



CZUJNIKI POMIAROWE I ELEMENTY WYKONAWCZE

# Ćwiczenie 1b

## Silnik prądu stałego jako element wykonawczy Modelowanie i symulacja napędu

Ramowy plan pracy

15'	30'	45'	1 <sup>h</sup>	1 <sup>h</sup> 15'	1 <sup>h</sup> 30'	po zajęciach

Opracowanie ćwiczenia i instrukcji:  
Radosław Tomala, Bartosz Pękosławski

Łódź 2011

wer. 1.0.0. 11.12.2011



## Spis treści

<b>B Wprowadzenie do ćwiczenia.....</b>	<b>5</b>
1. Cel i przebieg ćwiczenia.....	5
2. Podstawy teoretyczne .....	7
2.1. Wprowadzenie .....	7
2.2. Matematyczny opis pracy silnika.....	7
2.2.a. Stałe charakteryzujące obiekt i zmienne opisujące stan silnika.....	7
2.2.b. Układ równań dla stanu dynamicznego i ustalonego .....	8
<b>C Ćwiczenie .....</b>	<b>9</b>
3. Symulacje .....	9
3.1. Parametry badanego silnika .....	9
3.2. Wykonanie symulacji .....	11
<b>D Wyniki .....</b>	<b>15</b>
4. Opracowanie i analiza wyników.....	15
<b>E Informacje.....</b>	<b>17</b>
5. Literatura .....	17



## Wprowadzenie do ćwiczenia

---

### 1. Cel i przebieg ćwiczenia

---

Celem ćwiczenia jest zamodelowanie w programie PSpice napędu z silnikiem prądu stałego i symulacja stanu ustalonego przy sterowaniu PWM oraz wybranych stanów dynamicznych:

- rozruch silnika,
- hamowanie silnika poprzez zwarcie wirnika,
- hamowanie silnika poprzez odcięcie zasilania,
- hamowanie silnika poprzez zmianę napięcia zasilania (współczynnika wypełnienia).



## 2. Podstawy teoretyczne

---

### 2.1. Wprowadzenie

Silnik elektryczny zalicza się do najbardziej rozpowszechnionych elementów wykonawczych. Jest także najważniejszym obiektem układów automatycznej regulacji i stabilizacji. Napęd z silnikiem elektrycznym można modelować za pomocą równoważnego układu elektromechanicznego, a po przekształceniu części mechanicznej na dziedzinę elektryczną, także za pomocą układu elektrycznego, który może być symulowany np. w programie PSpice.

### 2.2. Matematyczny opis pracy silnika

#### 2.2.a. Stałe charakteryzujące obiekt i zmienne opisujące stan silnika

Równoważny model silnika pokazany na rys. 1 opisują stałe:

$L_A$  – indukcyjność twornika

$R_A$  – rezystancja twornika

$J$  – moment bezwładności

$c_M$  – stała momentowa [Nm/A]

$c_E$  – stała napięciowa [V/(obr·min<sup>-1</sup>)] lub [Vs/rad]

oraz zmienne:

$u_A$  – napięcie twornika w stanie dynamicznym

$U_A$  – napięcie twornika w stanie ustalonym

$i_A$  – prąd twornika w stanie dynamicznym

$I_A$  – prąd twornika w stanie ustalonym

$e$  – siła elektromotoryczna w stanie dynamicznym

$E$  – siłą elektromotoryczna w stanie ustalonym

$\omega$  – prędkość obrotowa w stanie dynamicznym

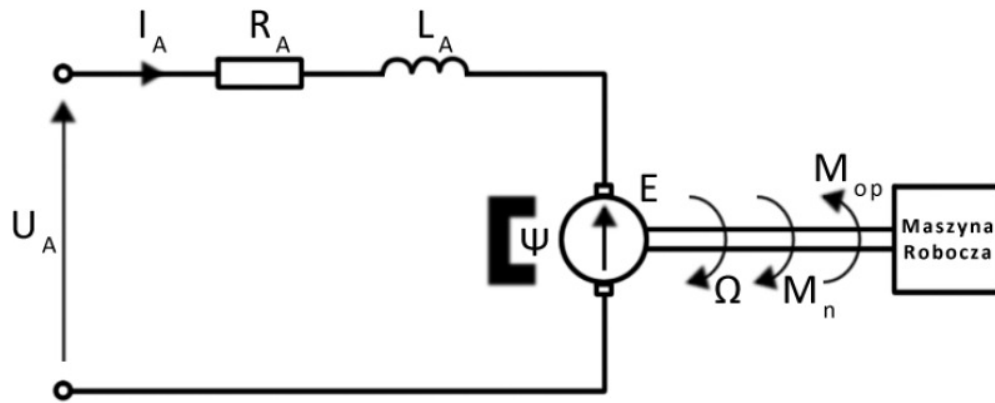
$\Omega$  lub  $n$  – prędkość obrotowa w stanie ustalonym

$m_n$  – moment napędowy w stanie dynamicznym

$M_n$  – moment napędowy w stanie ustalonym

$m_{op}$  – moment oporowy w stanie dynamicznym

$M_{op}$  – moment oporowy w stanie ustalonym



Rys. 1. Model ciągu mechanicznego z silnikiem

### 2.2.b. Układ równań dla stanu dynamicznego i ustalonego

W stanach dynamicznych silnik opisany jest układem równań:

$$\begin{cases} u_A = i_A R_A + L_A \frac{di_A}{dt} + e \\ e = c_E \omega \\ m_n = c_M i_A \\ m_n - m_{op} = J \frac{d\omega}{dt} \end{cases}$$

W stanie ustalonym, gdy  $M_n = M_{op}$ :

$$\begin{cases} U_A = I_A R_A + E \\ E = c_E \Omega \\ M_{op} = c_M I_A \end{cases}$$



### 3. Symulacje

---

#### 3.1. Parametry badanego silnika

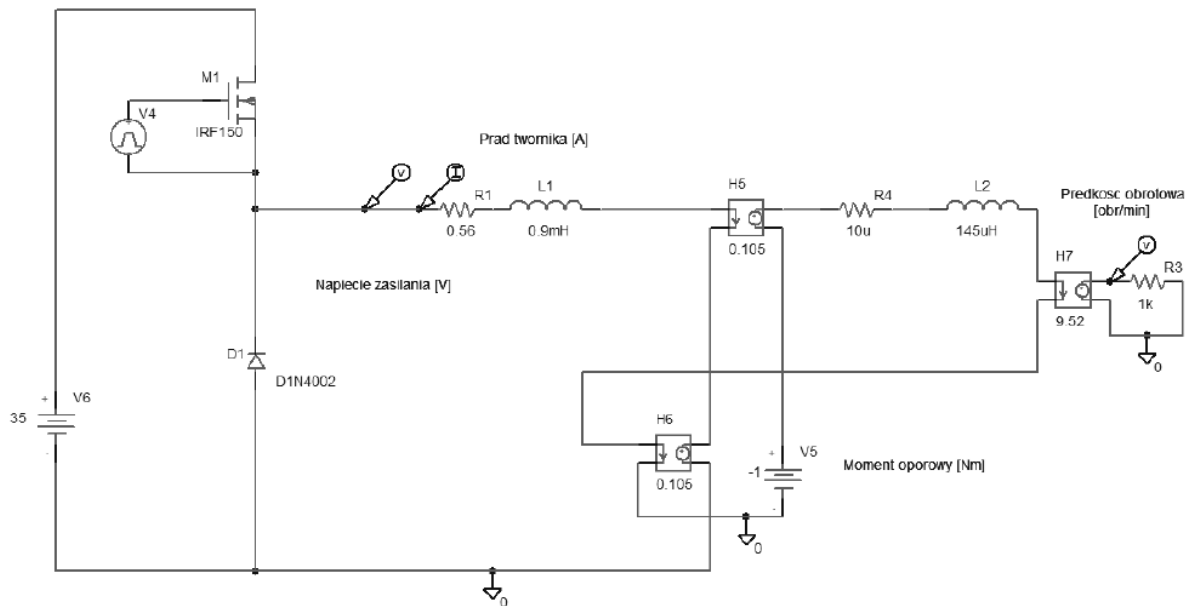
Badany w symulacjach silnik ma następujące parametry:

Napięcie zasilania:	$U_{A(nom)} = 35 \text{ V}$
Prędkość obrotowa maksymalna:	$n_{(max)} = 3200 \text{ obr/min}$
Moment napędowy maksymalny:	$M_{n(max)} = 2,83 \text{ Nm}$
Prąd twornika maksymalny:	$I_{A(max)} = 27 \text{ A}$
Rezystancja twornika:	$R_A = 0,56 \text{ } \Omega$
Indukcyjność twornika:	$L_A = 0,9 \text{ mH}$
Stała momentowa:	$c_M = 0,105 \text{ Nm/A}$
Stała napięciowa:	$c_E = 11 \text{ V / 1000 obr/min}$
Moment bezwładności:	$J = 0,000145 \text{ kgm}^2$



### 3.2. Wykonanie symulacji

1. Narysować poniższy schemat w programie PSpice:



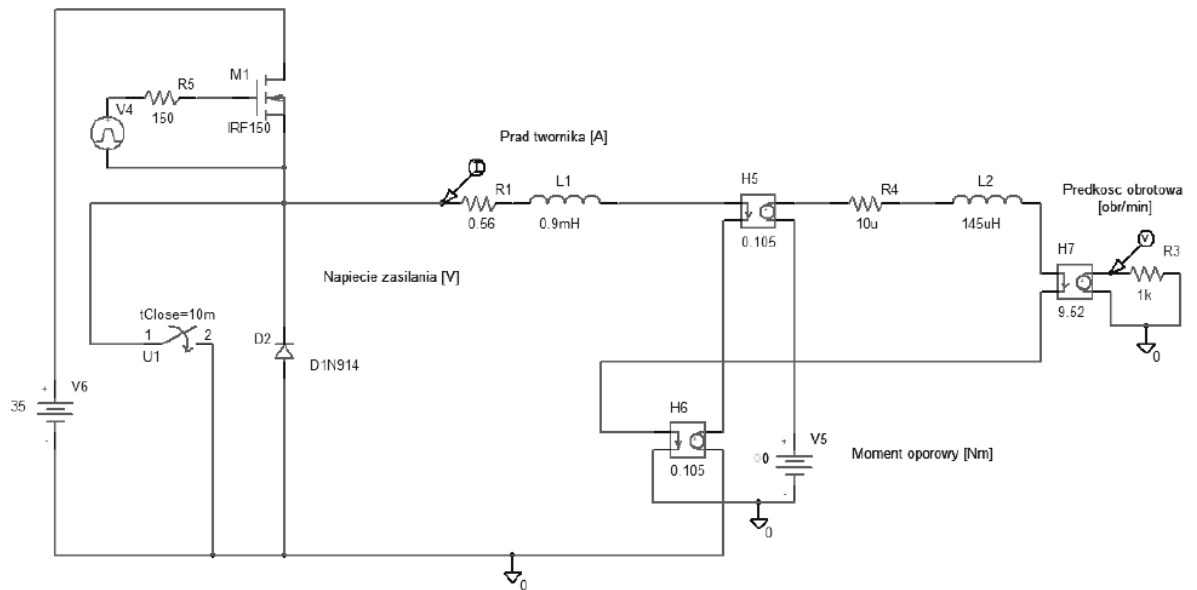
W prezentowanym układzie napędowym prądu stałego ma być zmieniana programowo prędkość obrotowa. Dla silnika obcowzbudnego ze stałym wzbudzeniem (stały prąd wzbudzenia lub magnes) zmianę prędkości obrotowej można osiągnąć przez zmianę napięcia średniego twornika. Do tego celu zastosowano prosty przekształtnik DC-DC w postaci przerywacza okresowego z jednym tranzystorem. Do rozładowania energii twornika służy dioda zerowa (zwrotna). Przedstawiony schemat odzwierciedla dobrze zjawiska w przerywaczu i części elektrycznej silnika.

2. Wyświetlić i zapisać przebiegi napięcia twornika, prędkości obrotowej i prądu twornika w fazie rozruchu i w stanie pracy ustalonej (analiza *Transient*). Na przebiegach w stanie ustalonym zaobserwować wymianę prądu pomiędzy tranzystorem a diodą zwrotną.

W chwili załączania tranzystora mogą pojawić się duże piki prądu drenu. Można je znacznie zmniejszyć włączając w obwód bramki pewną oporność, a także stosując szybszą diodę, np. D1N914.

3. Wyznaczyć charakterystykę zewnętrzną silnika  $n = f(M_{op})$  dla różnych wartości napięcia zasilania  $U_A$  (analiza *DC Sweep*).
4. Wyznaczyć charakterystykę sterowania silnika  $n = f(U_A)$  dla różnych wartości momentu oporowego  $M_{op}$  (analiza *DC Sweep*).

5. Zmodyfikować schemat zgodnie z poniższym rysunkiem:



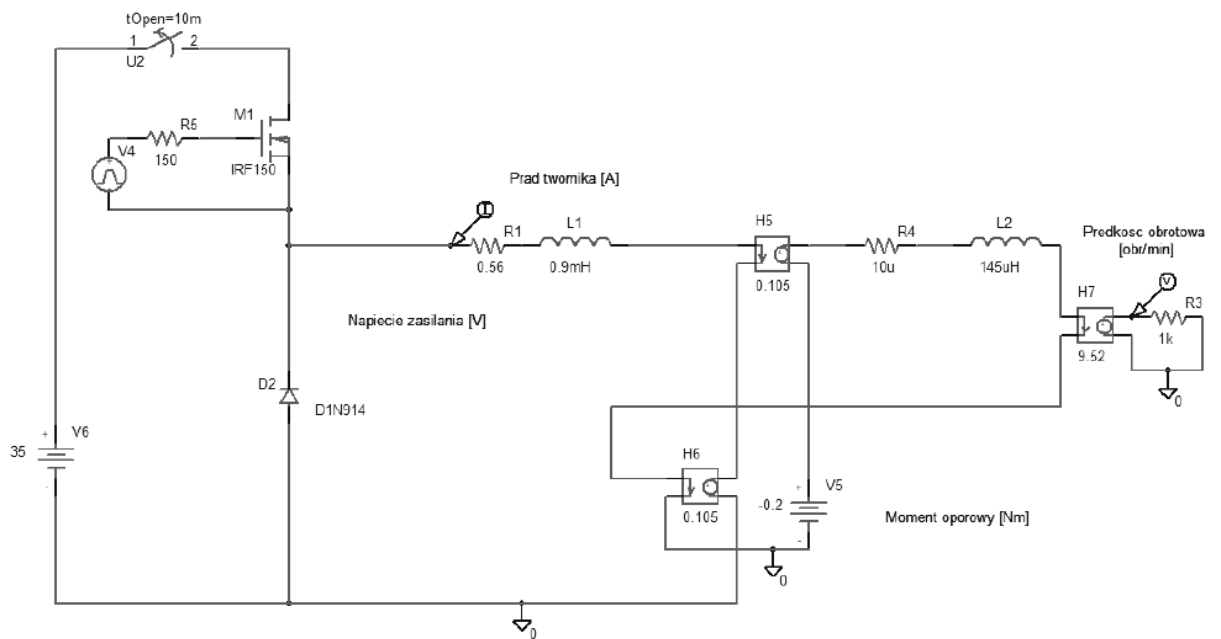
Parametry:

- współczynnik wypełnienia: 0,5
- okres impulsowania: 500  $\mu$ s ( $f = 2$  kHz),
- $M_{op} = 0$ ,
- rezystancja klucza w stanie ON: bardzo mała
- zwarcie wirnika po kilku milisekundach

6. Dla przypadku  $M_{op} = 0$  wyznaczyć czas hamowania silnika przyjmując za koniec hamowania chwilę, dla której prędkość obrotowa osiąga 5% wartości prędkości znamionowej.

Uwaga: dla  $M_{op}$  różnego od zera silnik nie zatrzymuje się, tylko osiąga inny stan ustalonej prędkości obrotowej.

7. Zmodyfikować schemat zgodnie z poniższym rysunkiem:

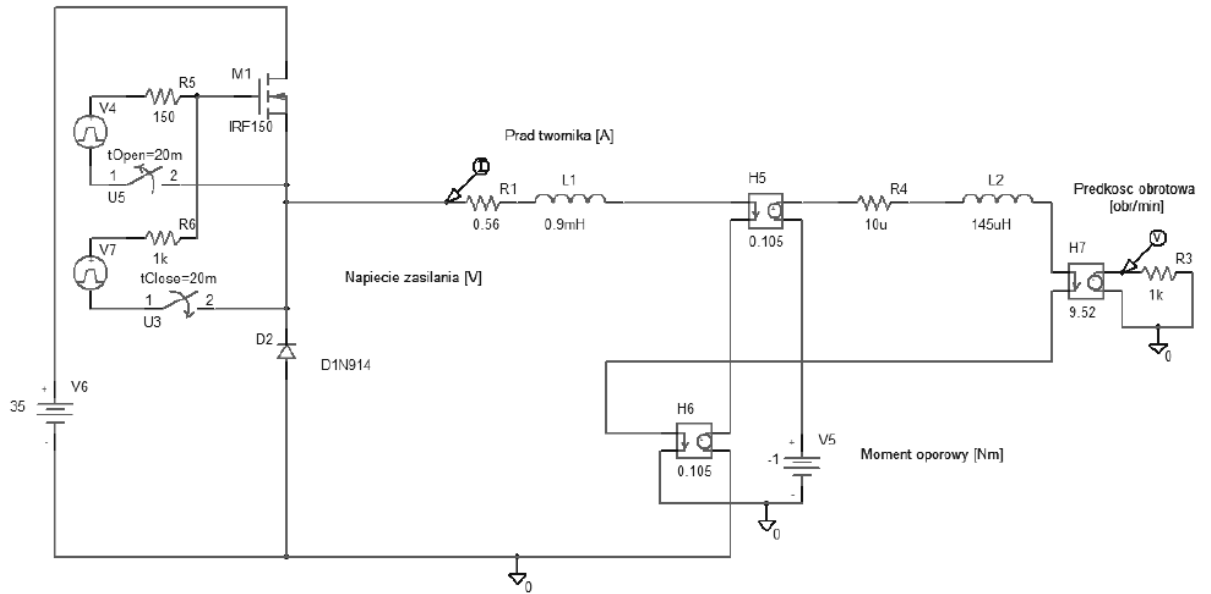


Po kilku milisekundach odłączamy źródło zasilania. Prąd twornika maleje zamykając się przez diodę zwrotną (nie może zmienić kierunku). Silnik zmniejsza prędkość obrotową powoli.

8. Wyznaczyć czas do zatrzymania się (5% prędkości obrotowej znamionowej). Do badań przyjąć niewielką wartość momentu oporowego.

Gdy  $M_{op} = 0$ , silnik nie zatrzymuje się. Wynika to z faktu, że w opisie dynamicznym nie uwzględniono strat mechanicznych, np. oporów w łożyskach.

9. Zmodyfikować schemat zgodnie z poniższym rysunkiem:



Po kilkunastu milisekundach zmieniamy skokowo napięcie zasilania przez zmianę wartości współczynnika wypełnienia. Prąd twornika maleje, ale nie zmienia kierunku z uwagi na obecność diody zwrotnej. Nie płynie do źródła, bo tranzystor regulacyjny jest wyłączony. Nie płynie też przez diodę podłożową tranzystora.

10. Wyznaczyć czas do zatrzymania się (5% nowej ustalonej prędkości obrotowej).

### 4. Opracowanie i analiza wyników

---

1. Wyjaśnić rolę tranzystora i diody w układzie na podstawie zapisanych przebiegów
2. Korzystając z układu równań dla stanu ustalonego obliczyć charakterystyki mechaniczne silnika  $n = f(M_{op})$  dla trzech różnych wartości napięcia twornika
3. Korzystając z układu równań dla stanu ustalonego obliczyć charakterystyki sterowania silnika  $n = f(U_A)$  dla trzech różnych wartości momentu oporowego
4. Porównać charakterystyki obliczone z otrzymanymi w symulacjach
5. Z czego wynika nieliniowość charakterystyk symulacyjnych?
6. Zebrać w tabeli wyznaczone z symulacji czasy hamowania dla różnych przypadków i skomentować





### 5. Literatura

---

[1]