

AKADEMIA GÓRNICZO – HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE



WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI,
INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ

KATEDRA ENERGGOELEKTRONIKI I AUTOMATYKI SYSTEMÓW
PRZETWARZANIA ENERGII

Praca dyplomowa inżynierska

Imię i nazwisko **Yauheni Busko**

Kierunek studiów Elektrotechnika

Temat pracy dyplomowej **„Wirtualne stanowisko laboratoryjne z maszyną indukcyjną”**

Opiekun pracy dr inż. Tomasz Lerch

Kraków, rok 2016

Spis treści

1.1 Wstęp	
1.2 Cel pracy	3
1.3 Opis pomiarów wykonanych na stanowisku A3	3
1.4 Model stanowiska w środowisku Matlab – opis ogólny	5
2. Opis modeli stanowiska A3	9
2.1 Zasilanie	9
2.2 Maszyna indukcyjna pierścieniowa	12
2.3 Prądnica prądu stałego	13
2.4 Połączenie maszyny indukcyjnej i prądnic wałem sztywnym	14
2.5 Parametry modelu	15
2.6 Pomiary napięcia prądu i mocy w układach trójfazowych	16
3. Badanie maszyny indukcyjnej według programu ćwiczenia A3	18
3.1 Próba biegu jałowego	18
3.2 Próba obciążenia	19
3.3 Próba zwarcia	21
3.4 Zanik napięcia	23
3.5 Próba rozruchu	24
4. Podsumowanie	26
5. Literatura	27

1. Wstęp

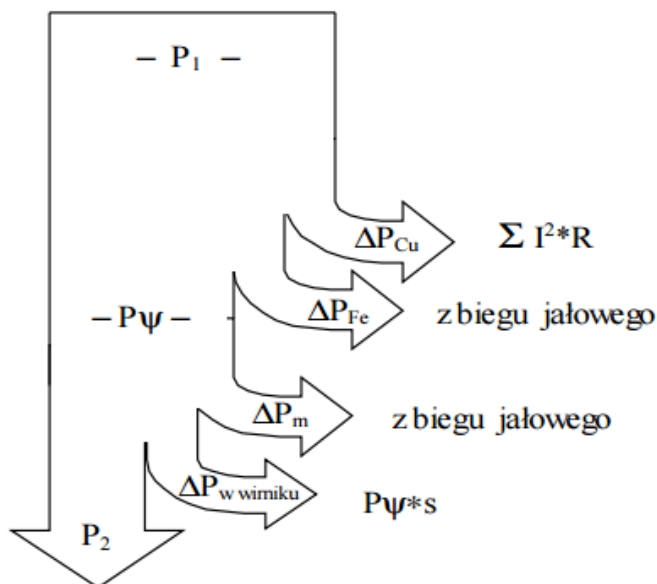
1.1 Cel pracy

Celem niniejszej pracy jest opracowanie kompletnego modelu stanowiska laboratoryjnego A3 do badań maszyny indukcyjnej. Model zostanie opracowany w środowisku Matlab Simulink 2015a z wykorzystaniem biblioteki SimPowerSystems oraz nowej biblioteki Dashboard. Parametry modelu zostaną zidentyfikowane na istniejącym stanowisku laboratoryjnym. Opracowany model ma w założeniu umożliwić przeprowadzenie badań symulacyjnych odpowiadających badaniom na stanowisku laboratoryjnym.

1.2 Opis pomiarów wykonywanych na stanowisku A3

Ćwiczenie A3 składa się z trzech części pomiarowych (oraz opracowania wyników): próby biegu jałowego, próby obciążenia oraz próby rozruchu.

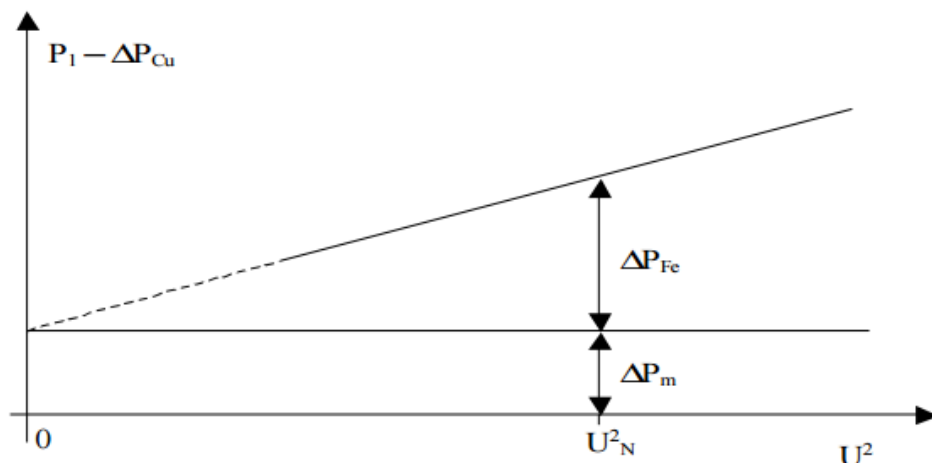
Próbę biegu jałowego wykonuje się zasilając nieobciążony silnik. Z otrzymanych wyników można określić straty mechaniczne (ΔP_m) oraz straty w żelazie (ΔP_{Fe}). Ogólny bilans mocy dla silnika asynchronicznego przedstawiony jest na rysunku 1.1.



Rys. 1.1 Bilans mocy silnika asynchronicznego

- ΔP_{Cu} – straty w uzwojeniach
- ΔP_{Fe} – straty w żelazie
- ΔP_m – straty mechaniczne
- $\Delta P_{w \text{ wirniku}}$ – straty w wirniku
- ΔP_2 – moc oddana

Podczas biegu jałowego moc oddana ΔP_2 jest równa zero, poślizg (s) jest bliski zera, z tego wynika, że straty w wirniku też są zbliżone do zera. Pozostaje problem rozdzielania strat mechanicznych i strat w żelazie. Aby tego dokonać, należy zmierzyć charakterystykę biegu jałowego $\Delta P_1(U)$, $I(U)$, a następnie dokonać rozdziału strat w sposób schematycznie przedstawiony na rysunku:



Rys.1.2 Rozdział strat mocy przy biegu jałowym

Próby obciążenia dokonuje się, mierząc wielkości: moc doprowadzoną (ΔP_1), prąd, prędkość, dla różnych wartości obciążenia (silnik obciążony jest prądnicą hamującą). Pomiaru dokonuje się w zakresie stabilnej części charakterystyki mechanicznej, a więc od stanu jałowego (poślizg bliski zera) do mocy nominalnej na wale. Znając rozdział strat, można z mocy pobranej i prędkości obrotowej wyliczyć moment obrotowy. Jak wyliczyć moc oddaną (ΔP_2), podają wzory 1.1 - 1.5.

$$P_2 = P_1 - \sum \Delta P \quad (1.1)$$

$$\sum \Delta P = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu} + \Delta P_m + \Delta P_{w \text{ wirniku}} + \Delta P_{dodatkowe} \quad (1.2)$$

$$\Delta P_{Cu} = 3 * R_s * I^2 \quad (1.3)$$

$$\Delta P_{w \text{ wirniku}} = (P_1 - \Delta P_{Cu} + \Delta P_{Fe}) * s \quad (1.4)$$

$$\Delta P_{dodatkowe} = 0.005 * P_1 \quad (1.5)$$

P_1 – wartość mocy pobranej

$\sum \Delta P$ – suma strat

s – poślizg

R_s – rezystancja fazy stojana

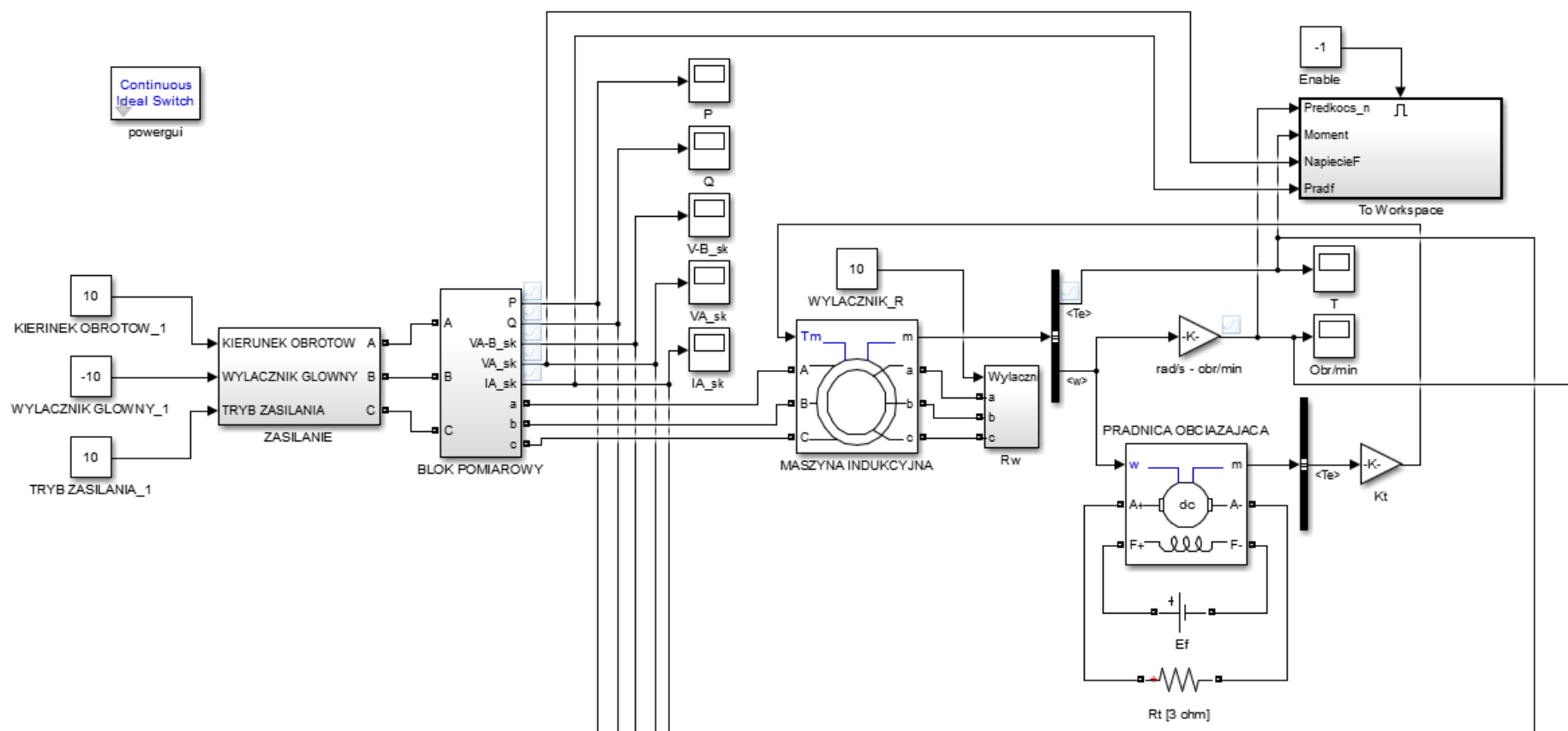
I – prąd fazowy

Z próby rozruchu można uzyskać charakterystykę mechaniczną silnika (w całym przedziale prędkości w odróżnieniu od próby obciążenia). Mierząc prędkość obrotową podczas rozruchu, a następnie wyliczając jej pochodną, można wyliczyć moment obrotowy (ponieważ moment bezwładności się nie zmienia, więc przyspieszenie kątowe jest proporcjonalne do rozwijanego momentu). Aby uzyskać krzywą quasi statyczną (czyli charakterystykę jak najbardziej zbliżoną do statycznej, a nie dynamiczny przebieg momentu w czasie rozruchu), rozruch powinien trwać dłużej niż trzy sekundy. W ćwiczeniu mierzymy rozruch silnika pierścieniowego dla dołączonych do wirnika rezystorów oraz bez dołączanych rezystorów. W otrzymanych charakterystykach powinien być wyraźnie widoczny wpływ różnej rezystancji wirnika.[1]

1.3 Model stanowiska w środowisku Matlab – opis ogólny

Schemat układu stanowiska A3 realizowany w środowisku Matlab Simulink przedstawia na rysunek 1.3.

Za pomocą konstant KIERUNEK OBROTOW_1, WYLACZNIK GLOWNY_1, TRYB ZASILANIA, WYLACZNIK_R, Enable” jest realizowane sterowanie modelem. Blok „ZASILANIE” realizuje zasilanie maszyny indukcyjnej napięciem trójfazowym. Dla wygody użytkownika istnieje możliwość przełączania pomiędzy trybem zasilania napięciem znamionowym maszyny 380V oraz trybem sterowalnym, który jest potrzebny do realizacji pomiaru biegu jałowego oraz zwarcia. W podsystemie „BLOK POMIAROWY” usytuowane są przyrządy pomiarowe. Do realizacji ćwiczenia potrzebne jest przeprowadzenie pomiaru wartości skutecznej napięcia fazowego i przewodowego, prądu jednej fazy stojana oraz mocy czynnej i biernej całego układu. Kolejnym elementem na schemacie jest maszyna indukcyjna pierścieniowa (blok „MASZYNA INDUKCYJNA”). Na wejście „Tm” maszyny indukcyjnej jest podawany sygnał momentu mechanicznego wytwarzanego przez generator prądu stałego. W bloku „Rw” znajdują się oporniki dodatkowe w obwodzie wirnika maszyny. Jako obciążenie maszyny indukcyjnej służy generator prądu stałego (blok „PRADNICA OBCIAZAJACA”). Napięcie wzbudzenia generatora wytwarza źródło napięcia stałego „Ef”, rezystor „Rt” tworzy obwód obciążający. Na wejściu „w” generatora jest podawany sygnał prędkości obrotowej wytworzony przez maszynę indukcyjną. Blok „Kt” zmienia znak sygnału momentu na ujemny. Blok „To Workspace” realizuje transfer danych momentu i prędkości obrotowej, napięcia fazowego, prądu fazowego oraz czasu do przestrzeni roboczej Matlaba.



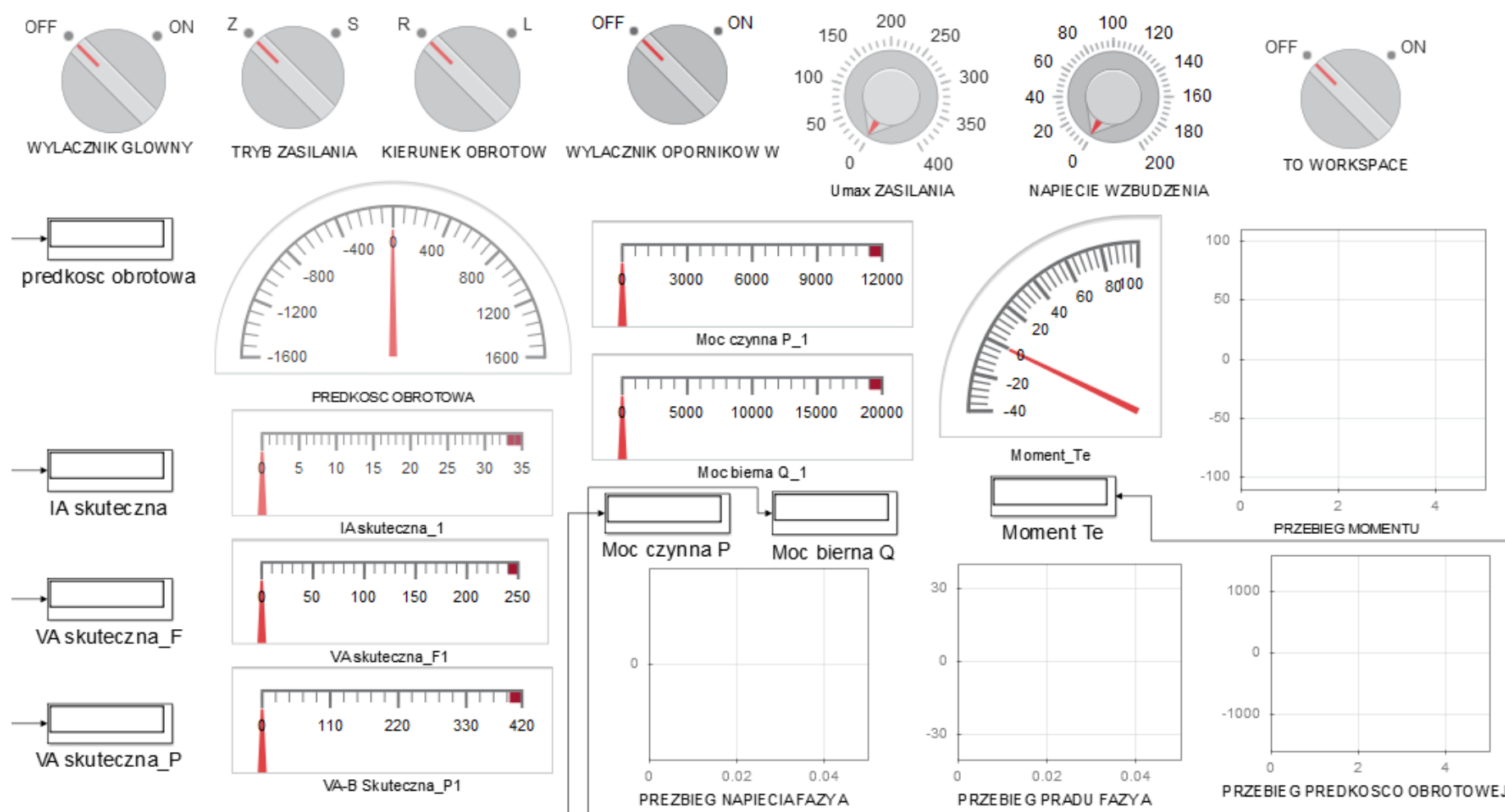
Rys 1.3 Schemat układu stanowiska laboratoryjnego

Interfejs użytkownika jest realizowany za pomocą nowej biblioteki Matlaba „Dashboard”.

Bloki biblioteki służą do wizualizacji wyników oraz sterowania układem w trakcie symulacji. Biblioteka zawiera wyłączniki, pokrętła, lampki, przyrządy wskazówkowe oraz oscyloskop.

Wyłączniki „WYLACZNIK GLOWNY, TRYB ZASILANIA, KIERUNEK OBROTOW, WYLACZNIK OPORNIKOW DODATKOWYCH, TO WORKSPACE” połączone są do odpowiadających konstant w modelu. Pokrętło „Umax Zasilania” połączone jest z blokiem „ZASILANIE” i umożliwia sterowanie wartością maksymalną sygnału zasilającego. Pokrętło „NAPIECIE WZBUDZENIA” połączone jest z źródłem „Ef” modelu i realizuje sterowanie napięciem wzbudzenia generatora prądu stałego.

Do odczytywania wyników symulacji służą przyrządy wskazówkowe z biblioteki Dashboard oraz bloki „Display”. Rejestrowane są wartości skuteczne napięcia fazowego oraz przewodowego, wartość skuteczna prądu fazy A, moc czynna oraz bierna, prędkość i moment obrotowy. Istnieje możliwość obserwacji przebiegów napięcia, prądu fazy A stojana maszyny indukcyjnej oraz przebiegu prędkości i momentu obrotowego.



Rys. 1.4 Schemat interfejsu użytkownika stanowiska laboratoryjnego

2. Opis modelu stanowiska A3

2.1 Zasilanie

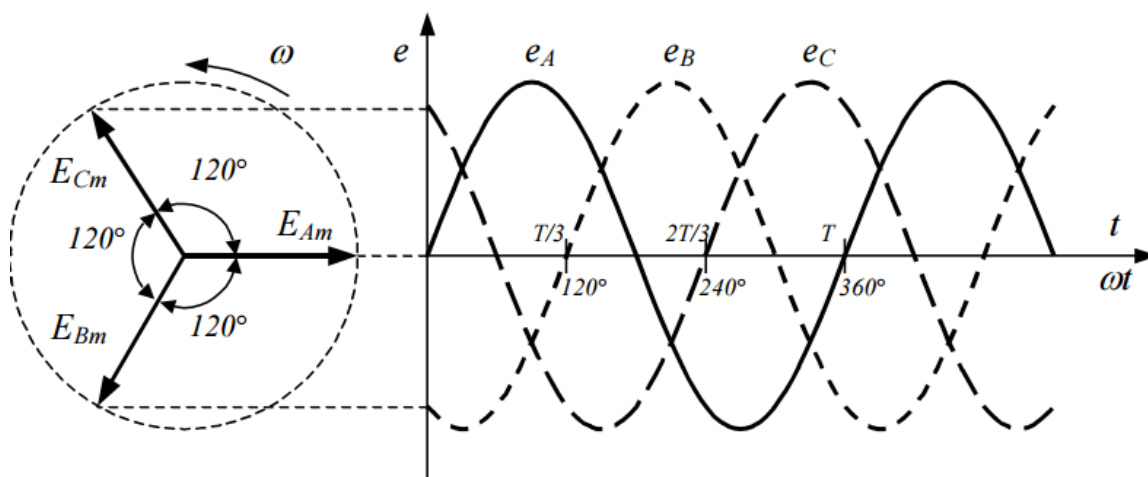
Do zasilania maszyny indukcyjnej służy symetryczne źródło napięcia przemiennego trójfazowego. Napięcia fazowe można przedstawić w postaci czasowej za pomocą wzorów 2.1. – 2.3.

$$e_A = E_m \sin \omega t \quad (2.1)$$

$$e_B = E_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (2.2)$$

$$e_C = E_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (2.3)$$

Taki układ symetryczny napięć nazywany jest układem symetrycznym zgodnym, gdyż przy dodatnim kierunku wirowania następstwo faz jest zgodne, przez co rozumie się następstwo A, B, C.



Rys. 2.1 Układ napięcia trójfazowego zgodny

Taki układ zasilania uzwojeń stojana wytwarza wirujące pole magnetyczne, które obraca się względem początkowo nieruchomego wirnika. Prędkość wirowania pola względem stojana zależy od częstotliwości napięć zasilających oraz liczby par biegunów p . [2]

$$n = \frac{60f}{p} \quad (2.4)$$

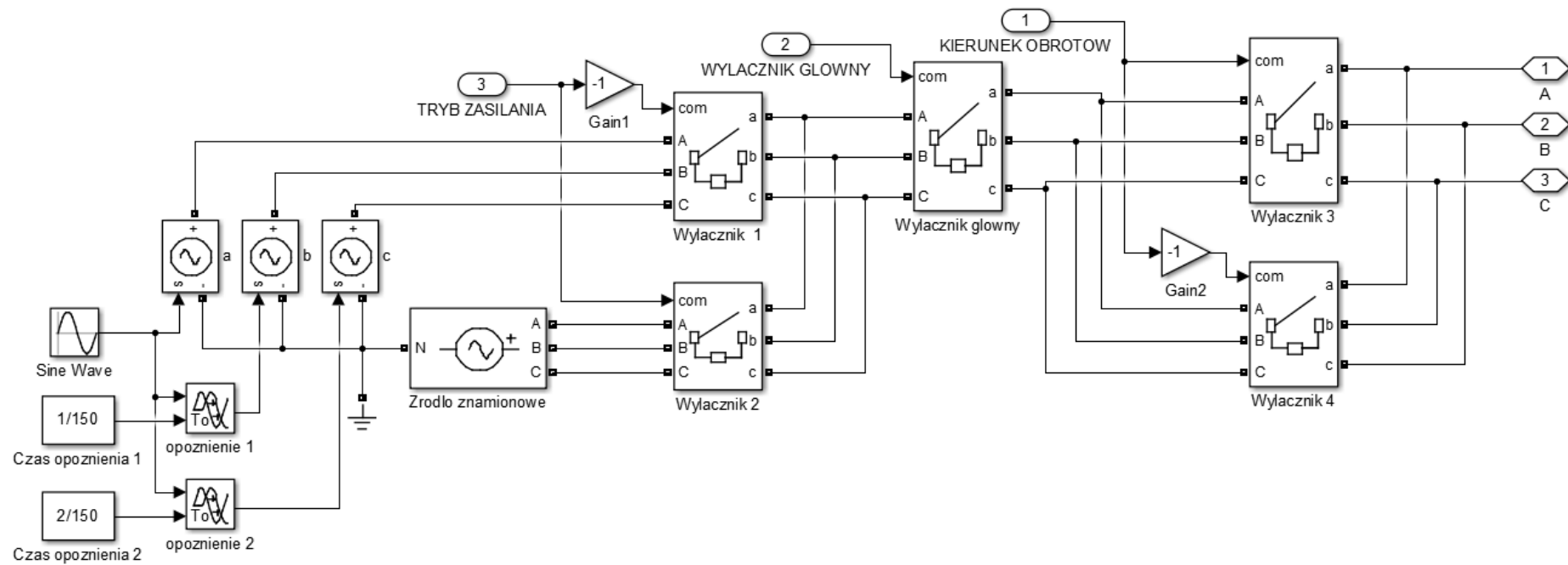
Ze wzorów 2.2 i 2.3 można wnioskować, że przebieg napięcia fazy B jest opóźniony względem fazy A o 120 stopni elektrycznych ($\frac{1}{3}$ okresu), a przebieg fazy C odpowiednio o 240 stopni elektrycznych ($\frac{2}{3}$ okresu). Znając częstotliwość zasilania maszyny indukcyjnej, wyliczono czasy opóźnienia fazy B i C względem A (wzory 2.5 – 2.7).

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} [s] \quad (2.5)$$

$$t_{oB} = \frac{1}{3}T = \frac{1}{150} [s] \quad (2.6)$$

$$t_{oC} = \frac{2}{3}T = \frac{2}{150} [s] \quad (2.7)$$

Układ zasilający modelu przedstawia rysunek 2.2. Źródło sterowalne utworzono za pomocą bloku Sine Wave oraz Controlled Voltage Source. Fazy B oraz C są opóźnione względem A zgodnie ze wzorami 2.6 i 2.7. Opóźnienie realizowane jest za pomocą bloku Variable Time Delay. Czas opóźnienia wprowadzają odpowiednie konstanty. Źródło znamionowe realizowane jest za pomocą bloku Three-Phase Programmable Voltage Source. Wyłączniki 1 i 2 tworzą układ do wyboru trybu zasilania. Wyłączniki 3 i 4 tworzą układ przełączania kolejności faz. Wyjścia „TRYB ZASILANIA, WYLACZNIK GŁÓWNY, KIERUNEK OBROTÓW” podłączone są do odpowiadających konstant, za pomocą których sterowany jest model.

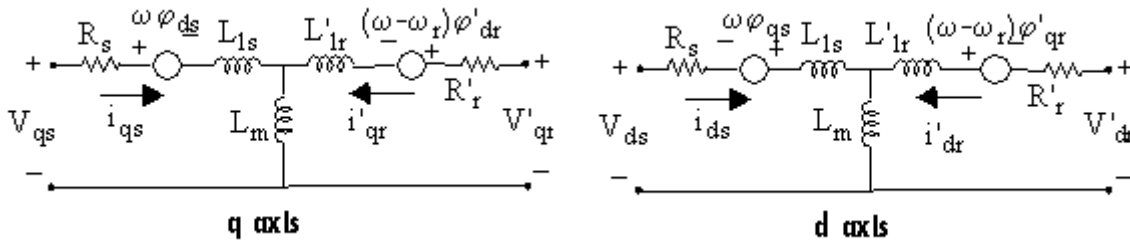


Rys. 2.2 Schemat bloku zasilajacego

2.2 Maszyna indukcyjna pierścieniowa

W środowisku Matlab stosuje się odwzorowanie trójfazowych wielkości wejściowych silnika indukcyjnego za pomocą tzw. wektora przestrzennego, określonego w przestrzeni dwuwymiarowej w prostokątnym układzie współrzędnych $q-d$. Układ ten jest orientowany w płaszczyźnie przekroju poprzecznego stojana silnika w ten sposób, że oś q pokrywa się z osią wybranej fazy, np. fazy A. [3]

Silnik indukcyjny wykorzystany w modelu opisują równania różniczkowe 2.8 – 2.20. Rysunek 2.2 przedstawia schemat zastępczy silnika indukcyjnego.[4]



Rys. 2.2 Schemat zastępczy maszyny indukcyjnej dla stanu nieustalonego

Równania opisujące system elektryczny maszyny indukcyjnej użytej w modelu:

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega \varphi_{ds} \quad (2.8)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega \varphi_{qs} \quad (2.9)$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d\varphi'_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr} \quad (2.10)$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d\varphi'_{dr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr} \quad (2.11)$$

$$\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \quad (2.12)$$

$$\varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \quad (2.13)$$

$$\varphi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{ds} \quad (2.14)$$

$$\varphi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \quad (2.15)$$

$$L_s = L_{1s} + L_m \quad (2.16)$$

$$L'_r = L'_{1r} + L_m \quad (2.17)$$

$$T_e = 1.5(\varphi_{ds}i_{qs} - \varphi_{qs}i_{ds}) \quad (2.18)$$

- $V_{qs}, V_{ds}, V'_{qr}, V'_{dr}$ – wektory przestrzenne napięcia stojana i wirnika
 $i_{qs}, i_{ds}, i'_{qr}, i'_{dr}$ – wektory przestrzenne prądu stojana i wirnika
 T_e – moment elektromagnetyczny
 $\varphi_{qs}, \varphi_{ds}, \varphi'_{qr}, \varphi'_{dr}$ – wektory przestrzenne strumienia skojarzonego stojana i wirnika
 R_s, R_r – rezystancja obwodów stojana i wirnika
 L_{1s}, L'_{1r} – indukcyjność stojana i wirnika
 L_m – indukcyjność wzajemna
 ω_r, ω – prędkość kątowna układu współrzędnych; wirnika względem stojana

Równania opisujące system mechaniczny maszyny indukcyjnej użytej w modelu:

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{2H} (T_e - F\omega_r - T_r) \quad (2.19)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m = \omega_r \quad (2.20)$$

- ω_r – prędkość obrotowa wirnika
 H – współczynnik opisujący inercję wspólnego układu rotora oraz obciążenia
 F – współczynnik opisujący tarcie lepkie wspólnego układu rotora oraz obciążenia
 T_e – moment mechaniczny wału
 T_r – moment tarcia ślizgowego
 θ_m – kąt elektryczny obrotu wirnika

2.3 Prądnicą prądu stałego

Równania opisujące elektryczną część generatora prądu stałego wykorzystanego w modelu: [5]

$$E = K_E \omega \quad (2.21)$$

$$K_E = L_{af} I_f \quad (2.22)$$

$$T_e = K_T I_a \quad (2.23)$$

$$K_E = K_T \quad (2.24)$$

E – siła elektromotoryczna generowana przez prądnice
 L_{af} – indukcyjność wzajemna obwodów wzbudzenia i wirnika
 T_e – moment elektryczny
 I_f, I_a – prądy obwodów wzbudzenia i wirnika
 K_E, K_T – stała napięciowa, stała momentu
 ω – prędkość obrotowa

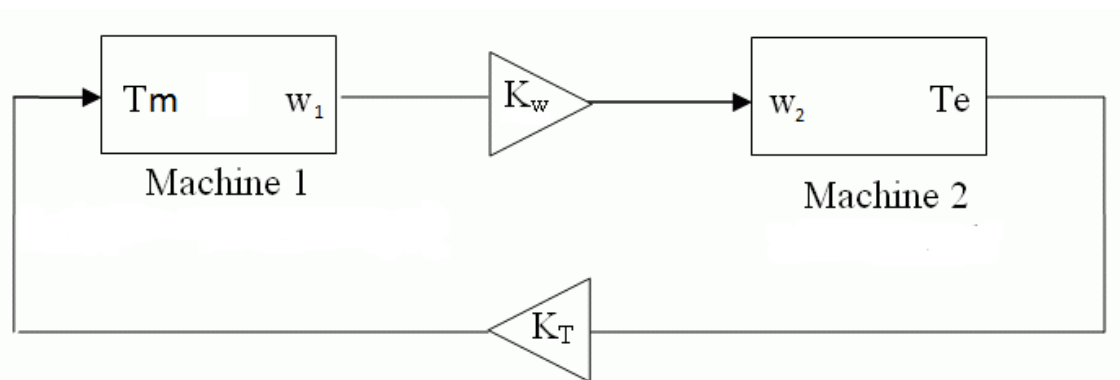
Równanie mechaniczne generatora przedstawia wzór 2.25.

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_l - B_m \omega - T_{fj} \quad (2.25)$$

J – moment bezwładności zredukowany do wału wirnika
 T_l – stały moment obciążenia generatora
 B_m – współczynnik tarcia lepkiego zredukowany do wału wirnika
 T_{fj} – moment siły tarcia ślizgowego

2.4 Połączenie maszyny indukcyjnej i prądnicy wałem sztywnym

Połączenie pomiędzy maszyną indukcyjną a generatorem prądu stałego wykonano według poleceń producenta pakietu Matlab. Zostało przedstawione na rysunku 2.3.



Rys. 2.3 Schemat blokowy połączenia maszyny indukcyjnej i generatora prądu stałego

Wirtualne wejście maszyny indukcyjnej „mechanical input” ustawione jest w tryb Tm. Oznacza to, że sygnałem wejściowym jest moment mechaniczny. Sygnałem wyjściowym jest prędkość obrotowa wirnika maszyny indukcyjnej ω . Wirtualne wejście generatora prądu stałego „mechanical input” ustawione jest w tryb ω . Oznacza to, że sygnałem wejściowym jest prędkość obrotowa. K_w jest współczynnikiem przekładni prędkości obrotowej, K_T jest współczynnikiem wspólnego momentu mechanicznego obu maszyn. W takim układzie pomija się moment bezwładności generatora, a moment bezwładności maszyny indukcyjnej wyliczany jest według wzoru 2.26. [4], [5]

$$J = J_1 + J_2 \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^2 \quad (2.26)$$

W przypadku badanym w tej pracy inzynierskiej prędkości obrotowe maszyny i generatora są sobie równe ($\frac{\omega_1}{\omega_2} = 1$), współczynnik $K_T = -1$ (maszyna prądu stałego pracuje w trybie generatora, moment mechaniczny dla maszyny indukcyjnej jest ujemny).

2.5 Parametry modelu

Parametry maszyny indukcyjnej modelu pokazuje tabela 2.1.

Tabela 2.1 Parametry maszyny indukcyjnej

Parametry znamionowe	P_n [kW]	U_n [V]	f [Hz]	I_n [A]	pb	nn[obr/min]	$\cos \varphi$
	3	380	50	6.6	2	1420	0.81
Parametry modelu	R_s [Ω]	R'_r [Ω]	X_{1s} [Ω]	X'_{1r} [Ω]	X_m [Ω]	J [kg m ²]	F[Nms]
	1.2	1.91	3.34	3.34	75	0.39	0.00825

Parametry generatora prądu stałego modelu pokazane w tabeli 2.2

Tabela 2.2 Parametry generatora prądu stałego

Parametry znamionowe	P_n [kW]	U_n [V]	I_n [A]	I_{wn} [A]	nn[obr/min]
	6.5	230	28.2	0.85	1450
Parametry modelu	R_t [Ω]	L_t [mH]	R_t [Ω]	L_t [H]	J [kg m ²]
	2.5	10.4	179	4.1	0.16

Pozostałe parametry modelu wymieniono poniżej:

- rezystancja obwodu wirnika maszyny pierścieniowej – $R_{ow} = 7$ [Ω]
- rezystancja dołączona do obwodu twornika prądniczy – $R_t = 3$ [Ω]

Moment bezwładności układu oblicza się za pomocą wzoru 2.26.

2.6 Pomiary napięcia, prądu i mocy w układach trójfazowych

Wartość średnia sygnału okresowego przemiennego o okresie T nazywana jest średnią arytmetyczną tego sygnału dla jednego okresu T (wzór 2.27).

$$\bar{F}_c = \overline{f(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.27)$$

Wartość skuteczną sygnału okresowego o okresie T stanowi pierwiastek kwadratowy z wartości średniej kwadratu sygnału obliczonej dla jednego okresu T (wzór 2.28).

$$F = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} = \sqrt{\overline{f^2(t)}} \quad (2.28)$$

Wartość skuteczną przebiegu sinusoidalnego określa wzór 2.29.

$$F = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T A^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{A}{\sqrt{2}} \quad (2.29)$$

A – amplituda sygnału, ω – pulsacja

Wartości skutecznej prądu można nadać następującą interpretację fizyczną: wartością skuteczną prądu okresowego nazywamy taką wartość prądu stałego, który przepływając przez niezmienną rezystancję R w czasie okresu T, spowoduje wydzielenie na tej rezystancji takiej samej ilości ciepła, co prąd okresowy zmienny w tym samym czasie.

Przyjmując za chwilową wartość prądu i , a za jego wartość skuteczną I , pojawi się zależność 2.30.

$$RI^2T = \int_0^T Ri^2 dt \quad (2.30)$$

Skąd

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (2.31)$$

W podobny sposób zdefiniowano wartość skuteczną napięcia (wzór 2.32).

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \quad (2.32)$$

Mocą czynną nazywany jest iloczyn wartości skutecznych napięcia i prądu oraz cosinusa kąta przesunięcia fazowego między napięciem i prądem (wzór 2.33).

$$P = UI \cos \varphi \quad (2.33)$$

Moc bierną stanowi iloczyn wartości skutecznych napięcia i prądu oraz sinusa kąta przesunięcia fazowego między napięciem i prądem wzór (2.34).

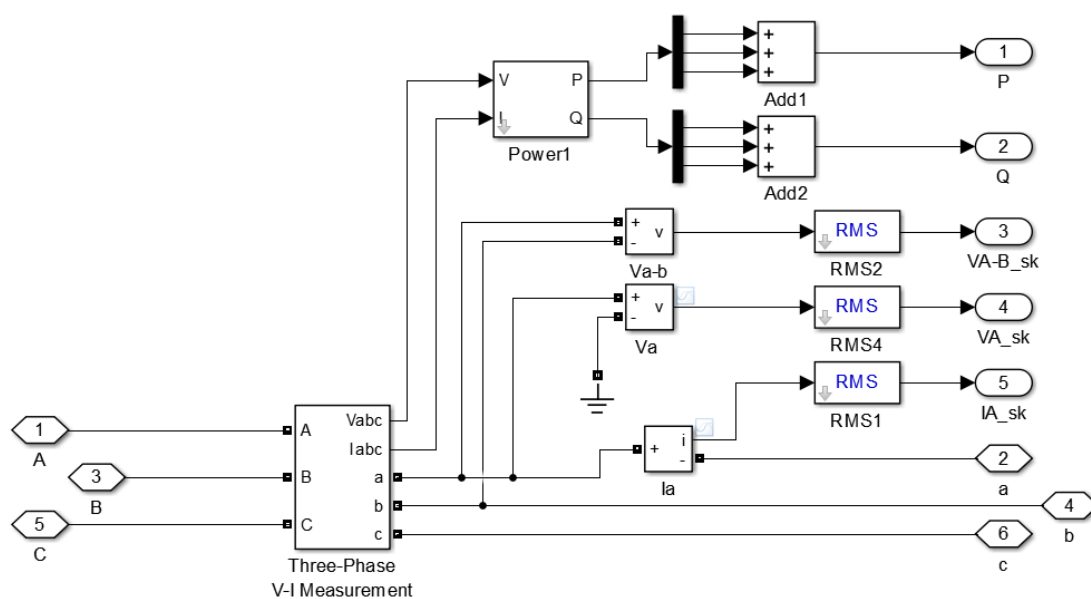
$$Q = UI \sin \varphi \quad (2.34)$$

Moc czynna oraz bierna w układach trójfazowych symetrycznych jest równa sumie mocy w poszczególnych fazach (wzór 2.35 – 2.36). [6]

$$P_{3f} = P_A + P_B + P_C \quad (2.35)$$

$$Q_{3f} = Q_A + Q_B + Q_C \quad (2.36)$$

Schemat bloku pomiarowego modelu przedstawiona rysunek 2.4.



Rys 2.4 Schemat bloku pomiarowego modelu

Wartość skuteczna prądu oraz napięcia liczone są odpowiednio według wzorów 2.31 i 2.32. Natomiast moc czynna oraz bierna według wzorów 2.33 - 2.36.

3. Badanie maszyny indukcyjnej według programu ćwiczenia A3

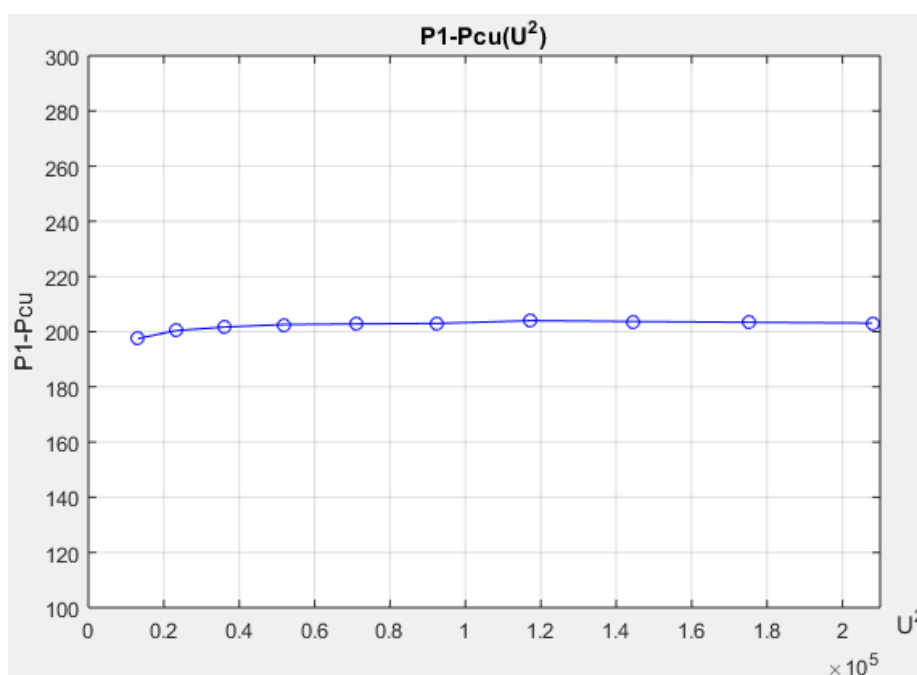
3.1 Pomiar biegu jałowego

Pomiaru biegu jałowego dokonuje się zasilając nieobciążony silnik. Mierzona jest moc doprowadzana do silnika oraz prąd fazowy w zależności od napięcia zasilania. Zgodnie ze wzorami 1.1-1.5 obliczane są straty. Wyniki pomiaru przedstawia tabela 3.1.

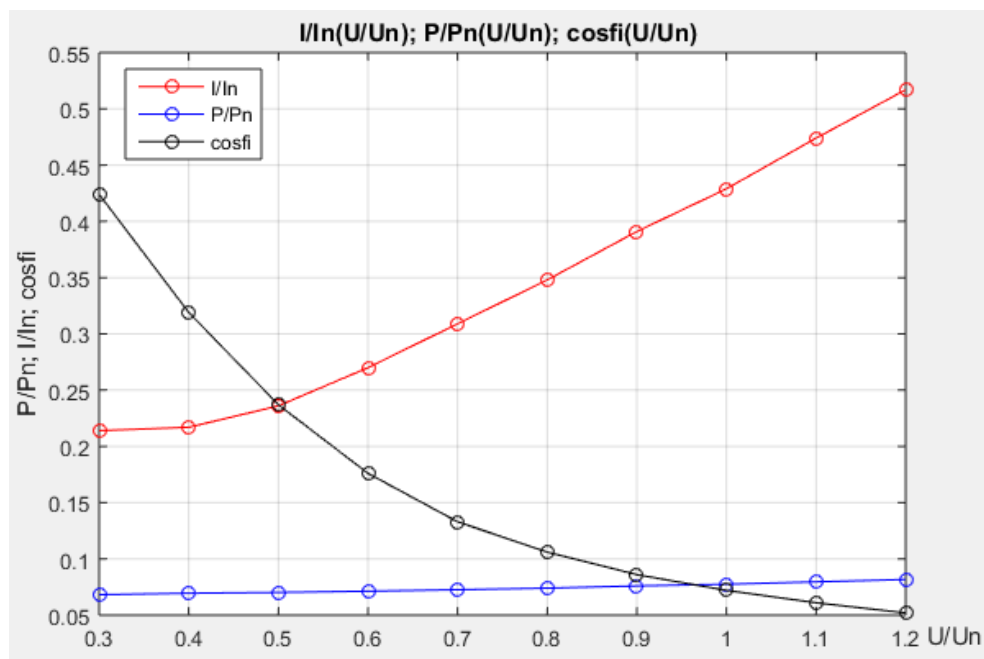
Tabela 3.1 Wyniki pomiarów biegu jałowego

U[V]	I[A]	P[W]	U/U_n	I/I_n	P/P_n	P_{Cu} [W]	$P - P_{Cu}$ [W]	U^2 [V]	$\cos \varphi$
114	1.41	204.7	0.3	0.21	0.068	7.2	197.5	12996	0.424
152.3	1.43	208.4	0.4	0.22	0.069	7.4	201	23195	0.32
190	1.56	210.5	0.5	0.24	0.07	8.7	201.8	36100	0.237
227.7	1.78	214	0.6	0.27	0.071	11.4	202.6	51847	0.176
266.6	2.04	217.8	0.7	0.31	0.073	15	202.8	71076	0.133
304.1	2.3	222	0.8	0.35	0.074	19	203	92477	0.106
342.6	2.58	228	0.9	0.39	0.076	24	204	117375	0.086
380	2.83	232.5	1	0.43	0.078	28.8	203.7	144400	0.072
418.4	3.13	238.7	1.1	0.47	0.08	35.3	203.4	175059	0.061
456	4.41	254	1.2	0.52	0.082	41.9	203.1	207936	0.053

Na rysunkach 3.1 i 3.2 przedstawiono wykres straty mocy w silniku indukcyjnym w funkcji kwadratu napięcia zasilającego oraz wykresy $\cos \varphi$, stosunków mocy i prądu do ich wartości nominalnych w funkcji stosunku napięcia do jego wartości nominalnej.



Rys 3.1 Wykres strat mocy



Rys 3.2 Wykres stosunków prądu, mocy i $\cos \varphi$ w funkcji napięcia

Z rysunku 3.1 wynika, że w modelu nie występują straty w żelazie, bo rezystancja R_{Fe} jest równa zero zgodnie z opisem modelu w podrozdziale 2.2.

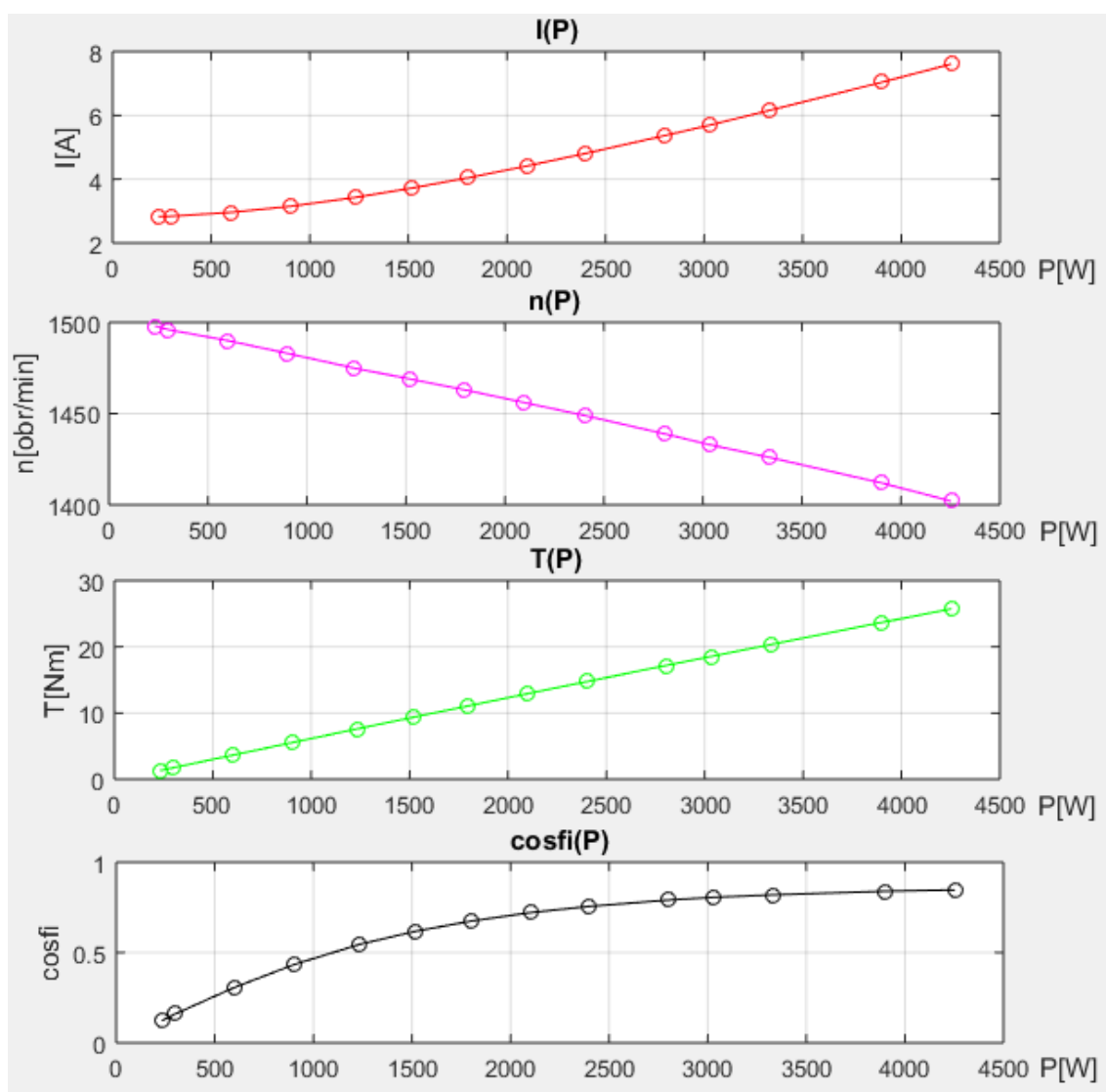
3.2 Próba obciążenia

Próbie obciążenia dokonuje się mierząc wielkości: moc doprowadzoną P_p , prąd moment, oraz prędkość obrotową przy obciążonym wale. Następnie wyliczana jest moc oddana P_o , sprawność oraz współczynnik mocy. Wyniki pomiarów zgromadzone są w tabeli 3.2.

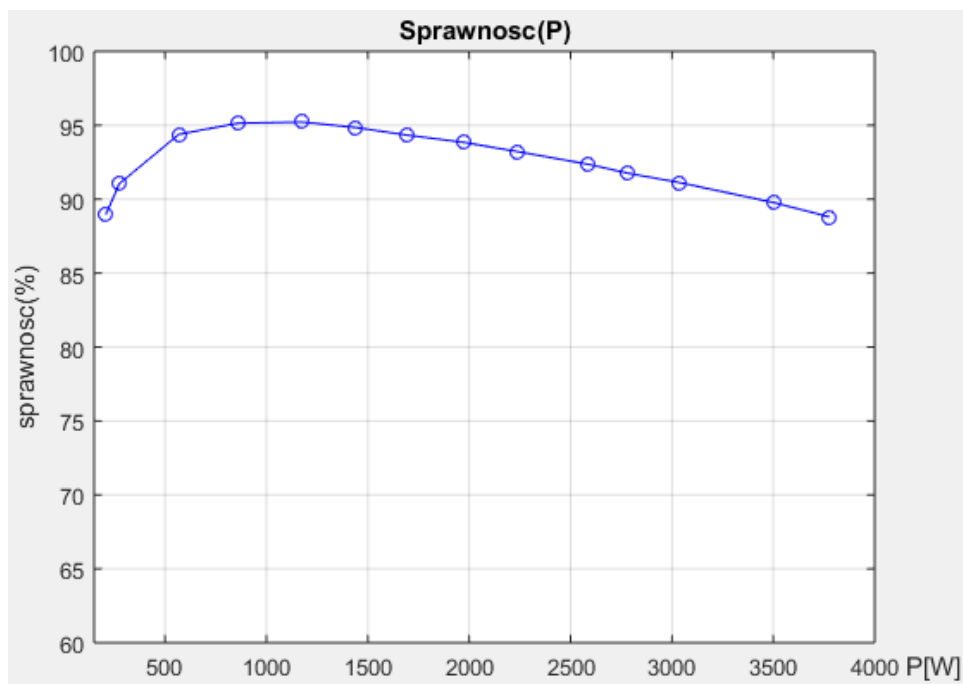
Tabela 3.2 Wyniki pomiarów próby obciążenia

I[A]	P_p [W]	n[obr/min]	T[Nm]	$\cos \varphi$	P_o	sprawność[%]
2.83	232.8	1498	1.32	0.125	207.1	88.9
2.84	301.1	1496	1.75	0.161	274.2	91.1
2.96	601.7	1490	3.64	0.308	568	94.4
3.15	902.7	1483	5.53	0.434	859	95.1
3.43	1236	1475	7.62	0.546	1177	95.2
3.72	1518	1469	9.36	0.618	1440	94.9
4.04	1798	1463	11.07	0.674	1696	94.3
4.41	2099	1456	12.92	0.721	1970	93.9
4.81	2401	1449	14.75	0.756	2238	93.2
5.37	2803	1439	17.18	0.791	2588	92.4
5.7	3032	1433	18.54	0.806	2782	91.8
6.16	3335	1426	20.35	0.820	3038	91.1
7.04	3902	1412	23.69	0.840	3503	89.7
7.61	4254	1402	25.73	0.847	3777	88.8

Rysunek 3.3 przedstawia wykresy prądu, prędkości obrotowej, momentu oraz współczynnika mocy w funkcji mocy pobranej. Na rysunku 3.4 przedstawiono wykres sprawności silnika w funkcji mocy oddanej.



Rys. 3.3 Wykresy prądu, prędkości obrotowej, momentu, $\cos \varphi$ w funkcji mocy pobranej



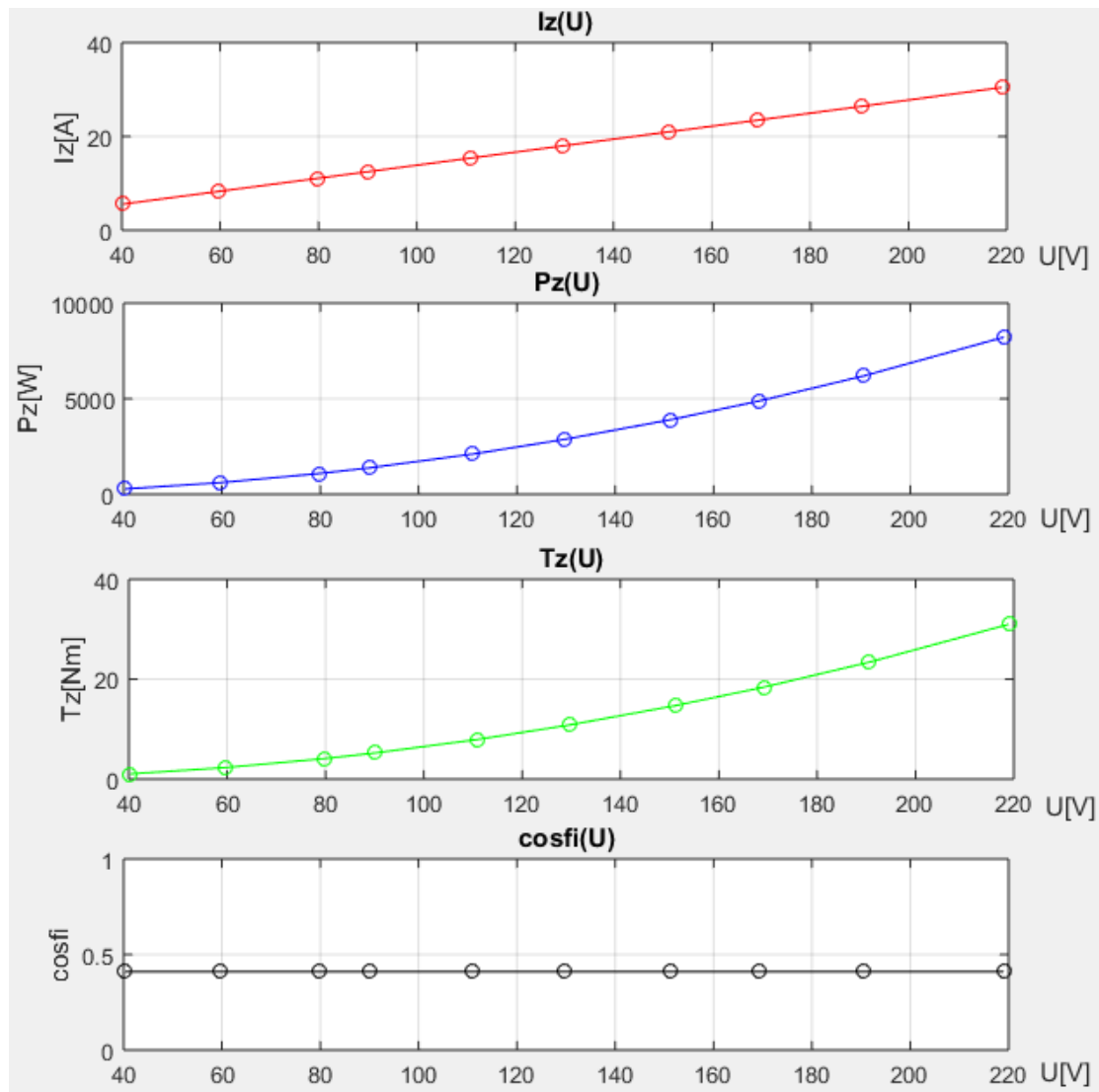
Rys. 3.4 Wykres sprawności w funkcji mocy oddanej

3.3 Próba zwarcia

Podczas próby zwarcia wirnik zostaje unieruchomiony. W modelu dokonuje się tego przez ustawienie parametru tarcia lub momentu bezwładności maszyny jako nieskończoność. Wyniki pomiarów oraz wykresy przedstawiają odpowiednio tabela 3.3 oraz rysunek 3.4.

Tabela 3.3 Wyniki pomiarów próby zwarcia

U_z [V]	I_z [A]	P_z [W]	T_z [Nm]	$\cos \varphi$	R_k [Ω]	X_k [Ω]
40.3	5.58	276.5	1.04	0.410	7.7	1.6
59.7	8.28	607.5	2.3	0.410	7.7	1.6
79.8	11.06	1084	4.1	0.410	7.7	1.6
90	12.48	1381	5.22	0.410	7.7	1.6
111	15.39	2101	7.94	0.410	7.7	1.6
129.6	17.97	2866	10.83	0.410	7.7	1.6
151.2	20.96	3896	14.72	0.410	7.7	1.6
169.1	23.43	4870	18.39	0.410	7.7	1.6
190.6	26.44	6196	23.41	0.410	7.7	1.6
219	30.45	8217	31	0.410	7.7	1.6



Rys 3.5 Wykres prądu, mocy, momentu oraz współczynnika mocy w funkcji napięcia

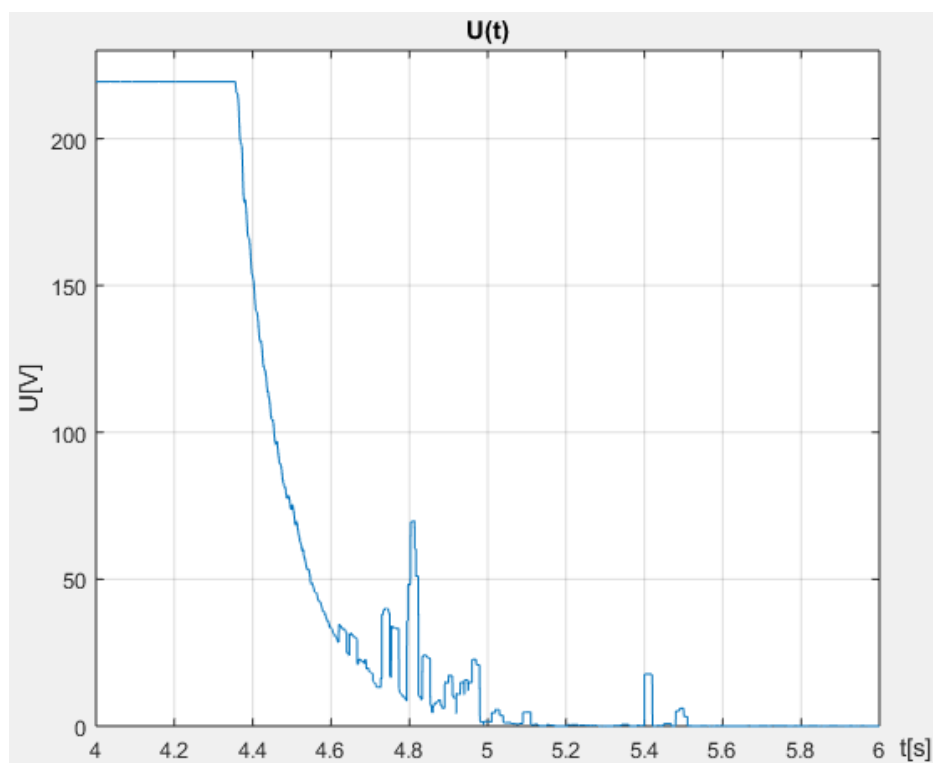
Rezystancję i reaktancję zwarciovą wyliczono według wzorów 3.1 i 3.2. [1]

$$R_k = \frac{P_z}{I_z^2} - R_s \quad (3.1)$$

$$X_k = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{U_z^2}{I_z^2} - (R_k - R_s)^2} \quad (3.2)$$

3.4 Zanik napięcia

Pomiaru zaniku napięcia dokonuje się w celu badania czasu, w którym napięcie na zaciskach maszyny spada do bezpiecznej wartości 24 V. Wyniki przedstawione na rysunku 3.6.

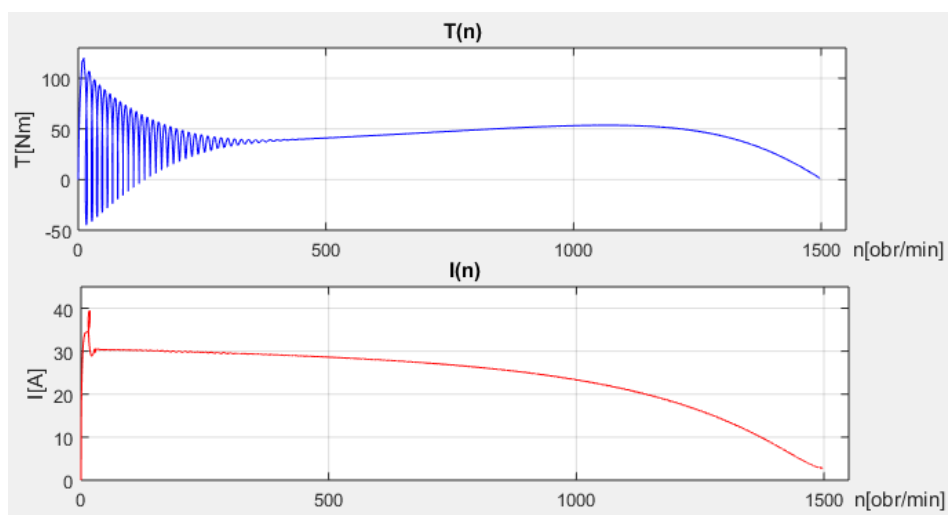


Rys. 3.6 Przebieg zaniku napięcia

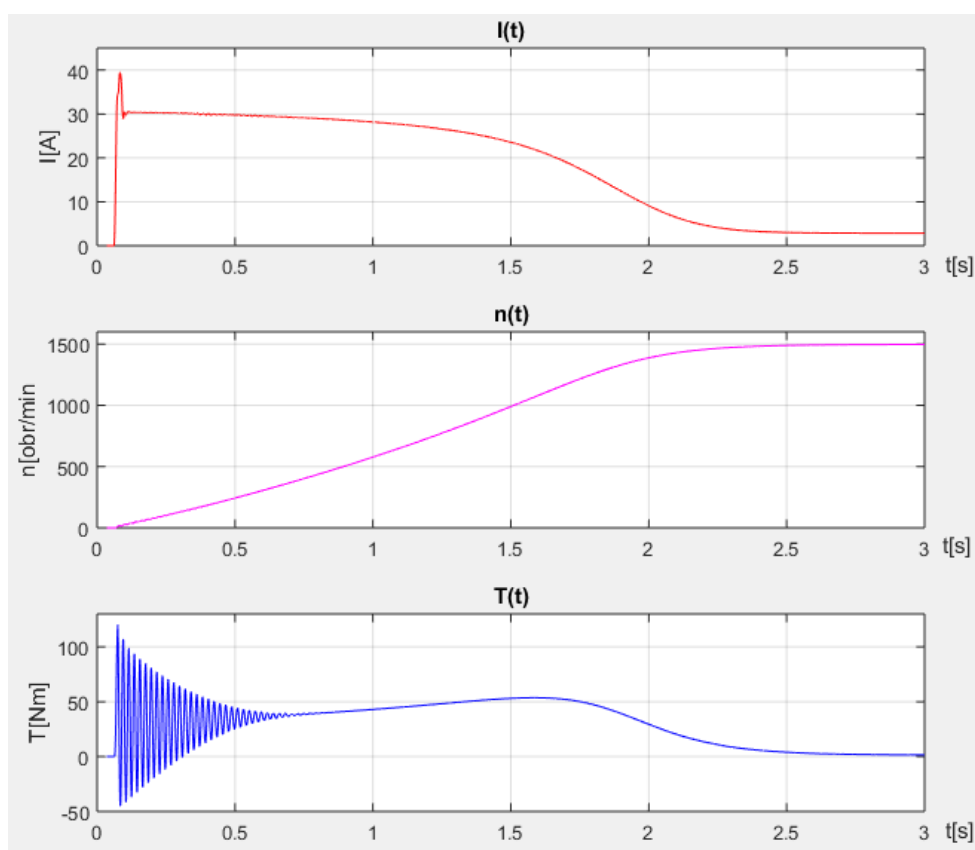
Z wykresu przebiegu zaniku napięcia wynika, że czas spadania napięcia do wartości 24 V wynosi około 0,6 s.

3.4 Próba rozruchu

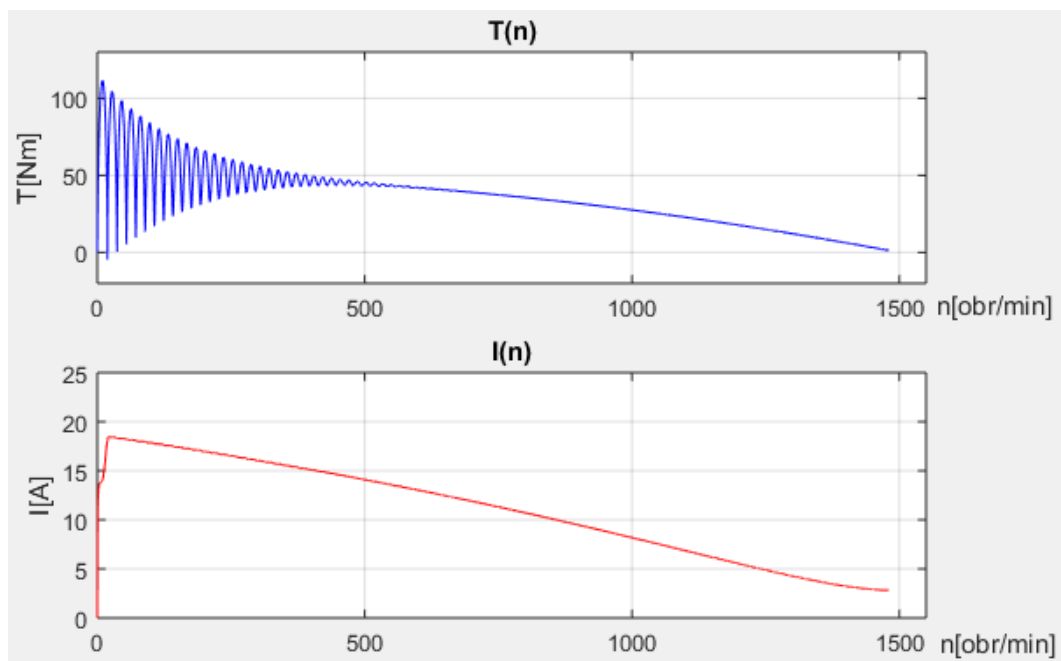
Na rysunkach 3.6 – 3.9 przedstawiono charakterystyki mechaniczne silnika indukcyjnego uzyskane z próby rozruchu



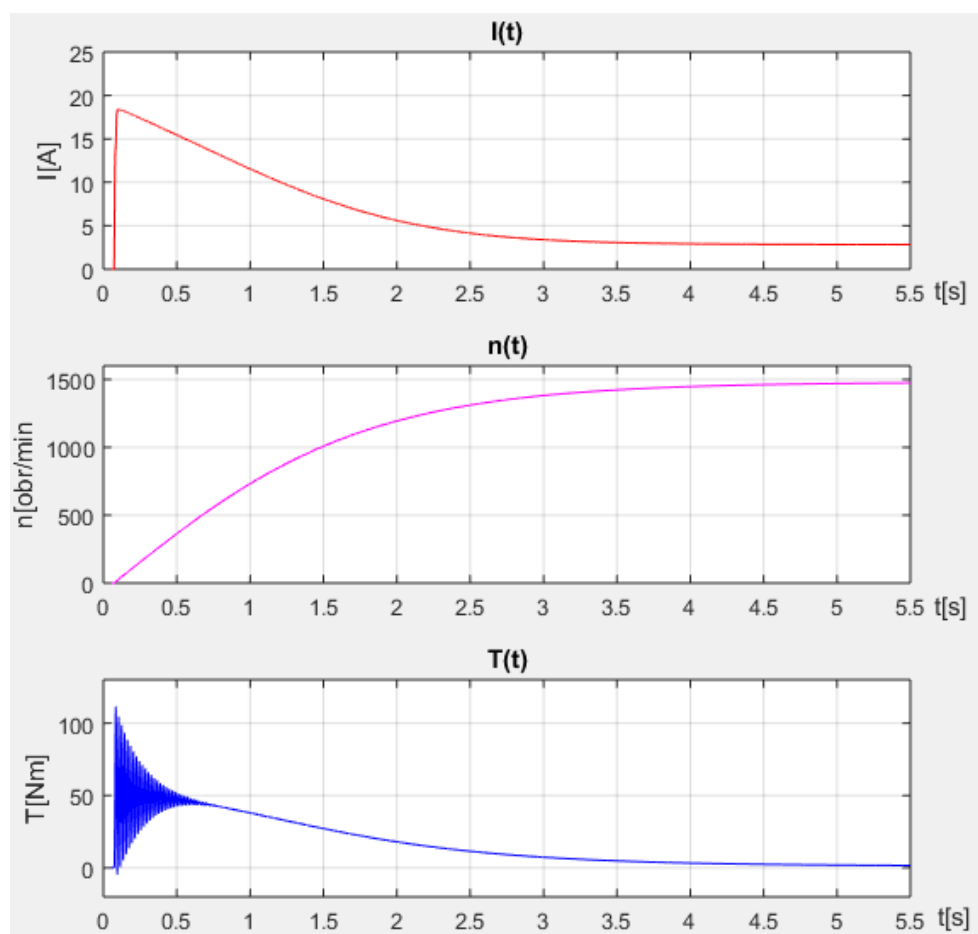
Rys. 3.6 Wykres zależności momentu i prądu od prędkości obrotowej bez rezystorów dodatkowych w obwodzie wirnika



Rys.3.7 Wykresy czasowe przebiegów prądu, prędkości obrotowej oraz momenty bez rezystorów dodatkowych w obwodzie wirnika



Rys 3.8 Wykres zależności momentu i prądu od prędkości obrotowej z rezystorami dodatkowymi w obwodzie wirnika



Rys 3.9 Wykres zależności momentu i prądu od prędkości obrotowej z rezystorami dodatkowymi w obwodzie wirnika

4. Podsumowanie

Celem pracy inżynierskiej było zrealizowanie modelu stanowiska laboratoryjnego do badania właściwości maszyny indukcyjnej w środowisku Matlab Simulink. Do budowy układu wykorzystano bibliotekę SimPowerSystems oraz bibliotekę Dashboard, dostępnej w wersji Matlab 2015a i nowszych. Parametry modelu zostały zidentyfikowane na istniejącym stanowisku laboratoryjnym.

Po skonstruowaniu modelu przeprowadzono na nim pomiary według instrukcji do ćwiczenia A3. W pierwszej części pomiarowej badano nieobciążony silnik w celu określenia strat mocy. Użyty w modelu blok maszyny indukcyjnej nie posiada symulacji strat mocy w żelazie, a więc występują w nim tylko straty w żelazie. W drugiej części pomiarowej badano charakterystykę silnika w funkcji obciążenia. Silnik posiada bardzo dużą sprawność, ponieważ występują w nim tylko straty mechaniczne oraz w uzwojeniach. W kolejnym punkcie badano zwarcie silnika. W rzeczywistym laboratorium zwarcia dokonuje się blokując wirnik maszyny, w modelu ustawiono parametr bezwładności napędu na nieskończoność (zgodnie z poleceniem ze strony Mathworks). Celem tego punktu jest badanie charakterystyk silnika w stanie zwarcia oraz wyznaczenie rezystancji oraz reaktancji zwarciowej. Następnie zbadano czas, w którym napięcie na zaciskach maszyny spada do bezpiecznej wartości po jej wyłączeniu od zasilania. Ostatnim punktem badań była próba rozruchu silnika. Jego celem było zbadanie charakterystyk maszyny indukcyjnej w całym zakresie prędkości obrotowej oraz sprawdzenie wpływu rezystancji dodatkowej w obwodzie wirnika maszyny na te charakterystyki.

Podsumowując, cel pracy udało się zrealizować. Stworzony model spełnia wszystkie wymagania zawarte w instrukcji ćwiczenia z wyjątkiem badania strat mocy w żelazie. Interfejs użytkownika stworzony za pomocą bloków biblioteki Dashboard pozwala na obserwację wyników pomiarów oraz sterowanie modelem. Otrzymane w trakcie symulacji dane można poddać analizie w przestrzeni roboczej programu Matlab za pomocą bloku „To Workspace”.

5. Literatura

- [1] „Ćwiczenie A3 – silnik indukcyjny pierścieniowy instrukcja” [online],
http://www.keiaspe.agh.edu.pl/keiaspe/articles/0100/5012/a3_i.pdf [dostęp 11.01.2016].
- [2] Kononenko W.W., „*Elektrotechnika i elektronika*”, Wydawnictwo Feniks, Rostov na-Donu 2010.
- [3] Teriochin W.B., „*Modelowanie układów napędowych w Simulink*”, Wydawnictwo Politechniki Tomskiej, Tomsk 2010.
- [4] „*Asynchronous machine*” [online],
http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/asynchronousmachine.html?s_tid=srchtitle ,Mathworks [dostęp 11.01.2016]
- [5] „*DC machine*” [online],
<http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/dcmachine.html?searchHighlight=dc%20machine> ,Mathworks [dostęp 11.01.2016]
- [6] Stanisław Bolkowski, „Teoria obwodów elektrycznych”, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne, Warszawa 2012.