

Politechnika Śląska
Wydział Elektryczny
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych

PRACA DYPLOMOWA MAGISTERSKA

**Badania symulacyjne wektorowego układu
sterowania silnika indukcyjnego przy wykorzystaniu
programu CASPOC**

**Simulation researches of field oriented control with
asynchronous motor using Caspoc program**

AUTOR PRACY
Zbigniew Gryt

PROMOTOR
dr inż. Tadeusz Janik

Gliwice, wrzesień 2008

SPIS TREŚCI

1. WSTĘP	4
1.1. Wprowadzenie	4
1.2. Cel pracy	6
2. WPROWADZENIE TEORETYCZNE	7
2.1. Ogólne wiadomości dotyczące silników indukcyjnych	7
2.2. Budowa	8
2.3. Zasada działania	11
2.4. Schemat zastępczy	12
2.5. Rozruch	14
2.5.1. Rozruch silników klatkowych	14
2.5.2. Rozruch silników pierścieniowych	16
2.6. Sterowanie	17
2.6.1. Sterowanie skalarne	18
2.6.2. Sterowanie wektorowe	20
2.7. Program CASPOC	26
2.7.1. Informacje podstawowe	26
2.7.2. Uruchomienie programu	27
2.7.3. Główne okno programu	27
2.7.4. Praca z Caspoc	30
3. SCHEMAT STEROWANIA WEKTOROWEGO W PROGRAMIE CASPOC	43
3.1. Schemat układu sterowania wektorowego oraz dane dotyczące badanego silnika	43
3.2. Zasada działania zamodelowanego układu FOC	45
3.3. Wyniki badań symulacyjnych	46
3.3.1. Przebiegi prędkości i momentu	46
3.3.2. Przebiegi prądów w osiach d i q	48

3.3.3. Przebiegi składowych wektora prądu w osiach x i y (składowa czynna i bierna)	49
3.3.4. Hodograf wektora prądu zadanego oraz rzeczywistego.....	54
3.3.5. Przebiegi dla skokowej zmiany prędkości obrotowej.....	58
3.4. Zestawienie elementów wykorzystanych w symulowanym układzie	60
4. WNIOSKI KOŃCOWE.....	62
5. LITERATURA.....	64

1. WSTĘP

1.1. Wprowadzenie

Maszyny elektryczne używane są do przekształcania energii elektrycznej w mechaniczną. Od ponad stu lat ulegają ciągłemu rozwojowi. Wraz z rozwojem maszyn elektrycznych istnieje ciągła potrzeba rozwijania układów napędowych służących do ich sterowania. W ostatnim 15-leciu można zaobserwować intensywny rozwój tych układów, co jest związane z bardzo dużym postępem w dziedzinie techniki mikroprocesorowej oraz energoelektroniki.

Coraz częściej we współczesnych zastosowaniach przemysłowych układy napędowe z silnikami prądu stałego zastępowane są przez napędy z silnikami indukcyjnymi klatkowymi lub silnikami synchronicznymi z magnesami trwałymi (PMSM – Permanent Magnet Synchronous Motor). Na szczególną uwagę zasługują tutaj silniki indukcyjne, gdyż w odróżnieniu od silników prądu stałego mają prostą budowę, nie mają szczotek i mechanicznego komutatora, są mniej awaryjne, nie wymagają tak częstych konserwacji, napraw oraz dzięki swojej budowie i niskiej cenie mogą swobodnie konkurować z silnikami PMSM [1].

Analizując metody sterowania silników indukcyjnych można wyróżnić dwie podstawowe metody sterowania prędkości: skalarną oraz wektorową.

Sterowanie skalarne jest stosowane wszędzie tam, gdzie układy napędowe mają małe wymagania dotyczące dynamiki. Najczęściej stosowana jest metoda sterowania z wymuszeniem napięcia stojana, potocznie znana jako sterowanie U/f . Zaletą tego sposobu jest prostota, jednak można zauważyć wiele wad, szczególnie widocznych w stanach przejściowych: brak kontroli prądu oraz momentu, długotrwałe stany przejściowe. Pomimo swoich wad, sterowanie skalarne znalazło zastosowanie w układach o średnich wymaganiach oraz wszędzie tam, gdzie wymagana jest tania oraz prosta regulacja.

W układach gdzie jakość regulacji jest czynnikiem decydującym o danym procesie technologicznym stosuje się metodę sterowania wektorowego. Sterowanie wektorowe można podzielić na dwie metody:

- polowo zorientowaną (FOC – Field Oriented Control),
- bezpośredniej regulacji momentu (DTC – Direct Torque Control).

Idea sterowania połowo zorientowanego została opracowana przez Blaschk'ego na początku lat 70 – tych., a metoda bezpośredniej regulacji momentem opracowana została przez Depenbrocka oraz Takanashiego i Noguchiego w połowie lat 80 – tych.

Dzięki bardzo dobrym właściwościom dynamicznym oraz statycznym, sterowanie to jest stosowane w układach najbardziej odpowiedzialnych oraz serwonapędach.

W tabeli 1.1. zostały przedstawione właściwości różnych metod sterowania prędkości silnika indukcyjnego [1].

Porównanie parametrów różnych metod sterowania prędkości silnika indukcyjnego

Tabela 1.1

Parametry / metoda sterowania	Skalarne U/f	Skalarne z kompensacją poślizgu	Wektorowe FOC	Serwonapęd
Zakres ω	1 ÷ 10 (układ otwarty)	1 ÷ 25 (układ otwarty)	1 ÷ 10000 (układ zamknięty)	1 ÷ 10000 (układ zamknięty)
Dokładność statyczna ω	10%	2%	0%	0%
Czas narastania Me	niedostępne	niedostępne	< 1 ms	< 1 ms
Czas narastania ω	> 100 ms	> 50 ms	< 10 ms	< 10 ms
Moment rozruchowy	niski	średni	duży	duży
Cena	bardzo niska	niska	wysoka	wysoka
Typowe zastosowania	pompy, wentylatory	przenośniki	dźwigi, windy	roboty

Obecnie szacuje się, że około 80% wszystkich zainstalowanych w przemyśle oraz różnego rodzaju urządzeniach silników elektrycznych wymaga regulacji prędkości lub położenia.

W tabelach 1.2. oraz 1.3. został pokazany stan na koniec lat 90–tych oraz perspektywy rozwoju różnych rodzajów układów napędowych, w odniesieniu do liczby wszystkich napędów zainstalowanych w przemyśle [2].

Zastosowania przemysłowe napędów Elektrycznych – stan na koniec lat 90

Tabela 1.2

Typ napędu	Wartość, %	Ilość, %
Napędy regulowane DC	27	20
Napędy regulowane AC - układy zamkniętej regulacji	11	5
Napędy regulowane AC - układy otwarte	50	19
Napędy nieregulowane	6	54
Inne	6	2

Zastosowania przemysłowe napędów elektrycznych – perspektywy rozwojowe do 2010r

Tabela 1.3

Typ napędu	Wartość, %	Ilość, %
Napędy regulowane DC	5	10
Napędy regulowane AC - układy zamkniętej regulacji	150	125
Napędy regulowane AC - układy otwarte	100	100
Napędy nieregulowane	120	75
Inne	30	15

To, że sterowanie wektorowe jest sterowaniem w zamkniętym układzie regulacji oraz analizując perspektywy jego rozwoju, czyli znaczny wzrost tych układów w przemyśle oraz prognoza, że będą one najbardziej rozpowszechnione, stało się bezpośrednią motywacją do podjęcia tego tematu pracy magisterskiej.

1.2. Cel pracy

Celem niniejszej pracy jest zebranie wiadomości dotyczących sposobów sterowania silników indukcyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem metody wektorowej oraz zamodelowania i przeprowadzenia symulacji układów sterowania wektorowego. Do tego celu posłuży program CASPOC.

2. WPROWADZENIE TEORETYCZNE

2.1. Ogólne wiadomości dotyczące silników indukcyjnych

Silniki indukcyjne (asynchroniczne) należą do najbardziej rozpowszechnionej grupy maszyn elektrycznych. Znajdują szerokie zastosowanie w układach napędowych niemal we wszystkich gałęziach przemysłu.

Maszyny indukcyjne budowane są w szerokim zakresie mocy znamionowych: od ułamków wata do kilkudziesięciu MW. Zdecydowana większość maszyn indukcyjnych to silniki, bardzo rzadko buduje się regulatory indukcyjne, przetwornice częstotliwości, przesuwniki fazowe i prądnice indukcyjne [9]. Najczęściej stosowany zakres mocy silników: od 0,6 kW do 1000 kW, gdzie silniki o mocy do 1 kW są najczęściej maszynami jednofazowymi, stosowanymi w urządzeniach gospodarstwa domowego; natomiast w przemysłowych układach napędowych stosuje się silniki o wyższych i najwyższych mocach.

Podobnie jak transformator, silnik ma dwa uzwojenia: pierwotne i wtórne. Najczęściej uzwojenie pierwotne umieszczone jest w stojanie (ze względu na łatwość zasilania), zaś wtórne w wirniku. Oba uzwojenia nie są ze sobą połączone galwanicznie. Pomimo tego, że wirnik nie jest połączony ani z uzwojeniem stojana ani z siecią zasilającą, w jego uzwojeniach płynie prąd, na skutek zjawiska indukcji elektromagnetycznej. Stąd wzięła się nazwa silnika indukcyjnego.

Przepływy uzwojeń wytwarzają w obwodzie magnetycznym silnika wirujące pole magnetyczne. Wynikiem wzajemnego oddziaływania prądów w uzwojeniu wtórnym wirnika oraz pola wirującego jest siła elektrodynamiczna i moment obrotowy wprawiający wirnik w ruch obrotowy o kierunku zgodnym z kierunkiem wirowania pola magnetycznego [5,10].

Biorąc pod uwagę sposoby wykonania wirnika, można wyróżnić dwa rodzaje silników asynchronicznych: klatkowe oraz pierścieniowe.

- Silnik klatkowy: w tym typie uzwojeniem wirnika jest klatka, która składa się z wielu najczęściej nieizolowanych prętów, zwartych na swoich czołach. Pręty i pierścienie zwierające wykonywane są z miedzi, mosiądzu lub aluminium. Takie uzwojenie jest traktowane jako wielofazowe. Taki rodzaj silnika jest prosty w budowie oraz jest tańszy niż silnik pierścieniowy.

- Silnik pierścieniowy: uzwojenia wykonane są z przewodów izolowanych; w silnikach 3-fazowych uzwojenie wirnika jest najczęściej również 3-fazowe, lecz dla małych mocy stosuje się uzwojenia 2-fazowe; końcówki uzwojenia dołączone są do pierścieni ślizgowych, po których podczas ruchu ślizgają się szczotki umieszczone w szczotkotrzymaczach zamocowanych w stojanie. Tak więc zaciski połączone ze szczotkami stanowią dodatkowe, trójfazowe wejście, które można wykorzystać w celach regulacyjnych. Należy tutaj podkreślić, że uzwojenie wirnika można zasilić napięciem przemiennym o parametrach (U_R, f_R) innych niż uzwojenie stojana (U_S, f_S) .

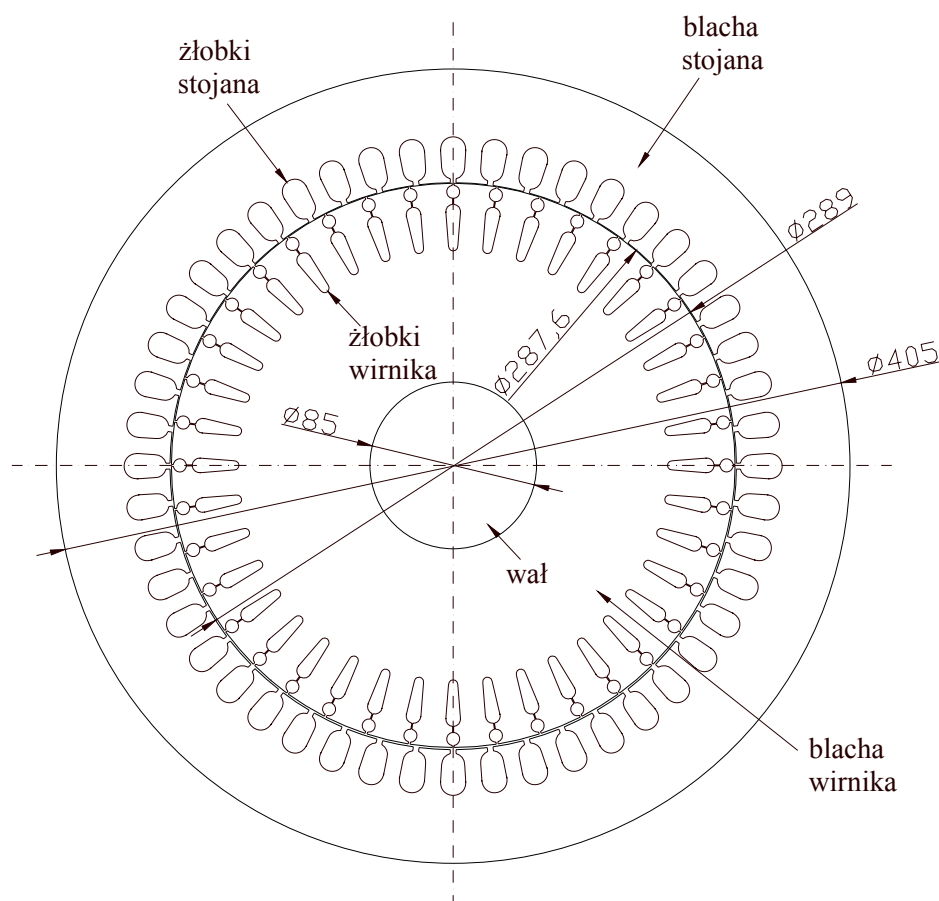
Dzięki swoim zaletom ruchowym, prostocie konstrukcji oraz umiarkowanej cenie silniki indukcyjne zajmują pierwsze miejsce wśród wszystkich rodzajów silników stosowanych obecnie w napędach przemysłowych oraz rolniczych.

2.2. Budowa

Silnik indukcyjny składa się z wirnika oraz stojana. W typowym silniku rdzeń stojana znajduje się w nieruchomym kadłubie. Kadłub odlany jest z żeliwa lub w małych maszynach z lekkich stopów. Maszyny większych mocy mają kadłub spawany. Najbardziej rozpowszechnionym rodzajem budowy silników indukcyjnych małej i średniej mocy jest budowa zamknięta, gdzie kadłub jest zewnętrznie uźebrowany i wyposażony w zewnętrzny wentylator, wprawiającym w ruch powietrze omywające kadłub. Silniki dużych mocy buduje się najczęściej jako przewietrzane. We wnętrzu stojana znajduje się rdzeń wirnika, osadzony na wale bezpośrednio lub za pomocą specjalnej konstrukcji szkieletowej. Rdzenie obwodów magnetycznych wykonuje się z blach elektrotechnicznych, jako pakiety blach wzajemnie od siebie odizolowanych. Najczęściej stosuje się blachy o grubości 0,5 mm; w maszynach małej mocy blachy są nieco grubsze np. 0,7 mm, a w maszynach bardzo dużej mocy 0,35 mm. Dla rdzeni o niewielkich rozmiarach stosuje się jeden pakiet (są to najczęściej silniki niskiego napięcia o mocy do około 250 kW przy czterech biegunach). Natomiast dla maszyn dużych mocy rdzeń składa się z kilku lub kilkunastu pakietów, porozdzielanych promieniowymi kanałami wentylacyjnymi. W wykonaniach praktycznych, najczęściej w rdzeniu wirnika mogą znajdować się jeszcze kanały wentylacyjne osiowe.

Aby konstrukcja rdzenia była technicznie poprawna musi mieć następujące cechy [6]:

- małą reluktancję, aby zapewnić małą wartość prądu magnesującego,
- dobrą przewodność cieplną,
- małe straty przy przemagnesowaniu,
- odpowiednią sztywność i wytrzymałość mechaniczną.

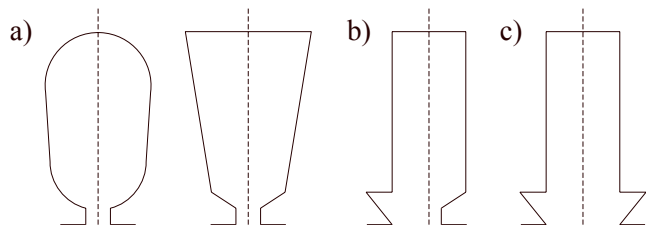


Rys. 2.1. Kształt blach rdzenia stojana i wirnika silnika indukcyjnego klatkowego

Rys. 2.1 przedstawia kształt blach stojana oraz wirnika silnika indukcyjnego, o wymiarach: średnica zewnętrzna stojana wynosi $\varnothing 405$ mm, średnica wewnętrzna stojana $\varnothing 289$ mm, średnica zewnętrzna wirnika $\varnothing 287,6$ mm; wał wirnika ma średnicę $\varnothing 85$ mm. Wewnątrz stojana znajduje się 48 równomiernie rozłożonych na obwodzie żłobków, a w wirniku żłobków jest 40.

Szczelina pomiędzy stojanem, a wirnikiem powinna być jak najmniejsza, ponieważ przy zbyt dużej szczelinie pogarsza się współczynnik mocy silnika oraz występuje zbyt duży prąd biegu jałowego. W maszynach średnich oraz dużych szczelina wynosi kilka milimetrów, a w małych maszynach nie przekracza $0,2 \div 0,3$ mm.

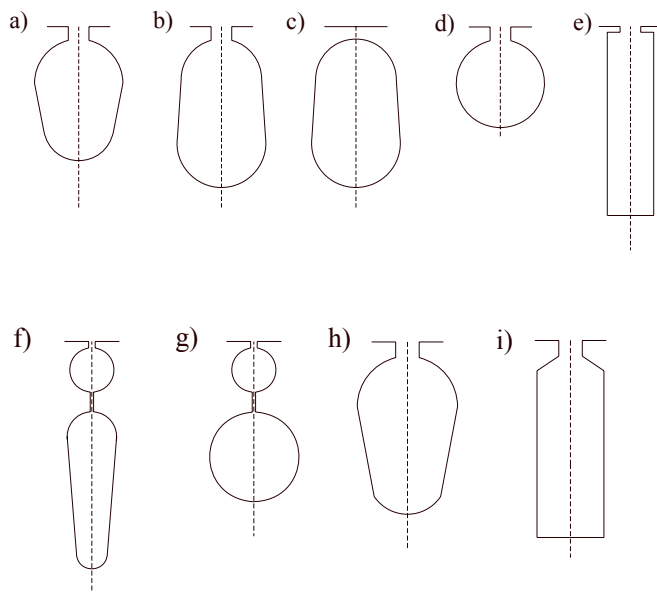
Na wewnętrznej powierzchni rdzenia stojana oraz na zewnętrznej wirnika wytłoczone są w blachach żłobki, w których umieszczane są uzwojenia silnika. Typowe kształty żłobków stojana silnika indukcyjnego ilustruje rys. 2.2 [9,10].



Rys. 2.2. Kształty żłobków stojana silnika indukcyjnego:

- a) żłobki półzamknięte (druć okrągły),
- b) żłobek półotwarty (druć prostokątny),
- c) żłobek otwarty (druć prostokątny).

Typowe kształty żłobków wirnika silnika indukcyjnego ilustruje rys. 2.3.

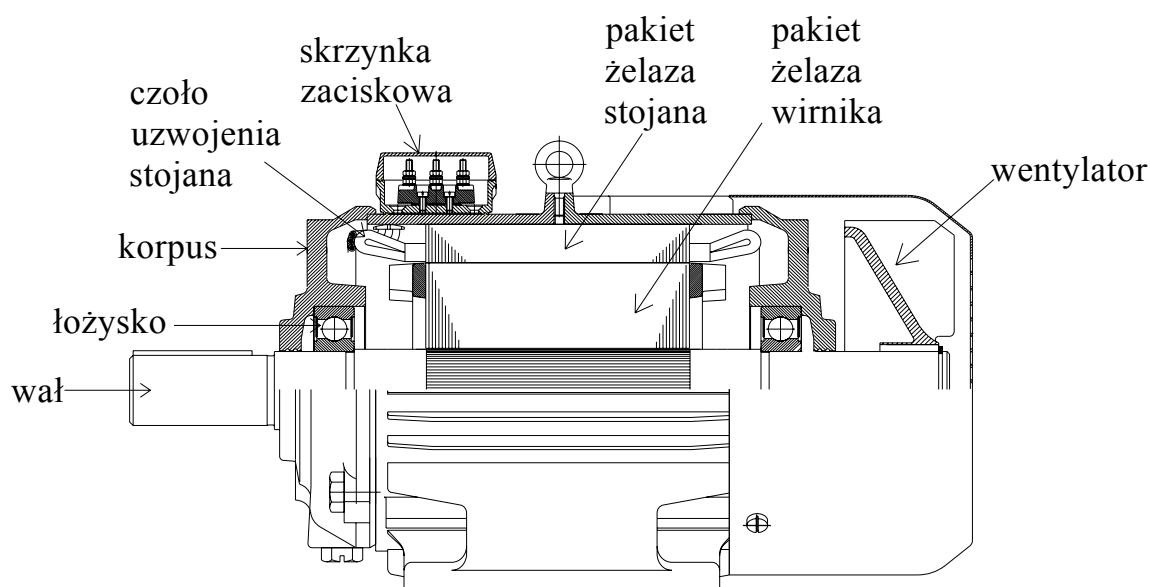


Rys. 2.3. Kształty żłobków wirnika silnika indukcyjnego:

- a) wirnik jednoklatkowy z klatką odlewaną bez wypierania prądu,
- b) jednoklatkowy z klatką odlewaną głębokożłobkowy (z wypieraniem prądu) – żłobek półzamknięty,
- c) jednoklatkowy z klatką odlewaną głębokożłobkowy (z wypieraniem prądu) – żłobek zamknięty,
- d) wirnik jednoklatkowy z klatką spawaną bez wypierania prądu,
- e) wirnik jednoklatkowy z klatką spawaną głębokożłobkowy (z wypieraniem prądu),
- f) wirnik dwuklatkowy z klatkami odlewanymi,
- g) wirnik dwuklatkowy z klatkami spawanymi,
- h) wirnik pierścieniowy, uzwojenie z drutu okrągłego,
- i) wirnik pierścieniowy, uzwojenie prętowe.

W zależności od rodzaju drutu oraz sposobu zwojenia dla stojana stosuje się żłobki półzamknięte lub otwarte. Przy drutach prostokątnych są to żłobki o ściankach równoległych; przy drutach okrągłych - żłobki trapezowe często o zaokrąglonym dnie i górnej części. W wirniku stosowane są żłobki półzamknięte, zamknięte lub rzadziej otwarte o kształcie dostosowanym do rodzaju uzwojenia [9].

Przekrój silnika indukcyjnego został przedstawiony na rys. 2.4.



Rys. 2.4. Przekrój silnika indukcyjnego klatkowego

2.3. Zasada działania

Uzwojenie stojana wytwarza wirujące pole magnetyczne, które wiruje względem początkowo nieruchomego wirnika. Prędkość wirowania tego pola (względem stojana) zależy od częstotliwości f_1 prądu zasilania oraz liczby par biegunów uzwojenia p

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (2.1)$$

Pole to przecina pręty wirnika indukując w nich napięcie, przez co zaczyna w nich płynąć prąd. Przepływ prądu w polu magnetycznym powoduje powstanie siły elektrodynamicznej, działającej stycznie do obwody wirnika, a więc powstaje także moment elektromagnetyczny. Gdy wartość powstałego momentu jest większa od momentu obciążenia, to wirnik zaczyna ruszać i stopniowo zwiększa swoją prędkość obrotową. Wraz z zwiększaniem prędkości wirnika prąd oraz napięcie indukowane w jego prętach

maleją, a zatem spada również wartość momentu elektromagnetycznego. Jeżeli moment ten spadnie do wartości równej momentowi obciążenia, wirnik przestanie przyspieszać i będzie poruszać się ze stałą prędkością. W rozważaniach teoretycznych można przyjąć, że nie istnieje żaden moment oporowy. Wówczas wirnik osiągnąłby prędkość wirowania równą prędkości synchronicznej. Biorąc pod uwagę maszynę rzeczywistą, taki stan pracy jest niemożliwy do osiągnięcia, ponieważ zawsze występują tarcia w łożyskach oraz opór powietrza. Z powyższych rozważań wynika, że silnik indukcyjny wytworzy moment elektromagnetyczny przy każdej wartości prędkości wirnika, z wyjątkiem prędkości synchronicznej. Stąd wzięła się druga nazwa (obok silnika indukcyjnego) - silnik asynchroniczny [17,18].

O wartości napięcia indukowanego w prętach oraz prądu w nich płynącego decyduje prędkość ich przecinania przez linie pola magnetycznego. Wraz ze wzrostem tej prędkości rośnie wartość indukowanego napięcia oraz prądu. Wartość tej prędkości jest jedną z charakterystycznych cech maszyny asynchronicznej. Określa się ją za pomocą poślizgu

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (2.2)$$

Poślizgiem nazywa się prędkość względną pola wirującego względem wirnika w odniesieniu do prędkości synchronicznej. Czasem poślizg wyraża się jako wielkość procentową

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

2.4. Schemat zastępczy

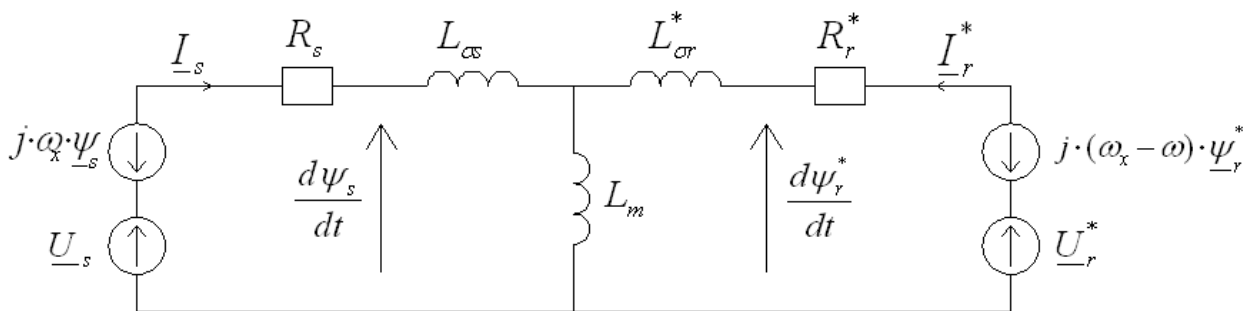
Podstawowym zadaniem przy analizie pracy maszyny elektrycznej jest opracowanie jej modelu matematycznego. Jest to szczególnie ważne, gdyż większość zadań rozwiązuje się za pomocą modelowania matematycznego i symulacji komputerowej. Stworzenie poprawnego modelu matematycznego jest niezbędne również do syntezy układów regulacji.

Model matematyczny silnika indukcyjnego otrzymuje się przy przyjęciu następujących założeń [11,12]:

- uzwojenia fazowe są symetryczne,

- obwody magnetyczne są symetryczne,
- rozkład uzwojeń fazowych na obwodzie stojana i wirnika jest ciągły,
- powierzchnie stojana i wirnika są gładkie, bez zębów,
- szczelina powietrzna jest równomierna,
- rozkład pola magnetycznego w szczelinie nie ulega zmianie przy nasyceniu ferromagnetyków,
- charakterystyka magnesowania obwodu głównego jest jednoznaczna,
- pomijane jest zjawisko wypierania prądu,
- pomijane są straty energii w obwodach magnetycznych,
- pomijane są pojemności między zwojami i uzwojeniami poszczególnych faz,
- nie występuje deformacja pola magnetycznego na brzegach obwodu magnetycznego i w szczelinach wentylacyjnych pakietów blach.

Zgodnie z powyższymi założeniami schemat zastępczy silnika indukcyjnego w stanie nieustalonym oraz równania różniczkowe go opisujące ilustruje rys. 2.5. oraz wzory 2.4. ÷ 2.6. Dla stanu ustalonego nie występują napięcia: transformacji oraz rotacji.



Rys. 2.5. Schemat zastępczy maszyny indukcyjnej dla stanu nieustalonego

$$\underline{U}_s = R_s \cdot \underline{I}_s + \frac{d\underline{\psi}_s}{dt} + j \cdot \omega_x \cdot \underline{\psi}_s \quad (2.4)$$

$$\underline{U}_r^* = R_r^* \cdot \underline{I}_r^* + \frac{d\underline{\psi}_r^*}{dt} + j \cdot (\omega_x - \omega) \cdot \underline{\psi}_r^* \quad (2.5)$$

$$J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} = \text{Im} | \underline{\psi}_s^* \cdot \underline{I}_s | - m_0 \quad (2.6)$$

gdzie:

$\underline{U}_s, \underline{U}_r^*$ - wektory przestrzenne napięcia stojana i wirnika,

$\underline{I}_s, \underline{I}_r^*$ - wektory przestrzenne prądu stojana i wirnika,

$\underline{\psi}_s, \underline{\psi}_r^*$ - wektory przestrzenne strumienia skojarzonego stojana i wirnika

- $\underline{\psi}_S^*$ - wektor określony przez liczbę sprzężoną z Ψ_S ,
 R_s, R_r - rezystancje uzwojeń stojana i wirnika,
 ω_x - prędkość kątowna układu współrzędnych,
 ω_r - prędkość kątowna wirnika względem stojana,
 J - moment bezwładności,
 m_0 - moment obciążenia występujący na wale silnika.

2.5. Rozruch

Rozruch silnika to proces przejścia od stanu postoju do stanu jego ustalonej pracy w określonych warunkach zasilania i obciążenia. Rozruch jest możliwy tylko wtedy, gdy moment elektromagnetyczny silnika jest większy niż moment hamujący. Ich różnica, to tzw. moment dynamiczny. Jego wartość decyduje o czasie trwania rozruchu.

Jeżeli silnik asynchroniczny zasilić przy postoju bezpośrednio napięciem znamionowym, to prąd rozruchowy osiągnie wartość kilkakrotnie większą niż prąd znamionowy. Tak duży prąd jest szkodliwy zarówno dla silnika (grzanie uzwojeń), jak i dla sieci zasilającej (powoduje duże spadki napięć), przy czym moment rozruchowy nie jest wówczas zbyt duży. W układach rozruchowych silnika indukcyjnego dąży się do zmniejszenia prądu rozruchowego, przy czym pożądanym jest równoczesne powiększenie momentu rozruchowego silnika [7].

Zgodnie z wymaganiami normy PN-89E-05012 urządzenia rozruchowe powinny być tak dobrane, aby prąd rozruchu silników o mocy do 5 kW nie przekraczał wartości $2,5I_N$, a dla silników o mocy (5 ÷ 100) kW – wartości $2,2 I_N$ lub aby prąd rozruchu nie przekraczał wartości 60 A przy napięciu 400 V. [4,13,17].

Głównymi parametrami określającymi warunki rozruchowe silnika są:

- moment rozruchowy M_r ,
- prąd rozruchu I_r ,
- czas trwania rozruchu t_r .

2.5.1. Rozruch silników klatkowych

Rozruch bezpośredni: Bezpośrednie przyłączenie silnika indukcyjnego do sieci polega na zasileniu go pełnym napięciem znamionowym. Z tym stanem pracy wiąże się przepływ znacznego prądu rozruchowego, sięgającego wartości $I_R = (4 \div 8)I_N$. Dlatego taki sposób rozruchu można jedynie stosować dla silników o mocy do kilku kilowatów.

Silniki większych mocy uruchamia się najczęściej przy obniżonym napięciu zasilania, stosując różne układy rozruchowe [3].

Rozruch autotransformatorowy: Lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie autotransformatora, którego zadaniem jest zmniejszenie napięcia doprowadzonego do silnika do wartości $(0,5 \div 0,7)U_N$. W takim układzie prąd rozruchowy jest znacznie mniejszy niż przy załączeniu bezpośrednim do sieci. Jednak układy, w których stosuje się autotransformatory są kosztowniejsze pod względem inwestycyjnym, dlatego też stosuje się tylko przy silnikach dużych mocy [4].

Rozruch z przełącznikiem gwiazda-trójkąt: Najczęściej stosowanym sposobem rozruchu silnika klatkowego jest zastosowanie przełącznika gwiazda – trójkąt. Przełącznik ten stosowany jest w celu zmniejszenia prądu pobieranego z sieci w chwili rozruchu, przez zmniejszenie napięcia na zaciskach poszczególnych faz uzwojenia stojana. W pierwszej chwili uruchamiania, uzwojenie stojana połączone jest w gwiazdę a następnie przełącza się je w trójkąt. Jeżeli silnik zasilany jest napięciem międzyprzewodowym U , to przy połączeniu w gwiazdę, napięcie fazowe wynosi $U_{f\lambda} = \frac{U}{\sqrt{3}}$, a przy połączeniu w trójkąt $U_{f\Delta} = U$, zatem $U_{f\Delta} = \sqrt{3} \cdot U_{f\lambda}$. Prąd rozruchowy przy połączeniu w gwiazdę wynosi

$$I_{R\lambda} = I_{f\lambda} = \frac{U_{f\lambda}}{Z_{fr}} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{fr}} \quad (2.7)$$

gdzie:

Z_{fr} - impedancja jednej fazy stojana w chwili rozruchu.

Przyjmując, że wartość impedancji Z_{fr} jest stała, prąd przy połączeniu w trójkąt wyniesie:

$$I_{R\Delta} = \sqrt{3} \cdot I_{f\lambda} = \sqrt{3} \cdot \frac{U_{f\lambda}}{Z_{fr}} = \sqrt{3} \cdot \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{fr}} \quad (2.8)$$

Dzieląc stronami (2.7) i (2.8) otrzymuje się:

$$\frac{I_{R\lambda}}{I_{R\Delta}} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{fr}} \cdot \frac{Z_{fr}}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{1}{3} \quad (2.9)$$

Ze wzoru (2.9) wynika, że zastosowanie omawianego tutaj przełącznika powoduje 3-krotne zmniejszenie prądu rozruchu.

Ponieważ moment rozruchowy wg poniższego wzoru

$$M_R = kU^2 \frac{R'_2}{(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2} \quad (2.10)$$

jest proporcjonalny do kwadratu napięcia, to stosunek momentu rozruchowego przy połączeniu w gwiazdę do momentu rozruchowego przy połączeniu w trójkąt wynosi

$$\frac{M_{R\lambda}}{M_{R\Delta}} = \left(\frac{U_{f\lambda}}{U_{f\Delta}} \right)^2 = \left(\frac{U}{\sqrt{3}U} \right)^2 = \frac{1}{3} \quad (2.11)$$

czyli moment rozruchowy maleje 3-krotnie, co jest zjawiskiem niekorzystnym.

Podsumowując:

- napięcie każdej fazy uzwojenia stojana jest $\sqrt{3}$ razy mniejsze niż napięcie znamionowe,
- prąd pobierany z sieci oraz moment jest w przybliżeniu 3 - krotnie mniejszy niż przy połączeniu w trójkąt.

Rozruch ten jest stosowany, gdy odbywa się bez obciążenia lub przy niewielkim obciążeniu. Przełączników gwiazda-trójkąt używa się przy uruchamianiu silników średniej mocy i tylko w tych przypadkach, w których uzwojenie stojana w czasie normalnej pracy powinno być połączone w trójkąt [10].

2.5.2. Rozruch silników pierścieniowych

Rozruchu silników pierścieniowych dokonuje się przez zastosowanie dodatkowej rezystancji włączonej w obwód wirnika. Liczba stopni rozruchowych zwykle nie przekracza 4. Wzrost rezystancji dodatkowej powoduje przesuwanie się maksimum momentu w kierunku rosnących wartości poślizgu, przy jednoczesnym zmniejszaniu prądu rozruchowego. Wartość prądu rozruchowego nie zależy od wartości momentu hamującego, lecz od całkowitej impedancji obwodu.

Przed załączeniem silnika należy sprawdzić czy rezystor rozruchowy jest nastawiony na największą wartość oraz czy szczotki przylegają do pierścieni. Gdy silnik osiągnie odpowiednią prędkość należy przełączyć rozrusznik na następny stopień. Powinno to nastąpić w takiej chwili, aby nie pojawił się prąd większy niż prąd

początkowy przy rozruchu, gdyż powoduje to nadmierne „uderzenie prądu” co skutkuje tym, że maszyna gwałtownie przyspiesza i jej praca jest niespokojna. Zbyt późne przełączenie powoduje wydłużenie rozruchu, co również jest niewskazane (np. niepotrzebne grzanie maszyny, mogące ją uszkodzić). Po zakończeniu rozruchu rozrusznik należy zewrzeć, ponieważ przeznaczony i projektowany jest tylko do pracy krótkotrwałej[3].

2.6. Sterowanie

W ostatnich latach można zauważyć znaczny postęp w dziedzinie regulowanych napędów prądu przemiennego. Jest on możliwy dzięki rozwojowi technologii półprzewodnikowej, a konkretnie półprzewodnikowych elementów mocy tj. tranzystorów IGBT, tranzystorów GTO oraz zwiększeniu mocy obliczeniowej mikroprocesorów.

Sterowanie prędkości silników indukcyjnych jest obecnie najczęściej realizowane przez zmianę częstotliwości napięcia zasilania. Do tego celu stosuje się pośrednie przezienniki częstotliwości, składające się z prostownika sieciowego, obwodu pośredniczącego napięcia/prądu stałego i falownika napięcia/prądu. Dominującą rolę odgrywają falowniki napięcia o modulowanej szerokości impulsów MSI (ang. PWM – Pulse Width Modulation), które z uwagi na wysoką częstotliwość łączeń cechują się zbliżonym do sinusoidalnego kształtem prądu oraz małymi stratami.

Metody sterowania częstotliwościowego można ogólnie podzielić na skalarne i wektorowe. Coraz częściej układy sterowania skalarnego są zastępowane przez układy wektorowe. W układach skalarnych stabilizacja strumienia uzyskiwana jest na podstawie charakterystyk statycznych $U/f = \text{const}$. Dla stanów ustalonych utrzymanie warunku $U/f = \text{const}$ jest równoważne stabilizacji strumienia stojana silnika. W przypadku metod sterowania skalarnego nastawiane są amplitudy i prędkości kątowe wektorów przestrzennych na podstawie zależności obowiązujących w stanach ustalonych. Wynikają z tąd wady tej metody, które uwidaczniają się w stanach przejściowych (brak kontroli momentu, brak odsprężenia między sterowaniem momentu i strumienia, nie w pełni wykorzystane możliwości dynamiczne silnika i przeziennika częstotliwości).

W przypadku układów sterowania wektorowego wpływa się na wzajemne położenie wektorów przestrzennych napięć, prądów i strumieni skojarzonych, zarówno w stanach ustalonych jak i przejściowych. Istnieją dwie podstawowe metody sterowania wektorowego: polowo zorientowana oraz bezpośrednia regulacja momentu.

2.6.1. Sterowanie skalarne

Prędkość obrotową wirnika silnika indukcyjnego można wyrazić wzorem

$$n = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - s) \quad (2.12)$$

gdzie:

- f - częstotliwość napięcia sieci zasilającej,
- p - liczba par biegunów silnika,
- s - poślizg.

Z powyższego wzoru wynika, że prędkość można regulować przez:

- zmianę prędkości pola wirującego, czyli przez zmianę wartości częstotliwości napięcia sieci zasilającej,
- zmianę liczby par biegunów,
- zmianę poślizgu, czyli zmianę rezystancji w obwodzie wirnika lub obniżenie napięcia stojana.

Sterowanie częstotliwościowe: Zmieniając częstotliwość napięcia zasilającego bezpośrednio wpływa się na zmianę wartości prędkości obrotowej wirnika silnika asynchronicznego - wzór (2.12). Zmieniając ją w sposób ciągły uzyskuje się płynną regulację prędkości obrotowej. Regulując częstotliwość należy równocześnie zmieniać wartość napięcia zasilania U tak, aby utrzymać stały stosunek U/f_1 . Gdyby wartość napięcia była stała, to wzrost częstotliwości powodowałby zmniejszenie się wartości strumienia.

Takie sterowanie silnika indukcyjnego wymaga osobnego, regulowanego źródła napięcia tj np. prądnicy synchronicznej o regulowanej prędkości obrotowej, asynchronicznej przetwornicy częstotliwości o regulowanej prędkości obrotowej, komutatorowej przetwornicy częstotliwości. Znaczny koszt wymienionych wyżej układów powoduje, że sterowanie częstotliwościowe jest opłacalne jedynie wówczas, gdy dotyczy to silników dużej mocy, gdzie wymagana jest ciągła regulacja prędkości w szerokich granicach [10].

Sterowanie przez zmianę liczby par biegunów: Zmiana prędkości wirnika przez zmianę liczby par biegunów jest stosowana w praktyce dość często. Jednakże nie może być stosowana zawsze, ponieważ nie jest to regulacja płynna tylko skokowa. Silniki indukcyjne z przełączalną liczbą par biegunów nazywają się silnikami wielobiegunowymi.

Ten sposób regulacji prędkości silnika można osiągnąć stosując:

- dwa niezależne uzwojenia w stojanie o różnej liczbie par biegunów magnetycznych,

- jedno uzwojenie, które można przełączać tak, aby wytwarzało pola o różnej liczbie par biegunów.

Umieszczenie w stojanie dwóch niezależnych uzwojeń o różnej liczbie par biegunów umożliwia skokową regulację prędkości obrotowej przez zmianę uzwojenia przyłączonego do sieci zasilającej. Jednakże w silniku, moment obrotowy może powstać tylko wówczas, gdy liczba par biegunów w stojanie i w wirniku jest taka sama, dlatego też ten sposób regulacji może być stosowany jedynie w silnikach klatkowych, gdyż klatka sama dostosowuje się do liczby par biegunów uzwojenia stojana. W silniku pierścieniowym należałoby dokonać takiej samej zmiany liczby par biegunów w uzwojeniu wirnika, co w czasie ruchu nie jest zadaniem łatwym.

Pierwszy sposób sterowania, czyli dwa uzwojenia w stojanie jest niekorzystne, gdyż niepotrzebnie powiększa się rozmiar maszyny, a więc występuje gorsze wykorzystanie materiału. Korzystniejsze jest zastosowanie uzwojenia, które można przełączać [13].

Sterowanie przez zmianę poślizgu

Zmiana poślizgu realizowana jest przez zmianę rezystancji wirnika. Zmiana rezystancji w obwodzie wirnika powoduje zmianę kształtu charakterystyki mechanicznej silnika. Cechą charakterystyczną tego sposobu sterowania jest to, że moment maksymalny zachowuje stałą wartość. Jeżeli silnik pracuje ze zwartymi pierścieniami i napędza maszynę roboczą o stałym momencie hamującym niezależnym od prędkości obrotowej, to po włączeniu rezystancji dodatkowej w obwód wirnika ustali się nowy punkt pracy przy zmniejszonej prędkości obrotowej wirnika. Dalszy wzrost rezystancji spowoduje dalsze zmniejszenie prędkości obrotowej. Dzięki temu można regulować prędkość silnika od znamionowej do dowolnie małej.

Ten rodzaj regulacji jest nieekonomiczny, ponieważ na rezystorach regulacyjnych występują duże straty mocy. Stosuje się ją w szerszym zakresie w układach małej mocy lub w przypadku krótkotrwałego zmniejszania prędkości [17].

Zmiana wartości poślizgu realizowana przez obniżenie napięcia stojana. Przez zmianę napięcia zasilającego silnik, przy stałym momencie hamującym, można wpłynąć na zmianę wartości poślizgu z jakim pracuje silnik. Zakres regulacji przez zmianę napięcia zasilającego jest niewielki (około 10%) w dół od prędkości znamionowej. Ten sposób regulacji nie jest więc korzystny. Zmniejszaniu napięcia przy stałym momencie hamującym towarzyszy wzrost prądu, zarówno w obwodzie stojana jak i wirnika.

Powoduje to niekorzystny wzrost strat w uzwojeniach. Omawianą tutaj zmianę wartości napięcia można uzyskać stosując np. autotransformator, reaktancje oraz rezystancje regulacyjne w obwodzie stojana.

W praktyce ten rodzaj regulacji prędkości jest praktycznie nie stosowany [9].

2.6.2. Sterowanie wektorowe

Sterowanie polowo zorientowane:

Bezpośrednie sterowanie polowo zorientowane – DFOC (ang. Direct Field Oriented Control)

Metoda DFOC została opracowana przez Blaschkego w 1972r. Pozwala ona na wydzielenie z wektora prądu stojana dwóch składowych:

- czynnej – odpowiedzialnej za sterowanie momentem,
- biernej – decydującej o wartości strumieniu.

Dla układu wirującego współbieżnie z wektorem strumienia skojarzonego wirnika Ψ_r , wektor prądu stojana można rozłożyć na dwie składowe prostokątne: i_{sx} oraz i_{sy} . Proporcjonalny do składowej i_{sx} jest moduł wektora strumienia wirnika, a do składowej i_{sy} moment elektromagnetyczny silnika. Takie podejście do wektora prądu stojana powoduje, że można dostrzec analogię do obcowzbudnego silnika prądu stałego. Składowa i_{sx} odpowiada prądowi wzbudzenia, natomiast składowa i_{sy} odpowiada prądowi twornika.

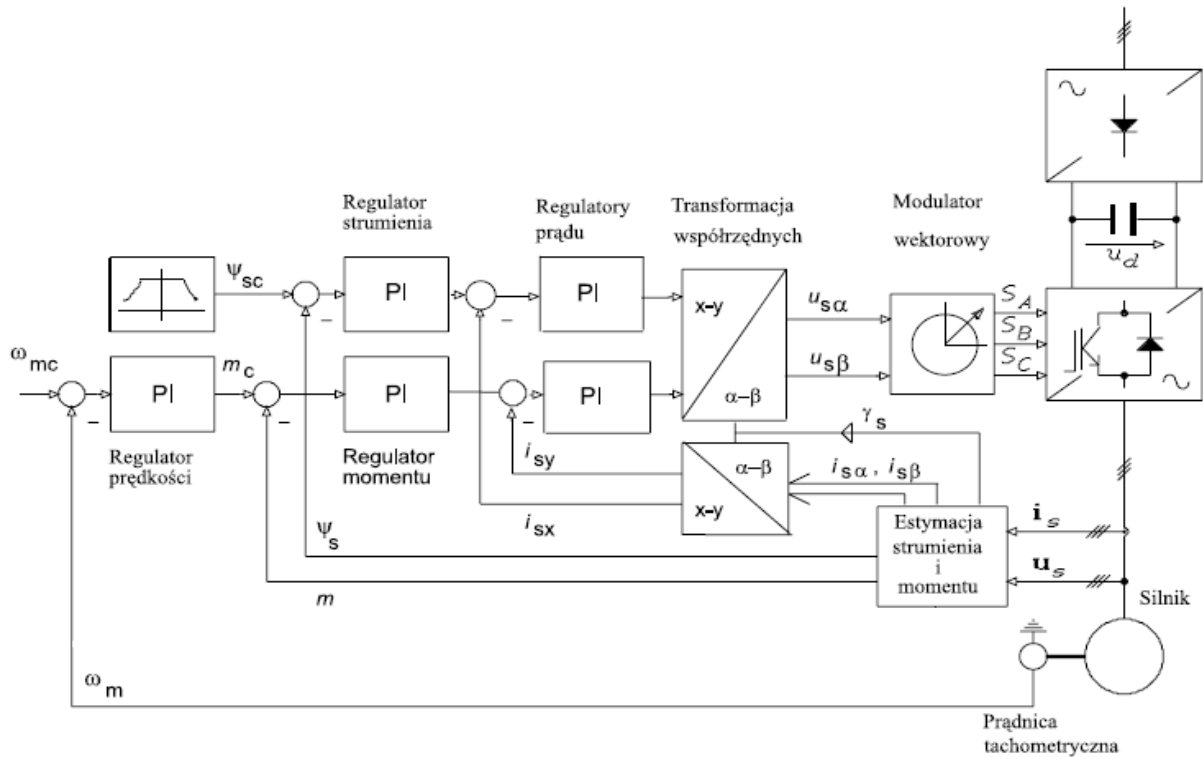
W układach FOC podstawowym elementem układu sterowania jest blok transformacji współrzędnych $x-y/\alpha-\beta$ oraz blok $\alpha-\beta/x-y$. Dzięki nim możliwe jest przeliczenie składowych i_{sx} oraz i_{sy} wektora prądu stojana, w układzie współrzędnych polowo zorientowanych, na składowe $i_{s\alpha}$ oraz $i_{s\beta}$, w nieruchomym układzie współrzędnych i odwrotnie [16].

W układzie DFOC składowa i_{sx} jest zadawana w zamkniętym układzie sterowania. W klasycznej strukturze z wymuszeniem prądu, regulatory PI pracują w układzie współrzędnych polowych $x-y$. Ilustruje to rys. 2.6.

Po transformacji mierzonych prądów fazowych uzwojenia stojana do układu $\alpha-\beta$ otrzymuje się sygnały prądowe do sprzężeń zwrotnych. Transformacji tej dokonuje się na podstawie poniższych wzorów:

$$i_{s\alpha} = i_{sA} \quad (2.13)$$

$$i_{S\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (i_{SA} + 2 \cdot i_{SB}) \quad (2.14)$$



Rys. 2.6. Struktura układu bezpośredniego sterowania połowo zorientowanego DFOC przy wymuszeniu prądowym z regulatorami prądu typu PI

Równania (2. 13) i (2. 14) prawdziwe są, gdy spełniony jest warunek:

$$i_{SA} + i_{SB} + i_{SC} = 0 \quad (2.15)$$

Następnie składowe z układu $\alpha\text{-}\beta$ należy poddać transformacji do układu $x\text{-}y$ korzystając z zależności:

$$i_{SX} = i_{S\alpha} \cdot \cos \gamma_S + i_{S\beta} \cdot \sin \gamma_S \quad (2.16)$$

$$i_{SY} = -i_{S\alpha} \cdot \sin \gamma_S + i_{S\beta} \cdot \cos \gamma_S \quad (2.17)$$

Dla ogólnego przypadku prawdziwe są następujące zależności:

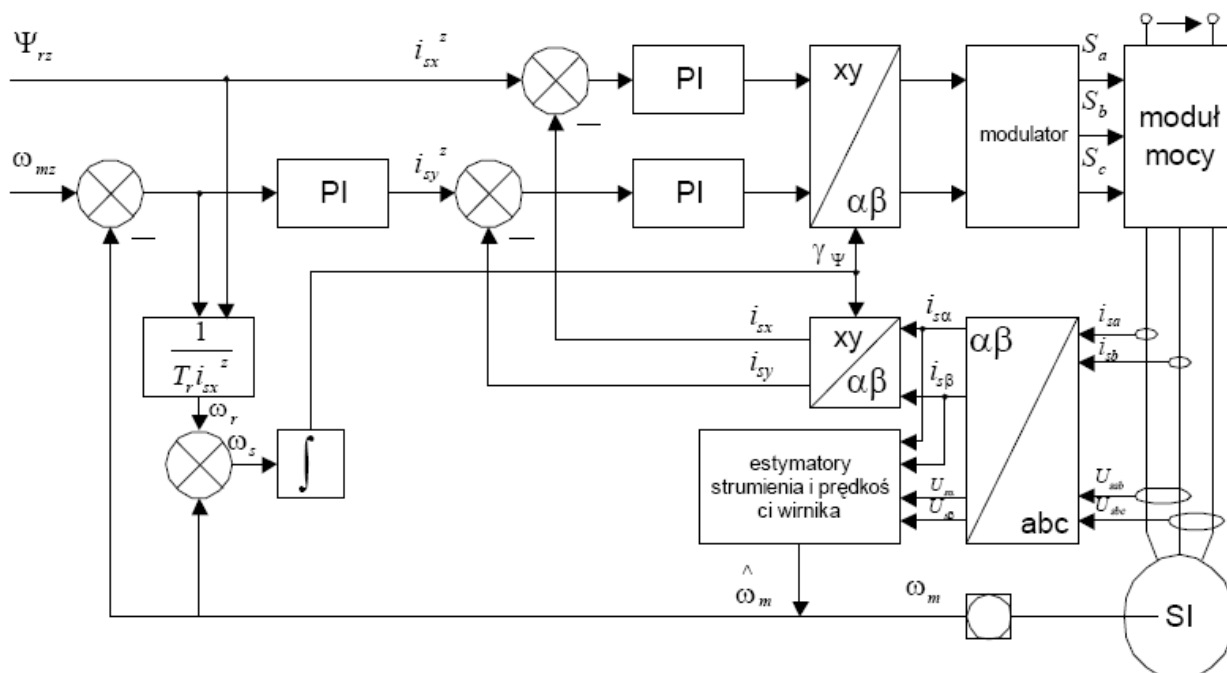
$$i_{S\alpha} = \frac{2}{3} \cdot (i_{SA} - \frac{1}{2} \cdot i_{SB} - \frac{1}{2} \cdot i_{SC}) \quad (2.18)$$

$$i_{S\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (i_{SA} + 2 \cdot i_{SB}) \quad (2.19)$$

W powyższym układzie zrealizowana jest modulacja PWM ze śledzeniem prądu. W układzie tym regulator prędkości kątowej generuje sygnał zadanego momentu silnika. Realizowane jest to na podstawie porównania prędkości zadanej ω_{mc} z prędkością mierzoną ω_m . W podobny sposób generowana jest druga składowa połowo zorientowana wektora prądu stojana i_{sxc} ; za pomocą regulatora strumienia. Następnym etapem jest poddanie składowych i_{sxc} oraz i_{syc} transformacji do układu $A-B-C$. Stanowią one wówczas wartości zadane dla regulatorów histerezowych prądu. Regulatory te generują sygnały sterujące tranzystorowy falownik napięcia.

Pośrednie sterowanie połowo zorientowane – IFOC (ang. Indirect Field Oriented Control)

Podstawową cechą odróżniającą sterowanie DFOC od IFOC jest sposób uzyskiwania informacji o aktualnym kącie położeniu strumienia wirnika. W sterowaniu bezpośrednim jest on odtwarzany lub mierzony (czujniki Halla, dodatkowe uzwojenia pomiarowe), natomiast w metodzie pośredniej jest on wyliczany na podstawie wartości zadanej składowej i_{sx} prądu stojana, pulsacji poślizgu oraz mierzonej lub estymowanej prędkości wirnika. Cechą charakterystyczną jest również brak regulatora strumienia wirnika. Powoduje to, że układ IFOC ma nieco gorsze właściwości dynamiczne w sterowaniu momentem silnika. Struktura pośredniego sterowania jest przedstawiona na rys. 2.8 [15].



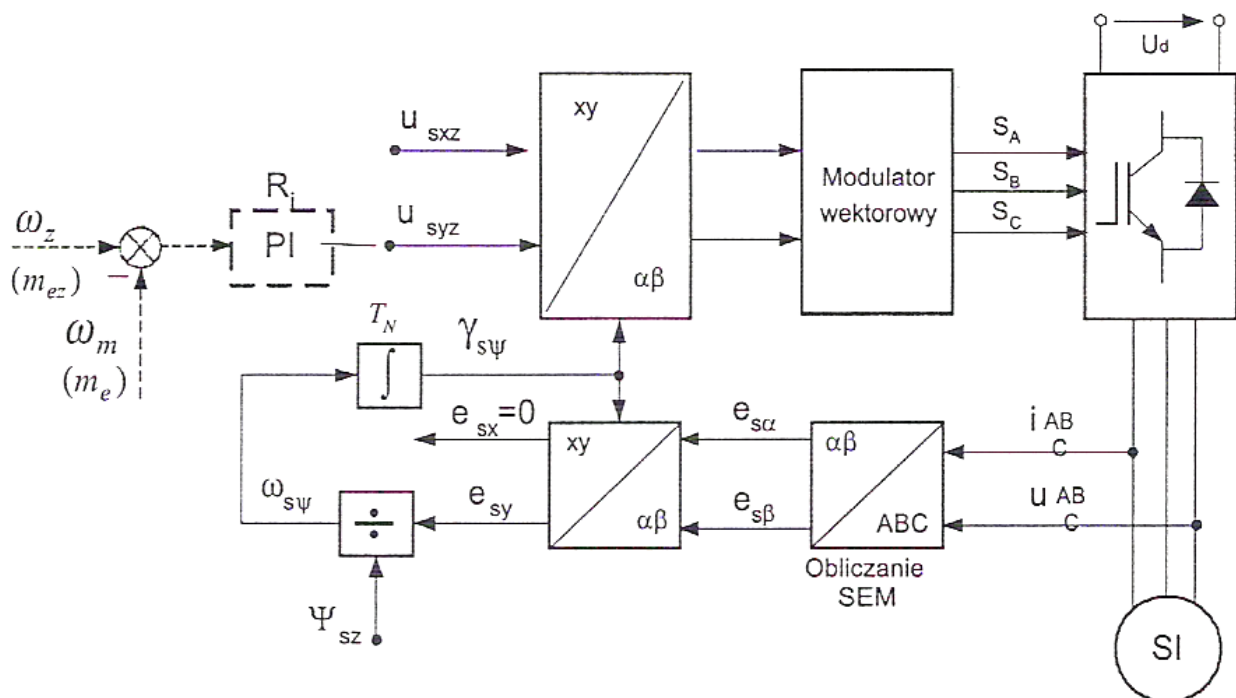
Rys. 2.8. Struktura pośredniego sterowania wektorowego

Naturalna orientacja wektora pola – NFO (ang. Natural Field Orientation)

Ostatnią z metod sterowania polowo zorientowanego jest metoda naturalnej orientacji wektora pola. Została ona opracowana przez Jönssona w 1994r. Metoda ta jest uproszczeniem pozostałych metod typu FOC [14].

Założenie prostopadłości wektorów strumienia skojarzonego stojana Ψ_s oraz napięcia indukowanego stojana e_s , stanowi ideę sterowania NFO. Jednak należy tutaj podkreślić, że takie założenie jest prawdziwe tylko dla stałego strumienia stojana.

Rys. 2.9. ilustruje strukturę sterowania NFO.



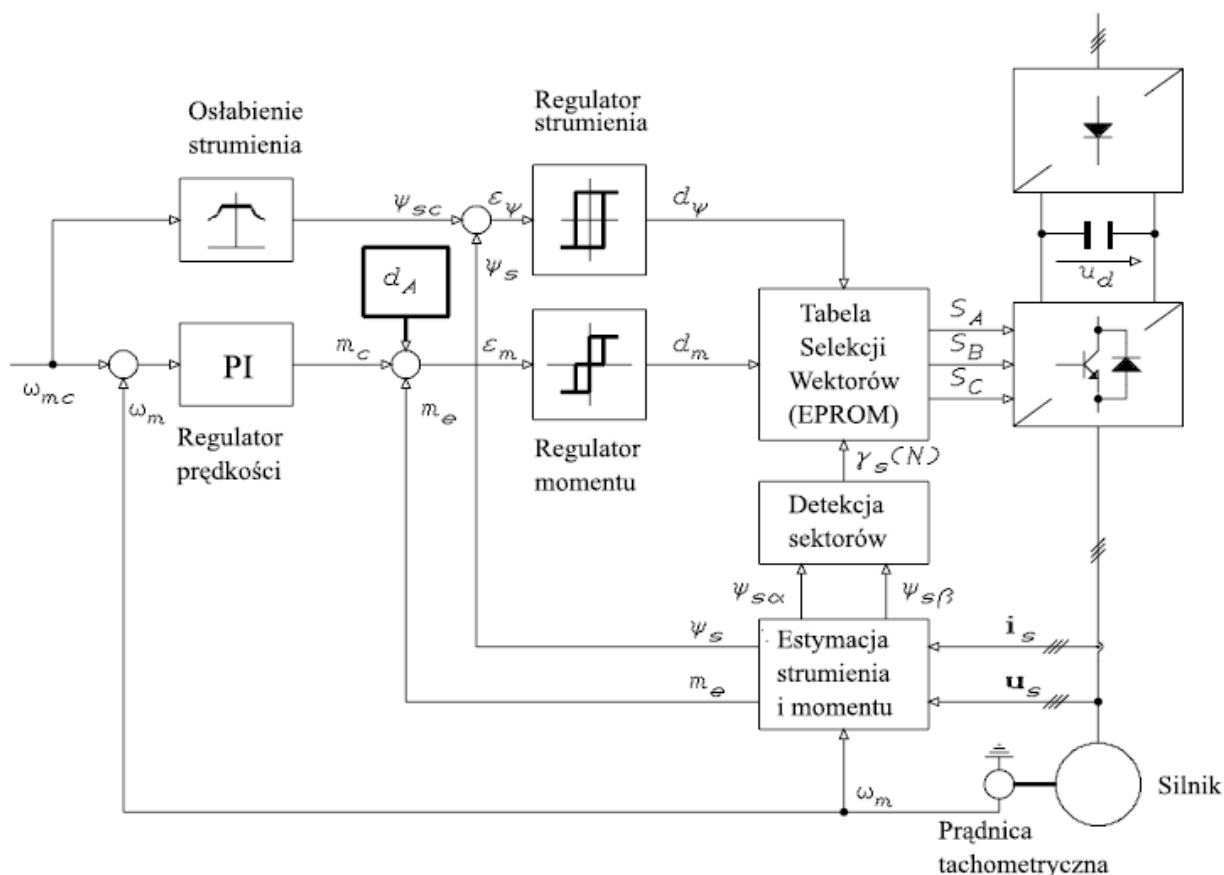
Rys. 2.9. Struktura sterowania NFO; linią przerywaną zaznaczona jest zewnętrzna pętla sterowania prędkością lub momentem

Zalety sterowania Natural Field Orientation to:

- przy założeniu prostopadłości wektorów Ψ_s oraz e_s pomija się, stosowanego w konwencjonalnych układach FOC całkowania, koniecznego do uzyskania wartości modułu strumienia,
- indukowane napięcie e_s zależy tylko od rezystancji stojana r_s ,
- w tej metodzie nie stosuje się regulatorów prądu.

Bezpośrednie sterowanie momentem – DTC (ang. Direct Torque Control)

Metoda Takahasiego i Noguchiego: Jest to metoda bezpośredniego sterowania momentu z kołowym kształtem trajektorii wektora skojarzonego stojana. Ilustruje ją rys. 2.10.



Rys. 2.10. Układ bezpośredniego sterowania momentu z kołowym kształtem trajektorii wektora strumienia (metoda Takahasiego i Noguchiego)

W regulatorach strumienia i momentu porównywane są wartości zadane amplitudy strumienia ψ_{sc} oraz momentu m_c z wartościami mierzonymi ψ_s oraz m_e . Komparator trójstanowy stanowi regulator momentu, natomiast komparator dwustanowy jest regulatorem amplitudy strumienia. Sygnały wyjściowe regulatora momentu są zdefiniowane w następujący sposób:

$$d_m = 1 \text{ dla } m < m_c - H_m \quad (2.23)$$

$$d_m = 1 \text{ dla } m = m_c \quad (2.24)$$

$$d_m = -1 \text{ dla } m > m_c + H_m \quad (2.25)$$

W przypadku regulatora strumienia:

$$d_\psi = 1 \text{ dla } \psi_s < \psi_{sc} - H_\psi \quad (2.26)$$

$$d_\psi = 0 \text{ dla } \psi_s > \psi_{sc} + H_\psi \quad (2.27)$$

Zmienne d_ψ , d_m oraz położenie wektora strumienia $\gamma_s(N)$ tworzą słowo bitowe, które doprowadzone do adresu pamięci EPROM generuje odpowiedni wektor napięcia falownika według poniższej tabeli.

Wektorowa reprezentacja napięcia wyjściowego falownika – stany zaworów falownika

Tabela 2.1

$d_\psi d_m$		$\gamma_s(N)$					
		$N=1$	$N=2$	$N=3$	$N=4$	$N=5$	$N=6$
$d_\psi = 1$	$d_m = 1$	$u_2(110)$	$u_3(010)$	$u_4(011)$	$u_5(001)$	$u_6(101)$	$u_1(100)$
	$d_m = 0$	$u_7(111)$	$u_0(000)$	$u_7(111)$	$u_0(000)$	$u_7(111)$	$u_0(000)$
	$d_m = -1$	$u_6(101)$	$u_1(100)$	$u_2(110)$	$u_3(010)$	$u_4(011)$	$u_5(001)$
$d_\psi = 0$	$d_m = 1$	$u_3(010)$	$u_4(011)$	$u_5(001)$	$u_6(101)$	$u_1(100)$	$u_2(110)$
	$d_m = 0$	$u_0(000)$	$u_7(111)$	$u_0(000)$	$u_7(111)$	$u_0(000)$	$u_7(111)$
	$d_m = -1$	$u_5(001)$	$u_6(101)$	$u_1(100)$	$u_2(110)$	$u_3(010)$	$u_4(011)$

Wielkości w powyższej tabeli zostały tak dobrane, aby w każdej chwili wybierać wektor napięcia falownika, który minimalizuje uchyb momentu i strumienia.

Widoczny na schemacie blok d_A przedstawia dodatkowy generator fali nośnej (piła lub prostokąt), który poprawia warunki startu i pracy wokół zerowej prędkości kątowej (do 3Hz), a dla wyższych częstotliwości jest odłączany [1,15].

2.7. Program CASPOC

2.7.1. Informacje podstawowe

Program Caspoc stworzony został przez firmę Simulation Research w latach osiemdziesiątych. Najnowsza dostępna wersja tego programu to Caspoc 2007. Przeznaczony jest on dla środowiska Windows, począwszy od wersji 95. Jest to narzędzie służące do modelowania oraz przeprowadzenia symulacji układów energoelektro-

nicznych oraz układów napędu elektrycznego. Przy jego użyciu modelowanie układów elektronicznych, maszyn elektrycznych, ich obciążenia oraz układów sterujących w jednym wielopoziomowym modelu jest szybkie i proste. Zasada działania programu oparta jest na sposobie iteracyjnym, przez co możliwa jest zmiana parametrów układu, po uprzednim zatrzymaniu symulacji i powrót do niej przy zmienionych już parametrach [19].

Cechami charakterystycznymi dla program Caspoc są:

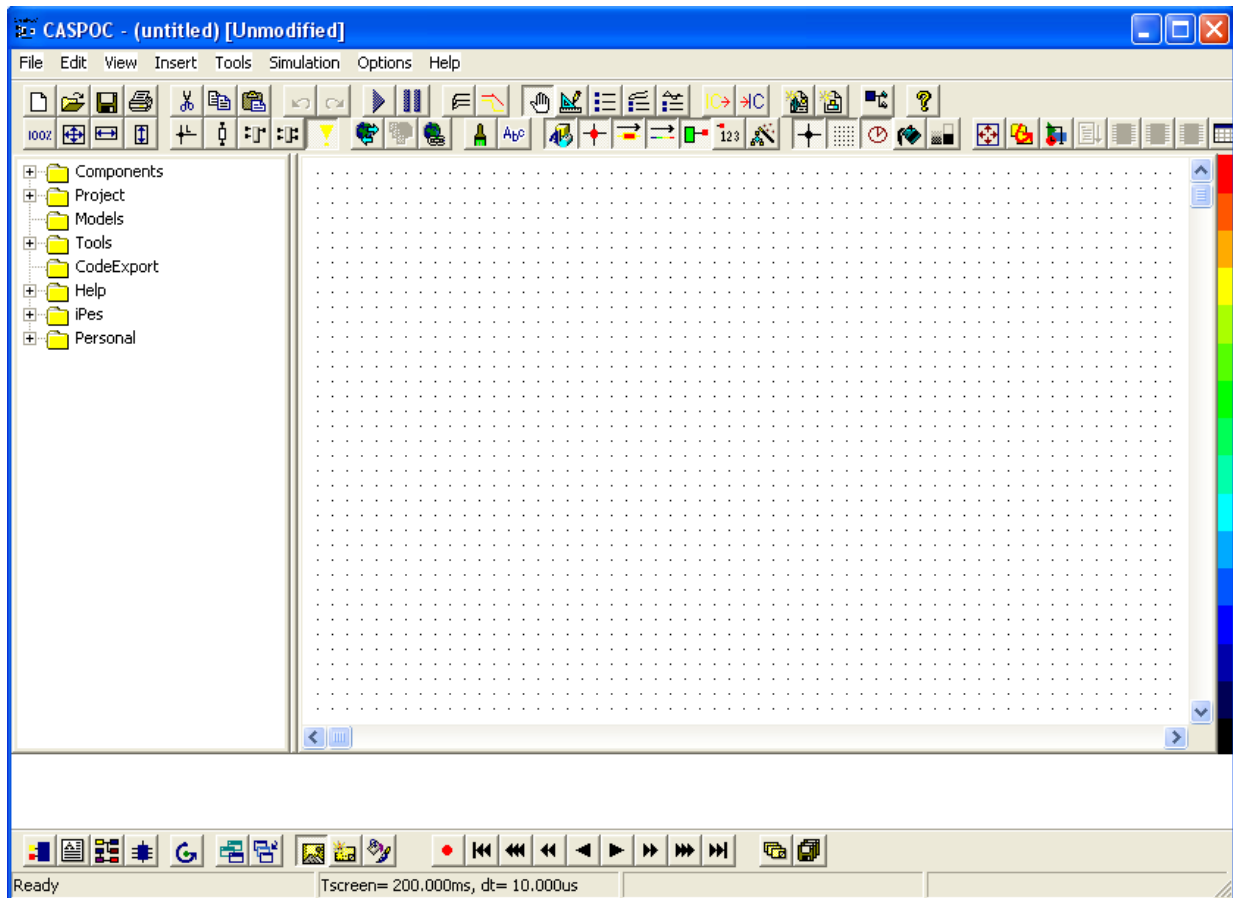
- duża szybkość działania,
- podgląd wyników podczas symulacji,
- intuicyjny interfejs - dodawanie elementów do układu następuje za pomocą metody „drag and drop”,
- bogata biblioteka gotowych elementów energoelektronicznych, maszyn elektrycznych, funkcji matematycznych i wiele innych,
- łatwość zbudowania własnych elementów na podstawie komponentów znajdujących się w „podzakładkach”: circuit, blocks, library,
- iteracyjny tryb pracy,
- łatwe ustawienie parametrów dowolnych elementów układu,
- wynikiem symulacji może być oprócz przebiegu czasowego, przebieg harmonicznych lub też fazorów przestrzennych,
- zastosowanie języka C lub Pascal do opisu elementów,
- możliwość współpracy z Simulinkiem,
- możliwość współpracy z programem Spice,
- możliwość współpracy z programem Tesla – służy on do projektowania maszyn,
- możliwość współpracy z programem Ansys – służy on do obliczeń polowych (opcja dostępna dla wersji Caspoc 2007).

2.7.2. Uruchomienie programu

Uruchomić program można korzystając ze skrótu znajdującego się na pulpicie komputera lub wybierając program CASPOC w menu **Start/Wszystkie programy/CASPOC/caspoc**.

2.7.3. Główne okno programu

Po uruchomieniu programu na ekranie komputera pojawi się główne okno programu, gdzie można budować własne schematy. Ilustruje je poniższy rys. 2.11.



Rys. 2.11. Główne okno programu CASPOC

Główne okno programu składa się z następujących elementów:

- menu głównego,
- pasków narzędzi,
- menedżera modułów,
- edytora schematów,
- okna komunikatów.

Menu główne

W menu głównym można znaleźć szereg następujących zakładek:

- **File** – w tej zakładce można m.in. otworzyć nowy bądź wcześniejszy projekt, zapisać zmiany, wydrukować oraz uzyskać informacje o danym projekcie,
- **Edit** – po rozwinięciu tej zakładki można np. cofnąć ruch, skopiować, wyciąć, obrócić element oraz zaimportować lub wyeksportować bibliotekę,
- **View** – można tutaj zmienić wielkość obrazu (Zoom), uzyskać informacje o zaimplementowanych elementach w układzie, włączyć/wyłączyć siatkę,

- **Insert** – ta zakładka może służyć zmianie koloru wybranych elementów, wstawieniu oscyloskopu do danego schematu lub jakiejś notatki,
- **Tools** – główną zaletą jest tutaj możliwość zapisu schematu w postaci pliku graficznego np. *.bmp, można również wyeksportować układ do Spice'a, Simulinka lub w postaci kodu w C,
- **Simulation** – służy do ustalenia parametrów symulacji,
- **Options** – można zmienić czcionkę, język programu (angielski, niemiecki),
- **Help** – w tej zakładce można uzyskać informacje na temat licencji, połączyć się bezpośrednio ze stroną producenta.

Paski narzędzi

Dzięki paskom narzędzi możliwy jest szybszy dostęp do zadań, które są realizowane w poszczególnych zakładkach menu głównego.

Manager modułów

W managerze modułów można znaleźć następujące zakładki:

- Components,
- Projekt,
- Models,
- Tools,
- Help,
- iPes,
- Personal.

Components

Jest to podstawowa, a zarazem najważniejsza zakładka w managerze modułów. W jej wnętrzu znajdują się wszystkie elementy, które są niezbędne do zbudowania danego układu elektrycznego bądź elektronicznego. Po jej rozwinięciu wyświetlają się nam trzy „podzakładki”:

- Circuit,
- Blocks,
- Library,

W pierwszej (circuit) znajdują się:

- podstawowe elementy elektryczne takie jak: R , L , C ,
- różnego rodzaju źródła zasilania: stałe, zmienne, prądowe, napięciowe,
- elementy półprzewodnikowe: diody, tranzystory.

W drugiej (blocks) znajdują się:

- modele maszyn elektrycznych,
- elementy nieliniowe,
- funkcje matematyczne.

W trzeciej podzakładce (library) znajdują się gotowe elementy, które zostały stworzone na podstawie elementów znajdujących się w circuit oraz blocks. Reszta zakładek znajdująca się w managerze modułów jest wykorzystywana w znikomym stopniu.

Edytor schematów

Edytor schematów to wyodrębnione miejsce, w którym można modelować dowolne schematy.

Okno komunikatów

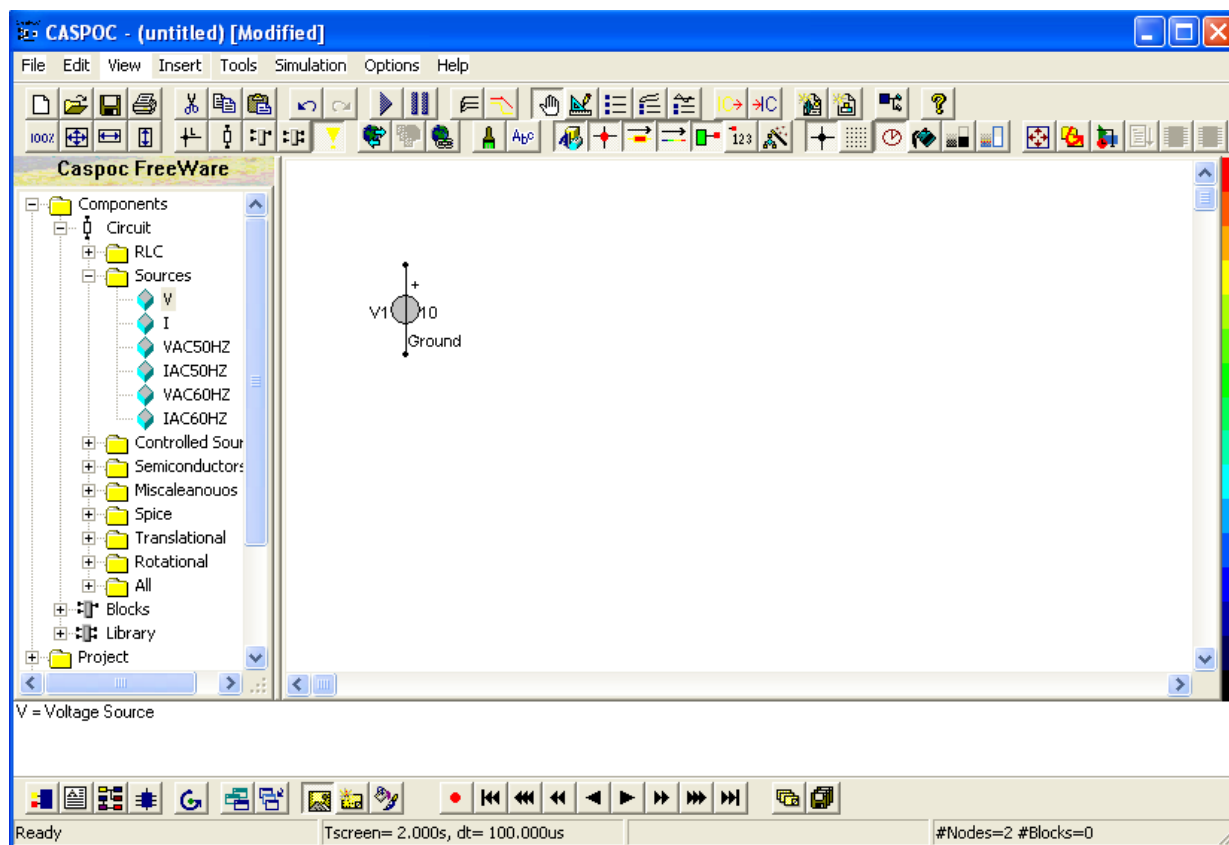
Wyświetla bieżące informacje o wykonywanych operacjach, zastosowanych elementach oraz o powstałych błędach.

2.7.4. Praca z Caspoc

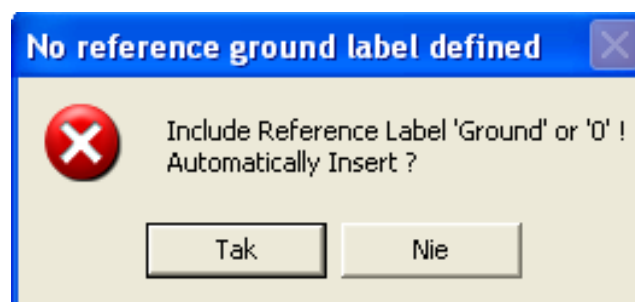
Wstawianie elementu

Korzystając z managera modułów można wstawić dowolny element do realizowanego projektu (rys. 2.12). Wstawienie polega na tym, że najpierw należy wybrać element z managera, klikając w niego lewym przyciskiem myszki, a następnie najechać na pole edytora schematów. Ponowne kliknięcie lewym przyciskiem myszki wstawi element w wybranym miejscu pola edycyjnego.

Po wstawieniu w projekcie pierwszego elementu, pojawi się okno dialogowe (rys. 2.13) z propozycją automatycznego przypisania węzła Ground. Jest to węzeł odniesienia o potencjale $U_o = 0 \text{ V}$. W razie potrzeby można zmienić węzeł odniesienia.



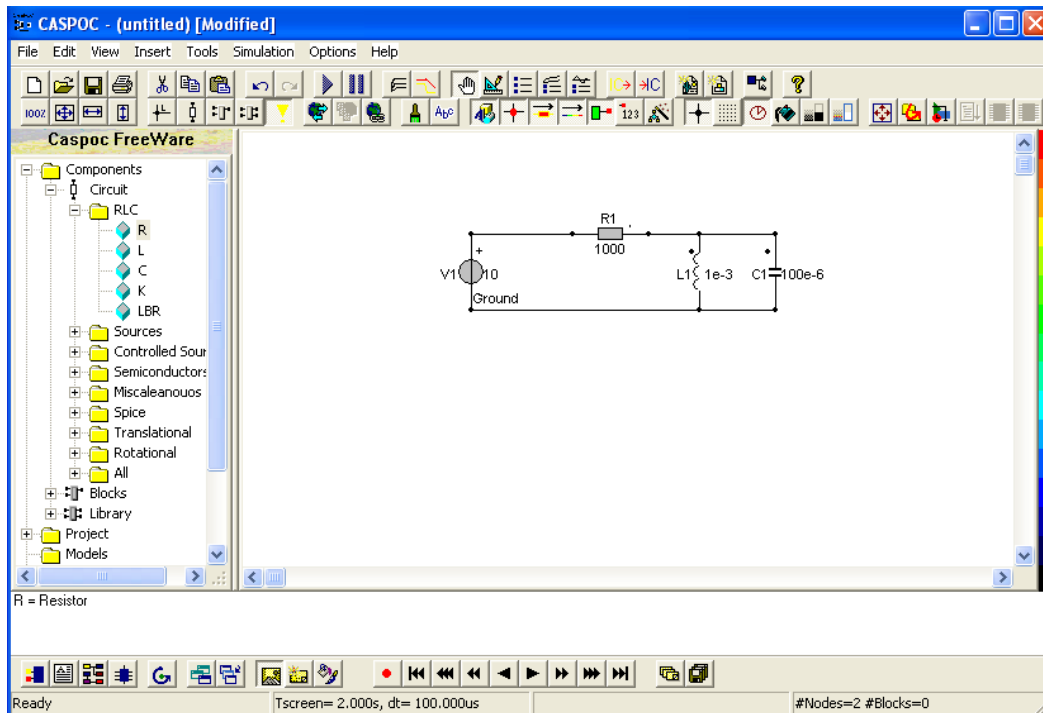
Rys. 2.12. Wstawianie dowolnego elementu do schematu



Rys. 2.13. Domyślne ustalenie węzła odniesienia (0 V)

Łączenie elementów

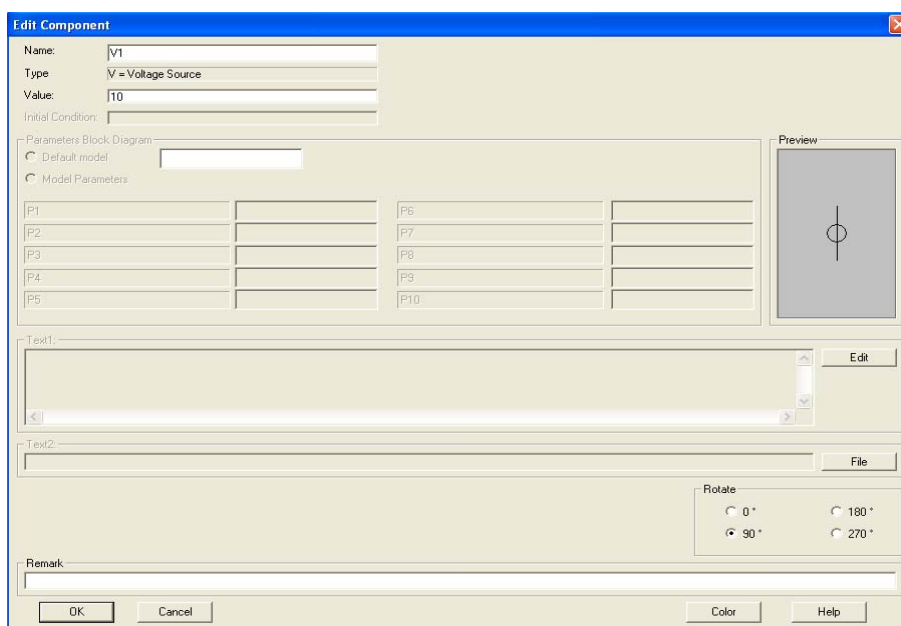
Aby połączyć dowolne elementy ze sobą należy najechać na wybrany węzeł i trzymając przyciśnięty lewy przycisk myszki najechać w dowolne miejsce, z którym chcemy się połączyć (rys. 14). Należy tutaj zwrócić uwagę na fakt, że łączyć można dwa dowolne węzły, bądź też węzeł z dowolnym punktem układu (węzeł tworzy się wówczas automatycznie).



Rys. 2.14. Łączenie elementów

Zmiana wartości poszczególnych elementów

W celu zmiany wartości wielkości poszczególnych elementów, należy kliknąć dwukrotnie lewym przyciskiem myszki lub raz prawym na wybranym elemencie. Otworzy się wówczas okno edytora parametrów (rys. 2.15).



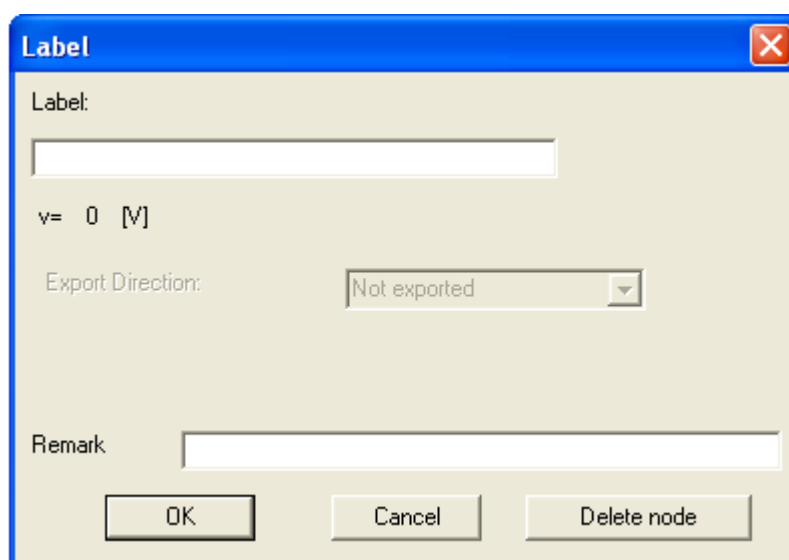
Rys. 2.15. Edycja parametrów wybranego elementu

Dla dowolnego elementu można np.:

- zmienić jego nazwę lub wartość,
- element obrócić,
- dodać do niego komentarz (remark).

Edycja węzła

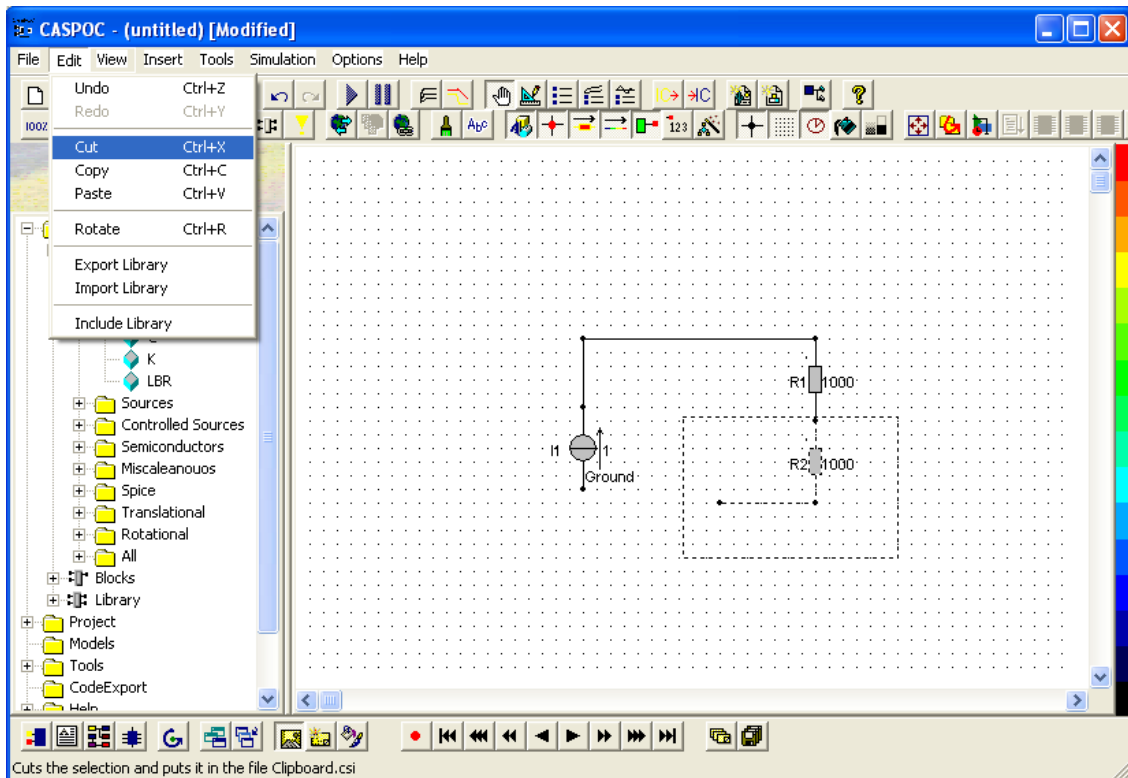
W celu nadania etykiety dla węzła lub jego usunięcie należy kliknąć w niego prawym przyciskiem myszki lub dwukrotnie lewym. Pokaże nam się wówczas następujące okno (rys. 2.16). W miejscu „Label” można wpisać etykietę. Klikając „Delete node” nastąpi usunięcie wcześniej zaznaczonego węzła.



Rys. 2.16. Edycja węzła

Usunięcie dowolnego elementu układu

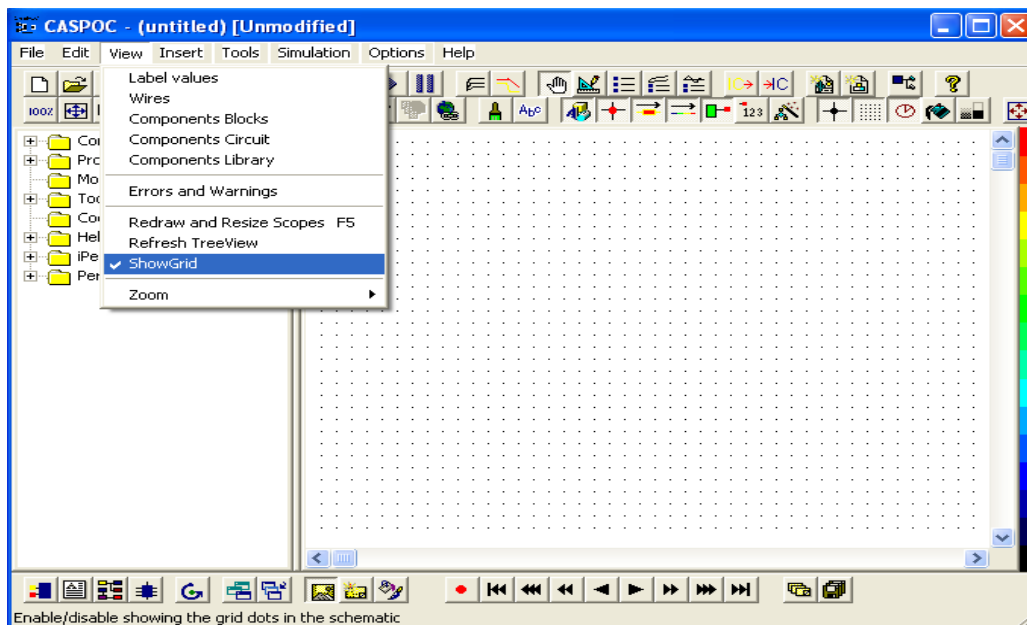
Aby usunąć dowolną część układu należy ją najpierw zaznaczyć przez kliknięcie lewym przyciskiem myszki. Następnie usunąć przez kliknięcie w zakładkę **Edit/Cut** lub przycisk **Delete** znajdujący się na klawiaturze. Sposób postępowania ilustruje rys. 2.17.



Rys. 2.17. Usunięcie wskazanego elementu układu

Opcje siatki

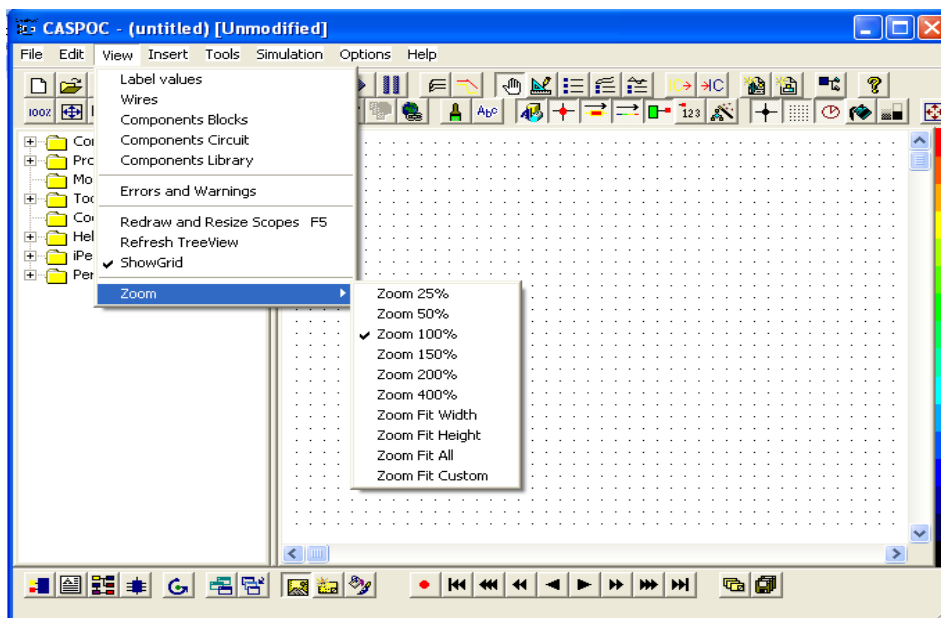
W celu włączenia lub wyłączenia wyświetlania siatki należy wybrać zakładkę **View**, a następnie opcję **ShowGrid** (rys. 2.18).



Rys. 2.18. Włączenie/wyłączenie wyświetlania siatki

Wielkość obrazu

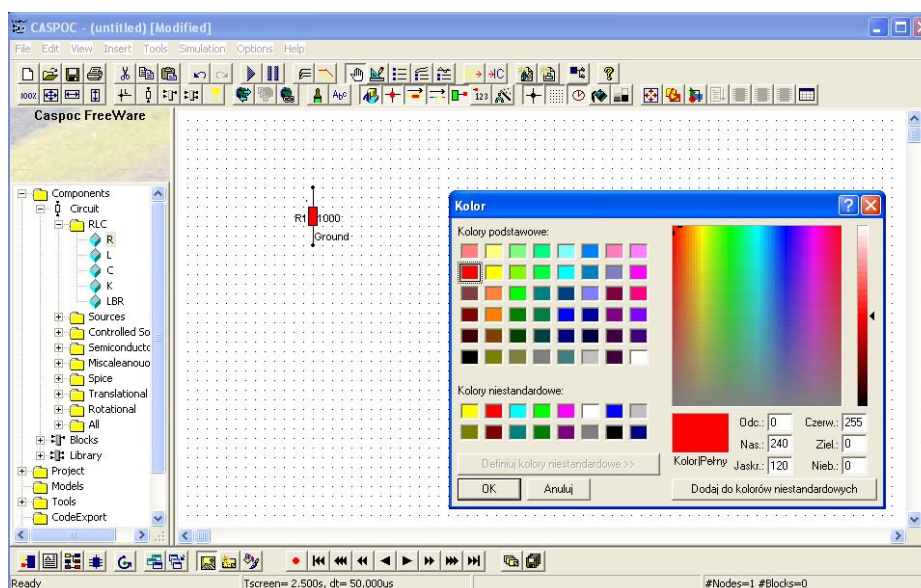
W celu zmiany wielkości obrazu należy wybrać zakładkę **View**, a następnie opcję **Zoom**. Po jej rozwinięciu jest do dyspozycji kilka wariantów, możliwych do zastosowania w zależności od potrzeb (rys. 2.19).



Rys. 2.19. Zmiana wielkości obrazu

Zmiana koloru dowolnego elementu

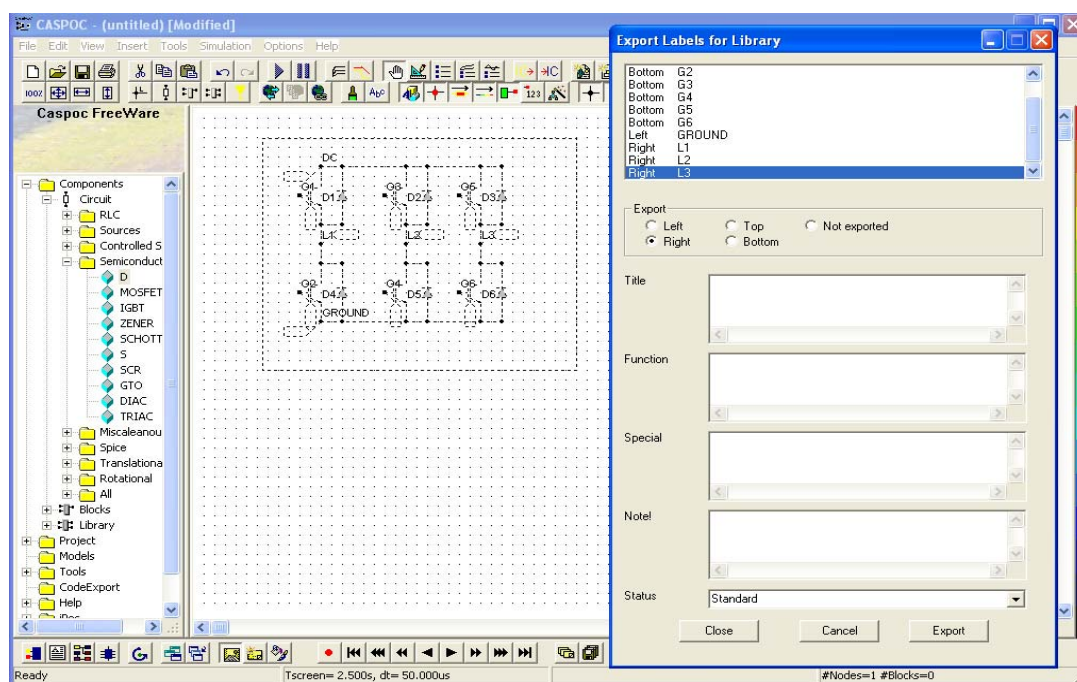
W celu zmiany koloru elementu należy zaznaczyć ten element, a następnie wybrać w zakładce **Insert** opcję **Color Selected Components**. Otworzy się wówczas okno z możliwością doboru odpowiedniego koloru dla elementu (rys. 2.20).



Rys. 2.20. Zmiana koloru elementu

Utworzenie bloku bibliotecznego

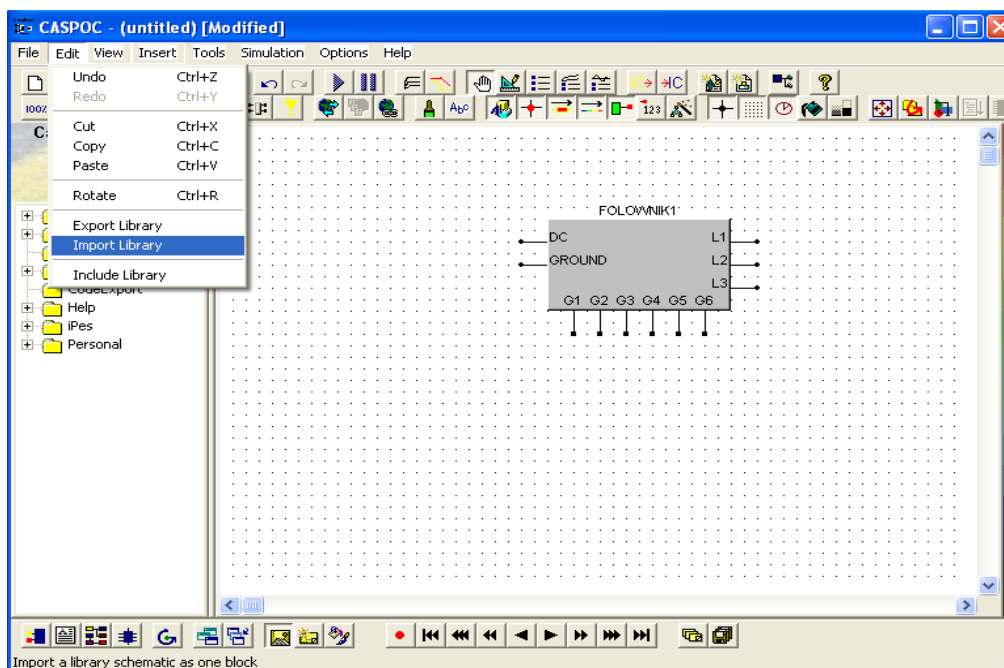
Możliwość utworzenia własnego bloku bibliotecznego jest funkcją niezwykle pomocną przy złożonych układach. W celu utworzenia bloku należy zaznaczyć elementy, które mają wchodzić w jego skład, wybrać z zakładki **Edit** opcję **Export Library**, następnie zaznaczyć wyprowadzenia (wejścia/wyjścia), nacisnąć przycisk **Export** i następnie zapisać blok pod dowolną nazwą. Należy tutaj pamiętać, aby przed zaznaczeniem elementów wchodzących w skład bloku bibliotecznego nazwać odpowiednio węzły, które będą stanowiły wejścia/wyjścia tworzonego bloku (patrz **Edycja węzła**). Sposób postępowania ilustruje rys. 2.21.



Rys. 2.21. Zaznaczenie wejść/wyjść bloku bibliotecznego

Wstawianie bloku bibliotecznego

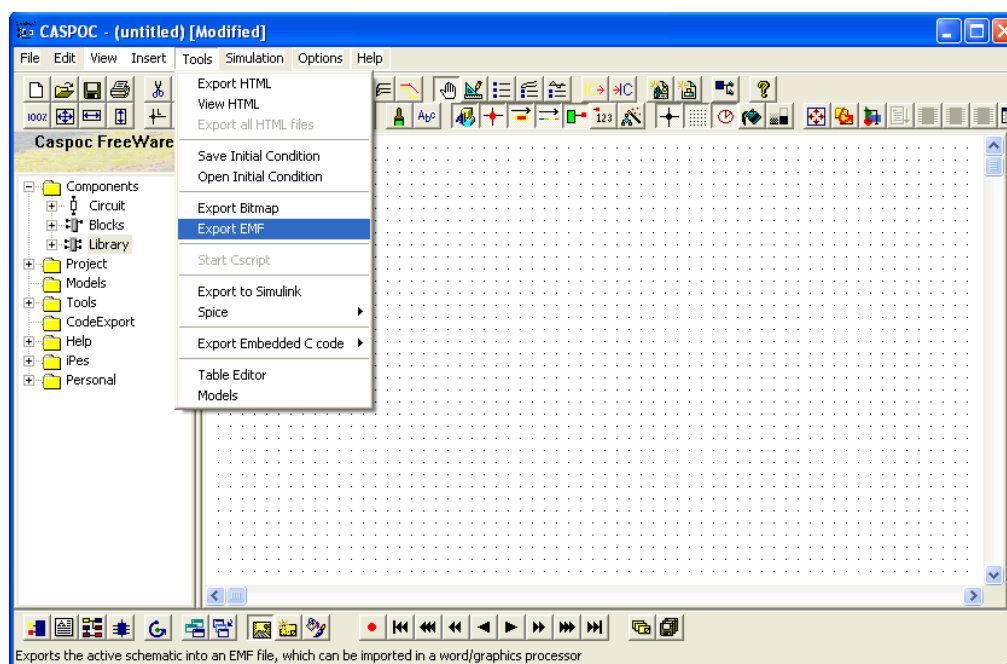
W celu wstawienia bloku należy wybrać opcję **Import Library** z zakładki **Edit**. Pojawi się wówczas okno (rys. 2.22), w którym należy znaleźć właściwy blok. Po naciśnięciu przycisku **Otwórz** pojawi się okno **Library Name**, w którym można zmienić domyślną nazwę bloku. Po zaakceptowaniu można wstawić wybrany blok w dowolnym miejscu w edytorze schematów, potwierdzając wybór kliknięciem lewym przyciskiem myszki.



Rys. 2.22. Wstawianie bloku bibliotecznego

Zapisanie schematu jako pliku graficznego

W celu zapisania schematu w postaci pliku graficznego należy z zakładki **Tools** wybrać opcję **Export Bitmap** lub **Export EMF** (rys. 2.23). Po wybraniu opcji pierwszej (**Export Bitmap**) plik jest zapisywany do schowka i należy go wkleić i zapisać w programie graficznym np. **Paint**. Natomiast wybierając opcję drugą (**Export EMF**) plik jest bezpośrednio zapisywany w postaci pliku graficznego.



Rys. 2.23. Zapisywanie schematu jako pliku graficznego

Symulacja badanego układu

Aby przeprowadzić symulację badanego układu należy z zakładki **Simulation** wybrać opcję **Start Simulation** lub w celu symulacji wielokrotnej **Start Multiple Simulation**.

Aby symulację zatrzymać, należy wybrać opcję **Pause Simulation**; aby symulację wznowić należy nacisnąć **Continue Simulation**.

Powyższe opcje można również uruchomić poprzez kliknięcie w odpowiednie ikony znajdujące się **Paskach Narzędzi**.

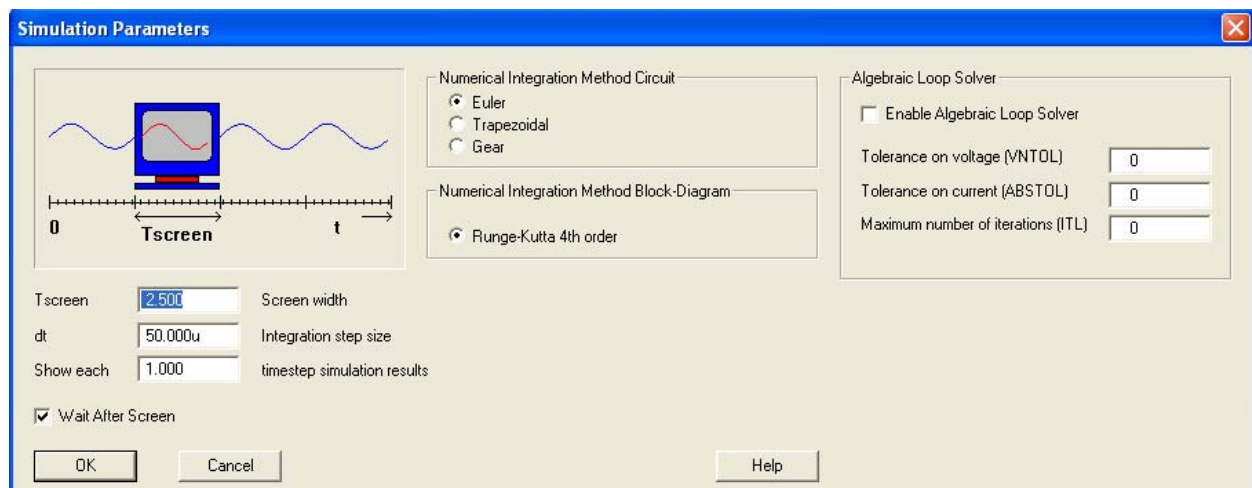
Parametry symulacji

Istotną rzeczą w analizie badanego układu jest odpowiedni dobór parametrów symulacji. Ustawienia parametrów symulacji możemy dokonać klikając w zakładkę **Simulation** i wybierając opcję:

- **Simulation Parameters** – dla symulacji pojedynczej,
- **Multiple Simulation Parameters** – dla symulacji wielokrotnej.

Parametry symulacji pojedynczej

Aby ustalić parametry symulacji pojedynczej należy wybrać **Simulation/Simulation Parameters**. Na ekranie pojawi się wówczas poniższe okno.



Rys. 2.24. Parametry symulacji pojedynczej

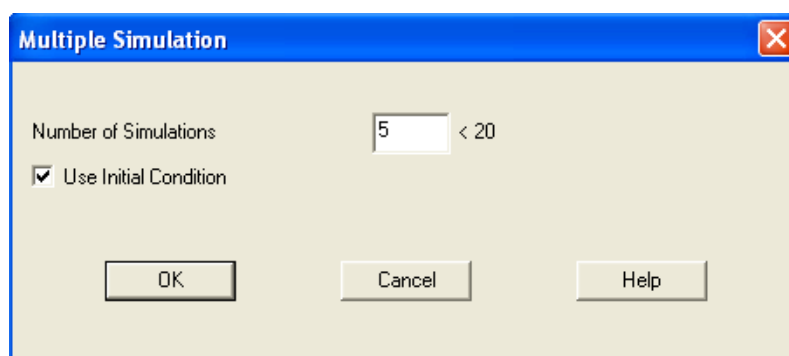
W tym oknie dostępne są następujące funkcje:

- **Tscreen** – końcowy czas symulacji,
- **dt** – krok całkowania,

- **Show each** – krok wyświetlania wyniku symulacji na ekranie,
- **Wait After Screen** – jeśli ta opcja jest zaznaczona, to symulacja zatrzymuje się po czasie ustawionym w Tscreen; jeśli nie jest zaznaczona, to symulacja trwa nieprzerwanie, przy czym po każdym czasie Tscreen wyniki na ekranie oscyloskopu są kasowane,
- **Numerical Intergration Metod Circuit** – metoda rozwiązywania elementów z manegera modułów z podzakładki **Circuit** (zmodyfikowana metoda potencjałów węzłowych: Euler, Trapezoidal, Gear),
- **Numerical Integration Metod Blocks** - metoda rozwiązywania elementów z manegera modułów z podzakładki **Blocks** (metoda rozwiązywania równań różniczkowych Rungego-Kutty rzędu 4),
- **Algebraic Loop Solver** – rozwiązywanie równań metodą algebraiczną.

Parametry symulacji wielokrotnej

Symulację wielokrotną stosuje się wówczas, gdy istotny jest wpływ zmiany jakiegoś parametru na badany układ. Aby ustalić parametry symulacji wielokrotnej należy wybrać **Simulation/ Multiple Simulation Parameters**. Na ekranie pojawia się wtedy okno, przedstawione na rys. 25.



Rys. 2.25. Parametry symulacji wielokrotnej

W widocznym oknie dostępne są następujące funkcje:

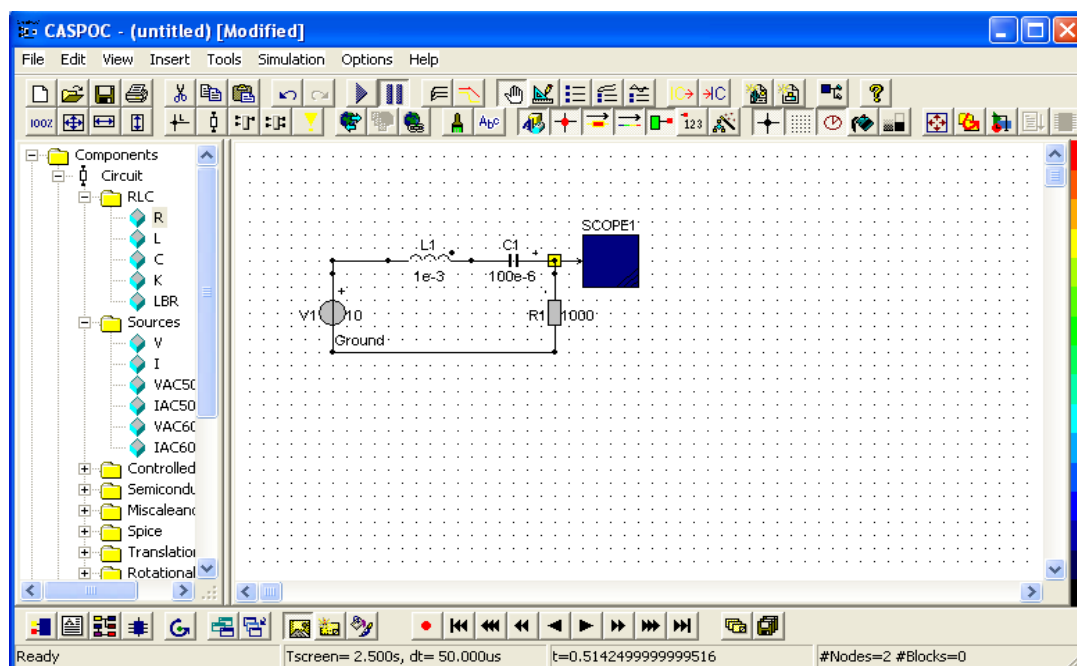
- **Number of Simulations** – liczba dostępnych symulacji,
- **Use Initial Condition** – wykorzystuje warunki początkowe.

Element SCOPE

Element Scope – oscyloskop, jest to element niezbędny do rejestracji oraz do podglądu wyników symulacji (prądów, napięć). Aby wstawić omawiany element należy z menu głównego wybrać zakładkę **Insert**, a następnie opcję **Scope** lub korzystając z menadżera modułów: **Components/Blocks/Sinks/Scope**. Wstawienie tego elementu do zamodelowanego układu następuje przez kliknięcie lewym przyciskiem myszki w miejscu docelowym.

Podgląd przebiegu napięcia

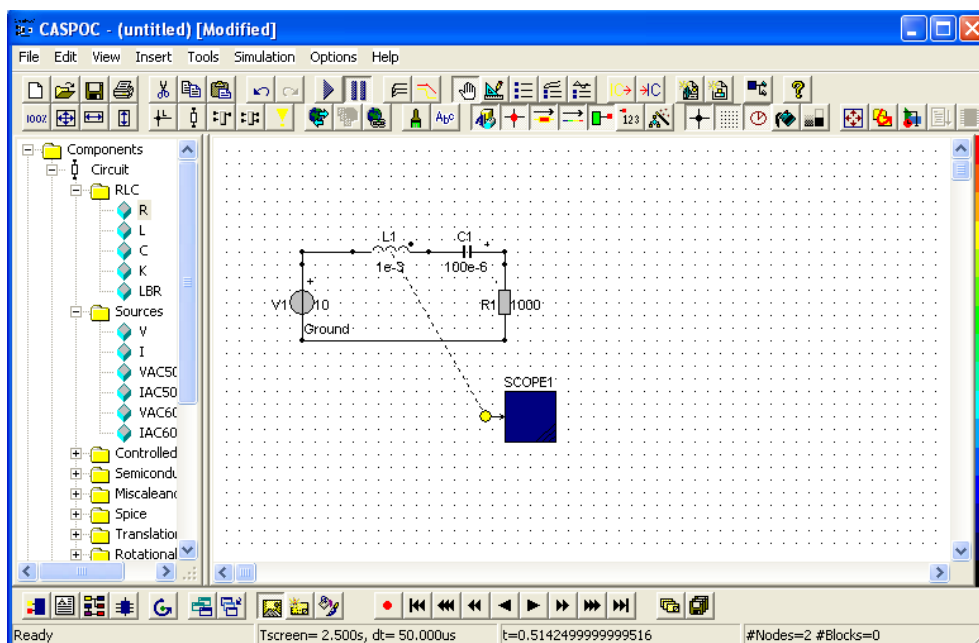
W celu rejestracji przebiegu napięcia (potencjału względem węzła odniesienia) należy połączyć element **Scope** z węzłem, w którym ma być dokonywany pomiar. Przykładowe połączenie ilustruje rys. 2.26.



Rys. 2.26. Podgląd przebiegu napięcia

Podgląd przebiegu prądu

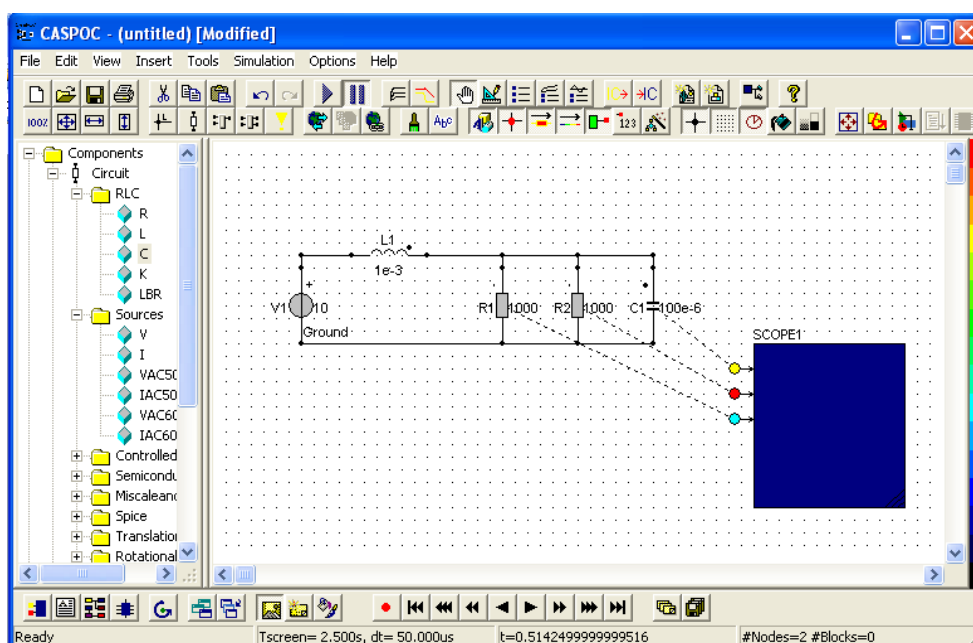
W celu rejestracji przebiegu prądu należy lewym przyciskiem myszki nacisnąć na wejście **Scope** i trzymając wciśnięty przycisk najechać na element, w którym ma być dokonany pomiar. Następnie - zwolnić przycisk. Sposób postępowania ilustruje rys. 2.27.



Rys. 2.27. Podgląd przebiegu prądu

Zmiana rozmiaru oraz liczby wejść elementu SCOPE

W celu zmiany liczby wejść oscyloskopu należy najechać na jego prawy dolny róg i trzymając wciśnięty przycisk rozciągnąć do pożądanej wielkości. Wraz z rozciągnięciem elementu zmieni się automatycznie liczba wejść, którą możemy później dostosować do własnych potrzeb. Liczbę wejść zmienia się klikając prawym przyciskiem lub dwukrotnie lewym na element **Scope**, a następnie wybierając **Trace/Number of Traces**. Ilustruje to rys. 2.28.

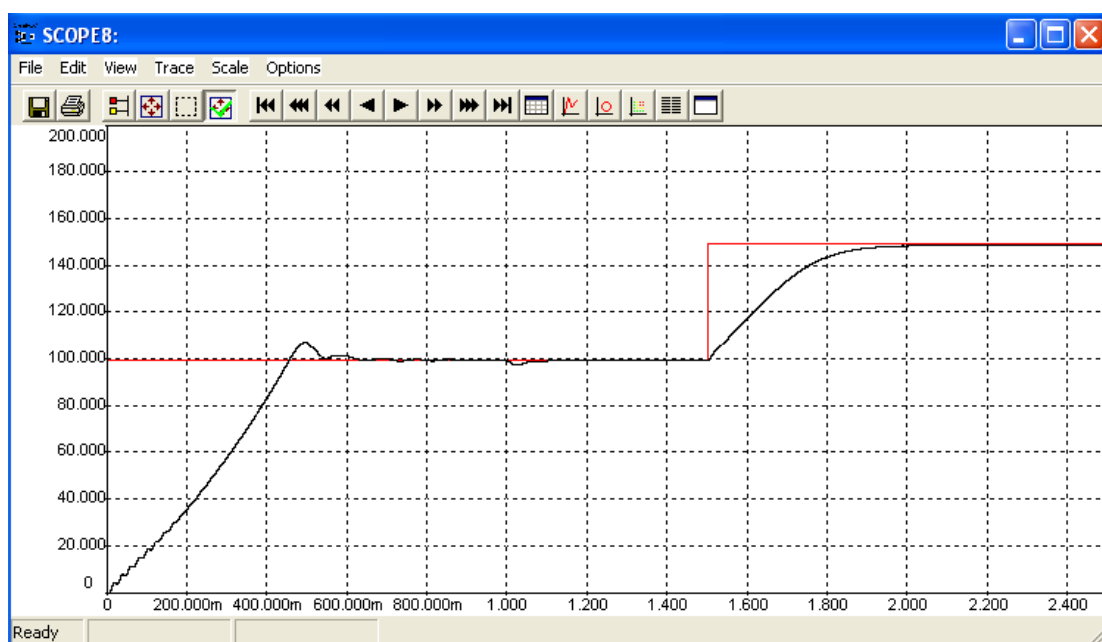


Rys. 2.28. Zmiana liczby wejść

Właściwości elementu Scope

Aby przejść do właściwości elementu **Scope** należy w niego dwukrotnie kliknąć lewym przyciskiem myszki lub raz prawym. W głównym oknie właściwości (rys. 2.29) znajdują następujące zakładki:

- File
 - Save/Open: służy do zapisu oraz otwarcia wcześniej zapisanego przebiegu symulacji,
 - Print: włączenie opcji drukowania,
 - Export EMF: pozwala zapisać schemat w postaci pliku graficznego.
- Edit
 - Edit: pozwala na edycję schematu.
- View
 - Time Scale: pokazuje przebieg symulacji w funkcji czasu,
 - XY Writer: przebieg Y wykreślany jest w funkcji X.
- Trace
 - Number of traces: zmiana liczby wejść oscyloskopu,
 - Trace 1...20: zmiana właściwości przebiegów (kolor, nazwa, grubość linii, ...).
- Scale
 - Resize Scale: dopasowuje skalę do przebiegów,
 - Auto Resize Scale: automatyczne dopasowanie skali,
 - Zoom scale of selected area: powiększenie zaznaczonego fragmentu.
- Options
 - Background color: pozwala na zmianę koloru tła,
 - Label Scope: zmiana nazwy oscyloskopu.



Rys. 2.29. Właściwości elementu **Scope** wraz z przykładowymi przebiegami

3. SCHEMAT STEROWANIA WEKTOROWEGO W PROGRAMIE CASPOC

3.1. Schemat układu sterowania wektorowego oraz dane dotyczące badanego silnika

W przedstawionym poniżej schemacie został wykorzystany silnik indukcyjny klatkowy o następujących parametrach:

- moc znamionowa	$P_N = 1120 \text{ W}$
- napięcie znamionowe	$U_N = 400 \text{ V}$
- prąd znamionowy	$I_N = 2,35 \text{ A}$
- częstotliwość znamionowa	$f_N = 50 \text{ Hz}$
- znamionowy współczynnik mocy	$\cos\varphi_N = 0,86$
- znamionowa sprawność	$\eta_N = 0,8$
- prędkość znamionowa	$n_N = 1450 \text{ obr/min}$
- znamionowy moment	$M_N = 7,375 \text{ Nm}$
- przeciążalność znamionowa	$M_{KN}/M_N = 2,4$
- rezystancja uzwojenia stojana	$R_S = 7,5 \text{ } \Omega$
- rezystancja uzwojenia wirnika	$R'_R = 5,03 \text{ } \Omega$
- indukcyjność rozproszenia stojana	$L_S = 0,0162 \text{ H}$
- indukcyjność rozproszenia wirnika	$L'_R = 0,0324 \text{ H}$
- indukcyjność magnesowania	$L_\mu = 0,304 \text{ H}$
- moment bezwładności silnika	$J = 0,0079 \text{ kgm}^2$
- liczba par biegunów	$p = 2$

Układ został zasilony ze źródła napięcia stałego o wartości $U = 650 \text{ VDC}$.

Rys. 3.1 przedstawia zamodelowany w programie Caspoc 2007 układ sterowania wektorowego [1,8].

3.2. Zasada działania zamodelowanego układu typu FOC

Schemat z rys. 3.1 przedstawia układ pośredniego sterowania połowo zorientowanego (IFOC – Indirect Field Oriented Control).

Składowe wektora strumienia wirnika są określane na podstawie wartości zadanej składowej i_{sx} prądu stojana, poślizgu oraz mierzonej prędkości wirnika, co jest cechą charakterystyczną tego układu. Zrealizowane jest to za pomocą elementu IDIQWSLIP1[1].

Zasada działania układu przedstawia się następująco:

- prądy fazowe są transformowane do układu 2 - fazowego (bloki CURRENT oraz 3/2); po tej transformacji otrzymuje się współrzędne wektora prądu rzeczywistego,
- na jedno wejście bloku IDIQWSLIP1 zadaje się stałą wartość sygnału odpowiedzialnego za strumień, natomiast sygnał na drugim wejściu stanowi prąd odpowiedzialny za moment elektromagnetyczny silnika, sygnał ten jest wypracowany za pomocą regulatora prędkości typu PI (PI – Proportional Integral – proporcjonalno-całkujący); regulatory typu PI pozwalają na sprowadzenie do zera uchybu regulacji w stanie ustalonym.

Przyjęto następujące parametry regulatora prędkości:

- współczynnik wzmocnienia	$K = 1,18$
- stała całkowania	$T_{au} = 100 \text{ ms}$
- max poziom sygnału	max poziom sygnału = 10
- min poziom sygnału	min poziom sygnału = 0

Na wyjściu elementu IDIQWSLIP1 otrzymuje się przebiegi prądów i_d , i_q oraz prędkości synchronicznej.

- dalej następuje porównanie prędkości synchronicznej z prędkością rzeczywistą oraz scałkowanie wyniku tego porównania, w celu uzyskania informacji o kącie (między stojanem a wirnikiem) niezbędnej do sterowania układu transformacji xy/dq ,
- wektor wartości zadanej (sygnał wyjściowy) z bloku xy/dq jest porównywany z wartością wektora prądu rzeczywistego,
- wynik tego porównania jest podawany na regulator prądu typu PI (w celu wypracowania wartości zadanej prądu).

Przyjęto następujące parametry regulatora prądu:

- współczynnik wzmocnienia	$K = 1$
- stała całkowania	$T_{au} = 0,1 \text{ ms}$
- max poziom sygnału	max = 1
- min poziom sygnału	min = -1

- wektor wyjściowy z prądowego regulatora PI jest sygnałem wejściowym do układu transformacji odwrotnej 2/3,
- przebiegi po transformacji 2/3 są porównywane z przebiegiem piłokształtnym o częstotliwości 5kHz, w celu właściwego wysterowania falownika.

3.3. Wyniki badań symulacyjnych

Przeprowadzono badania symulacyjne przy skokowej zmianie wartości zadanej prędkości wirnika i różnych wartościach momentu obciążenia silnika. Dokonano rejestracji następujących przebiegów czasowych:

- prędkości wirnika i momentu elektromagnetycznego silnika,
- prądów w osiach d i q (odpowiedzialnych za wartość strumienia głównego i momentu elektromagnetycznego),
- prądów w osiach x i y (składowych wektorów prądu zadanego i rzeczywistego).

Przedstawiono również hodografy wektorów prądu zadanego i rzeczywistego przy różnych parametrach pracy układu (prędkości zadanej i momentu obciążenia).

3.3.1. Przebiegi prędkości i momentu

Na rys. 3.2 ÷ 3.5 przedstawiono przebiegi prędkości wirnika i momentu elektromagnetycznego silnika przy parametrach pracy zestawionych w tabeli 3.1.

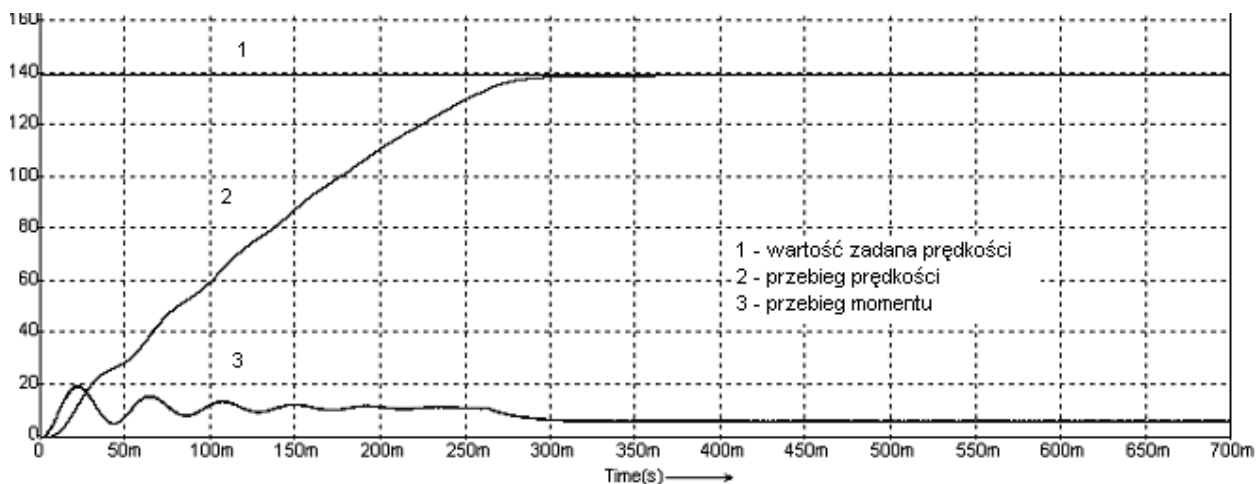
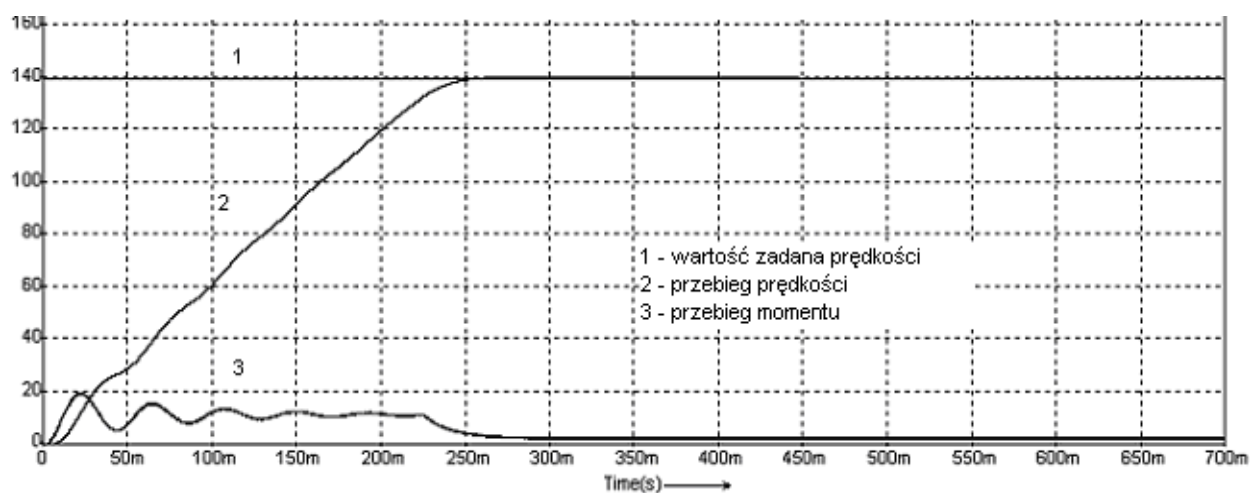
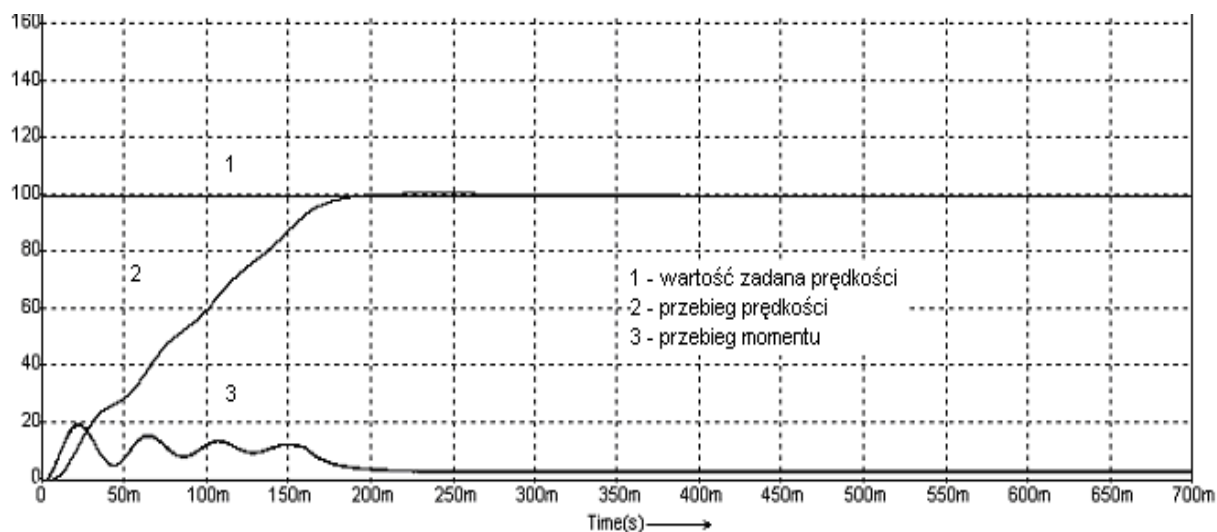
Tabela 3.1

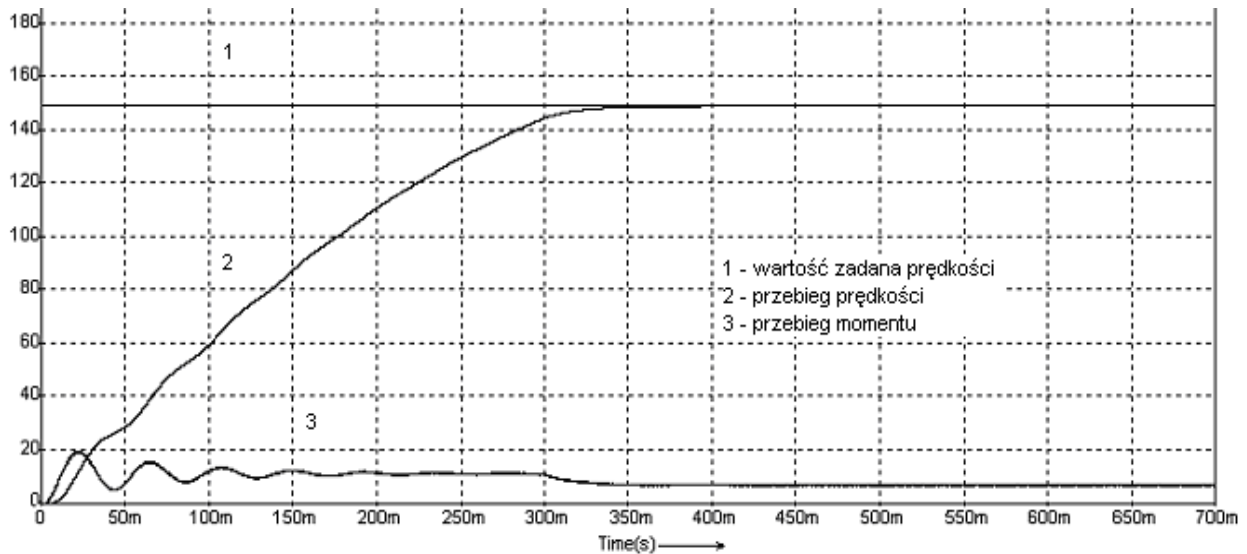
Nr symulacji	ω_{zad}	T_{obc}
---	rad/s	Nm
1	140	7,375
2	140	3
3	100	7,375
4	150	7,375

Dla tych warunków silnik uzyskał moment maksymalny i dokonał rozruchu w czasie podanym w tabeli 3.2.

Tabela 3.2

Nr symulacji	T_{max}	t_{rc}
---	Nm	ms
1	21,8	322,5
2	19,9	258,6
3	19,9	391,4
4	19,9	412,4

Rys. 3.2. Przebieg prędkości i momentu przy $\omega_{zad} = 140\text{rad/s}$ i $T_{obc} = 7,375\text{Nm}$ Rys. 3.3. Przebieg prędkości i momentu przy $\omega_{zad} = 140\text{rad/s}$ i $T_{obc} = 3\text{Nm}$ Rys. 3.4. Przebieg prędkości i momentu przy $\omega_{zad} = 100\text{rad/s}$ i $T_{obc} = 7,375\text{Nm}$



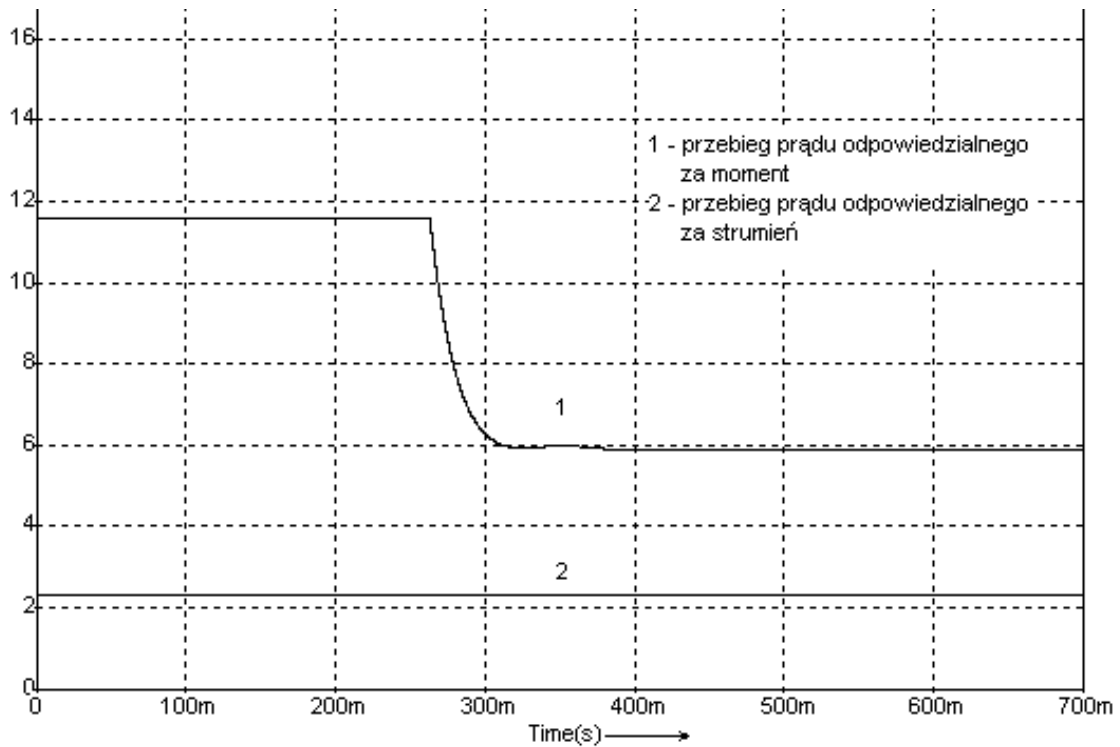
Rys. 3.5. Przebieg prędkości i momentu przy $\omega_{zad} = 150\text{rad/s}$ i $T_{obc} = 7,375\text{Nm}$

3.3.2. Przebiegi prądów w osiach d i q

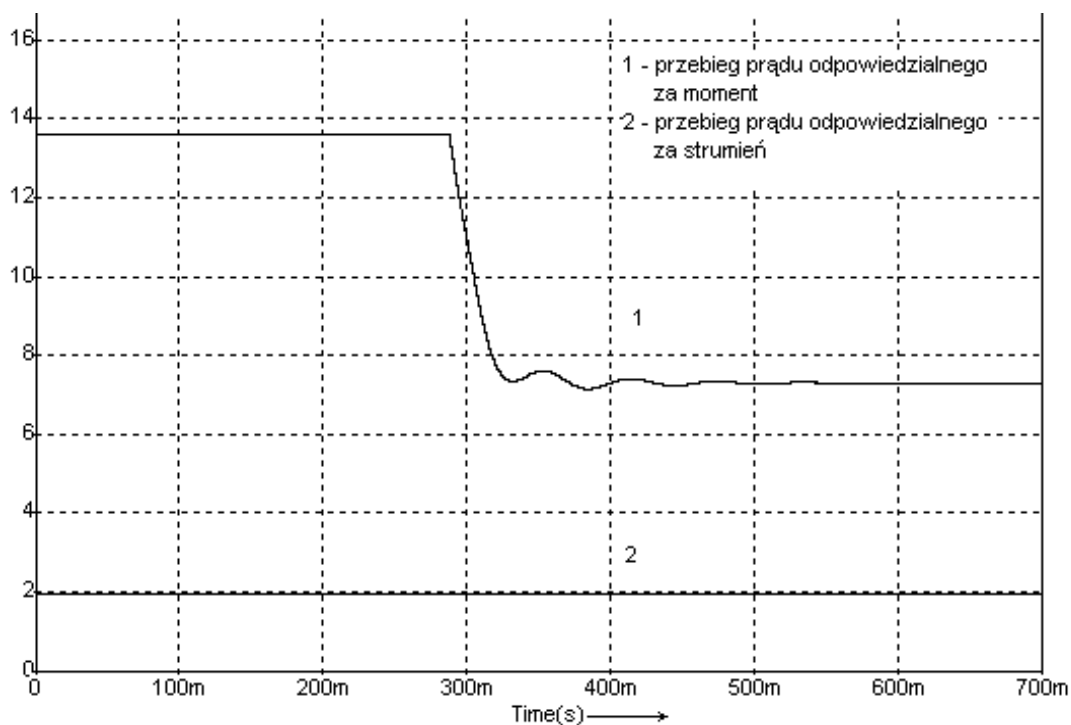
Przebiegi prądów osiowych (i_d oraz i_q) zarejestrowano podczas rozruchu silnika dla dwóch wartości zadanych prądu $i_{d\text{zad}}$:

- $i_{d\text{zad}} = 2,35\text{A}$,
- $i_{d\text{zad}} = 2,00\text{A}$.

Przebiegi przedstawiono odpowiednio na rys. 3.6 i 3.7.



Rys. 3.6. Przebieg prądu odpowiedzialnego za strumień (i_d) i moment (i_q)



Rys. 3.7. Przebieg prądu odpowiedzialnego za strumień (i_d) i moment (i_q)

3.3.3. Przebiegi składowych wektora prądu w osiach x i y (składowa czynna i bierna)

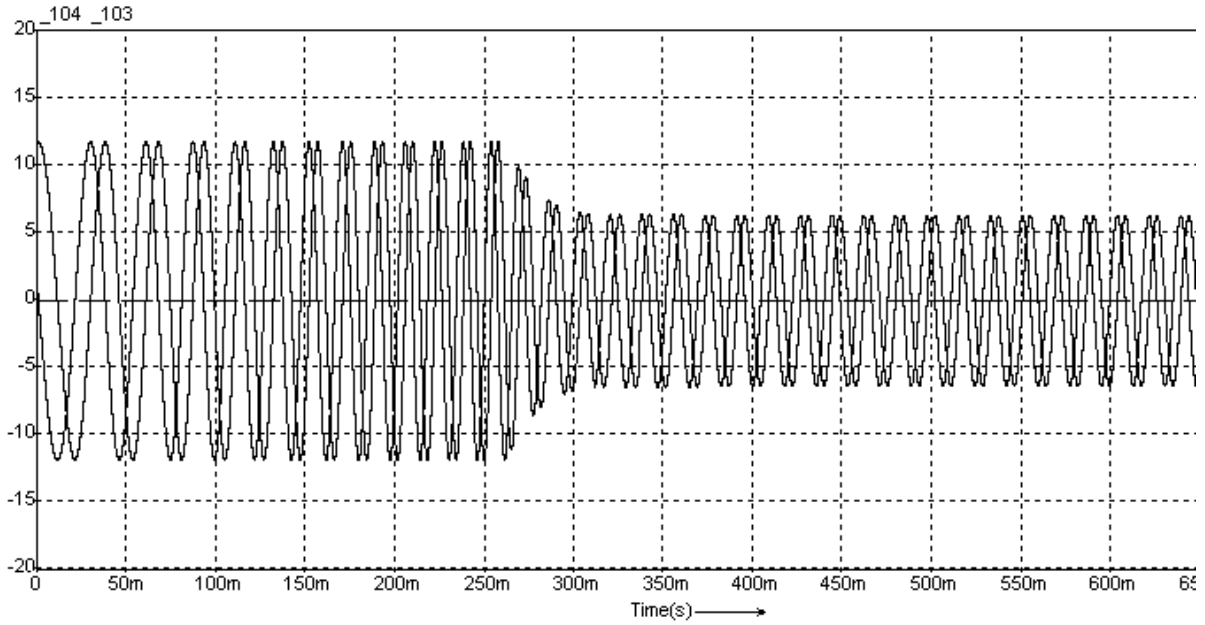
Przebiegi składowych wektora prądu zadanego oraz rzeczywistego dla parametrów pracy zamieszczonych w poniższej tabeli (tabela 3.3) ilustrują rys. 3.8.-3.15.

Tabela 3.3

Nr symulacji	ω_{zad}	T_{obc}
---	rad/s	Nm
1	140	7,375
2	140	3
3	100	7,375
4	150	7,375

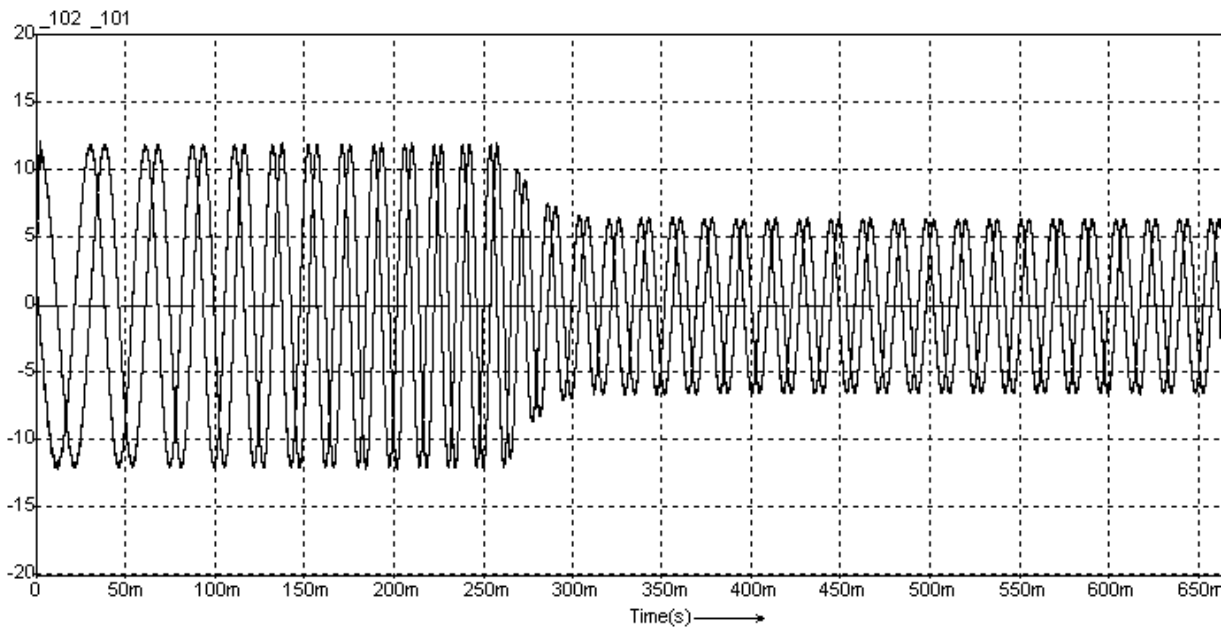
a). Symulacja numer 1

Składowe wektora prądu zadanego



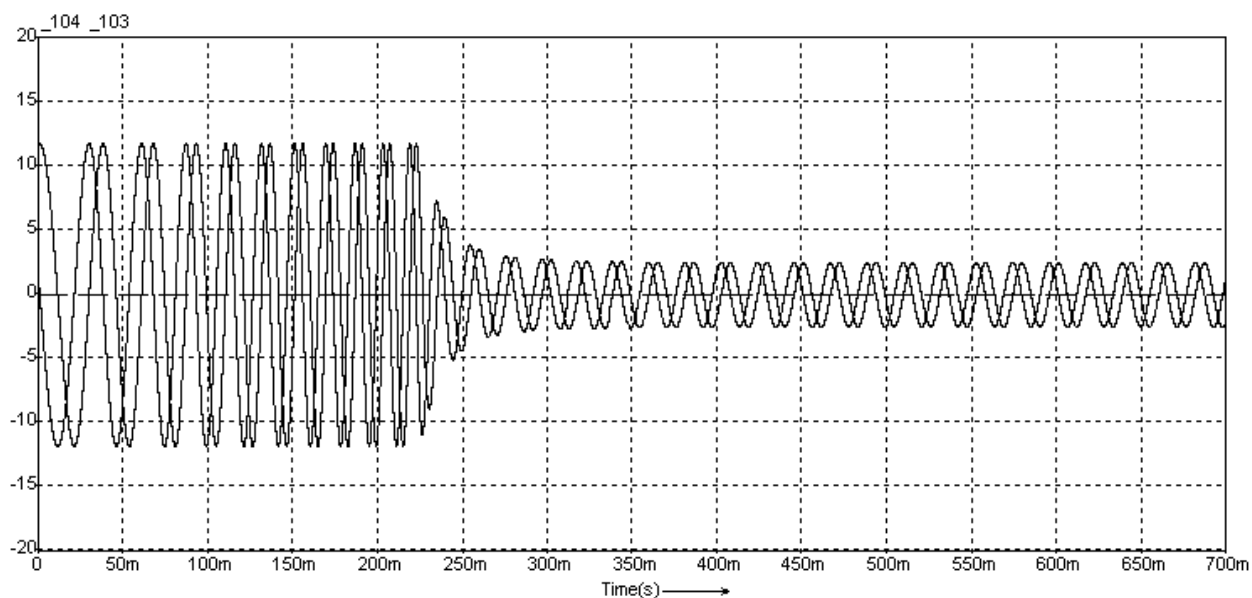
Rys. 3.8. Składowe wektora prądu zadanego

Składowe wektora prądu rzeczywistego

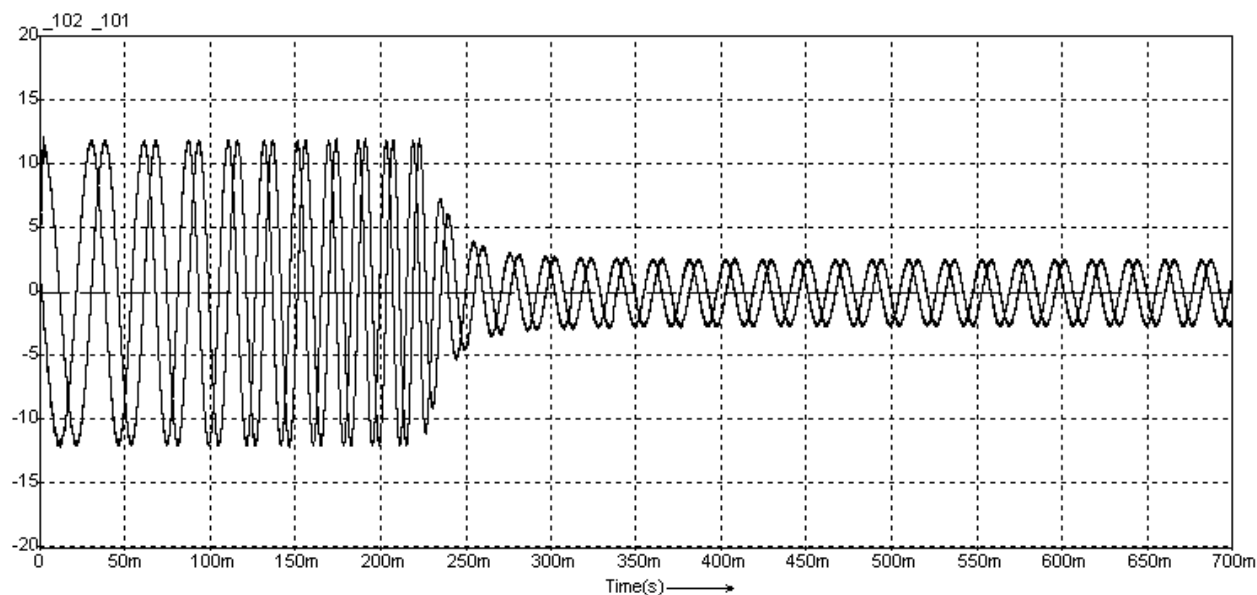


Rys. 3.9. Składowe wektora prądu rzeczywistego

b). Symulacja numer 2

Składowe wektora prądu zadanego

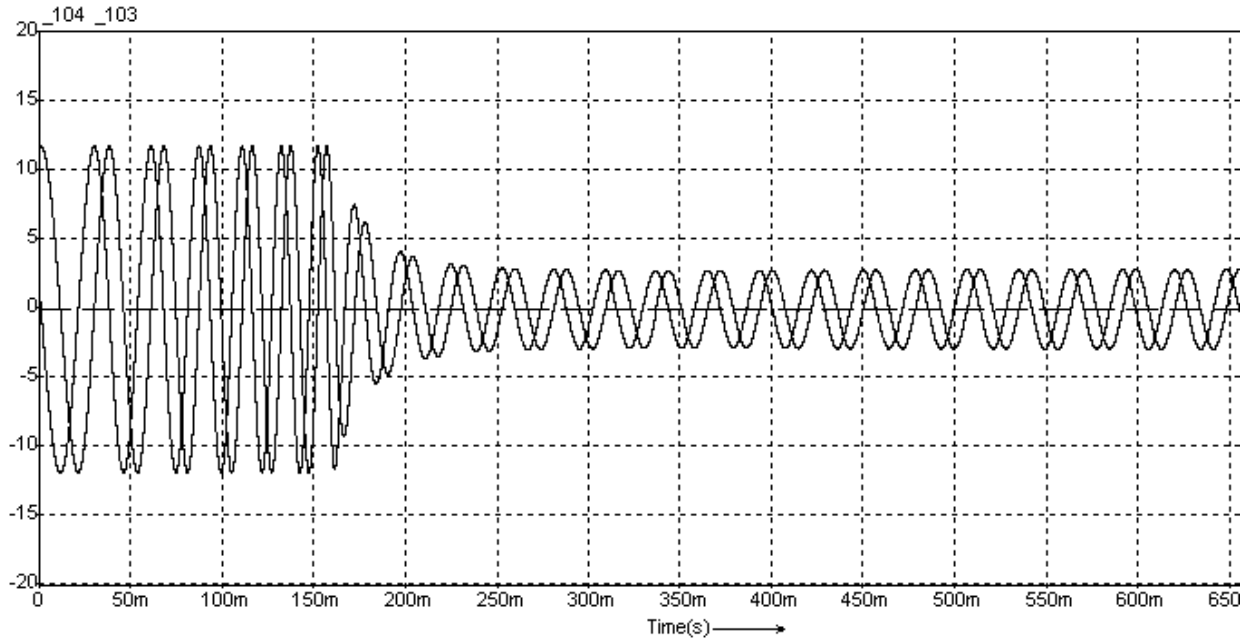
Rys. 3.10. Składowe wektora prądu zadanego

Składowe wektora prądu rzeczywistego

Rys. 3.11. Składowe wektora prądu rzeczywistego

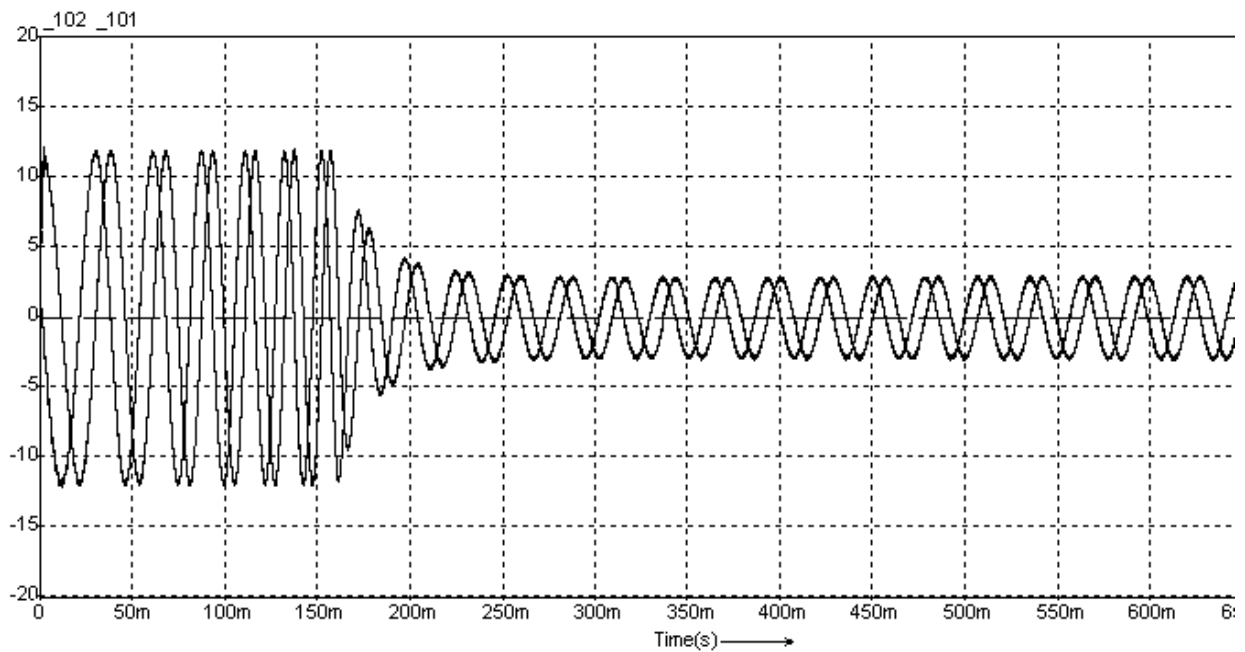
c). Symulacja numer 3

Składowe wektora prądu zadanego



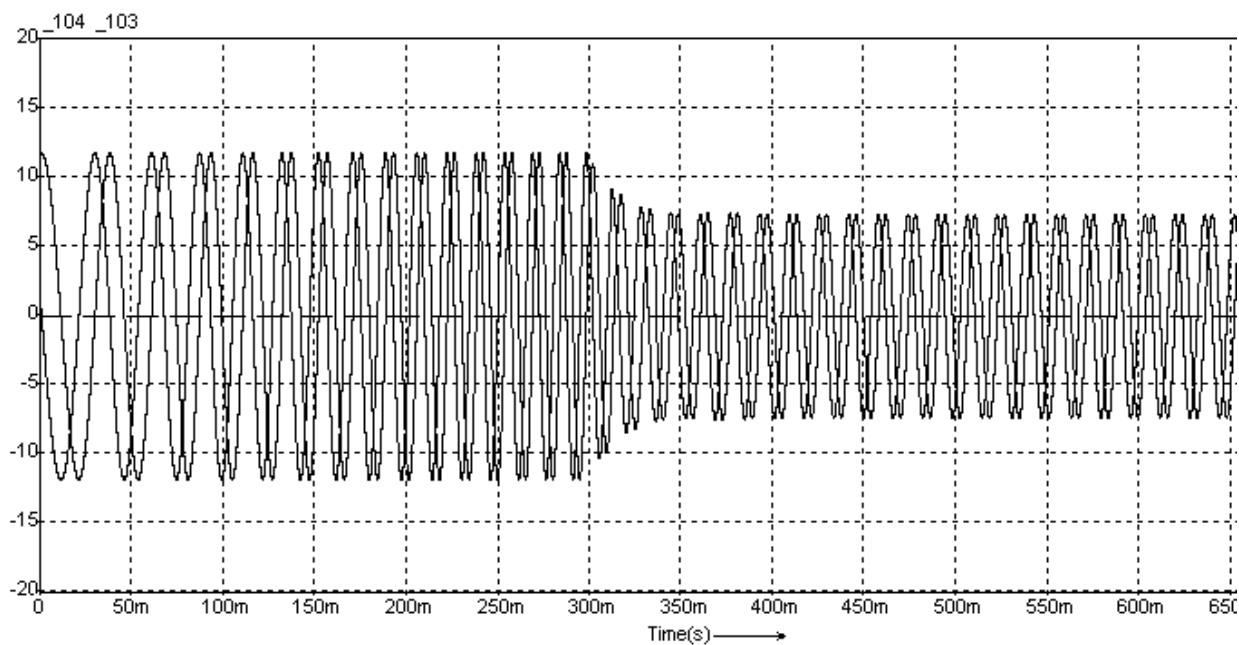
Rys. 3.12. Składowe wektora prądu zadanego

Składowe wektora prądu rzeczywistego

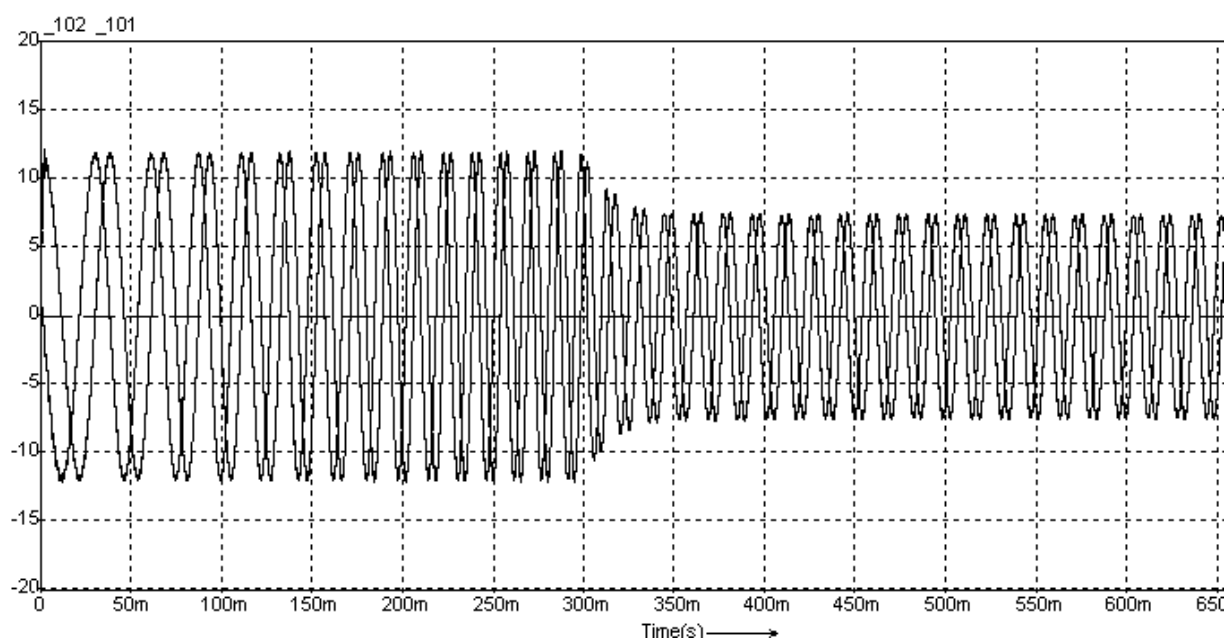


Rys. 3.13. Składowe wektora prądu rzeczywistego

d). Symulacja numer 4

Składowe wektora prądu zadanego

Rys. 3.14. Składowe wektora prądu zadanego

Składowe wektora prądu rzeczywistego

Rys. 3.15. Składowe wektora prądu rzeczywistego

3.3.4. Hodograf wektora prądu zadanego oraz rzeczywistego

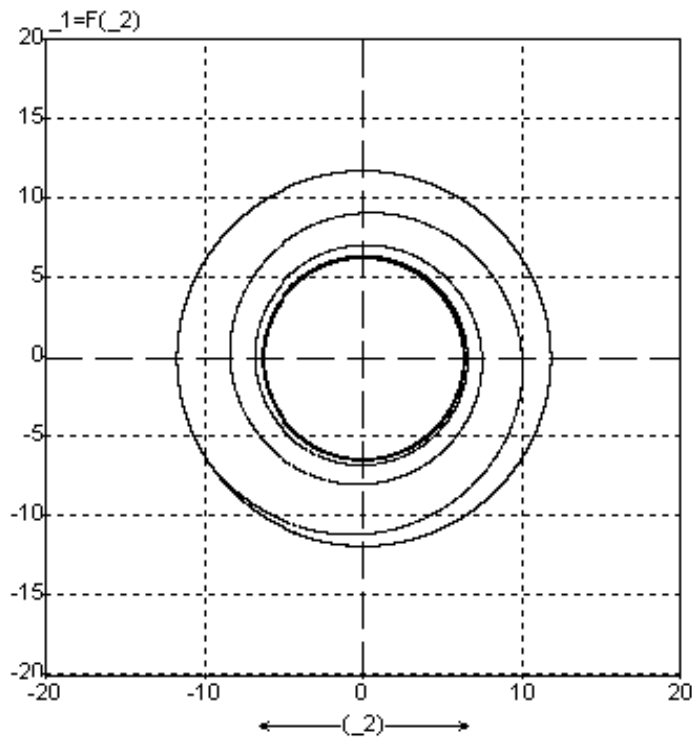
Poniższe przebiegi rys. 3.16-3.23. przedstawiają hodografy prądów rzeczywistego oraz zadanego dla parametrów symulacji zawartych w tabeli 3.4.

Tabela 3.4

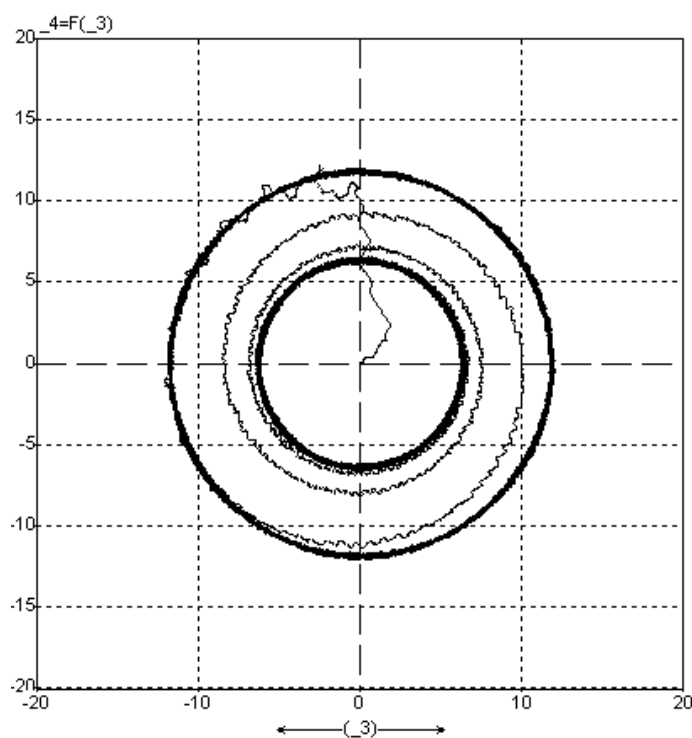
Nr symulacji	ω_{zad}	T_{obc}
---	rad/s	Nm
1	140	7,375
2	140	3
3	100	7,375
4	150	7,375

a). Symulacja numer 1

Hodograf wektora prądu zadanego

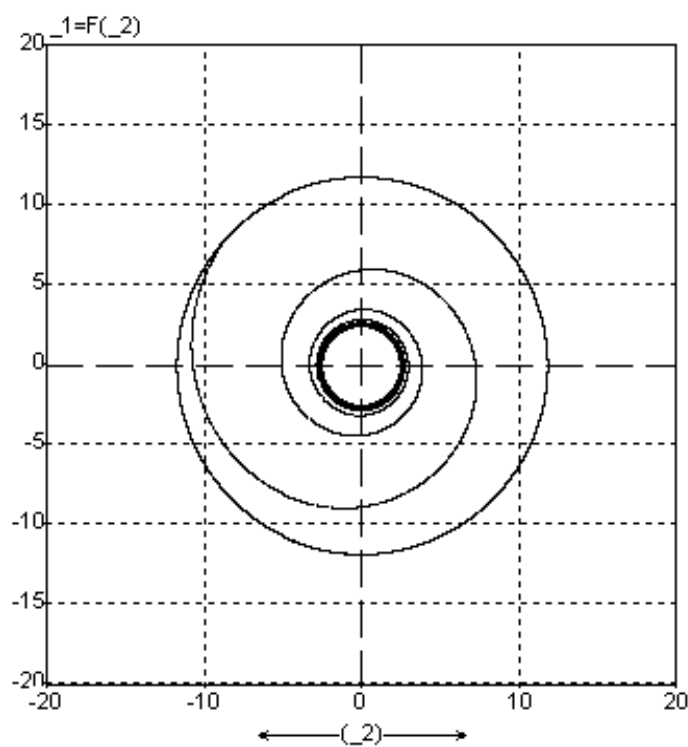


Rys. 3.16. Hodograf wektora prądu zadanego

Hodograf wektora prądu rzeczywistego

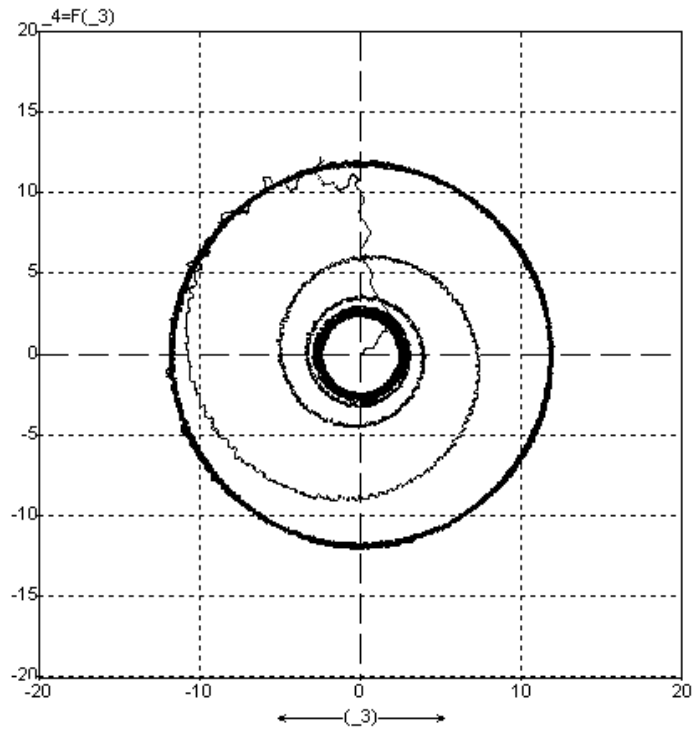
Rys. 3.17. Hodograf wektora prądu rzeczywistego

b). Symulacja numer 2

Hodograf wektora prądu zadanego

Rys. 3.18. Hodograf wektora prądu zadanego

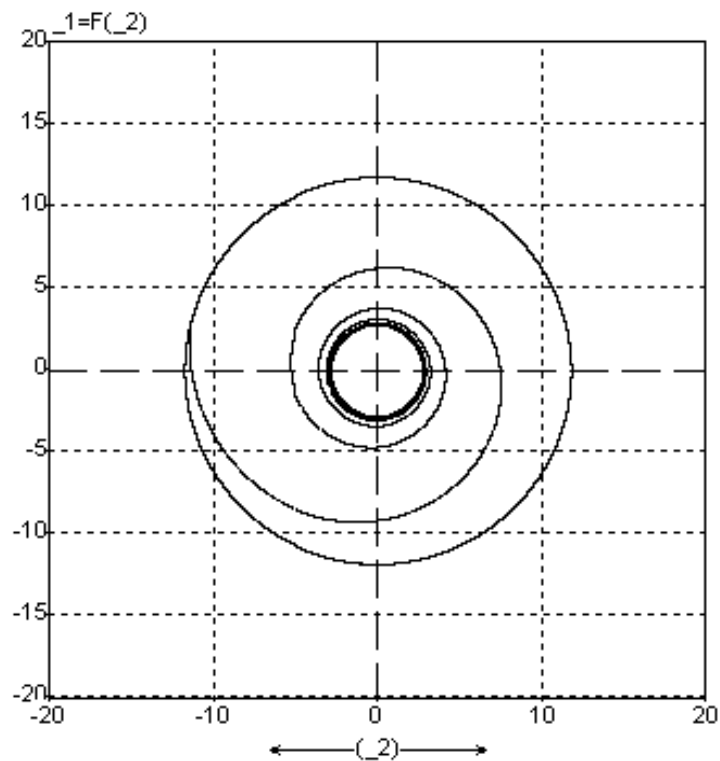
Hodograf wektora prądu rzeczywistego



Rys. 3.19. Hodograf wektora prądu rzeczywistego

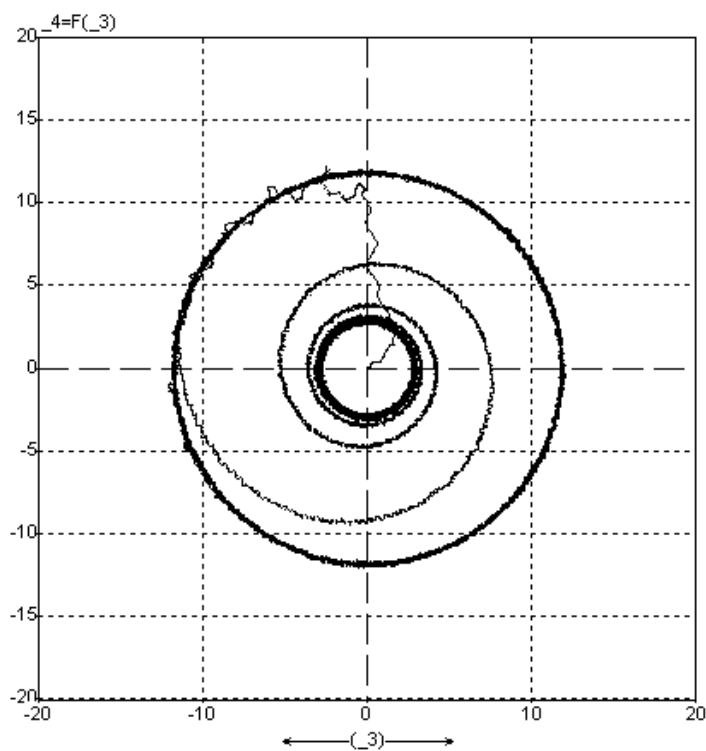
c). Symulacja numer 3

Hodograf wektora prądu zadanego



Rys. 3.20. Hodograf wektora prądu zadanego

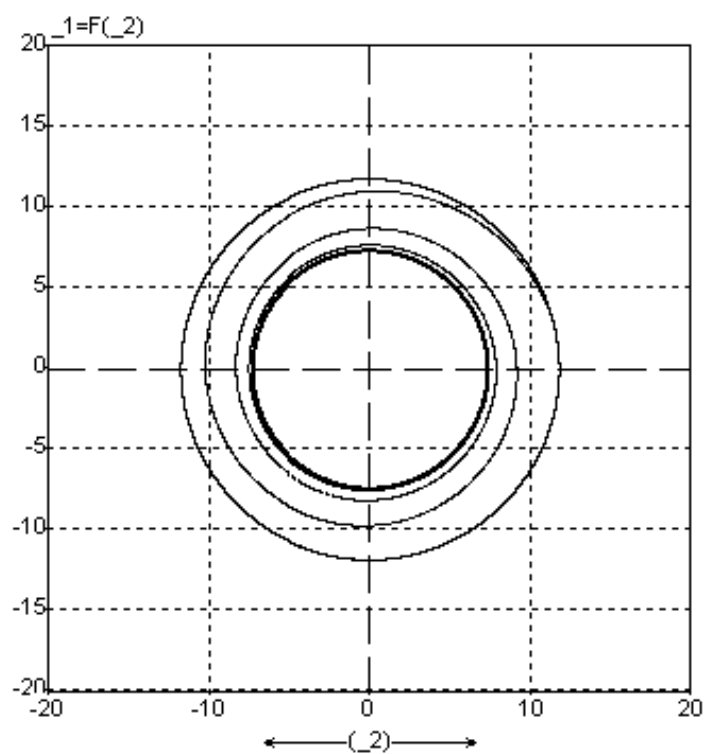
Hodograf wektora prądu rzeczywistego



Rys. 3.21. Hodograf wektora prądu rzeczywistego

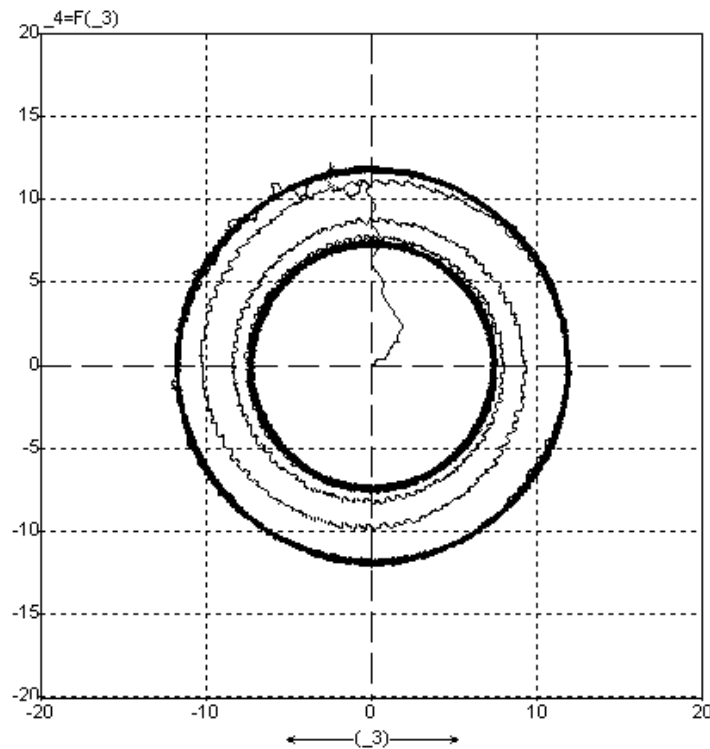
d). Symulacja numer 4

Hodograf wektora prądu zadanego



Rys. 3.22. Hodograf wektora prądu zadanego

Hodograf wektora prądu rzeczywistego



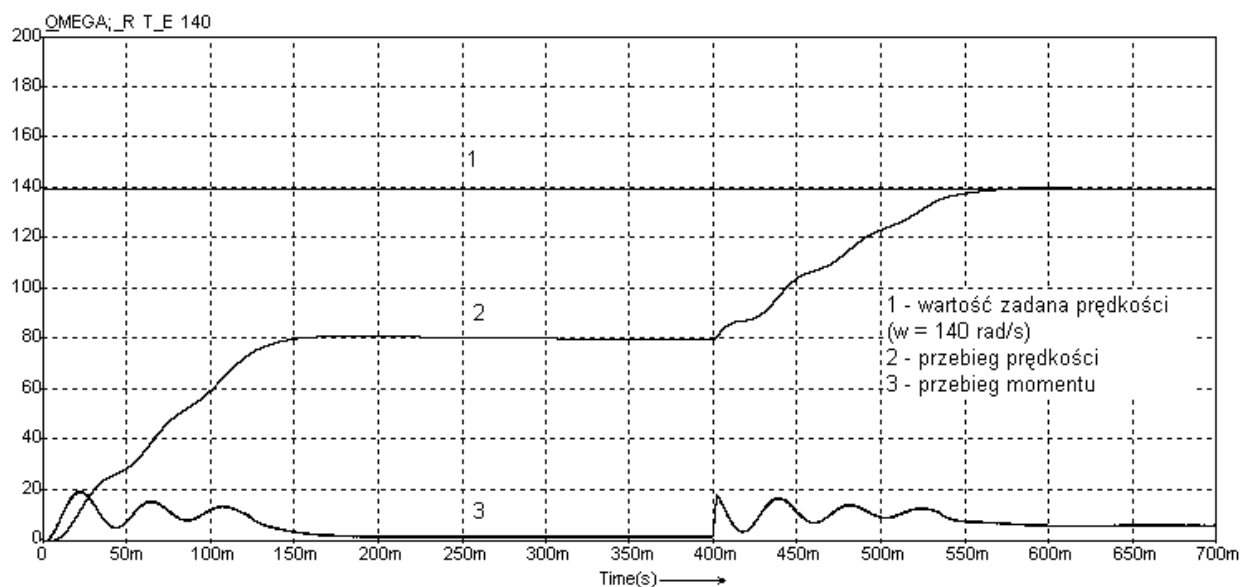
Rys. 3.23. Hodograf wektora prądu rzeczywistego

3.3.5. Przebiegi dla skokowej zmiany prędkości obrotowej

Rys. 3.24-3.26. ilustrują przykładowe przebiegi prędkości, momentu, składowych wektora prądu zadanego w osiach x i y oraz prądów w osiach d i q odpowiedzialnych za strumień i moment, przy skokowej zmianie wartości zadanej prędkości obrotowej.

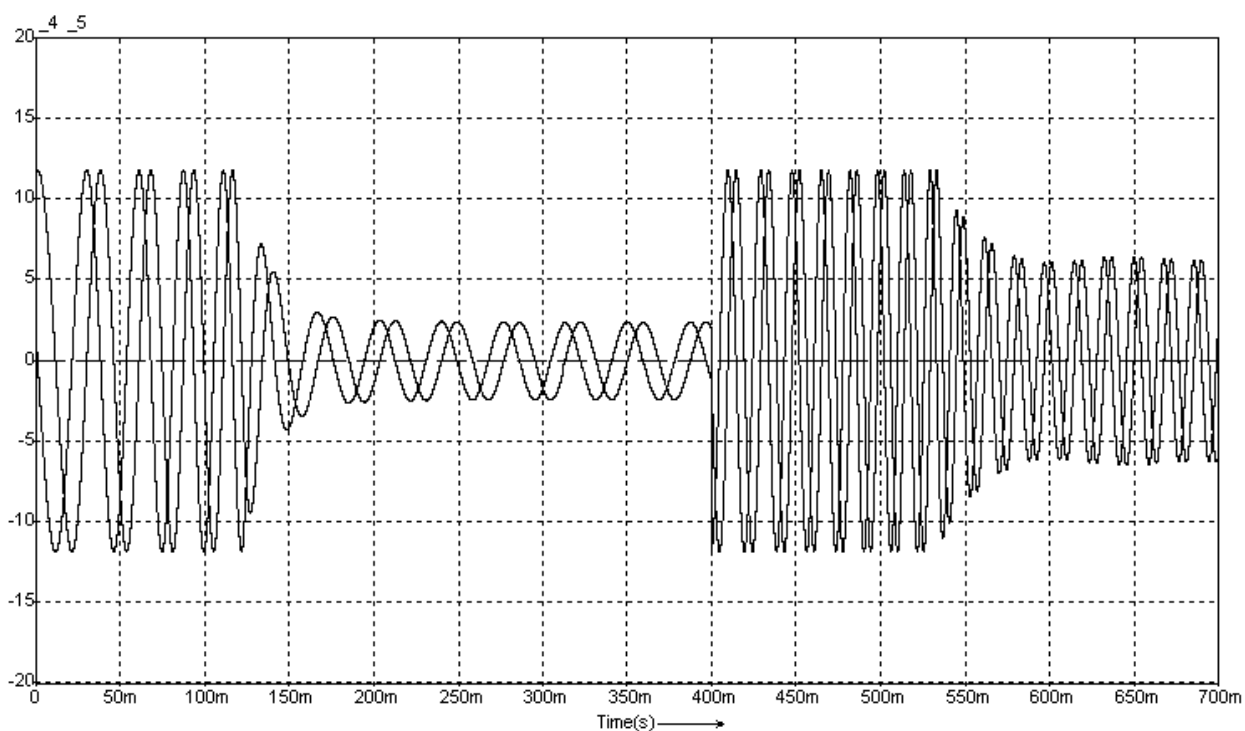
Silnik dokonuje rozruchu do prędkości 80 rad/s, a po czasie 400 ms następuje przyspieszenie do prędkości 140 rad/s.

Przebieg prędkości oraz momentu



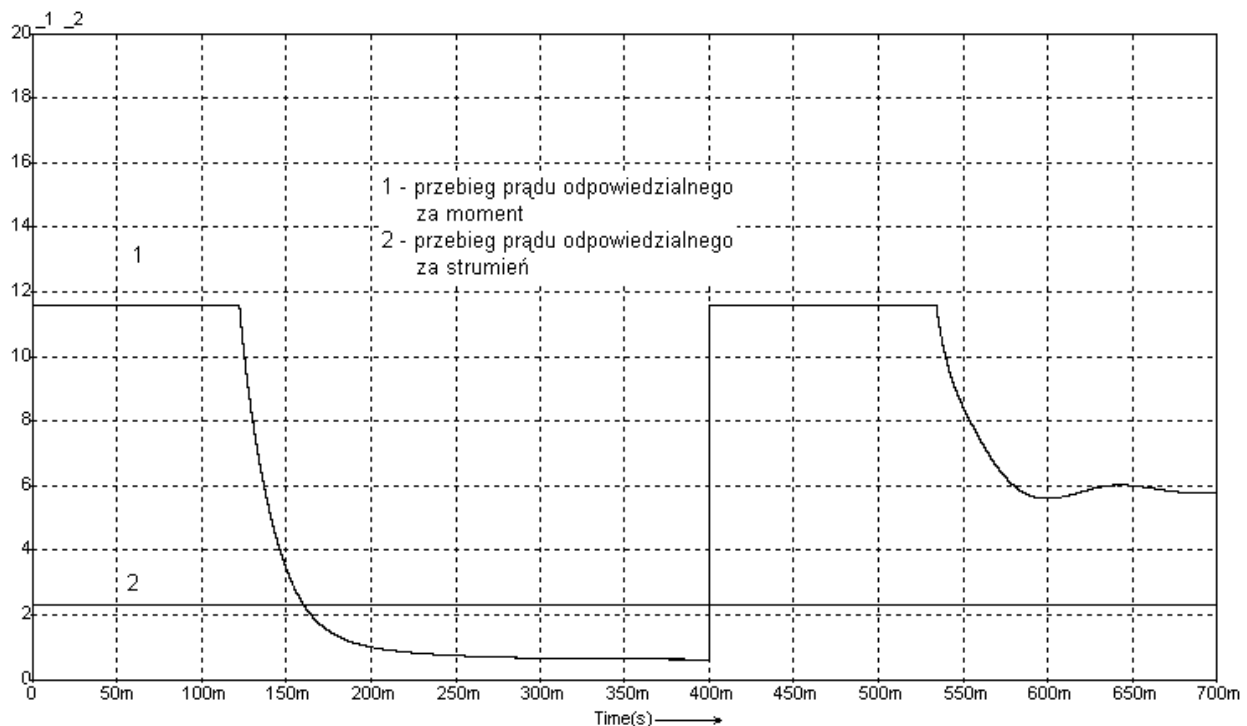
Rys. 3.24. Przebieg prędkości oraz momentu przy skokowej zmianie prędkości obrotowej

Składowe wektora prądu zadanego w osi x i y



Rys. 3.25. Składowe wektora prądu zadanego przy skokowej zmianie prędkości obrotowej

Przebieg prądu w osi d i q



Rys. 3.26. Przebieg prądu odpowiedzialnego za strumień (i_d) i moment (i_q) przy skokowej zmianie prędkości obrotowej

3.4. Zestawienie elementów wykorzystanych w symulowanym układzie

Elementy wykorzystane w zamodelowanym schemacie

Tabela 3.3

Nazwa elementu	Ścieżka dostępu	Znaczenie
V – Voltage Source	Components – Circuit – Sources - V	Źródło napięcia
L - Inductor	Components – Circuit – RLC - L	Cewka
C - Capacitor	Components – Circuit – RLC - C	Kondensator
Inverter	Components – Library – PowerConverters – Inverters3phase - Inverter	Falownik
IMWYE – Inductor Motor	Components – Library – ElectricalMachines – IM - IMWYE	Silnik indukcyjny klatkowy
Load Quadratic	Components – Library – Mechanic – Rotational - LoadQuadratic	Obciążenie silnika
Angular Speed	Components – Library – Sensor – Rotational - AngularSpeed	Czujnik prędkości
ABRST	Components – Library – ElectricalMachines – Transformations - ABRTS	Transformacja 2/3

PWM	Components – Library – PowerConverters – Inverters3phase – PWM_Converter - SymCarrier	MSI
Current	Components – Blocks – Source - Current	Prąd
RSTAB	Components – Library – ElectricalMachines – Transformations - RTSAB	Transformacja 3/2
PI Limited	Components - Library – AdvancedElectricalDrives – Control – Scalar - PILimited	Regulator PI
IDIQWslip	Components - Library – Control – FieldOrientedControl – IDIQWslip	Informuje o kącie położenia strumienia wirnika
K_Tau	Components - Library – Control – FieldOrientedControl –	Związany z IDIQWslip (informuje o silniku)
ADD	Components - Library – AdvancedElectricalDrives – Math – Scalar - Add	Suma
SUB	Components - Library – AdvancedElectricalDrives – Math – Scalar - Sub	Różnica (dla wielkości skalarnych)
SUB	Components - Library – AdvancedElectricalDrives – Math – Vector - Sub	Różnica (dla wielkości wektorowych)
XYDQ	Components - Library – AdvancedElectricalDrives – Transformation – General - XYDQ	Transformacja XY/DQ
Integrator Modulus	Components - Library – AdvancedElectricalDrives – Math – Scalar - IntegratorModulus	Całkowanie prędkości
Scalar2Vector	Components - Library – AdvancedElectricalDrives – Interface - Scalar2Vector	Przejsie z wielkości skalarnych do wektorowych
Vector2Scalar	Components - Library – AdvancedElectricalDrives – Interface - Vector2Scalar	Przejsie z wielkości wektorowych do skalarnych
Scope	Insert - Scope	Oscyloskop

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Celem niniejszej pracy dyplomowej było zamodelowanie układu sterowania wektorowego silnika indukcyjnego przy użyciu programu Caspoc.

Pracę można podzielić na dwie główne części. Pierwsza zawiera podstawowe informacje na temat silników indukcyjnych, sterowania wektorowego oraz programu Caspoc. W drugiej, zasadniczej części przedstawiono sposób zamodelowania układu i doboru jego parametrów. Przeprowadzone symulacje zilustrowano zarejestrowanymi przebiegami wielkości mechanicznych i elektrycznych oraz sygnałów w różnych miejscach układu sterowania.

Analizując przebiegi oraz działanie przedstawionego układu można wysunąć następujące wnioski:

- sterowanie połowo zorientowane umożliwia niezależną regulację składowych prądu odpowiedzialnych za strumień oraz moment; dzięki temu możliwe jest odsprężone sterowanie momentu oraz strumienia silnika zarówno w stanach ustalonych jak i dynamicznych; prąd odpowiedzialny za strumień ma zawsze stałą wartość, natomiast przebieg prądu odpowiedzialnego za moment jest proporcjonalny do chwilowej wartości momentu elektromagnetycznego silnika (rys. 3.6., rys. 3.7.),
- układ charakteryzuje się szybkim ustaleniem prędkości obrotowej bez żadnych przeregulowań (oscylacji),
- zmiana momentu obciążenia silnika wpływa na czas jego rozruchu; zmniejszenie wartości obciążenia powoduje szybsze ustalenie prędkości obrotowej,
- przy odpowiednio dobranych parametrach regulatora prędkości silnik osiąga stan ustalony bardzo szybko ($t = 322,5$ ms - rys. 3.2.), bez żadnych przeregulowań; zbyt małe wzmocnienie powoduje dłuższy czas ustalenia prędkości, również bez przeregulowań (rys. 3.5); natomiast zbyt duże wzmocnienie powoduje oscylacje lub przeregulowania prędkości po osiągnięciu przez silnik wartości prędkości zadanej (rys. 3.4.),
- porównując przebiegi prądów oraz ich hodografów dla wartości zadanych i rzeczywistych można zauważyć, że przebiegi rzeczywiste w stanie

nieustalonym odbiegają od zadanych (np. rys. 3.22. i 3.23.), co spowodowane jest zastosowaniem falownika w układzie zasilania silnika.

5. LITERATURA

1. Orłowska–Kowalska T. Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2003.
2. Wierzejski M. Tendencje rozwojowe w napędzie elektrycznym, Wiadomości elektrotechniczne, Vol. 64, nr 8, 1996.
3. Kalus M., Skoczkowski T. Sterowanie napędami asynchronicznymi i prądu stałego, Wydawnictwo Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice, 2003.
4. Grunwald Z. Napęd elektryczny, Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, Warszawa, 1987.
5. Kowalowski H. Maszyny i napęd elektryczny, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1982.
6. Głowacki A. Obliczenia elektromagnetyczne silników indukcyjnych trójfazowych, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa, 1993.
7. Gogolewski Z., Kuczewski Z. Napęd elektryczny, Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, Warszawa, 1972.
8. Praca zbiorowa pod redakcją B. Grzesika Energoelektronika ćwiczenia laboratoryjne, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2001.
9. Śliwiński T. Poradnik inżyniera elektryka tom II, Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, Warszawa, 1975.
10. Plamitzer A.M. Maszyny elektryczne, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1976.
11. Krzemiński Z. Cyfrowe sterowanie maszynami asynchronicznymi, Gdańsk, 2000.
12. Kudła J. Wykłady z dynamiki maszyn elektrycznych.
13. Kaźmierkowski M.P. Nowoczesne energooszczędne układy sterowania i regulacji napędów z silnikami indukcyjnymi klatkowymi.
14. Kaźmierkowski M.P. Control strategies of PWM inverter-fed induction motors, Wydawnictwo SIGMA NOT Sp. z o.o., 1999.
15. Vas P. Vector Control of AC Machines, Clarendon Press, Oxford, 1990.
16. Texas Instruments Europe Field oriented control of 3-phase ac-motors, Literature Number BPRA073, 1998.
17. <http://www.automatykaonline.pl/>
18. <http://silnikielektryczne.prv.pl/>
19. <http://www.simulation-research.com/sr/sr.php>

