stanu. Jako zmienne stanu używane są w programie wielkości prędkości kątowej oraz strumieni skojarzonych w osi alfa i beta wektorowego modelu matematycznego silnika indukcyjnego dla stojana ($PSIsa$, $PSIsb$) i wirnika ($PSIra$ i $PSIrb$). Jedną z ważniejszych opcji programu jest możliwość ustawienia parametrów wykorzystywanych w procesie modelowania silnika (rys. 5). Dostępne są następujące parametry:

- Ua , Ub , Uc – wartości skuteczne napięć fazowych w kolejnych fazach silnika. Program służy do modelowania pracy silnika przy zasilaniu sinusoidalnym;
- *Częstotliwość* – częstotliwość napięcia zasilającego;
- *Kierunek* – zadany kierunek wirowania pola magnetycznego: 0 – prawy; 1 – lewy;
- *Zasilanie jednofazowe* – wpisanie wartości 0 (domyślnie) wymusza zasilanie napięciem trójfazowym, przy którym przesunięcie fazowe kolejnych napięć fazowych jest równe 120° . Wpisanie wartości 1 wymusza zasilanie napięciem jednofazowym. W tym przypadku przyjmuje się, że wszystkie napięcia są ze sobą w fazie. Opcja ta umożliwia np. modelowanie hamowania jednofazowego;
- Kw , $Kw2$, *Moment obciążenia_bierny*, *Moment obciążenia_aktywny* – wielkości określające wartość momentu obciążenia i ich zależność od prędkości obrotowej. Wartość momentu obciążenia o charakterze biernym liczona jest wg zależności: $M_b = \text{Moment obciążenia_bierny} + Kw \times \text{prędkość kątowa} + Kw2 \times \text{prędkość kątowa}^2$

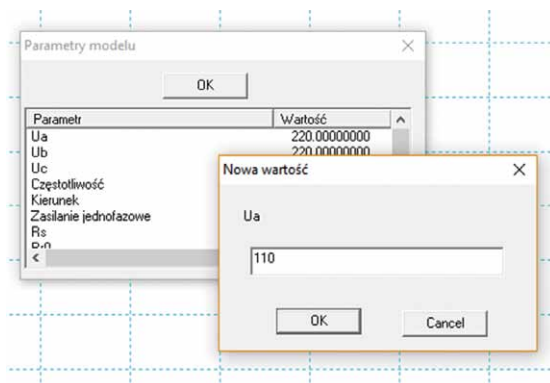
Następujące parametry mają związek z parametrami modelu silnika:

- rezystancja stojana;
- rezystancja wirnika;
- liczba par biegunów silnika;
- indukcyjność rozproszenia stojana;
- indukcyjność rozproszenia wirnika;
- indukcyjność główna;
- moment bezwładności.

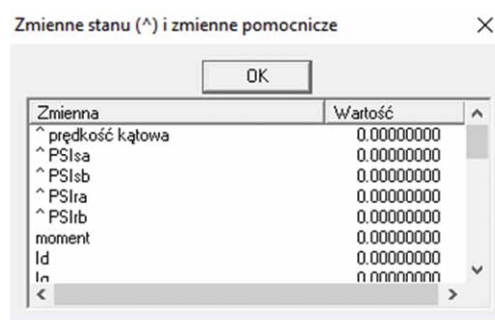
Aktualna wersja programu umożliwia uproszczoną prezentację wpływu zjawiska wypierania prądu w klatce wirnika. W modelu przyjęto prostokątny kształt żłobka. Parametrem, który wymusza obliczenia rezystancji modelu zależnie od częstotliwości prądu w wirniku, jest wysokość pręta (h). Wpisanie wartości większej od zera powoduje uwzględnienie zmian rezystancji pręta wirnika od jego wysokości oraz częstotliwości wynikającej z prędkości wirowania wirnika i częstotliwości napięcia stojana. Dostępna jest opcja podglądu wartości zmiennych stanu i innych wielkości od nich zależnych (rys. 6).

Dostępne są następujące zmienne stanu (wyróżnione prefiksem ^) oraz pozostałe zmienne od nich zależne:

- *prędkość kątowa* – w jednostkach [rad/s];
- $PSIsa$, $PSIsb$, $PSIra$, $PSIrb$ – strumienie stojana i wirnika w zastępczym układzie dwufazowym alfa/beta;

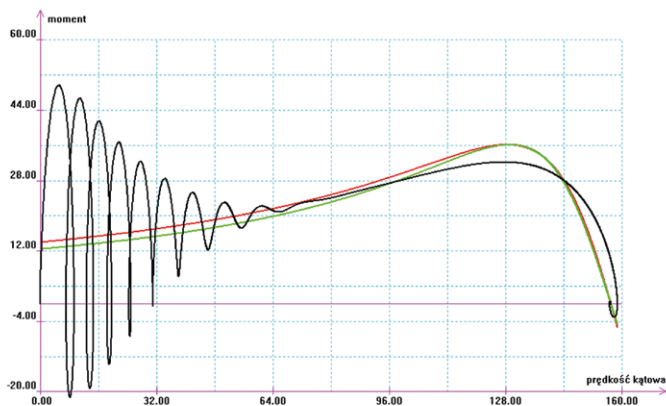


Rys. 5. Widok okna po wyborze opcji „parametry modelu”

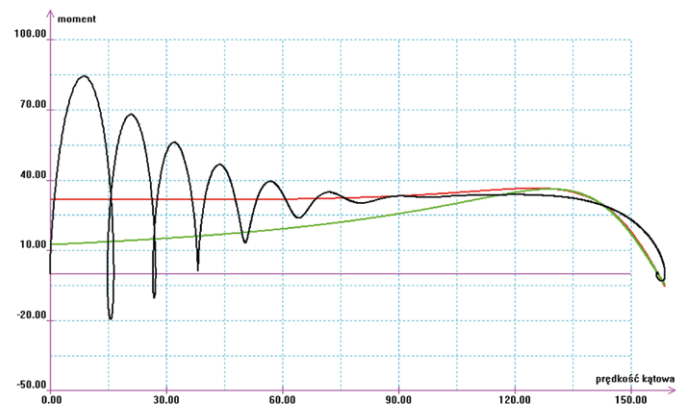


Rys. 6. Widok okna po wyborze opcji „zmienne”

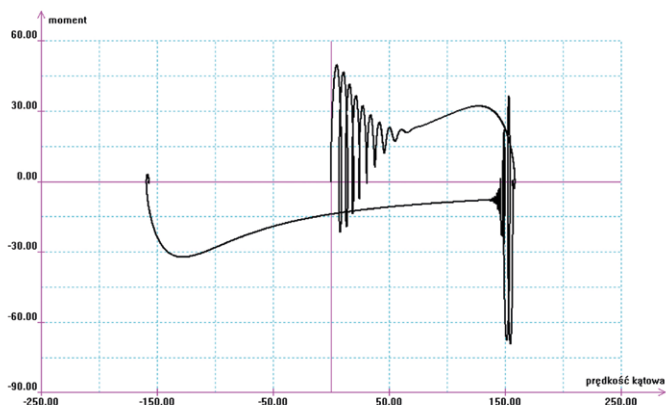
- *moment* – moment elektromagnetyczny silnika (w stanie przejściowym);
- *moment ustalony* – moment obliczany z charakterystyki mechanicznej na podstawie schematu zastępczego dla składowej zgodnej i przeciwnej. Przyjęto, że silnik połączony jest w układzie trójprzewodowym i pomijane są zjawiska związane ze składową zerową prądu;
- *moment obciążenia* – sumaryczny moment obciążenia – suma momentu biernego i czynnego w przypadku prędkości dodatniej i różnica momentu aktywnego i biernego dla prędkości ujemnej;
- *strumień stojana* – moduł wektora strumienia stojana;
- id , iq – prądy stojana w układzie dq zorientowanym wg strumienia wirnika;
- *moduł wektora prądu* – moduł wektora prądu stojana;
- Usa , Usb , Isa , Isb , Ira , Irb – odpowiednio składowe napięcia stojana, prądów stojana oraz prądów wirnika w układzie alfa/beta. Przyjęty sposób transformacji (stosowany z praktyce) zapewnia, że wartości w fazie alfa mają wartości chwilowe równe wielkościom w fizycznej fazie A silnika;
- IsB , IsC , UsB , UsC – odpowiednio prądy i napięcia fazowe w fazie B i C;
- kR – współczynnik wzrostu rezystancji wirnika w zależności od częstotliwości i wysokości pręta;
- kL – współczynnik zmian indukcyjności rozproszenia wirnika w zależności od częstotliwości i wysokości pręta.



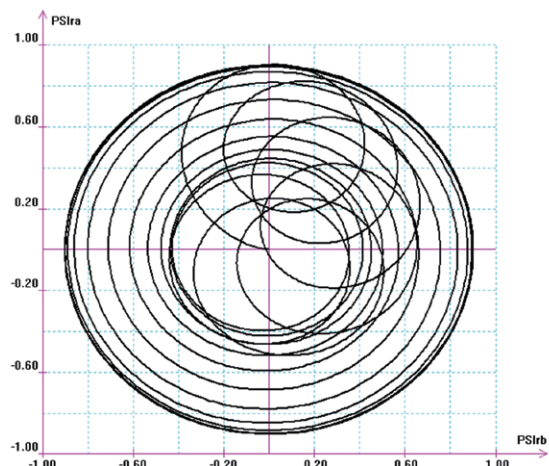
Rys. 7. Przebiegi sygnałów momentu (czarny), momentu w stanie ustalonym (czerwony) oraz momentu liczonego ze wzoru Klossa (zielony) w funkcji prędkości kątowej



Rys. 9. Przebiegi sygnałów momentu (czarny), momentu w stanie ustalonym (czerwony) oraz momentu liczonego ze wzoru Klossa (zielony) w funkcji prędkości kątowej dla silnika głębokożłobkowego



Rys. 8. Przebieg momentu funkcji prędkości kątowej w czasie rozruchu i podczas wykonania nawrotu silnika



Rys. 10. Portret fazowy strumieni skojarzonych z fazami alfa - beta wirnika

3. Przykładowe wyniki modelowania

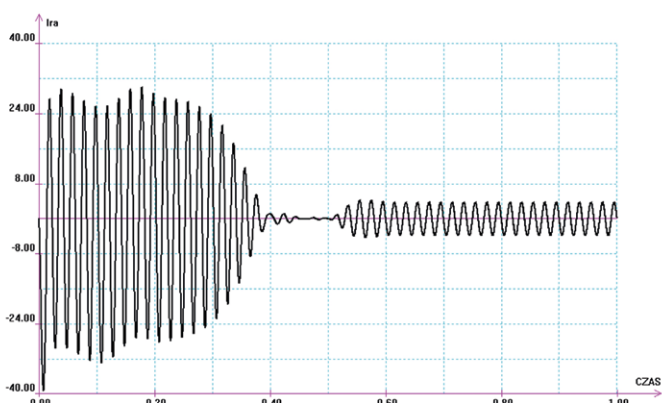
Na rysunkach 7–14 pokazano przykładowe możliwości prezentacji działania maszyny indukcyjnej. Rys. 7 pokazuje wartość momentu liczonego z modelu dynamicznego (czarny), czerwonym kolorem pokazano wartość momentu w stanie ustalonym obliczonego z pełnego schematu zastępczego w stanie ustalonym. Kolor zielony prezentuje wartość momentu obliczanego z uproszczonego wzoru Klossa. Na rys. 8 pokazano kolejno rozruch silnika bez momentu obciążenia, a po rozruchu efekt wymuszenia zmiany kierunku wirowania pola magnetycznego, czyli tzw. nawrót silnika.

Na rys. 9 pokazano rozruch silnika głębokożłobkowego przy założeniu prostokątnego kształtu przekroju pręta. Uwzględnienie zmian parametrów modelu w czasie rozruchu polega na szacowaniu częstotliwości prądu w klatce wirnika przy danej prędkości kątowej oraz obliczeniu wzrostu rezystancji i zmianie reaktancji rozproszenia wg zależności podanej w pracy [5].

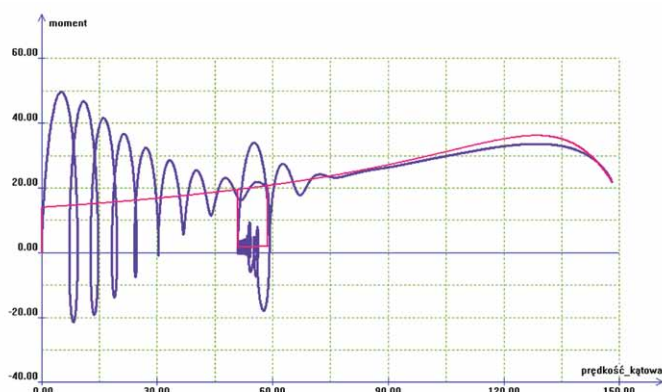
Program umożliwia obserwację wielkości niedostępnych pomiarowo. Np. rys. 10 przedstawia zależność strumieni skojarzonych z uzwojeniami wirnika (w modelu wektorowym maszyny indukcyjnej) w fazach alfa i beta w czasie rozruchu silnika. Rys. 11 przedstawia wartość chwilową prądu wirnika w przypadku rozruchu oraz przy obciążeniu silnika momentem znamionowym po upływie 0,5 s od momentu włączenia silnika do sieci.

Rysunek 12 pokazuje wpływ zapadu napięcia, polegającego na 50% obniżeniu napięcia w jednej fazie, na przebiegi czasowe prądów silnika w czasie rozruchu.

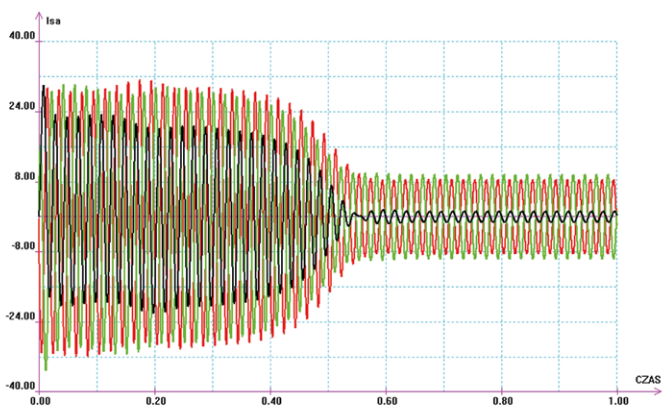
Kolejne rysunki to modelowanie 0,2 s zaniku napięcia w jednej fazie sieci w czasie rozruchu silnika obciążonego momentem o charakterystyce wentylatorowej. Rys 13 przedstawia zależność momentu od prędkości kątowej, natomiast rys. 14 wartość chwilową prądu w jednej fazie.



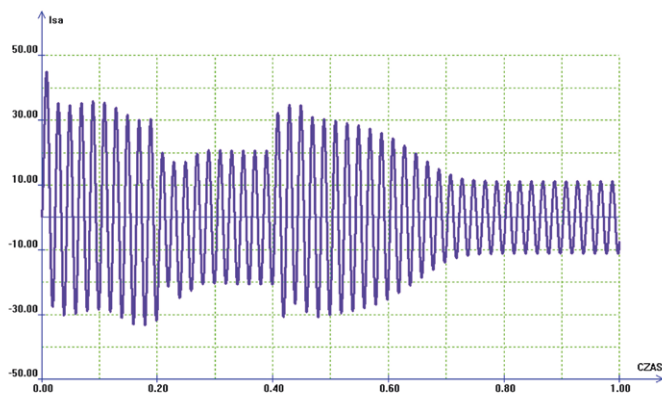
Rys. 11. Przebieg prądu wirnika w czasie rozruchu i przy obciążeniu momentem znamionowym po 0,5 s od włączenia silnika



Rys. 13. Przebieg momentu silnika od prędkości obrotowej w przypadku zaniku napięcia w jednej fazie w czasie rozruchu



Rys. 12. Przebiegi prądów fazowych silnika przy rozruchu z obniżoną o 50% wartością napięcia w jednej fazie



Rys. 14. Przebieg prądu w fazie silnika w przypadku zaniku napięcia w jednej fazie w czasie rozruchu

4. Wnioski

Prezentowana aplikacja, dostępna na stronie internetowej autora, jest wygodnym, łatwym w użyciu narzędziem umożliwiającym modelowanie pracy silnika indukcyjnego w różnych warunkach zasilania i obciążenia. Od wielu lat z powodzeniem jest wykorzystywana na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej w dydaktyce przedmiotów Maszyny Elektryczne oraz Napęd Elektryczny. Program umożliwia porównanie wyników analiz pracy silnika klatkowego oraz pierścieniowego dla modeli w stanach ustalonych oraz modelu dynamicznego. Może być wykorzystywany do oceny zachowania się rzeczywistych maszyn używanych w przemyśle.

Literatura

- [1] GLINKA T.: *Model dynamiczny silnika indukcyjnego klatkowego*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 1(117)/2018.
- [2] SOŁBUT A.: *Maszyny elektryczne. Cz. 1. Transformatory. Maszyny indukcyjne*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2017.

- [3] SOŁBUT A.: *Squirrel-cage motor drive dynamics modeling including chosen damages – programming tools*. Archives of Electrical Engineering, Vol. 59, nr 3/4 (2010).
- [4] SOŁBUT A.: *Programy symulacyjne z wykorzystaniem technik programowania obiektowego*. „Nowa Elektrotechnika” 1/2007.
- [5] TUROWSKI J.: *Elektrodynamika techniczna*. PWN, Warszawa 2014.

Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr S/WE/1/2018 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.

dr hab. inż. Adam Sołbut
Politechnika Białostocka
Wydział Elektryczny
e-mail: a.solbut@pb.edu.pl

artykuł recenzowany