

# Modelowanie silnika prądu stałego w programie PLECS

AiR III rok, semestr 5

# Spis treści

<b>1</b>	<b>Wyznaczanie parametrów silnika</b>	<b>2</b>
1.1	Odczytanie parametrów pracy z tabliczki znamionowej . . . . .	2
1.2	Wyznaczanie pozostałych parametrów silnika . . . . .	3
1.2.1	Obwód wzbudzenia . . . . .	3
1.2.2	Tarcie wiskotyczne . . . . .	3
1.3	Podsumowanie . . . . .	4
1.3.1	Przebieg dla warunków znamionowych . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Podstawowe sterowanie silnikiem za pomocą mostka H</b>	<b>6</b>
2.1	Konstrukcja i analiza działania mostka H . . . . .	6
2.1.1	Obciążenie w postaci rezystora $R_o$ . . . . .	6
2.1.2	Obciążenie w postaci rezystora $R_o$ i cewki $L_o$ . . . . .	9
2.2	Układ mostka H z silnikiem DC . . . . .	11
2.2.1	Badanie pracy w stanie jałowym . . . . .	11
2.2.2	Badanie pracy silnika przy zmianach obciążenia . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Układy regulacji silnika DC</b>	<b>13</b>
3.1	Dobór regulatora prądu . . . . .	13
3.1.1	Wzmocnienie członu całkującego . . . . .	13
3.1.2	Wzmocnienie członu proporcjonalnego . . . . .	14
3.1.3	Ograniczenia sygnału modulującego . . . . .	15
3.1.4	Sprawdzenie działania regulatora . . . . .	16
3.2	Dobór regulatora prędkości . . . . .	17
3.2.1	Regulator proporcjonalny . . . . .	17
3.2.2	Regulator członu całkującego . . . . .	18
3.2.3	Regulator PI z ograniczeniem . . . . .	19
3.3	Podsumowanie . . . . .	21
3.3.1	Badanie pracy silnika przy zmiennym obciążeniu . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Zasilanie silnika z sieci</b>	<b>23</b>
4.1	Prostownik sieciowy . . . . .	23
4.1.1	Schemat i podstawowe parametry . . . . .	23
4.1.2	Zachowanie prostownika przy nawrocie silnika . . . . .	25
4.2	Układ wytracający energię hamowania . . . . .	25
4.2.1	Praca układu w trakcie nawrotu . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Implementacja w C</b>	<b>28</b>
5.1	Realizacja . . . . .	28
5.2	Porównanie implementacji . . . . .	29
<b>6</b>	<b>Dodatek</b>	<b>30</b>
6.1	Kod w bloku <i>C_script</i> . . . . .	30
6.2	Kod Matlab . . . . .	31

# Część 1

## Wyznaczanie parametrów silnika

**Cel** By zasymulować zachowanie danego silnika należy wyznaczyć jego parametry - część z nich zostanie wyliczona lub odczytana, a część dobrana arbitralnie.

### 1.1 Odczytanie parametrów pracy z tabliczki znamionowej

Parametry obwodu twornika:

- Napięcie znamionowe  $U_{aN} = 310$  [V]
- Prąd znamionowy  $I_{aN} = 13.5$  [A]
- Rezystancja twornika  $R_a = 4.53$  [ $\Omega$ ]
- Induktancja twornika  $L_a = 17.5$  [mH]

Parametry pracy:

- Prędkość znamionowa  $n_N = 1220$  [obr/min]
- Moment znamionowy obciążenia  $T_M = 24.6$  [Nm]
- Znamionowa moc na wale  $P_N = 3.15$  [kW]
- Moment bezwładności  $J = 0.02$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ]

Parametry obwodu wzbudzenia:

- Napięcie znamionowe  $U_{fN} = 310$  [V]
- Moc  $P_f = 0.33$  [kW]

## 1.2 Wyznaczanie pozostałych parametrów silnika

### 1.2.1 Obwód wzbudzenia

**Rezystancja**  $R_f$  wyznaczana jest ze wzoru na moc i parametrów z tabliczki 1.1:

$$R_f = \frac{U_{fN}^2}{P_f} = \frac{(310V)^2}{0.33 kW} \simeq 291 [\Omega] \quad (1.1)$$

**Induktancja**  $L_f$  jest wartością arbitralnie dobraną - nie jest w stanie być wyliczona. Wiadomo, że musi być większa niż  $L_a$ , zatem wybrano wartość kilkukrotnie większą lecz nadal będącą tego samego rzędu wielkości

$$L_f = 50.0 [mH] \quad (1.2)$$

**Prąd początkowy**  $I_{f0}$  dla uproszczenia symulacji, prąd początkowy dobiera się tak jakby układ wzbudzenia pracował od samego początku w warunkach znamionowych. Zatem:

$$I_{f0} = I_{fN} = \frac{P_f}{U_{fN}} = \frac{0.33 kW}{310 V} \simeq 1.06 [A] \quad (1.3)$$

**Induktancja wzajemna**  $L_{af}$  jest wyrażona (po przekształceniach) przez wzór:

$$L_{af} = \frac{U_{aN} - I_{aN}R_a}{I_{fN} \cdot \frac{2\pi \cdot n_N}{60}} = \frac{(310 - 13.5 \cdot 4.53) V}{\left(1.06 \cdot \frac{1220 \cdot \pi}{30}\right) \frac{A}{s}} \simeq 1.83[H] \quad (1.4)$$

### 1.2.2 Tarcie wiskotyczne

**Współczynnik tarcia wiskotycznego**  $F$  dany jest wzorem:

$$F = \frac{T_{eN} - T_N}{\omega_N} \quad (1.5)$$

Przy czym  $T_{eN}$  to moment elektromagnetyczny dany wzorem:

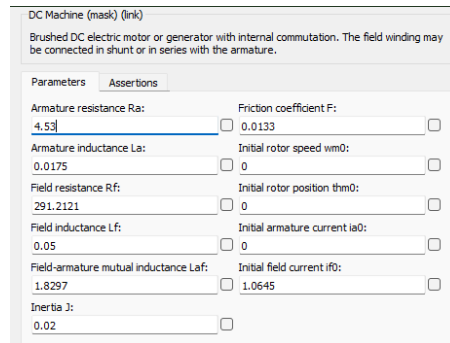
$$T_{eN} = \frac{(U_{aN} - I_{aN}R_a)I_{aN}}{\omega_N} = \frac{((310 - 13.5 \cdot 4.53) \cdot 13.5) VA}{\left(\frac{1220\pi}{30}\right) \frac{1}{s}} \simeq 26.3 [Nm]$$

Podstawiając do 1.5 jesteśmy już w stanie wyznaczyć  $F$ :

$$F \simeq 0.0133 [Nm \cdot s] \quad (1.6)$$

## 1.3 Podsumowanie

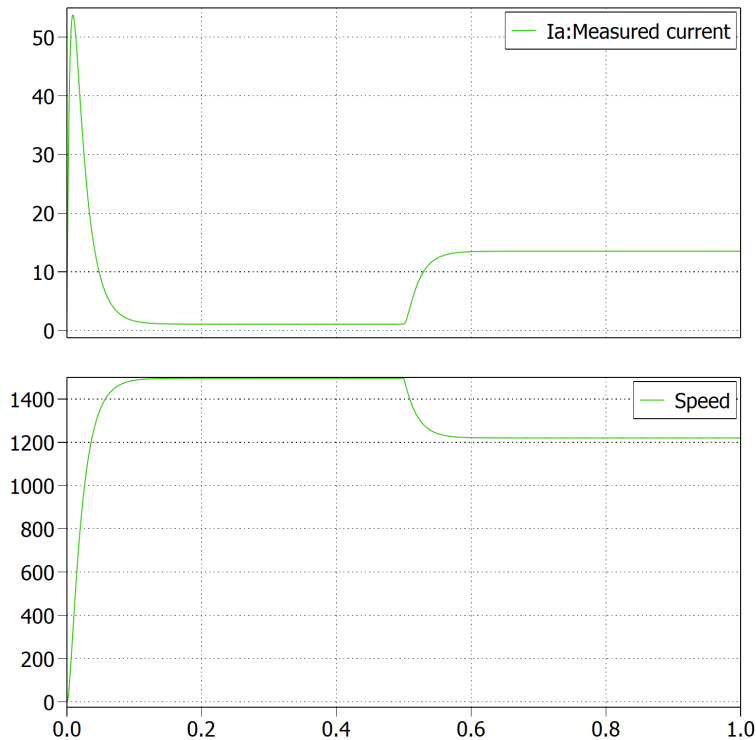
Uzupełnienie bloku funkcyjnego *DC Machine* w programie PLECS zgodnie z wyznaczonymi współczynnikami:



Rys. 1.1: Zrzut ekranu z programu PLECS

### 1.3.1 Przebieg dla warunków znamionowych

By uzyskać poniższy przebieg w pierwszej kolejności uzupełniono parametry silnika oraz napięć zasilających (obwód twornika i wzbudzenia). Następnie obserwowano odpowiedź skokową układu przy zmianie obciążenia - stan początkowy  $T_0 = 0$  [Nm], stan po 0.5s  $T_{fin} = T_N = 24.6$  [Nm]. W trakcie próby mierzono prąd silnika oraz jego prędkość obrotową.



Rys. 1.2: Symulacja przy zmiennym obciążeniu

**Prąd rozruchowy:** Na początku pracy nieruchomy silnik pobiera prąd rozruchowy, który wielokrotnie przekracza wartość prądu znamionowego. Jego wartość w tym wypadku wynosi 53.6 A - czyli prawie czterokrotność  $I_n$ .

**Bieg jałowy -  $T = 0 \text{ Nm}$**  Widoczne jest, że prąd płynący przez silnik jest niewielki, równa się on  $I_0 \simeq 1.07$  natomiast prędkość rozwijana przez silnik jest równa  $n_0 \simeq 1500 \text{ [obr/min]}$  - zatem jest większa od prędkości znamionowej.

**Praca przy obciążeniu znamionowym -  $T = 24.6 \text{ Nm}$**  Można zaobserwować, że zarówno prąd jak i prędkość obrotowa silnika osiągają wartości znamionowe - zgodnie z założeniami. Oznacza to, że parametry silnika zostały uzupełnione i dobrane prawidłowo.

## Część 2

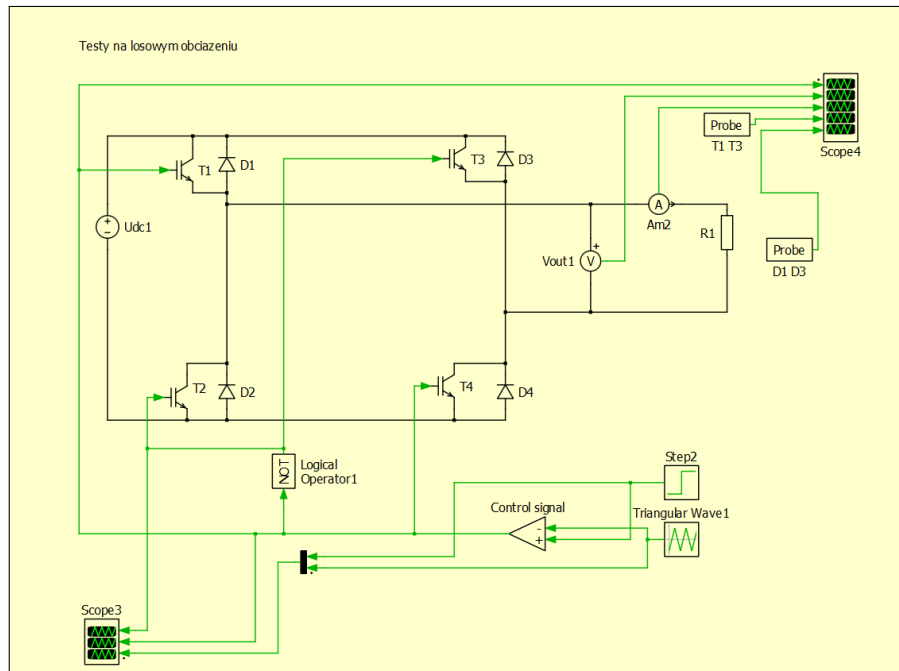
# Podstawowe sterowanie silnikiem za pomocą mostka H

**Cel** W poprzednim rozdziale sterowanie silnika (a właściwie jego prędkością) odbywało się jedynie przez zmianę momentu obciążenia na wale. Jest to podejście nieoptymalne - zazwyczaj chcielibyśmy dostosować jego pracę bez "ruszania" obciążenia. Parametrem mającym wpływ na moment elektromagnetyczny (a zatem również prędkość) jest prąd płynący przez silnik. Sterowanie prądem może zostać zrealizowane przez mostek H.

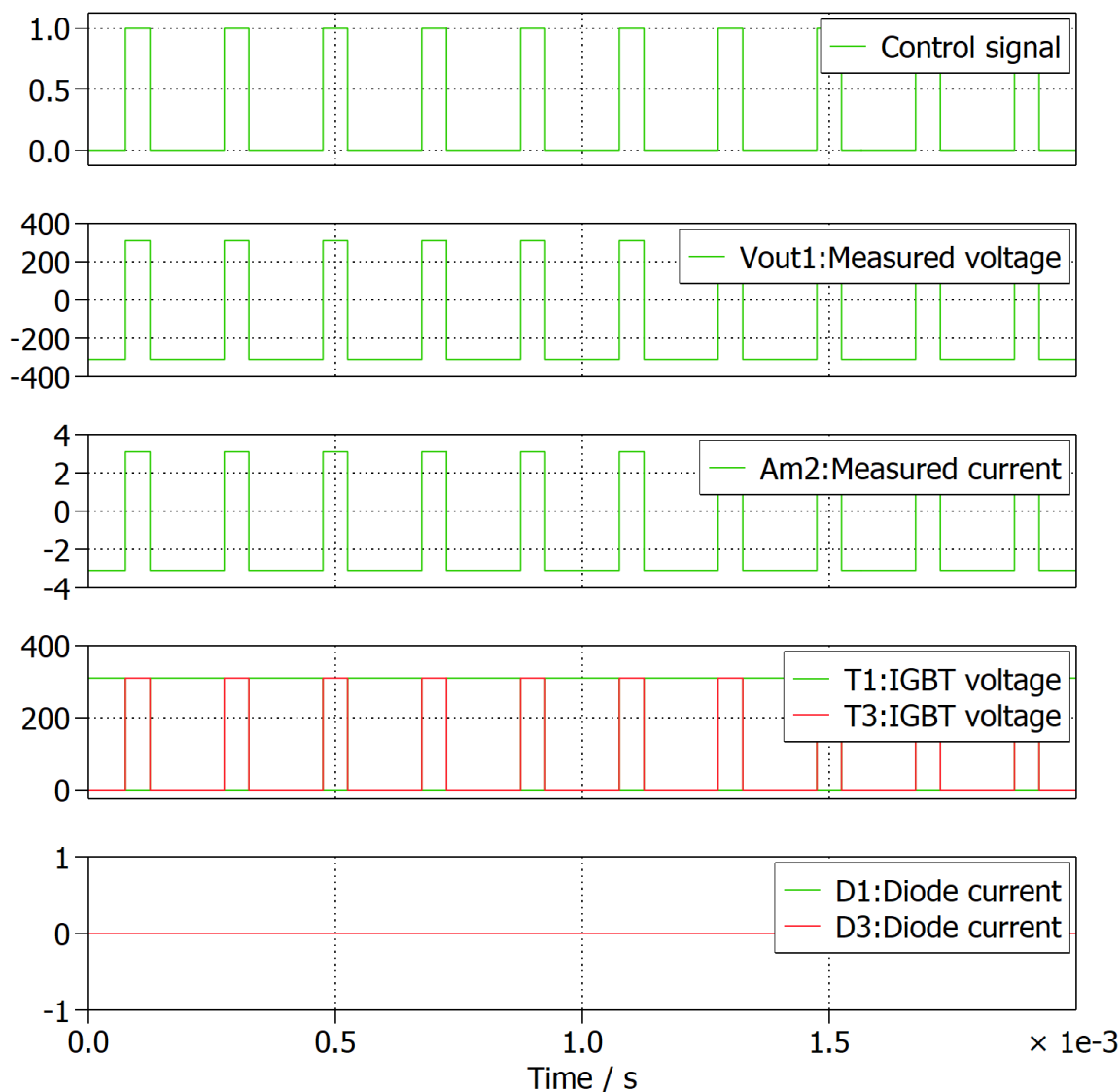
## 2.1 Konstrukcja i analiza działania mostka H

### 2.1.1 Obciążenie w postaci rezystora $R_o$

Utworzono układ z mostkiem H zasilony  $U_{IN} = U_{aN} = 310$  [V]. Częstotliwość fali nośnej  $f_c = 5$  [kHz]. Jako obciążenie użyto rezystora  $R_o = 100$  [ $\Omega$ ].



Rys. 2.1: Schemat opisanego układu w PLECSie



Rys. 2.2: Przebiegi czasowe różnych prądów oraz napięć w układzie z mostkiem H

**Generalna praca układu** Widoczne jest, że tranzystory pracują w sposób przeciwny - w czasie gdy T1 jest wyłączony pracuje T3 oraz analogicznie podczas załączenia T1 nie pracuje T3. Otrzymany prąd oraz napięcie wyjściowe mają ten sam kształt przebiegu - sygnał prostokątny o wypełnieniu równym wypełnieniu sygnału prostokątnego. Przy obciążeniu o zerowej reaktancji żadna z diód nie pracuje.

**Zakresy napięć i prądów** Napięcie wyjściowe jest równe wartości napięcia wejściowego  $|U_o| = U_{IN} = 310$  [V], oczywiście zależnie od załączonego tranzystora zmienia się znak napięcia wyjściowego. Prąd wyjściowy można wyznaczyć ze wzoru  $I_o = U_o / R_o$  zatem osiąga on wartość  $-3.1$  lub  $3.1$  [A]



**Badanie zależności między parametrami wyjściowymi a sygnałem sterującym** Mostek jest sterowany za pomocą trójkątnej fali nośnej o częstotliwości  $f_c$  oraz sygnału modulującego  $\text{syg\_mod} \in <-1, 1>$ . By zbadać jak zmieniają się parametry wyjściowe układu manipulowano wartością sygnału modulującego i badano: współczynnik wypełnienia sygnału sterującego (tranzystory T1 i T4), średni prąd wyjściowy oraz średnie napięcie wyjściowe.

syg_mod	-1.0	-0.4	0.0	0.6	1.0
d	0.0	0.3	0.5	0.8	1.0
$\overline{U}_o$ [V]	-310	-123	0	186	310
$\overline{I}_o$ [A]	-3.10	-1.23	0.00	1.86	3.10

Tabela 2.1: Otrzymane wyniki

Na podstawie obserwacji można sformułować następującą zależność:

$$\overline{U}_o = \text{syg\_mod} \cdot U_{IN} \qquad \overline{I}_o = \frac{U_o}{R_o} \qquad (2.1)$$

### Opracowanie pytań z instrukcji

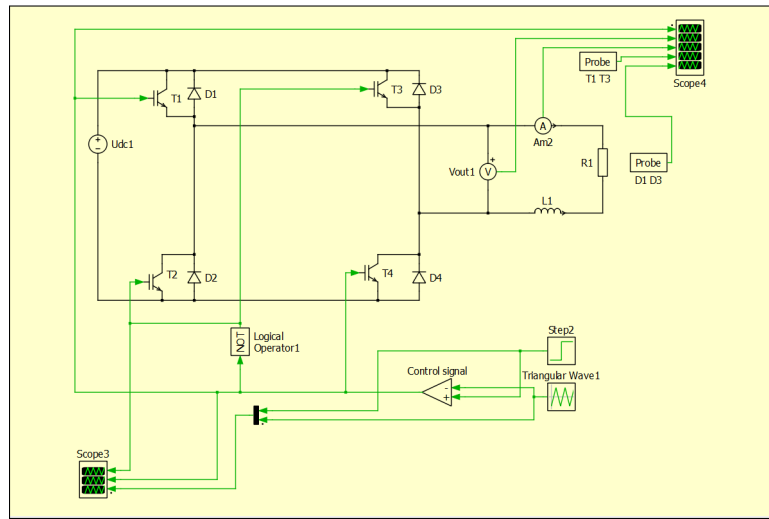
- Kształt przebiegu  $U_o$ : prostokątny o wypełnieniu równym sygnałowi sterującemu - poza przypadkami  $d = 0$  oraz  $d = 1$ , gdzie przyjmuje odpowiednio wartość -310V oraz 310V.
- Poziomy napięć na wyjściu  $U_o$  w zależności od sygnału PWM: Wartość napięcia wyjściowego jest proporcjonalna do wartości  $\text{syg\_mod}$  oraz określona wzorem 2.1.
- Kształt prądu wyjściowego  $I_o$ : prostokątny o wypełnieniu równym sygnałowi sterującemu - poza przypadkami  $d = 0$  oraz  $d = 1$ , gdzie przyjmuje odpowiednio wartość -3.1A oraz 3.1A.

znak $\overline{I}_o$	Wartość sygnału sterującego	Pracujące elementy
+	1	T1, T4
+	0	T2, T3
-	1	T1, T4
-	0	T2, T3

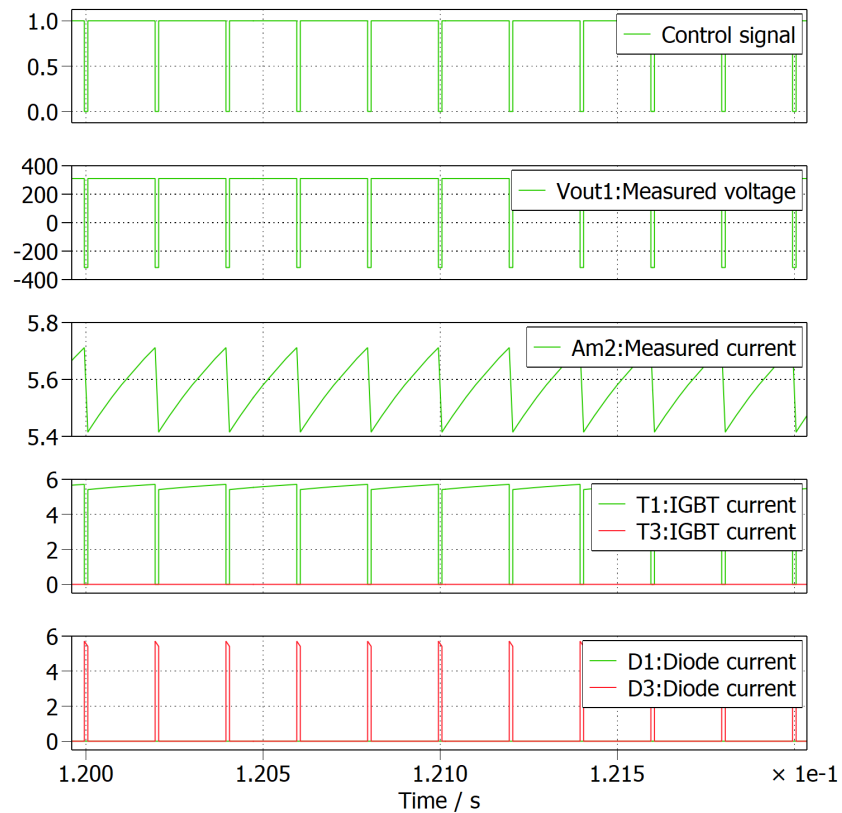
Warto zauważyć, że w przypadku obciążenia jedynie rezystorem, wartość prądów dla diód D1, D2, D3, D4 jest zawsze równa 0.

### 2.1.2 Obciążenie w postaci rezystora $R_o$ i cewki $L_o$

Poprzedni model mostka rozszerzono o dodanie cewki  $L_o$  jako obciążenia. Tym razem dobrano  $R_o = 50 [\Omega]$  oraz  $L_o = 20 [\text{mH}]$  - są to parametry zbliżone do naszego silnika. Napięcie wejściowe oraz częstotliwość fali nośnej pozostała bez zmian.



Rys. 2.3: Schemat z dodaną indukcyjnością



Rys. 2.4: Przebiegi czasowe różnych prądów oraz napięć w układzie z mostkiem H

**Badanie zależności między parametrami wyjściowymi a sygnałem sterującym** analogicznie do 2.1 zbadano zachowanie układu przy manipulowaniu syg\_mod

syg_mod	-1.0	-0.4	0.0	0.6	1.0
d	0	0.3	0.5	0.8	1
$\bar{U}_o$ [V]	-310	-123	0	186	310
$\bar{I}_o$ [A]	-6.2	-2.5	0.0	3.7	6.2

Na podstawie otrzymanych wyników znaleziono zależność:

$$\bar{U}_o = \text{syg\_mod} \cdot U_{IN} \qquad \bar{I}_o = \frac{U_o}{R_o} \qquad (2.2)$$

Jak można zauważyć jest ona równoważna do 2.1 - co oznacza, że parametry wyjściowe są niezależne od obciążenia mostka (do pewnego stopnia)

### Opracowanie pytań z instrukcji

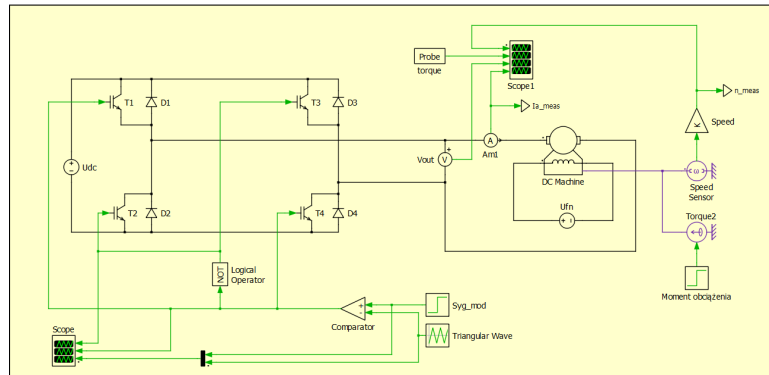
- Kształt przebiegu  $U_o$ : prostokątny o wypełnieniu równym sygnałowi sterującemu - poza przypadkami  $d = 0$  oraz  $d = 1$ , gdzie przyjmuje odpowiednio wartość -310V oraz 310V.
- Poziomy napięć na wyjściu  $U_o$  w zależności od sygnału PWM: Wartość napięcia wyjściowego jest proporcjonalna do wartości syg\_mod. Nie różnią się od przypadku z samym rezystorem.
- Kształt przebiegu  $I_o$ : wprowadzenie indukcyjności zmienia zaobserwowany kształt prądu wyjściowego na trójkątny lub piłokształtny (im większe wypełnienie sygnału PWM, tym bardziej piłokształtny wychodzi przebieg)

znak $\bar{I}_o$	Wartość sygnału sterującego	Pracujące elementy
+	1	T1,T4
+	0	D2,D3
-	1	D1,D4
-	0	T2,T3

## 2.2 Układ mostka H z silnikiem DC

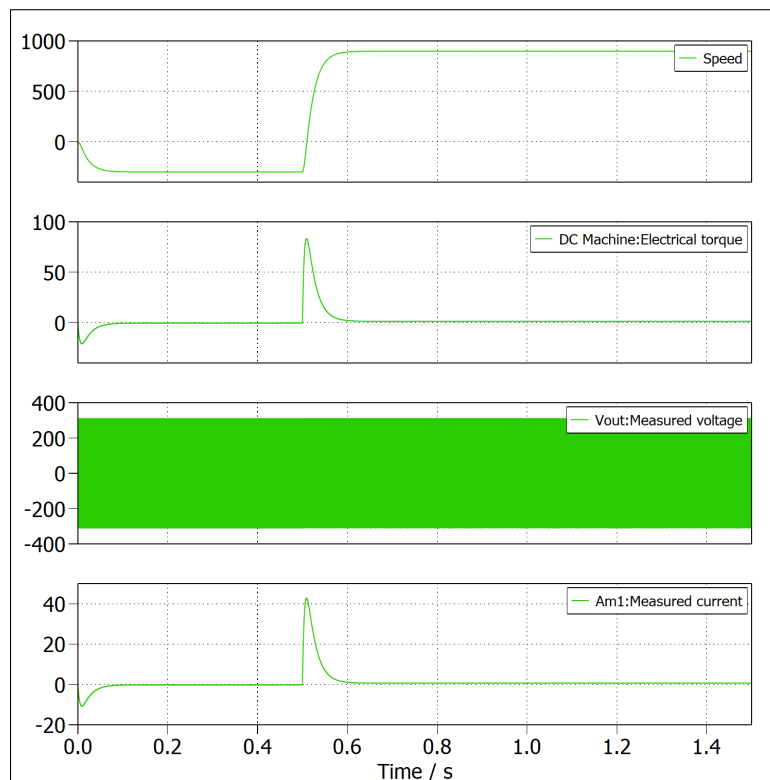
### 2.2.1 Badanie pracy w stanie jałowym

Do układu z poprzedniej części 2.1 zamiast obciążenia w postaci rezystora włączono silnik z wcześniej określonymi parametrami



Rys. 2.5: Schemat układu w programie PLECS

Przy poprawnej konstrukcji mostka H zmiana sig\_mod powinna przełożyć się zmiany prędkości oraz momentu w silniku. By zbadać tą tezę obserwowano pracę silnika w biegu jałowym.



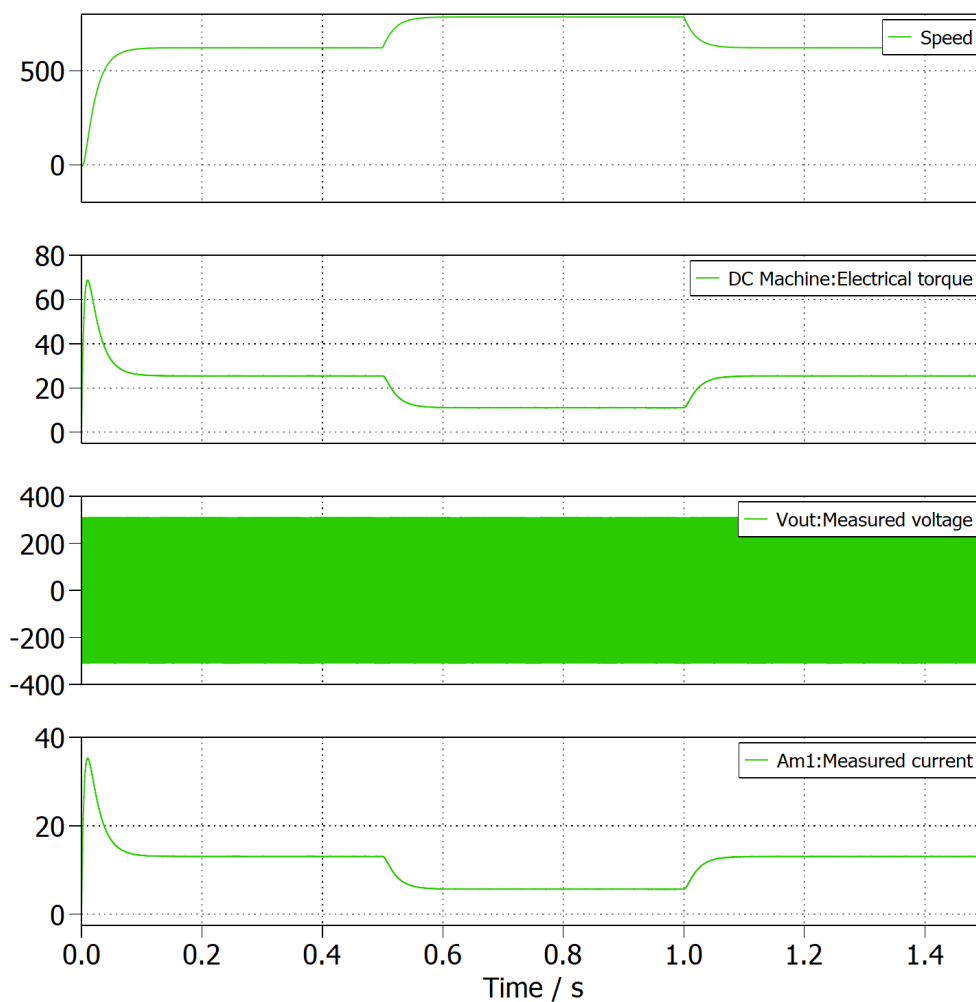
Rys. 2.6: Praca silnika przy dwóch wartościach sig\_mod - sig\_mod<sub>1</sub> = -0.2 oraz sig\_mod<sub>2</sub> = 0.6

Silnik pracuje tak jak tego oczekiwano - moment na silniku ma przebieg analogiczny do prądu oraz zadając sig\_mod < 0 silnik obraca się w przeciwną stronę niż przy sig\_mod > 0. Widoczne są też znaczne pobory prądu podczas rozpędzania silnika.

### 2.2.2 Badanie pracy silnika przy zmianach obciążenia

Sprawdzono jak na pracę silnika wpływa nagle zmiana obciążenia silnika

Parametr	$T_L$ rośnie	$T_L$ maleje
$U_a$	nie zmienia się	nie zmienia się
$I_a$	rośnie	maleje
n	maleje	rośnie



Rys. 2.7: Praca silnika podczas dwóch zmian obciążenia w  $t_1 = 0.5$  [s] oraz  $t_2 = 1.0$  [s]

## Część 3

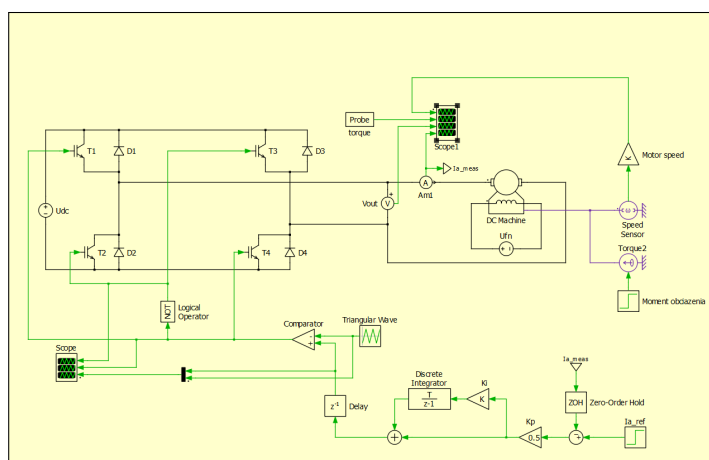
# Układy regulacji silnika DC

**Cel** W poprzednim układzie 2.5 obroty były sterowane przez manipulację sygnałem modującym. Nadal jest to dość nieoptymalne podejście - potrzebny jest układ sterowania, w którym wartość zadawana jest prędkością.

### 3.1 Dobór regulatora prądu

Założono, że układ regulacji będzie składał się z członu całkującego i proporcjonalnego. Co można wyrazić wzorem:

$$G(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{sT_i} \right)$$



Rys. 3.1: Schemat układu z dodanym regulatorem prądu

Ponieważ celem jest realistyczne wykonanie zarówno symulacji silnika jak i układu sterowania, zastosowano bloki *ZOH* oraz *Delay*. Dzięki nim otrzymywano sygnał dyskretny zamiast ciągłego (spróbkowany z częstotnością równą  $f_c = f_{sample}$ ).

#### 3.1.1 Wzmocnienie członu całkującego

Czas zdwojenia został obliczony z następującej zależności:

$$T_i = \tau_a = \frac{R_a}{L_a} \approx 259$$

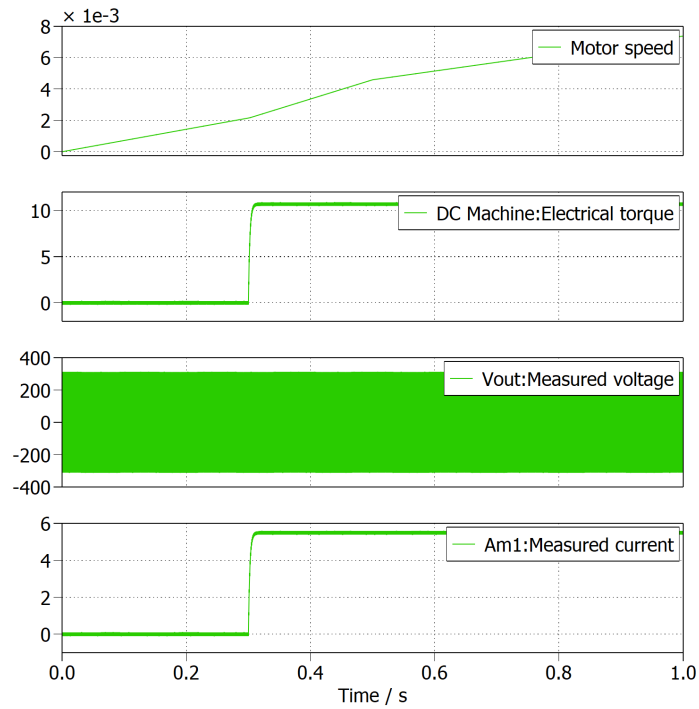
Wówczas:

$$k_i = \frac{1}{T_i} \approx 0.00386 \quad (3.1)$$

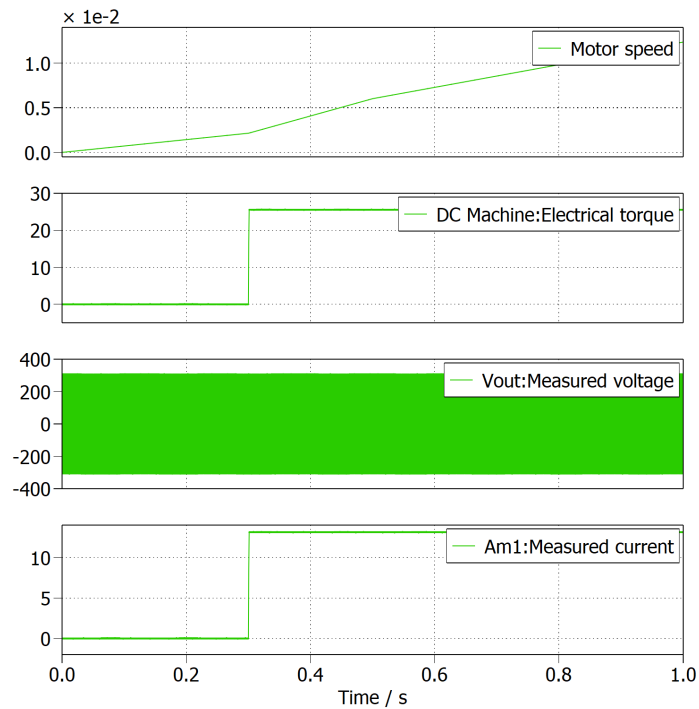
### 3.1.2 Wzmocnienie członu proporcjonalnego

Było dobierane przy zatrzymanym silniku (by osiągnąć ten efekt znacznie zwiększono moment bezwładności silnika). Celem było otrzymanie przebiegu o dość małych oscylacjach w stanie ustalonym.

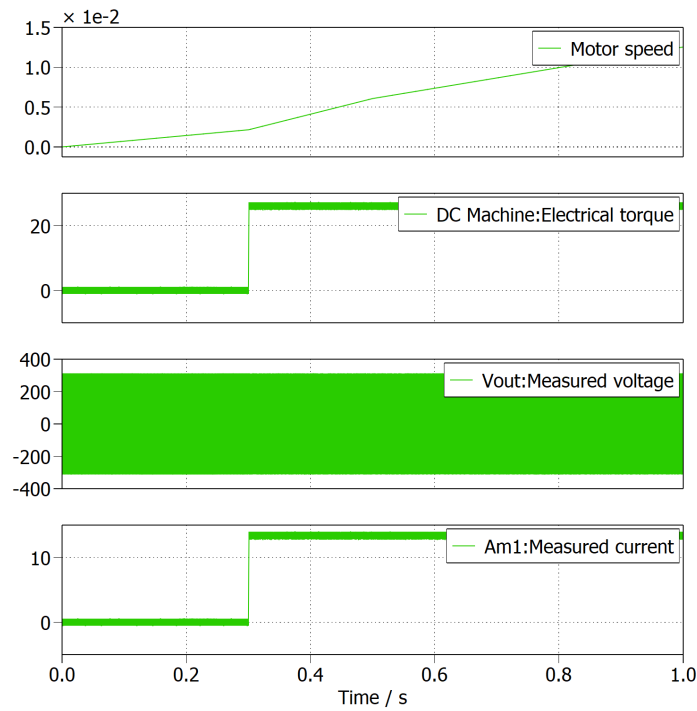
Porównanie przebiegów przy różnych  $k_p$



(a)  $k_p = 0.01$



(b)  $k_p = 0.5$

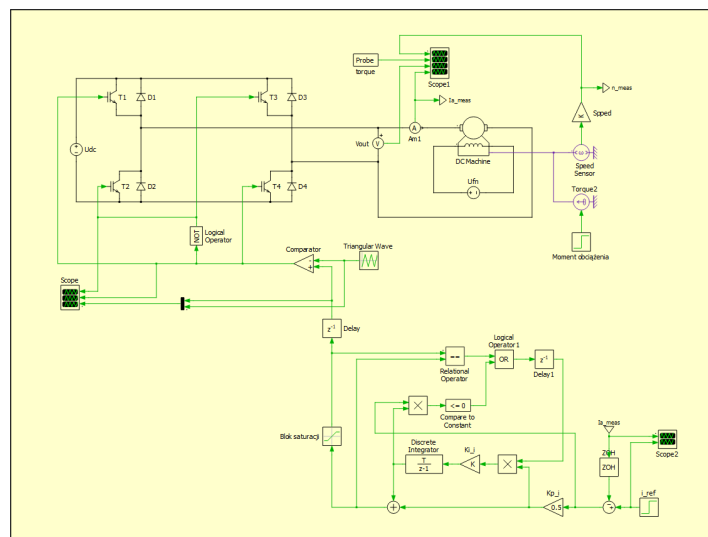


Rys. 3.3:  $k_p = 10$

Zdecydowano się na wybór wzmocnienia  $k_p = 0.5$ , widoczne jest, że dla tej wartości oscylacje są najmniejsze oraz dynamika układu jest lepsza niż dla mniejszych wzmocnień.

### 3.1.3 Ograniczenia sygnału modulującego

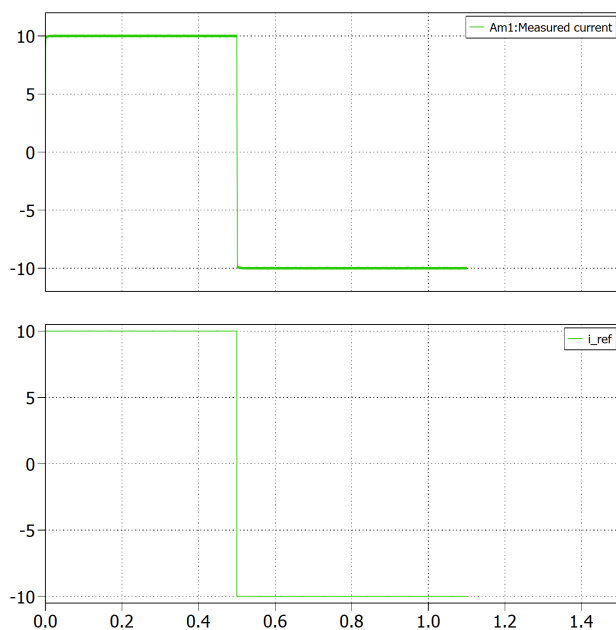
Widząc schemat układu 3.1 można zauważyć, że sygnał modulujący jest równoważny do sygnału wyjściowego z regulatora. By usprawnić pracę układu należy dostosować powyższy sygnał tak by osiągał wartości fali nośnej -  $F_C \in <-1, 1>$ . Zatem kolejnym krokiem było dodanie bloku *Saturation*.



Rys. 3.4: Kompletny schemat z regulatorem prądu w programie PLECS



### 3.1.4 Sprawdzenie działania regulatora



Rys. 3.5: Przebiegi prądu mierzonego oraz zadanego przy zatrzymanym silniku

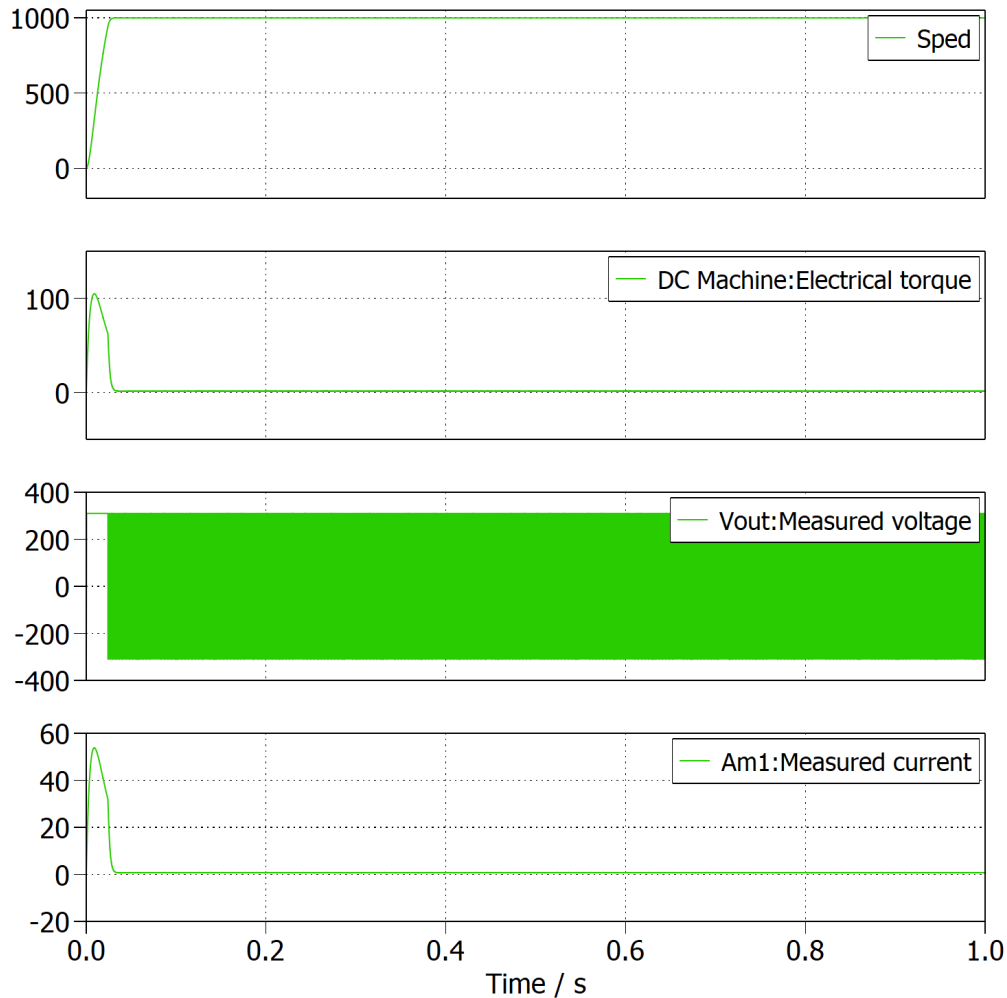
Widoczne jest, że układ osiąga zadane wartości bez znacznych oscylacji ani przeregulowań. Oznacza to, że wartości wzmocnień zostały dobrane poprawnie

## 3.2 Dobór regulatora prędkości

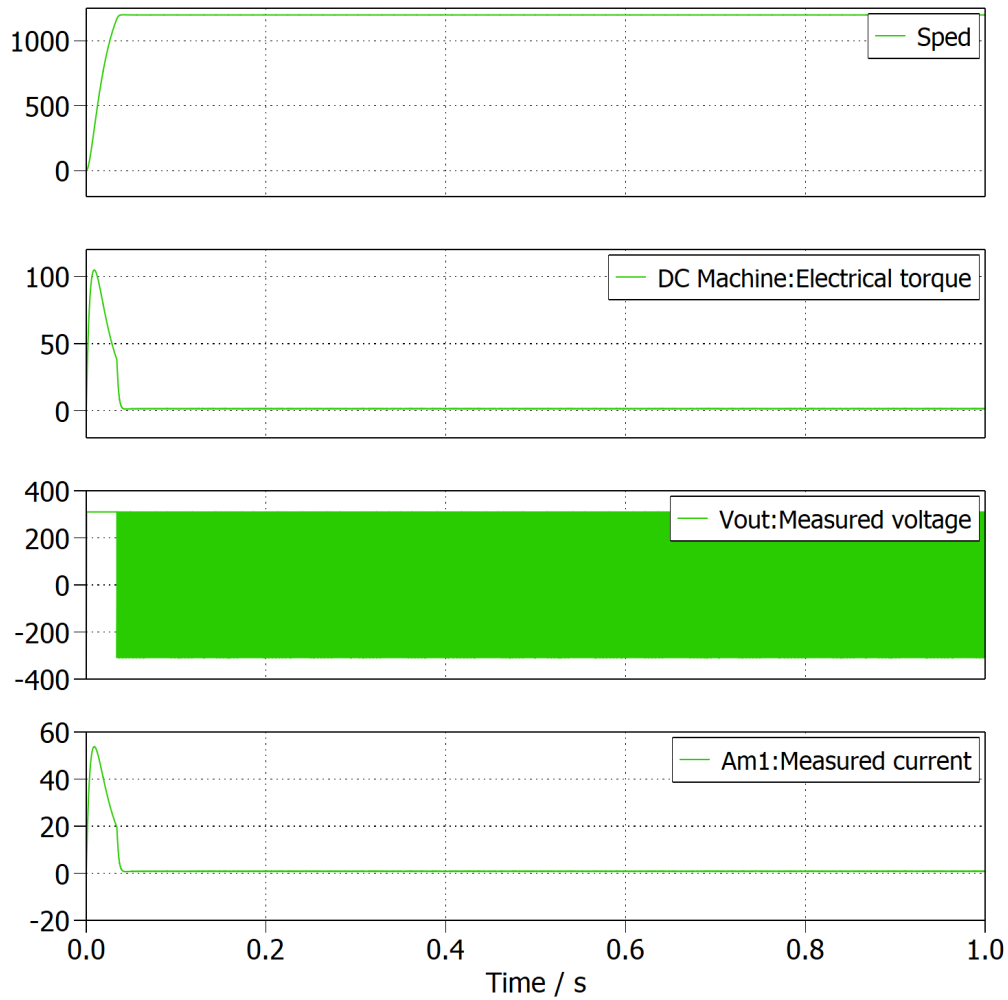
### 3.2.1 Regulator proporcjonalny

Dobrano tak, by uchyb otrzymywany przy odpowiedzi skokowej (w biegu jałowym) był niewiekszy niż 1-2 % wartości zadanej. Przy badaniu zachowania układu 'wyłączono' regulator całkujący - osiągnięto to przyjmując bardzo długi czas zdwojenia. Dodatkowo wartość  $k_p$  dobrano zgrubnie - przy mniejszych wartościach (nadal spełniających warunek uchybu) nie dało się osiągnąć odpowiednio krótkich czasów przy doborze wzmocnienia  $k_i$ .

#### Badanie uchybu dla $k_p = 0.5$



Rys. 3.6: Przy prędkości  $n_{ref} = 1000$  [obr/min] otrzymano uchyb rzędu 1.3 %



Rys. 3.7: Przy prędkości  $n_{ref} = 1200$  [obr/min] otrzymano uchyb rzędu 0.2 %

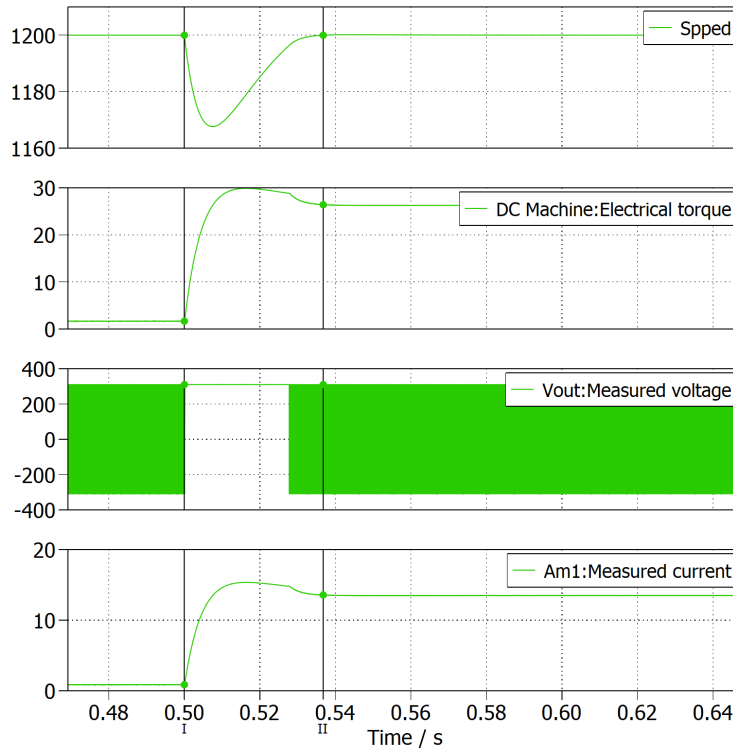
Jak widać  $k_p = 0.5$  spełnia wcześniej postawione założenia.

### 3.2.2 Regulator członu całkującego

Miał zostać dobrany tak by przy skoku obciążenia na wale silnika (od 0 do  $T_N = 24.6$  [Nm]) prędkość ustabilizowała się po czasie  $t = 0.02 - 0.05 \cdot \tau_m$  danym:

$$\tau_m = \frac{J}{F} = 1.51[s] \quad \Rightarrow \quad t \in < 30.1ms, 45.1ms > \quad (3.2)$$

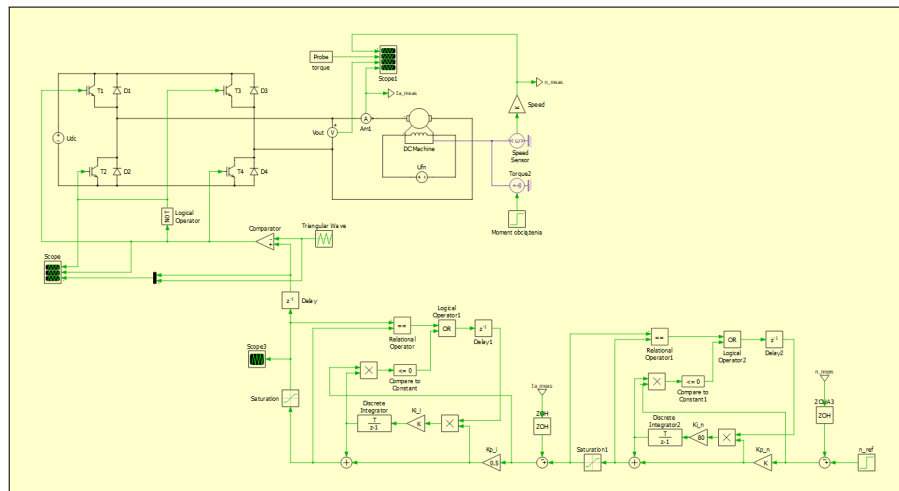
By znaleźć odpowiednią wartość manipulowano wzmocnieniem członu, a następnie mierzono  $\Delta t$  między skokiem obciążenia a wejściem układu w stan ustalony - dobór prowadzono zgodnie z zaleceniami dla prędkości bliskiej znamionowej. Otrzymano w ten sposób nastawę  $k_i = 45$



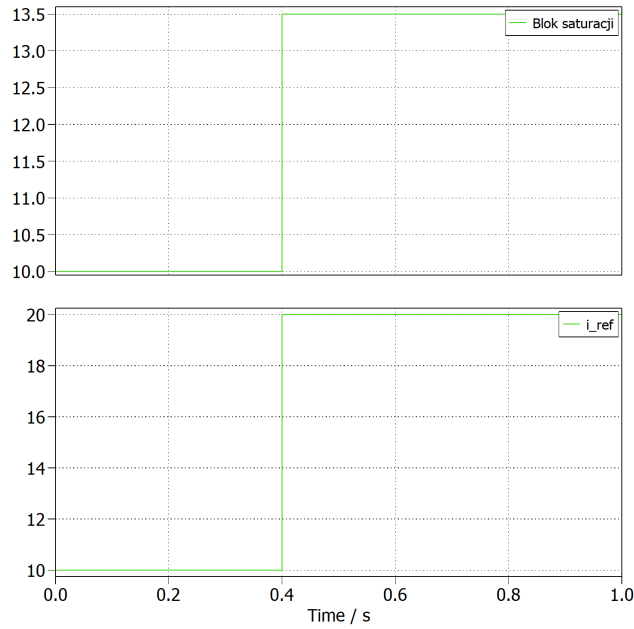
Rys. 3.8: Odpowiedź układu dla regulatorów  $k_p = 0.5$ ,  $k_i = 45$  - widoczny pomiar  $\Delta t$  za pomocą kursorów

### 3.2.3 Regulator PI z ograniczeniem

**Saturacja** Układ osiąga wartości zadane - jednak może dziać się to przy przekroczeniu wartości prądu znamionowego  $I_n = \pm 13.5$  [A] jest to niekorzystne dla silnika. Należy zatem ograniczyć pracę silnika dodając blok saturacji. By sprawdzić skuteczność rozwiązania zatrzymano silnik (zwiększono znacznie jego moment bezwładności) oraz zamiast wyjścia regulatora prędkości umieszczono blok skoku jednostkowego.

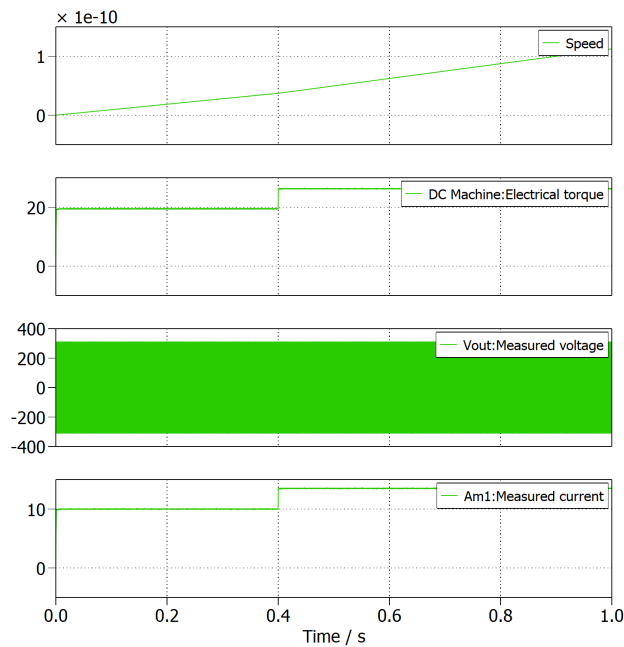


Rys. 3.9: Schemat w programie PLECS



Rys. 3.10: Widoczne wejście bloku saturacji  $i_{ref}$  oraz sygnał wyjściowy

Widoczne jest, że początkowy zadawany prąd jest mniejszy od znamionowego natomiast po 0.4s wymuszany jest prąd większy od znamionowego. Przy poprawnej pracy układu regulacji z ograniczeniem, powinniśmy obserwować prąd mniejszy lub równy (co do wartości) prądowi znamionowemu  $I_{aN}$  na wejściu silnika.



Rys. 3.11: Przebiegi pracy silnika podczas testu ograniczenia prądowego

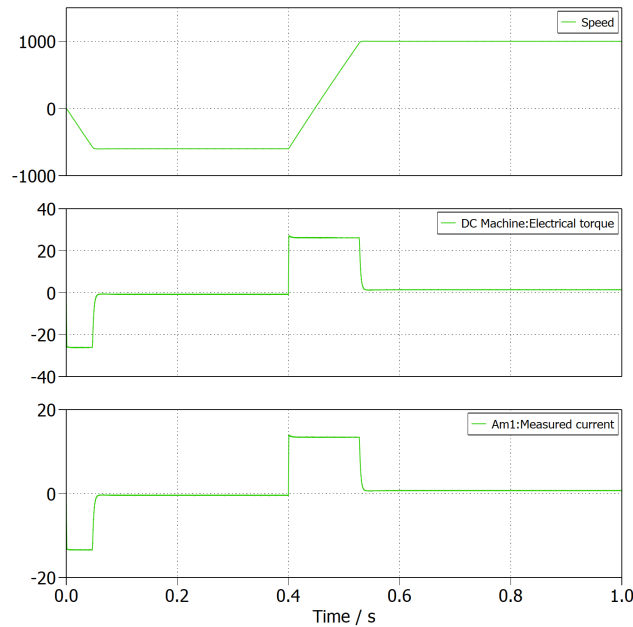
Powyższe przebiegi potwierdzają poprawne działanie układu.

### 3.3 Podsumowanie

**Praca układu** po skończeniu układu regulacji powinna spełniać poniższe warunki:

- Osiągać zadaną prędkość bez uchybu
- Osiągać 'szybko' zadaną prędkość
- Być pozbawiona oscylacji oraz znacznych przeregulowań
- Nie przekraczać prądu znamionowego  $I_n = \pm 13.5$  [A]

By zweryfikować czy powyższe warunki są spełnione zadano  $n_{ref1} = -600$  [obr/min] a po 0.4s prędkość zadana wynosiła  $n_{ref2} = 1000$  [obr/min]



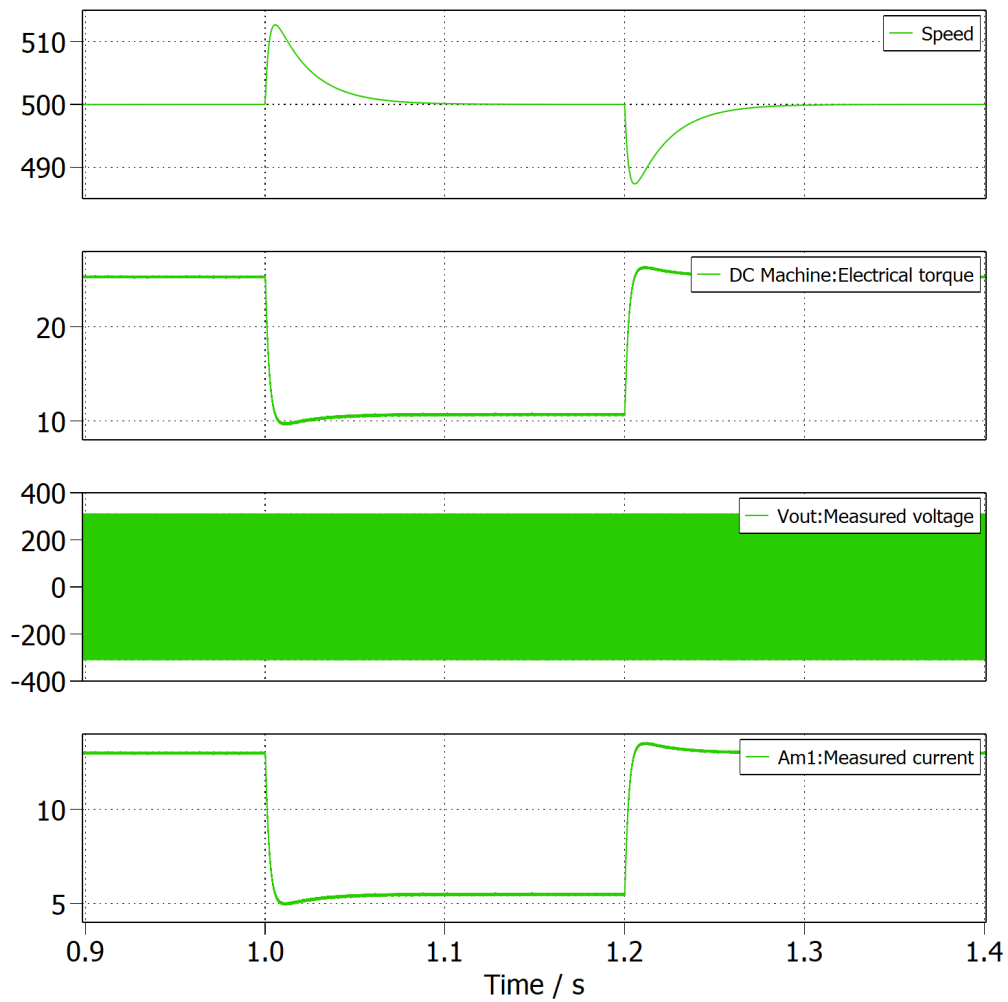
Rys. 3.12: Sprawdzenie pracy silnika z układem regulacji

Jak widać praca silnika nie odbiega od założeń teoretycznych.

#### 3.3.1 Badanie pracy silnika przy zmiennym obciążeniu

Analogicznie do 2.2.2 sprawdzono jak silnik 'zareaguje' na nagłe zmiany obciążenia

Parametr	$T_L$ rośnie	$T_L$ maleje
$U_a$	rośnie	maleje
$I_a$	rośnie	maleje
n	nie zmienia się	nie zmienia się



Rys. 3.13: Przebieg pracy silnika przy zmianach obciążenia na wale

Dzięki zastosowaniu układu regulacji prędkość silnika jest utrzymywana pomimo zmian innych parametrów pracy - jest to znaczna zmiana w porównaniu do poprzedniego testu.

# Część 4

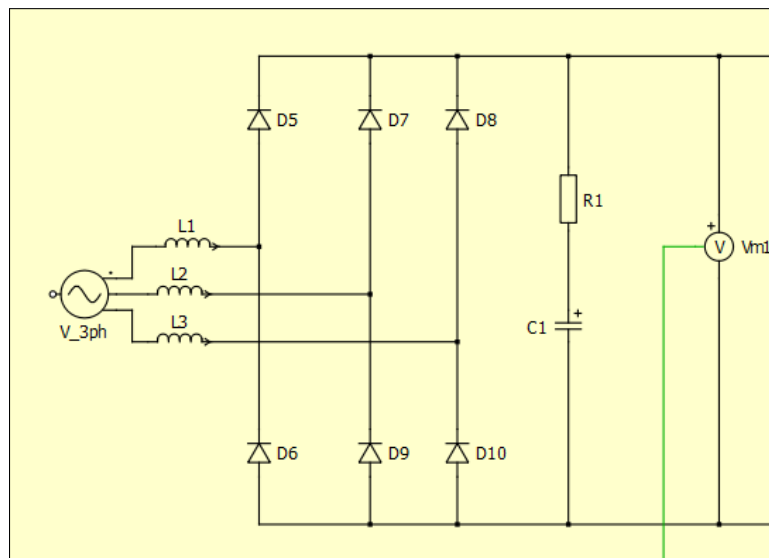
## Zasilanie silnika z sieci

**Cel** Docelowo nasz silnik byłby zasilany z sieci, zatem należy dodać kolejny segment obwodu pozwalający na takie dostarczanie energii.

### 4.1 Prostownik sieciowy

#### 4.1.1 Schemat i podstawowe parametry

**Schemat układu** prostownika sieciowego:



Rys. 4.1: Schemat prostownika

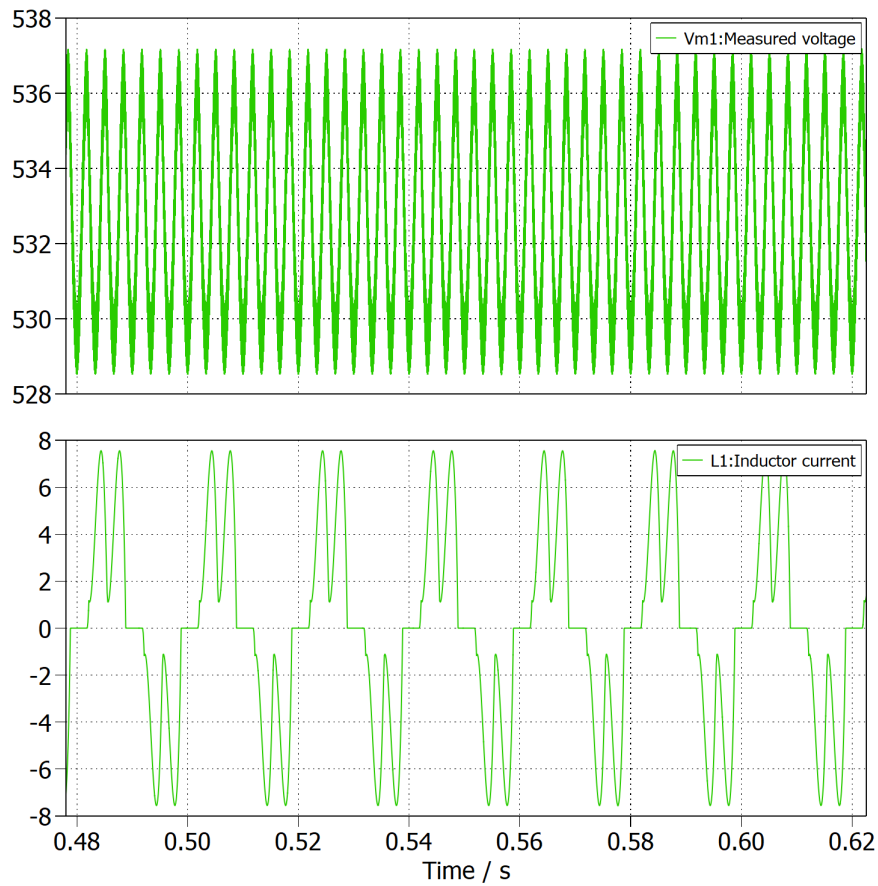
**Zasilanie sieciowe** zostało skonfigurowane w następujący sposób: amplituda napięcia fazowego -  $U_s = 230\sqrt{2} \approx 325$  [V], częstotliwość  $f_s = 50$  [Hz].

**Indukcyjności filtrujące**  $L$  zostały wyliczone w oparciu o maksymalny spadek napięcia ustalony arbitralnie jako  $U_{\%} = 0.03 \cdot U_{sRMS}$ . Wzór:

$$L = \frac{3 \cdot U_{\%} \cdot U_{sRMS}}{2\pi f_s \cdot U_{aN} I_{aN}} \approx 3.62 \text{ [mH]} \quad (4.1)$$



**Pojemność kondensatora pośredniczego  $C_{DC}$**  dobrano arbitralnie tak, by tętnienia napięcia wyjściowego z prostownika były nie większe niż 5% jego wartości średniej  $\bar{U}_{DC} \approx 530$  [V] - dopuszczalne wahania napięcia zatem były równe  $\Delta U_{DC} = \pm 27$  [V]. Dodatkowo szeregowo do kondensatora została dołożona rezystancja symulująca starty w kondensatorze  $R_{DC} = 0.1$  [ $\Omega$ ].

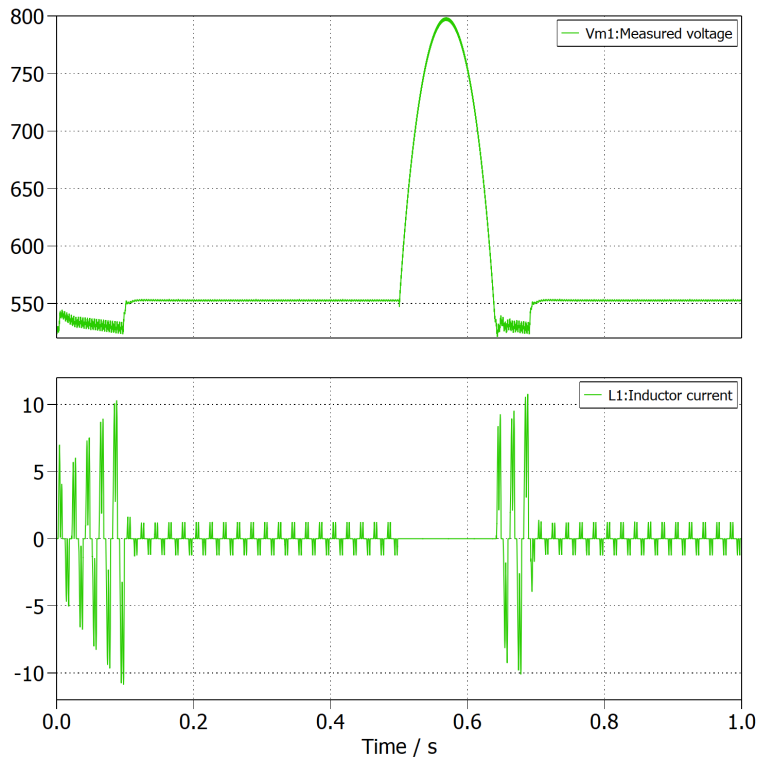


Rys. 4.2: Tętnienia napięcia dla dobranej pojemności  $C_{DC} = 500$  [uC]

Jak widać dla pojemności  $C_{DC} = 500$  [uC] osiąga się wcześniej założone poziomy tętnień

### 4.1.2 Zachowanie prostownika przy nawrocie silnika

Sprawdzono jak zachowa się napięcie na wyjściu prostownika oraz prąd w sieci (na indukcyjności filtrującej), gdy silnik zacznie zmniejszać swoją prędkość (przy zerowym obciążeniu wału).



Rys. 4.3: W 0.5s widać nawrót z prędkości  $n = 1200$  [obr/min] do prędkości  $n = -1200$  [obr/min]

Widoczny jest znaczny wzrost napięcia  $U_{DC}$ , które osiąga wartość maksymalną około 800 [V]. Dodatkowo można zauważyć nagły wzrost prądu, o bardzo wysokiej amplitudzie tętnień.

## 4.2 Układ wytracający energię hamowania

W celu rozproszenia energii zastosowano rezystor mocy. Rozpraszenie kontrolowane jest za pomocą regulatora dwupołożeniowego histerezyowego sterującego tranzystorem dołączającego rezystor do obwodu pośredniczącego prądu stałego. By zabezpieczyć układ przed przebiegami spowodowane przerwaniem przepływu prądu przez  $L_r$  - indukcyjność pasożytniczą tranzystora mocy zastosowano diodę.

Regulator dwupołożeniowy zapewnia ochronę przed uszkodzeniem przekształtnika wysokim napięciem  $U_{dc}$  - w tym celu ustalany jest górny próg regulatora. Dolny próg zapewni wyłączenie tranzystora  $T_{br}$  po obniżeniu  $U_{dc}$  (jest on niewiele większy od średniego napięcia  $\overline{U}_{DC}$ ). Ustalone progi to:

- Próg załączenia  $U_{DC\_H} = 600$  [V]
- Próg wyłączenia  $U_{DC\_L} = 550$  [V]

**Rezystancja  $R_{br}$ :** Odpowiednia wartość rezystancji  $R_{br}$  pozwala wytracić odpowiednią ilość mocy. Zakładając, że  $I_{a\_max} = 1.5I_{aN}$ , równanie ma postać:

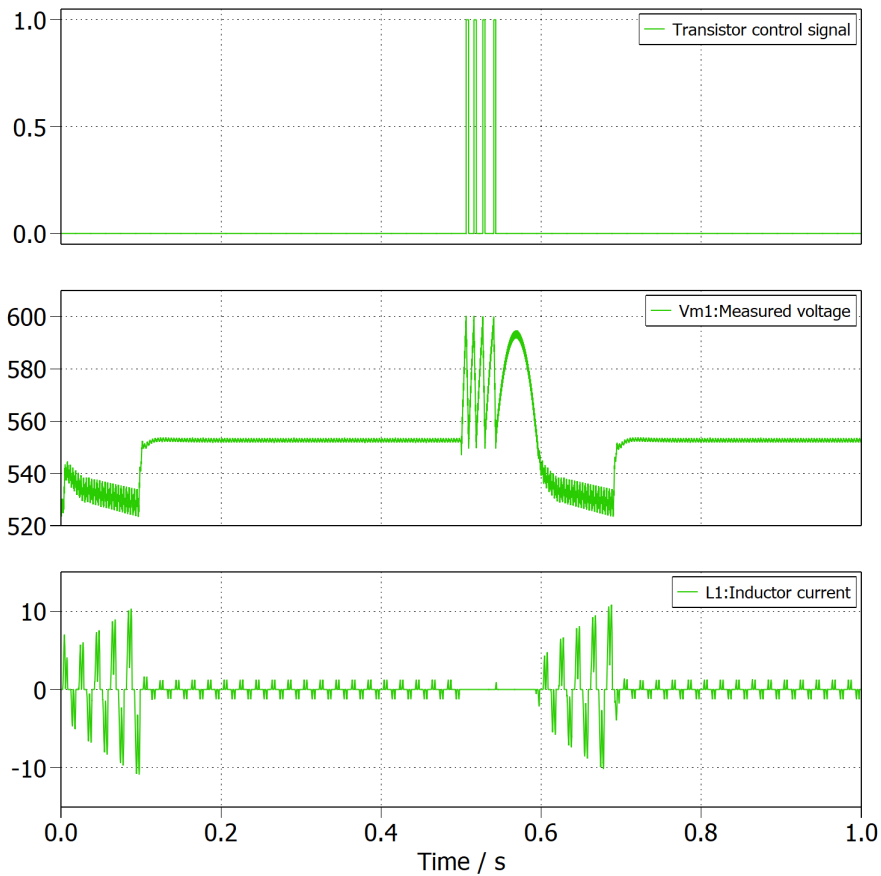
$$R_{br} < \frac{U_{DC\_L}^2}{U_{aN}I_{a\_max}} = \frac{(550^2) V^2}{(1.5 \cdot 310 \cdot 13.5) VA} = 48.2 [\Omega]$$

Dobrana wartość spełniająca równanie  $R_{BR} = 40 [\Omega]$ .

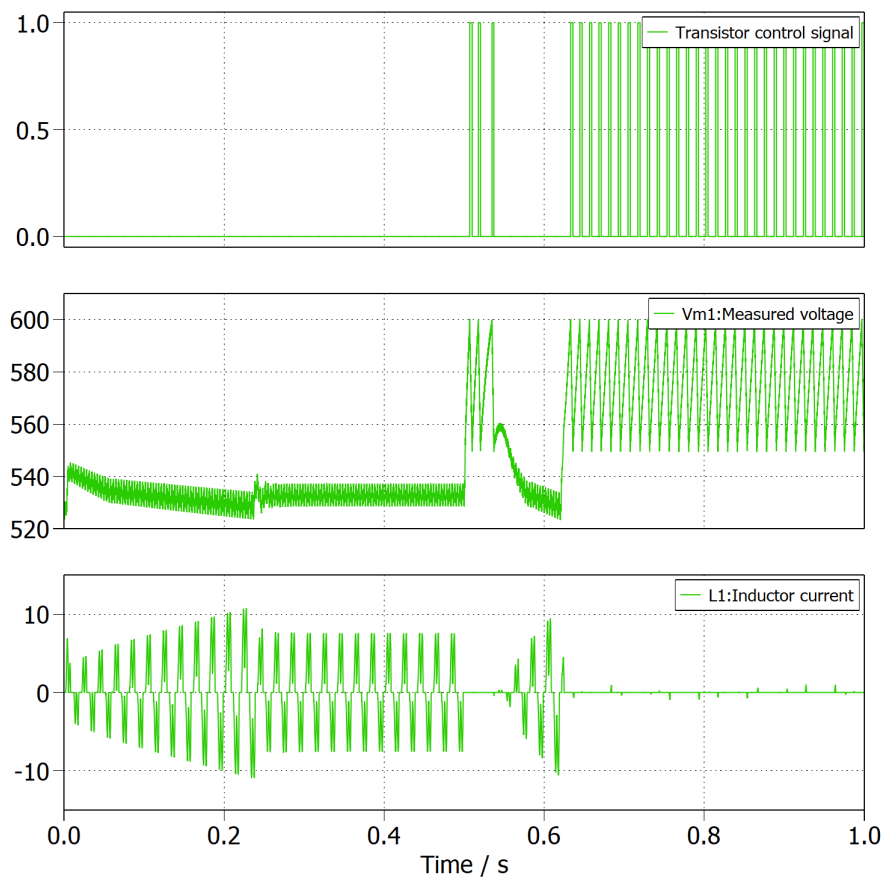
#### 4.2.1 Praca układu w trakcie nawrotu

By zaobserwować pracę układu wytracającego napięcie dokonano nawrotu silnika z  $n_1 = 1200$  [obr/min] do  $n_2 = -1200$  [obr/min] w chwili  $t_0 = 0.5$  [s]. Badano napięcie wyjściowe prostownika, prąd cewki oraz sygnał sterujący tranzystorem  $T_{BR}$ :

##### Badanie zachowania układu przy różnych obciążeniach wału



Rys. 4.4: Przy zerowym obciążeniu wału



Rys. 4.5: Przy znamionowym obciążeniu wału

Widoczne jest, że układ załącza się i wyłącza przy wcześniej ustalonych progu napięciowych. Zgodnie z oczekiwaniami energia jest wytracana.

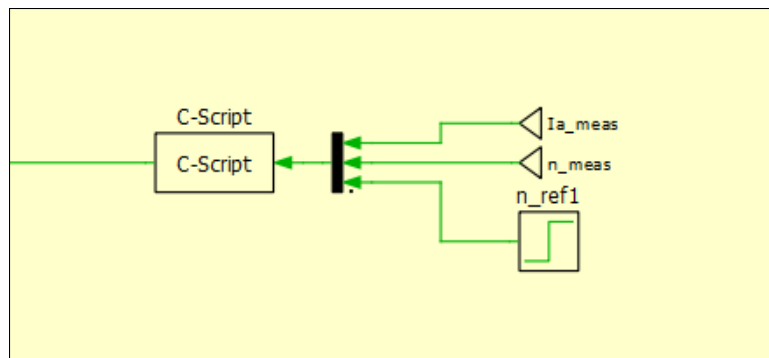
# Część 5

## Implementacja w C

**Cel** Nowoczesne układy sterowania są 'zarządzane' przez mikrokontrolery - ostatnim krokiem będzie zastąpienie analogowych regulatorów symulacją mikrokontrolerów.

### 5.1 Realizacja

Symulacją działania mikrokontrolera będzie blok *C\_Script*, który realizuje kod napisany w C. Program zawiera te same funkcjonalności - dyskretne implementacje regulatorów prądu i prędkości wraz z ograniczeniami.

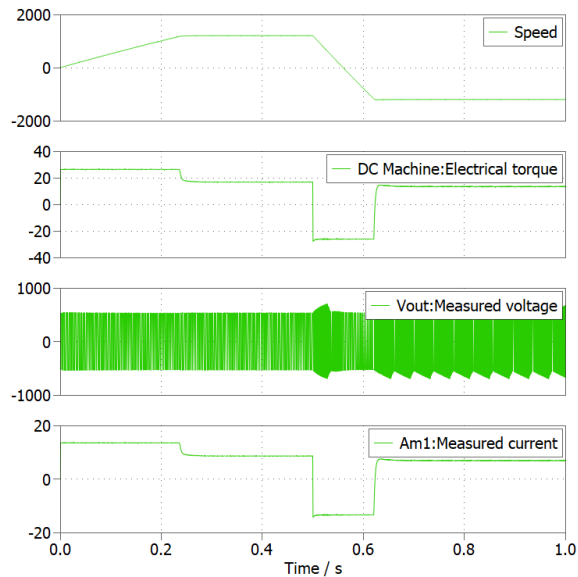


Rys. 5.1: Fragment schematu, gdzie widać układ regulacji zastąpiony blokami C-Script.

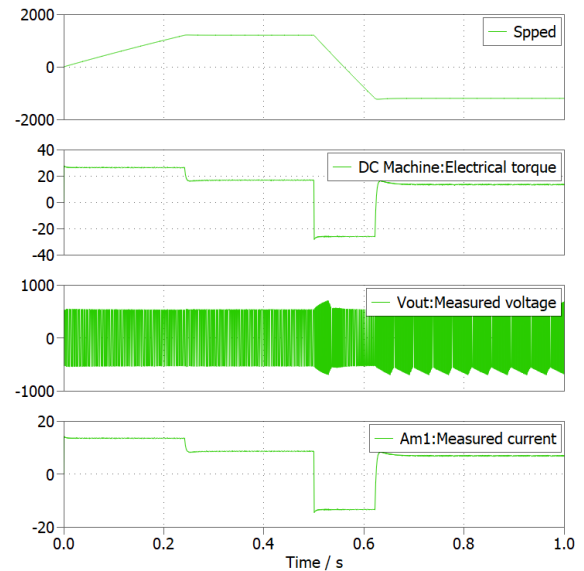
Kod znajdujący się na ISODzie dostosowano do potrzeb zmieniając wartość kroku całkowania oraz nastaw regulatorów. Finalny kod jest w sekcji Dodatek.

## 5.2 Porównanie implementacji

### Zestawienie dwóch sposobów regulacji



(a) Przebiegi układu analogowego



(b) Przebiegi układu z 'mikrokontrolerem'

Jak widać, przebiegi czasowe są niemal nierozróżnialne. Świadczy to o poprawności implementacji kodu.

# Część 6

## Dodatek

### 6.1 Kod w bloku C\_script

```
#include <math.h>

float h=0.00002; //krok calkowania

//Definicja wejsc
float n_ref = Input(0); //wartosc zadana predkosci
float n = Input(1); //wartosc rzeczywista (mierzona) predkosci;
float i = Input(2); //wartosc rzeczywista (mierzona) pradu;

//Stale do regulatorow
float Kp_i=0.5; //wzmocnienie czesci proporcjonalnej reg. pradu
float Ki_i=1/0.00386; //wzmocnienie czesci calkujacej reg. pradu
float out_max_i=1.0; //wartosc ograniczenia regulatora pradu

float Kp_n= 0.5; //wzmocnienie czesci proporcjonalnej reg. predkosci
float Ki_n= 45; //wzmocnienie czesci calkujacej reg. predkosci
float out_max_n=13.5; //wartosc ograniczenia regulatora predkosci

////////////////////////////////////////////////////
//Praca regulatora predkosci

float eps_n=Kp_n*(n_ref-n); //obliczenie uchybu regulacji/czesci proporcjonalnej

static float integ_n=0.0;
static float eps_prev_n=0.0;

integ_n+=Ki_n*0.5*(eps_n+eps_prev_n)*h; //obliczenie calki metoda trapezow
eps_prev_n=eps_n; //zapamietywanie poprzedniej probki bledu

if (integ_n>out_max_n) integ_n=out_max_n; //antiwindup gorny
if (integ_n<=-out_max_n) integ_n=-out_max_n; //antiwindup dolny

float reg_out_n=eps_n+integ_n; //obliczenie wyjscia regulatora

if (reg_out_n>out_max_n) reg_out_n=out_max_n; //ograniczenie gorne regulatora
```

```

if (reg_out_n<-out_max_n) reg_out_n=-out_max_n; //ograniczenie dolne regulatora

//Przekazanie wartosci wyjsciowej do regulatora pradu
float i_ref = reg_out_n;

////////////////////////////////////////////////////
//Praca regulatora pradu

float eps_i=Kp_i*(i_ref-i); //obliczenie uchybu regulacji/czesci proporcjonalnej

static float integ_i=0.0;
static float eps_prev_i=0.0;

integ_i+=Ki_i*0.5*(eps_i+eps_prev_i)*h; //obliczenie calki metoda trapezow
eps_prev_i=eps_i; //zapamietywanie poprzedniej probki bledu

if (integ_i>out_max_i) integ_i=out_max_i; //antiwindup gorny
if (integ_i<-out_max_i) integ_i=-out_max_i; //antiwindup dolny

float reg_out_i=eps_i+integ_i; //obliczenie wyjscia regulatora

if (reg_out_i>out_max_i) reg_out_i=out_max_i; //ograniczenie gorne regulatora
if (reg_out_i<-out_max_i) reg_out_i=-out_max_i; //ograniczenie dolne regulatora

Output(0)=reg_out_i;

```

## 6.2 Kod Matlab

```

clear all
%%Mock data
% V_IN = 420;
% n = 995;
% P_n = 3.15*1000;
% T_n = 302;
% I_n = 90;
% eta = 79;
% R_a = 0.65;
% L_a = 6.6/1000;
%
% U_fn = 310;
% P_f = 1.81*1000;
% J = 0.32

%% Dane wejsciowe
V_IN = 310;
n = 1220;

```



```

P_n = 3.15*1000;
T_n = 24.6;
I_n = 13.5;
eta = 69;
R_a = 4.53;
L_a = 17.5/1000;
L_s = 37/1000;

U_fn = 310;
P_f = 0.33*1000;
J = 0.02

%% Rezystancja obwodu wzbudzenia
R_f = U_fn^2/P_f
I_fn = P_f/U_fn

%%Napięcie indukowane i znamionowa elektromotoryczna
E_an = V_IN - I_n*R_a
omega_n = 2*pi/60 * n
L_af = E_an / (I_fn*omega_n)

%%Współczynnik tarcia wiskotycznego
T_en = E_an * I_n / omega_n
F = (T_en - T_n) / omega_n

%%Obliczenia do dopasowania członów regulatora od prędkości
tm = J/F
tm_min = tm*0.02;
tm_max = tm*0.03;

%%Obliczenia do prostownika
U_siec = 230;
L_1 = 0.09*U_siec^2/(2 * pi * 50 * V_IN * I_n)

%%Obliczenia do układu odzyskiwania energii
U_dcl = 550;
R_br = U_dcl^2/(V_IN * 1.5 * I_n)

```