

1. Analiza rozruchu silnika indukcyjnego

1.1. Wprowadzenie

Silnik elektryczny jest podstawowym elementem układu napędowego, stosowanym w różnorodnych urządzeniach powszechnego użytku i w instalacjach przemysłowych. Rozruchowi silnika towarzyszy znaczny wzrost prądu (prąd rozruchowy), co wywołuje, niekiedy groźne, zapady napięcia i komplikuje pracę ich zabezpieczeń. Zamieszczony poniżej przykład, ilustruje sposób określania parametrów modelu silnika indukcyjnego oraz ich wykorzystania w modelu ATP-EMTP. Przeprowadzone symulacje pokazują przebieg zjawisk elektromagnetycznych i mechanicznych, związanych z rozruchem silnika klatkowego.

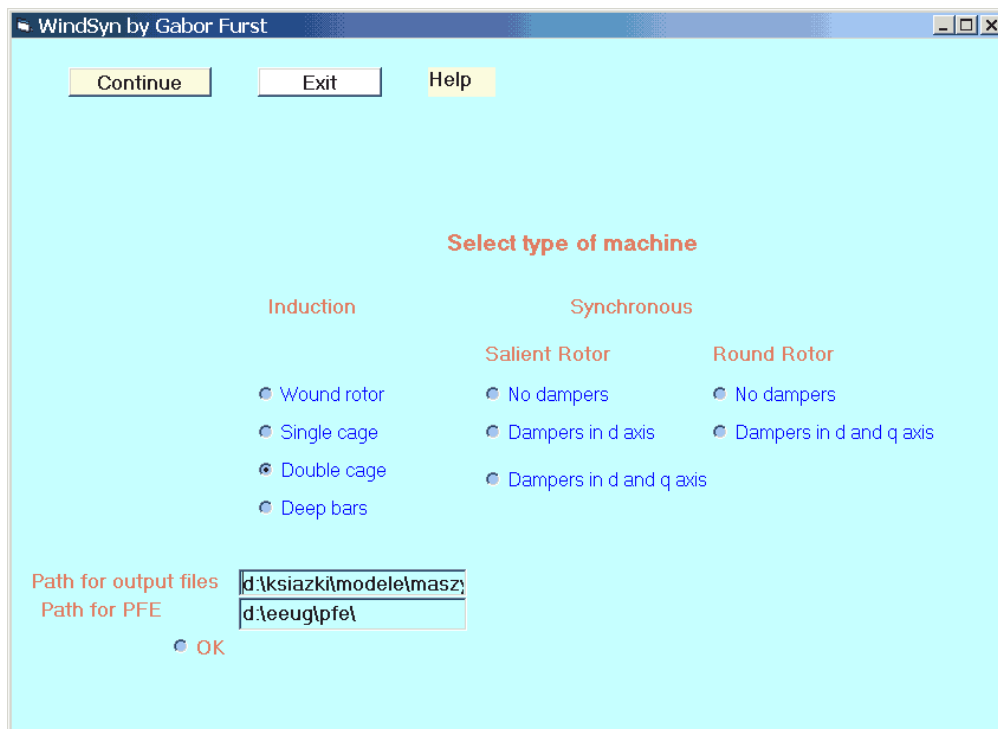
1.2. Model matematyczny silnika indukcyjnego

Parametry, zatem i właściwości silników indukcyjnych, mogą się dosyć istotnie różnić, w zależności od szczegółów ich budowy. W charakterze przykładu rozpatrzmy model silnika klatkowego, którego parametry są następujące:

| | |
|-------------------------|--------|
| Moc znamionowa | 2,8MW |
| Napięcie znamionowe | 10kV |
| Liczba par biegunów | 4 |
| Współczynnik mocy | 0,9 |
| Sprawność | 0,98 |
| Poślizg znamionowy | 1% |
| Prąd rozruchowy, j.w. | 4 |
| Moment rozruchowy, j.w. | 0,9 |
| Stała inercji H | 0,97s. |

Do obliczenia parametrów silnika wygodnie jest skorzystać z programu WindSyn, który jest przeznaczony do współpracy z systemem WINDOWS. Jest on dostępny w pakiecie z podstawowym programem ATP-EMTP. Po zainstalowaniu programu i przygotowaniu niezbędnych podstawowych danych silnika, postępujemy zgodnie z następującą procedurą.

1. Uruchomić program. Na pierwszym ekranie (rys.1) należy podać adres dostępu do używanego edytora tekstowego oraz adres kartoteki, w której umieszczone zostaną pliki wyjściowe po wykonaniu obliczeń (w dolnej części okna). Przy czytaniu wprowadzanych danych liczbowych, w programie korzysta się z lokalnie ustawionego formatu zapisu liczb dziesiętnych (przecinek ',' lub kropka '.' oddzielająca część ułamkową). Ponieważ przetwarzanie w programie prowadzone jest zgodnie z formatem anglosaskim (kropka dziesiętna), więc przed rozpoczęciem obliczeń należy ustawić w systemie WINDOWS (*Panel sterowania/Opcje regionalne*) zapis liczb dziesiętnych w formacie z kropką dziesiętną. Następnie, należy wybrać odpowiedni rodzaj analizowanej maszyny. W tym przypadku zaznaczono silnik indukcyjny z dwoma kłatkami na wirniku (*Double cage*).



Rys.1.

2. W kolejnym kroku należy wprowadzić szczegółowe dane silnika (rys..2). Najważniejsze z nich, to wielkości znamionowe: moc (*Rated Power*), KM (ang. *horse power, hp*), częstotliwość zasilającego napięcia, napięcie (wartość skuteczna napięcia międzyfazowego), prędkość obrotowa (zależna od liczby par biegunów maszyny i częstotliwości sieci) oraz współczynnik mocy.

Rys.2.

Przy braku któregoś z parametrów zaleca się pozostawienie wartości podpowiadanej przez program. Należy także podać nazwę zbioru dyskowego, w którym zostaną umieszczone wyniki obliczeń (parametry modelu silnika).

3. W ostatnim etapie należy określić wymagane parametry, związane z rodzajem symulacji. Można tu wprowadzić dodatkowe źródło prądowe, odzwierciedlające zmianę obciążenia silnika (ang. *Extra load*) i moment jego załączenia (ang. *Time of extra load*) – rys..3. Ponadto: sposób określenia warunków początkowych (w przykładzie wybrano *Autoinitialization*, co oznacza, że odpowiednie parametry stanu początkowego zostaną określone na podstawie początkowego stanu ustalonego (w innym przypadku użytkownik powinien podać te parametry jako dane modelu silnika). Zauważmy, że w rozpatrywanym przykładzie, początkowy poślizg (ang. *Initial slip*) przyjmuje wartość 99,99% w miejsce wartości 100% (w stanie początkowym silnik jest zatrzymany), aby uniknąć błędu przepełnienia numerycznego. Model silnika jest opisany równaniami o zmiennych współczynnikach (ze względu na przekształcenie $dq0$), a w ogólnym przypadku, jest to model nieliniowy (przy uwzględnieniu nasycenia żelaza). Do numerycznego rozwiązywania tych równań wybrano metodę kompensacji.

W rezultacie, otrzymuje się dwa pliki wyjściowe:

- *INDMOT.LIS*, z danymi wejściowymi oraz z obliczonymi parametrami modelu;
- *INDMOT.PCH*, który przedstawia plik wejściowy modelu w formie gotowego bloku modułowego, który może być dołączany do głównego pliku danych przez zastosowanie dyrektywy *\$INCLUDE*.

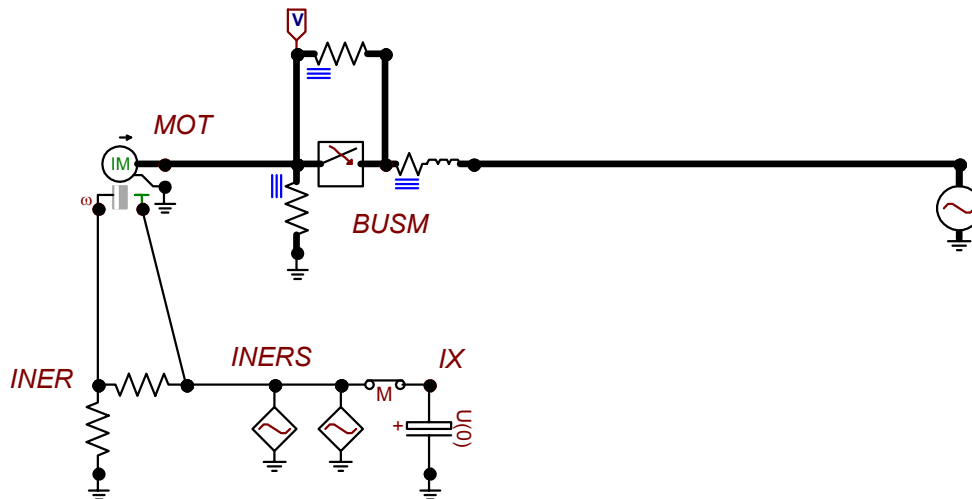
Rys..3.

1.3. Analiza rozruchu silnika

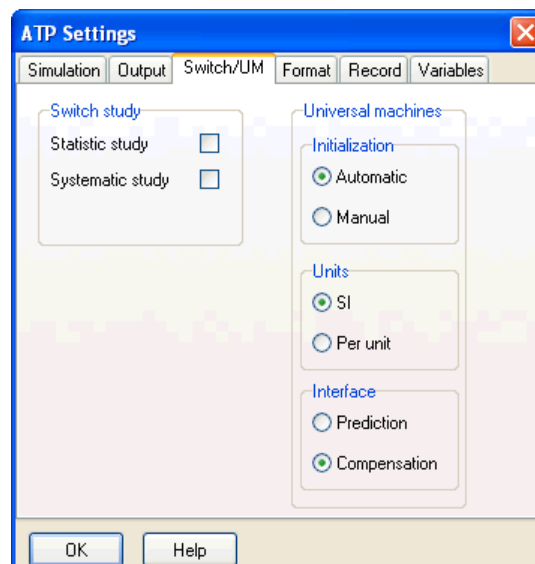
Test rozruchu silnika był prowadzony z wykorzystaniem modelu, jak na rys..4. Pliki związane z tym testem mają nazwę *SIL_INDA* z odpowiednimi rozszerzeniami. W celu ustalenia właściwych warunków rozruchu silnika, należy w oknie *ATP Settings* (*ATP/Settings/Switch/UM* – rys.5) wybrać opcję: *Initialization – Automatic*. Wówczas, warunki początkowe symulacji zostaną określone automatycznie na podstawie stanu

ustalonego modelu dla czasu $t=0$. (przed uruchomieniem symulacji). W tym celu, wyłącznik generatora powinien być otwarty na początku symulacji. Właściwa informacja o zasilającym napięciu jest przekazywana przez równoległe włączenie rezystancji o dużej wartości. Rozruch silnika rozpoczyna się po załączeniu wyłącznika (w rozpatrywanym modelu zachodzi to dla $t=0,1s$).

Kondensator w obwodzie reprezentującym układ mechaniczny odzwierciedla wartość momentu inercji obracającego się wirnika: $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2 \leftrightarrow 1 \text{ F}$. Wartość napięcia początkowego na kondensatorze odpowiada początkowej prędkości kątowej wirnika: $\omega, 1/\text{s} \leftrightarrow U_C, \text{V}$ - w tym przypadku $U_C(0)=0$.



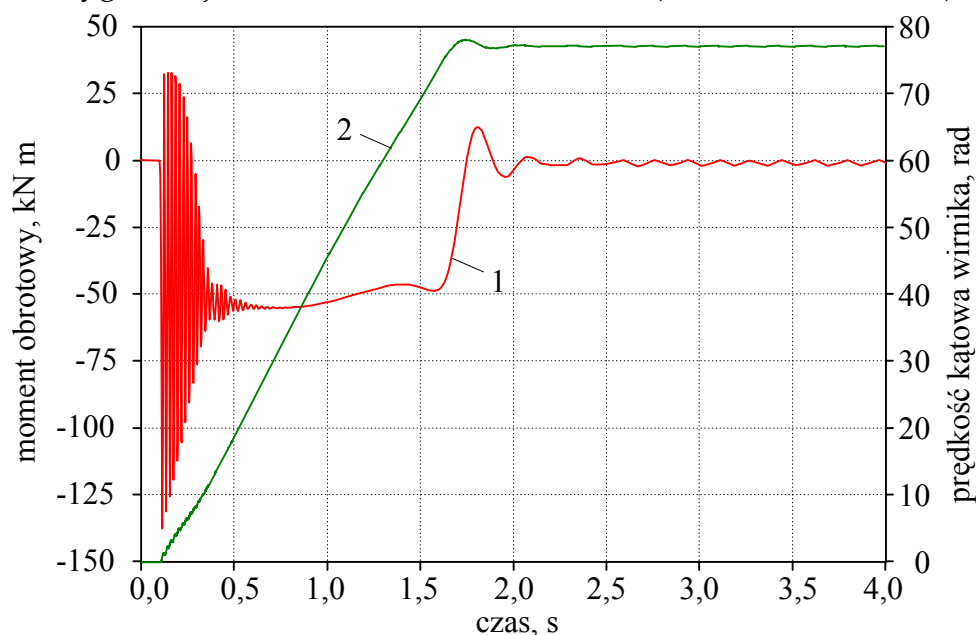
Rys.4. Schemat modelu sieci z silnikiem indukcyjnym – faza uruchomienia



Rys.5. Okno programu ATPDraw do ustawienia warunków symulacji rozruchu modelu maszyny uniwersalnej z automatyczną inicjalizacją

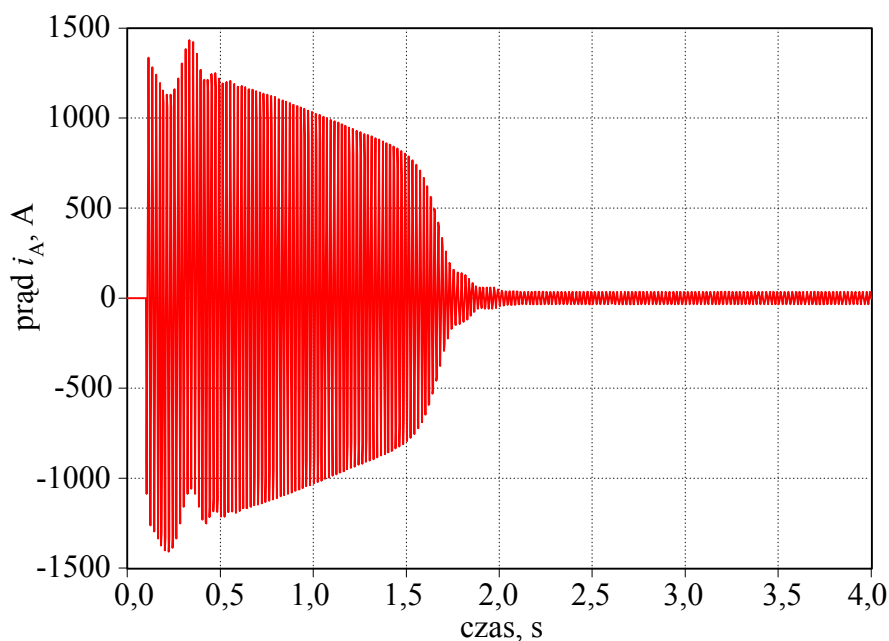
Źródła prądowe w obwodzie odzwierciedlającym układ mechaniczny silnika określają wartość momentu obciążenia. Aby uwzględnić początkową wartość tego momentu, należy użyć źródła prądu przemiennego o bardzo niskiej częstotliwości (właściwym byłoby tu zastosowanie źródła prądu stałego, ale stan początkowy sieci jest obliczany tylko dla obwodu prądu przemiennego). Zmiana obciążenia w trakcie

symulacji jest reprezentowana przez dodatkowo dołączone źródło (w rozpatrywanym przykładzie amplituda tego źródła jest bardzo mała). W przypadku zmiennego obciążenia, wygodnie jest stosować źródło sterowane (MODELS lub TACS).



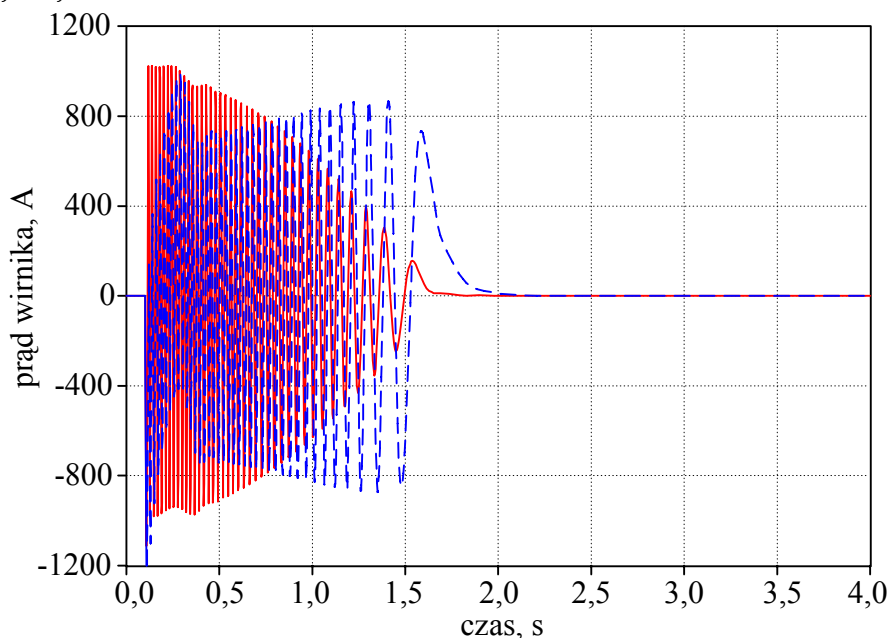
Rys.6. Zmiana momentu napędowego (krzywa 1) oraz prędkości kątowej silnika (krzywa 2) podczas startu

Przebieg zmian momentu obrotowego silnika i prędkości kątowej wirnika podczas rozruchu jest pokazany na rys.6. Widać, że rozruch nieobciążonego silnika trwa ok. 1,7 s. W tym czasie prędkość wirnika narasta niemal liniowo od zera do wartości bliskiej $50\pi/2$ rad, co odpowiada 750 obr/min. Chwilowy przebieg prądu rozruchowego stojana jest pokazany na rys.7. Po zakończeniu rozruchu prąd ten spada do niskiej wartości, odpowiadającej wartości prądu biegu jałowego silnika.



Rys.7. Przebieg prądu stojana silnika podczas rozruchu (faza A)

Przebiegi prądów w osi d obu klatek wirnika są pokazane na rys..8. Można zauważyć przeciwne kierunki narastania obu tych prądów w czasie rozruchu: w miarę wzrostu prędkości obrotowej wirnika, prąd pierwszej klatki maleje, podczas gdy prąd drugiej klatki rośnie. Po zakończeniu rozruchu, gdy poślizg jest bliski zera, oba prądy przyjmują bardzo małe wartości.



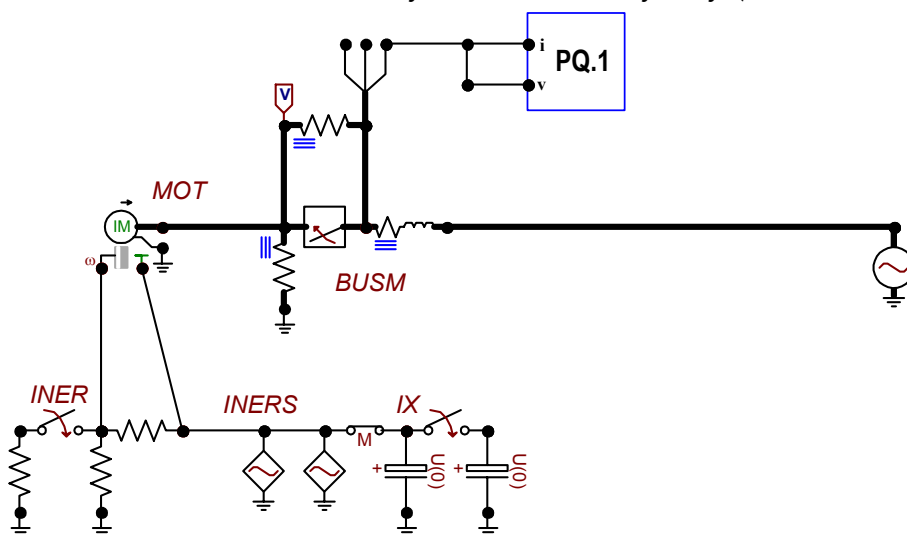
Rys.8. Prądy wirnika: i_{wd1} (linia ciągła), i_{wd2} (linia przerywana)

1.4. Analiza rozruchu i zmiany obciążenia silnika

Rozpatrzmy przypadek, gdy po rozruchu silnika, załączane jest znamionowe obciążenie. Schemat odpowiedniego modelu jest pokazany na rys..9. Wartość momentu obciążenia jest reprezentowana za pomocą źródła prądowego dołączonego do węzła INERS (w tym przypadku element z prawej strony), którego wartość jest równa:

$$I = T_{eN} = 34576,48 \text{ A},$$

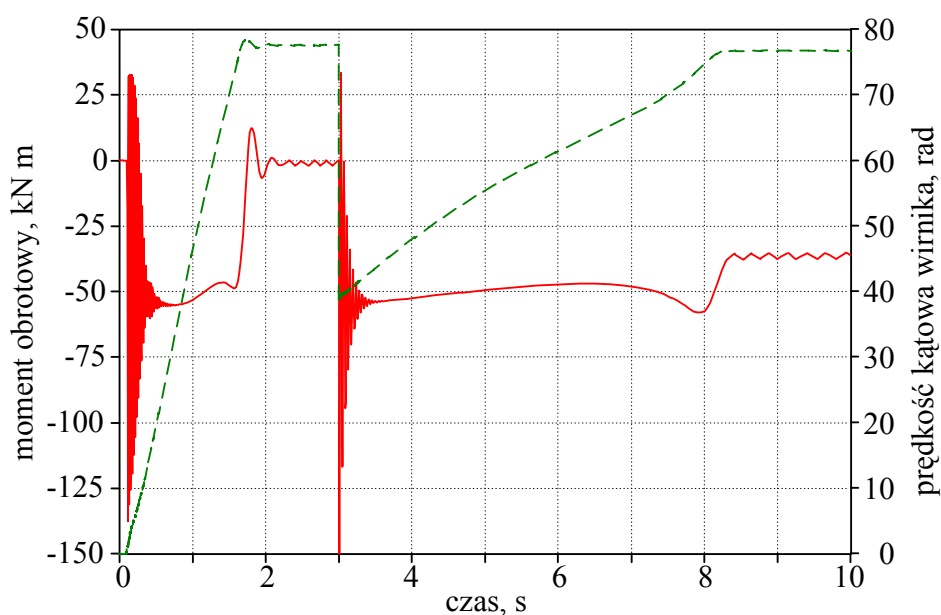
gdzie: $T_{eN} = 34576,48 \text{ Nm}$ - znamionowy moment elektryczny (w szczelinie) silnika.



Rys.9. Schemat modelu do symulacji rozruchu i obciążenia silnika

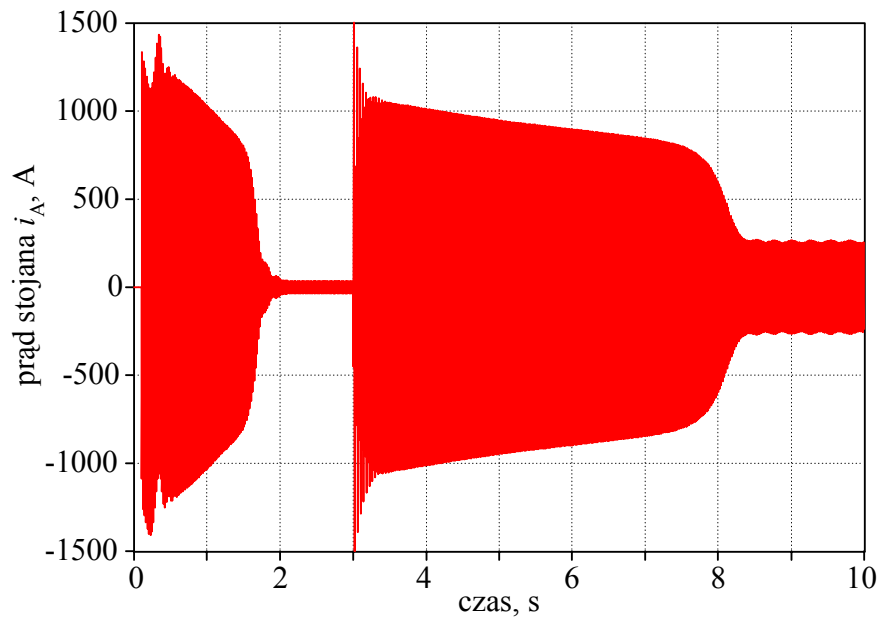
Przyjęto, że zarówno moment bezwładności, jak i współczynnik tłumienia dołączanego obciążenia są takie same, jak w przypadku rozpatrywanego silnika. Te wielkości są w modelu reprezentowane za pomocą załączanych dodatkowo: pojemności (do węzła IX) i rezystancji (INER). Czas załączenia obciążenia: $t_{obc}=3s$. W obwodzie zasilania silnika został umieszczony miernik mocy jednofazowej (zauważmy, że odwrócony został wyłącznik, aby mierzony prąd miał poprawny kierunek)). Pliki związane z tym modelem mają nazwę *SIL_INDB* z odpowiednimi rozszerzeniami.

Przebiegi momentu obrotowego oraz prędkości kątowej wirnika są pokazane na rys.10. Po załączeniu obciążenia znamionowego, prędkość obrotowa silnika chwilowo spada dosyć znacznie i odbudowuje się po czasie ok. 5 s. Można zauważyć, że ustala się ona na nieco niższym poziomie, niż dla pracy bez obciążenia (większy poślizg).



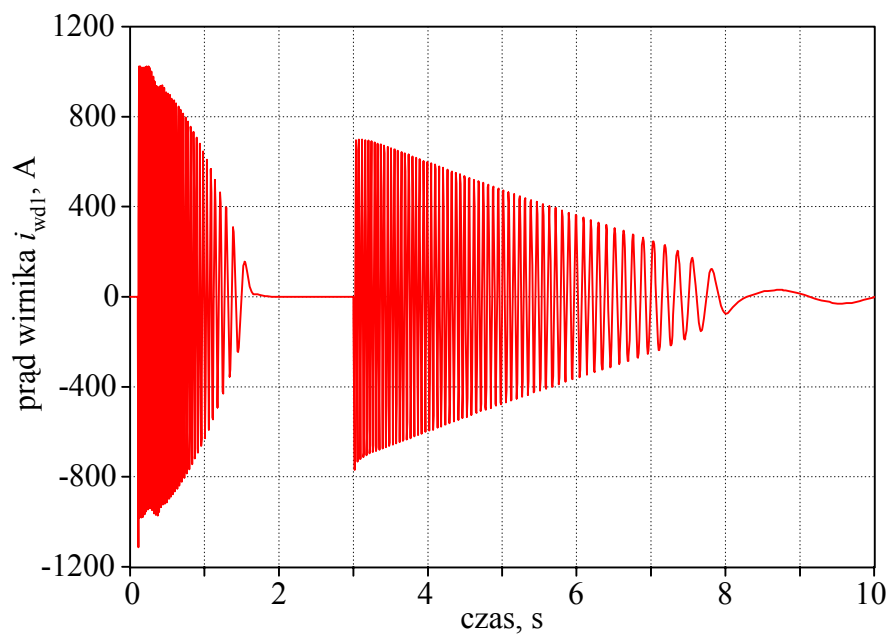
Rys.10. Przebieg momentu obrotowego (ciągła linia) oraz prędkości kątowej wirnika (linia przerywana)

Zgodnie z oczekiwaniami, zmienia się także obraz prądu stojana (rys.11).



Rys.11. Przebieg prądu stojana (faza A) podczas startu i załączenia obciążenia

Częstotliwość prądu klatki wirnika (rys..12 – prąd pierwszej klatki) zależy od wartości poślizgu i w stanie ustalonym, przy pełnym obciążeniu, jest ona mniejsza od 1 Hz.



Rys.12. Przebieg prądu wirnika