

Politechnika Wrocławska  
Wydział Elektryczny

# Ślizgowy regulator prędkości silnika prądu stałego

Praca inżynierska

**Autor:** Bartosz Orchowski

**Nr albumu:** 273433

**Kierunek:** Elektromechatronika

**Promotor:** dr inż. Marcin Kamiński

Wrocław, 2025

# Streszczenie

Celem niniejszej pracy inżynierskiej jest analiza oraz zastosowanie odpornego regulatora prędkości w układzie napędowym z silnikiem bezszczotkowym prądu stałego. Zastosowano wariant sterowania ślizgowego w postaci algorytmu Super-Twisting Sliding Mode Control (ST-SMC), charakteryzującego się zwiększoną odpornością na zakłócenia oraz redukcją efektu chatteringu. W pracy przedstawiono model matematyczny bezszczotkowego silnika prądu stałego, implementację regulatora w środowisku MATLAB/Simulink oraz jego realizację w układzie z mikrokontrolerem STM32. Wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych potwierdziły skuteczność zaprojektowanego układu.

**Słowa kluczowe:** bezszczotkowy silnik prądu stałego, sterowanie ślizgowe, Super-Twisting, STM32, regulator prędkości

# Spis treści

<b>1</b>	<b>Wprowadzenie</b>	<b>4</b>
1.1	Cel i zakres pracy . . . . .	4
1.2	Uzasadnienie wyboru tematu . . . . .	5
1.3	Zakres badań i założenia projektowe . . . . .	6
1.4	Struktura pracy . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Podstawy teoretyczne układu napędowego i sterowania odpornego</b>	<b>7</b>
2.1	Charakterystyka silnika bezszczotkowego prądu stałego . . . . .	7
2.1.1	Zasada działania i typowe zastosowania . . . . .	7
2.1.2	Model matematyczny silnika BLDC . . . . .	8
2.2	Układy regulacji prędkości . . . . .	10
2.2.1	Klasyczne metody sterowania . . . . .	10
2.2.2	Ograniczenia regulatorów liniowych . . . . .	10
2.3	Sterowanie ślizgowe i regulator Super-Twisting . . . . .	10
2.3.1	Zasada działania sterowania ślizgowego . . . . .	10
2.3.2	Wyprowadzenie algorytmu Super-Twisting . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Modelowanie i badania symulacyjne</b>	<b>11</b>
3.1	Model układu regulacji w MATLAB/Simulink . . . . .	11
3.2	Projekt regulatora Super-Twisting . . . . .	11
3.3	Dobór parametrów i analiza stabilności . . . . .	11
3.4	Wyniki badań symulacyjnych . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Implementacja i stanowisko laboratoryjne</b>	<b>12</b>
4.1	Opis stanowiska badawczego . . . . .	12
4.1.1	Silnik, przekształtnik, czujniki . . . . .	12
4.2	Platforma STM32 i integracja sprzętowa . . . . .	12
4.2.1	Konfiguracja ADC, PWM, enkodera . . . . .	12
4.3	Implementacja algorytmu sterowania . . . . .	12
4.3.1	Struktura programu i pętla sterowania . . . . .	12
4.4	Modernizacja stanowiska i połączenia elektryczne . . . . .	12
<b>5</b>	<b>Testy eksperymentalne i analiza wyników</b>	<b>13</b>

5.1	Metodyka badań . . . . .	13
5.2	Wyniki testów . . . . .	13
5.3	Porównanie wyników symulacyjnych i eksperymentalnych . . . . .	13
5.4	Ocena skuteczności regulatora . . . . .	13
<b>6</b>	<b>Podsumowanie i wnioski</b>	<b>14</b>
6.1	Podsumowanie zrealizowanych etapów . . . . .	14
6.2	Wnioski końcowe . . . . .	14
6.3	Kierunki dalszych badań . . . . .	14
	<b>Bibliografia</b>	<b>15</b>
<b>A</b>	<b>Kody źródłowe programu</b>	<b>16</b>
<b>B</b>	<b>Schemat połączeń stanowiska</b>	<b>17</b>

# 1. Wprowadzenie

## 1.1 Cel i zakres pracy

Celem niniejszej pracy inżynierskiej jest opracowanie, analiza oraz implementacja odpornego regulatora prędkości dla napędu z silnikiem bezszczotkowym prądu stałego (BLDC). W odróżnieniu od klasycznych metod regulacji, takich jak sterowanie typu PI lub PID, celem jest zastosowanie sterowania ślizgowego w wariantcie Super-Twisting Sliding Mode Control (ST-SMC), które charakteryzuje się zwiększoną odpornością na zakłócenia, niepewności modelu oraz zmiany parametrów obiektu.

W ramach pracy wykonano szereg etapów obejmujących zarówno analizy teoretyczne, jak i badania praktyczne. W części teoretycznej opracowano model matematyczny silnika BLDC oraz opisano zasadę działania regulatora ślizgowego typu Super-Twisting. Następnie przeprowadzono symulacje numeryczne w środowisku MATLAB/Simulink w celu weryfikacji poprawności opracowanego algorytmu.

Część praktyczna obejmuje implementację regulatora ST-SMC w mikrokontrolerze z rdzeniem ARM (np. STM32 z rodziny Nano) oraz jego zastosowanie w rzeczywistym stanowisku laboratoryjnym z napędem BLDC. W ramach realizacji pracy przeprowadzono również testy eksperymentalne, mające na celu ocenę jakości regulacji prędkości, odporności układu na zakłócenia oraz porównanie uzyskanych wyników z rezultatami badań symulacyjnych.

Zakres pracy obejmuje zatem:

- analizę literatury w zakresie metod sterowania odpornego i sterowania ślizgowego,
- opracowanie modelu matematycznego silnika BLDC w środowisku symulacyjnym,
- zaprojektowanie regulatora prędkości typu Super-Twisting Sliding Mode Control,
- realizację badań symulacyjnych i analizę ich wyników,
- implementację algorytmu na mikrokontrolerze z rdzeniem ARM,
- wykonanie testów eksperymentalnych na stanowisku laboratoryjnym oraz ocenę skuteczności sterowania.

Ostatecznym celem pracy jest potwierdzenie, że regulator ślizgowy typu Super-Twisting może zapewnić stabilną, szybką i odporną regulację prędkości silnika BLDC w obecności zakłóceń oraz niepewności parametrów modelu, przewyższając pod tym względem klasyczne rozwiązania liniowe.

## 1.2 Uzasadnienie wyboru tematu

Napędy z silnikami bezszczotkowymi prądu stałego (BLDC) znajdują szerokie zastosowanie w nowoczesnych systemach mechatronicznych, takich jak pojazdy elektryczne, roboty mobilne, drony czy urządzenia przemysłowe. Wysoka sprawność energetyczna, duża gęstość mocy oraz niewielkie wymagania serwisowe sprawiają, że silniki BLDC są obecnie jednym z najczęściej stosowanych rozwiązań w układach napędowych małej i średniej mocy. Jednocześnie ich sterowanie wymaga stosowania zaawansowanych algorytmów, ze względu na nieliniowość obiektu, sprzężenie między fazami oraz zmienne warunki pracy.

Klasyczne regulatory liniowe, takie jak PI lub PID, mimo prostoty implementacji, charakteryzują się ograniczoną odpornością na zmiany parametrów silnika oraz wpływ zakłóceń zewnętrznych, np. wahania napięcia zasilania czy zmiany momentu obciążenia. W zastosowaniach wymagających precyzyjnej i dynamicznej regulacji prędkości, te niedoskonałości prowadzą do spadku jakości sterowania oraz trudności w zapewnieniu stabilności w szerokim zakresie pracy.

Sterowanie ślizgowe (Sliding Mode Control, SMC) stanowi alternatywną metodę projektowania układów regulacji, zapewniającą wysoką odporność na zakłócenia oraz niepewności modelu. Zasada działania SMC opiera się na wprowadzaniu powierzchni ślizgowej, po której stan układu jest utrzymywany mimo zmian warunków zewnętrznych. Jedną z odmian klasycznego sterowania ślizgowego jest regulator typu Super-Twisting Sliding Mode Control (ST-SMC), który eliminuje podstawową wadę konwencjonalnego SMC, jaką jest zjawisko chatteringu, czyli oscylacji sygnału sterującego w pobliżu powierzchni ślizgowej.

Wybór tematu pracy wynika z potrzeby opracowania układu regulacji prędkości napędu BLDC, który zapewniłby:

- wysoką odporność na zakłócenia i zmiany parametrów silnika,
- krótkie czasy narastania i dobrą jakość regulacji,
- ograniczenie efektu chatteringu,
- możliwość implementacji w rzeczywistym układzie z mikrokontrolerem.

Ponadto, temat ma duże znaczenie praktyczne i badawcze, ponieważ łączy zagadnienia z zakresu teorii sterowania nieliniowego, elektroniki mocy oraz mikrokontrolerowych systemów wbudowanych. Implementacja regulatora ślizgowego typu Super-Twisting w rzeczywistym układzie sterowania BLDC pozwala na ocenę skuteczności tego typu metod w

kontekście rzeczywistych ograniczeń sprzętowych oraz stanowi punkt wyjścia do dalszych badań nad adaptacyjnymi i hybrydowymi strategiami sterowania odpornego.

### **1.3 Zakres badań i założenia projektowe**

### **1.4 Struktura pracy**

## 2. Podstawy teoretyczne układu napędowego i sterowania odpornego

### 2.1 Charakterystyka silnika bezszczotkowego prądu stałego

#### 2.1.1 Zasada działania i typowe zastosowania

Silnik bezszczotkowy prądu stałego (ang. *Brushless Direct Current Motor*, BLDC) jest maszyną elektryczną prądu stałego, w której komutacja prądów w uzwojeniach stojana realizowana jest elektronicznie, a nie mechanicznie jak w klasycznych silnikach szczotkowych. Zastąpienie komutatora i szczotek układem elektronicznym pozwala na wyeliminowanie tarcia, iskrzenia oraz zużycia elementów stykowych, co znacząco zwiększa trwałość i sprawność układu napędowego.

Silnik BLDC składa się z trzech podstawowych części: stojana z uzwojeniami, wirnika z magnesami trwałymi oraz czujników położenia (np. czujników Halla lub enkodera). Uzwojenia stojana są zwykle połączone w układ trójfazowy (gwiazda lub trójkąt), natomiast na wirniku umieszczone są magnesy trwałe o biegunach N i S. Sterownik silnika (tzw. falownik lub kontroler BLDC) wytwarza odpowiednie przebiegi napięć zasilających poszczególne fazy stojana w taki sposób, aby uzyskany moment elektromagnetyczny utrzymywał się w zgodności z kierunkiem pola magnetycznego wirnika. W tym celu konieczna jest znajomość aktualnego położenia kąтового wirnika, co umożliwia realizację komutacji elektronicznej.

Zasada działania silnika BLDC opiera się na wytwarzaniu momentu elektromagnetycznego w wyniku oddziaływania pola magnetycznego magnesów trwałych na wirniku i pola wytwarzanego przez prądy płynące w uzwojeniach stojana. W każdej chwili czasu przewodzą dwie z trzech faz, a trzecia pozostaje odłączona. Sterownik, na podstawie sygnałów z czujników położenia, przełącza zasilanie poszczególnych faz tak, aby wektor wytwarzanego pola magnetycznego był przesunięty o stały kąt względem pola wirnika. W wyniku tego działania uzyskuje się płynny ruch obrotowy.

Silniki BLDC wyróżniają się szeregiem zalet w porównaniu z tradycyjnymi silnikami komutatorowymi, takich jak:

- wysoka sprawność energetyczna (często przekraczająca 85–90%),



- brak elementów szczotkowych, co redukuje straty mechaniczne i hałas,
- możliwość pracy z dużą prędkością obrotową,
- niskie wymagania konserwacyjne i długa żywotność,
- łatwość sterowania momentem i prędkością dzięki zastosowaniu układów mikroprocesorowych.

Dzięki wymienionym cechom, silniki BLDC znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach techniki. W przemyśle stosuje się je m.in. w serwonapędach, systemach automatyki, obrabiarkach CNC oraz napędach robotów. W sektorze motoryzacyjnym wykorzystywane są w pojazdach elektrycznych i hybrydowych, a także w systemach wspomagania kierownicy czy pompach. W elektronice użytkowej silniki tego typu napędzają wentylatory, napędy dysków twardych, urządzenia AGD oraz drony. Coraz częściej są również elementem systemów mechatronicznych, w których wymagana jest du

### 2.1.2 Model matematyczny silnika BLDC

Modelowanie silnika BLDC (Brushless DC Motor) bazuje na analizie trójfazowego układu elektrycznego i dynamiki mechanicznej ruchu obrotowego. W przeciwieństwie do silników PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor), model BLDC opiera się na przebiegu trapezoidalnym siły przeciwelektromotorycznej (Back-EMF), co wpływa na charakterystykę sterowania.

#### Równania Elektryczne (Model Fazy $a - b - c$ )

Przyjmując, że silnik posiada trzy symetryczne uzwojenia połączone w gwiazdę (Y) oraz stałą rezystancję ( $R$ ) i indukcyjność własną ( $L$ ), napięcie fazowe  $V_k$  dla fazy  $k \in \{a, b, c\}$  jest sumą spadku rezystancyjnego, indukcyjnego oraz indukowanej siły Back-EMF  $e_k$ :

$$V_k = R \cdot i_k + L \frac{di_k}{dt} + e_k$$

gdzie:

- $V_k$  — napięcie fazowe [V],
- $i_k$  — prąd fazowy [A],
- $R$  — rezystancja uzwojenia fazowego [ $\Omega$ ],
- $L$  — uproszczona indukcyjność uzwojenia fazowego [H] (w modelach bardziej szczegółowych uwzględnia się wzajemne sprzężenie magnetyczne  $M$  i zmienność  $L$  z kątem).

Zakładając brak połączenia z punktem zerowym, suma prądów fazowych musi być równa zero:

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

### Siła Przeciwelektromotoryczna (Back-EMF)

Siła  $e_k$  indukowana w uzwojeniu jest wprost proporcjonalna do prędkości kątowej wirnika ( $\omega_m$ ) oraz zależy od kąta elektrycznego ( $\theta_e$ ) poprzez trapezoidalną funkcję kształtu  $f_k(\theta_e)$ :

$$e_k = K_e \cdot \omega_m \cdot f_k(\theta_e)$$

gdzie:

- $K_e$  — stała Back-EMF [V·s/rad],
- $\omega_m$  — prędkość mechaniczna wirnika [rad/s],
- $f_k(\theta_e)$  — trapezoidalna funkcja kształtu Back-EMF (zwykle normalizowana do  $\in [-1, 1]$ ), przesunięta o  $120^\circ$  elektrycznych między fazami.

Zależność między kątem elektrycznym a mechanicznym określa liczba par biegunów  $P$ :

$$\theta_e = P \cdot \theta_m$$

### Równanie Momentu Elektromagnetycznego

Chwilowy moment elektromagnetyczny ( $T_e$ ) jest związany z całkowitą mocą konwersji elektromechanicznej. Stanowi go suma iloczynów Back-EMF i prądów wszystkich faz, podzielona przez prędkość mechaniczną:

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m}$$

W przypadku przyjęcia spójnego układu jednostek SI (np.  $K_t = K_e$ ), moment może być wyrażony za pomocą prądów i funkcji kształtu Back-EMF:

$$T_e = K_t \cdot [i_a f_a(\theta_e) + i_b f_b(\theta_e) + i_c f_c(\theta_e)]$$

gdzie  $K_t$  to stała momentu obrotowego [Nm/A].

### Równanie Mechaniczne

Ruch obrotowy wirnika jest opisywany przez równanie dynamiki mechanicznej (równanie Newtona dla ruchu obrotowego), uwzględniające moment bezwładności ( $J$ ) i siły tarcia (reprezentowane przez współczynnik tarcia lepkiego  $B$ ):

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m$$

gdzie:

- $T_L$  — moment obciążenia [Nm],
- $J$  — moment bezwładności wirnika i obciążenia [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ],
- $B$  — współczynnik tarcia lepkiego [ $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ ].

Model ten jest podstawą do projektowania algorytmów sterowania, zwłaszcza w trybie  $120^\circ$  komutacji sześciostopniowej.

## 2.2 Układy regulacji prędkości

### 2.2.1 Klasyczne metody sterowania

### 2.2.2 Ograniczenia regulatorów liniowych

## 2.3 Sterowanie ślizgowe i regulator Super-Twisting

### 2.3.1 Zasada działania sterowania ślizgowego

### 2.3.2 Wyprowadzenie algorytmu Super-Twisting

### 3. Modelowanie i badania symulacyjne

3.1 Model układu regulacji w MATLAB/Simulink

3.2 Projekt regulatora Super-Twisting

3.3 Dobór parametrów i analiza stabilności

3.4 Wyniki badań symulacyjnych

## 4. Implementacja i stanowisko laboratoryjne

### 4.1 Opis stanowiska badawczego

#### 4.1.1 Silnik, przekształtnik, czujniki

### 4.2 Platforma STM32 i integracja sprzętowa

#### 4.2.1 Konfiguracja ADC, PWM, enkodera

### 4.3 Implementacja algorytmu sterowania

#### 4.3.1 Struktura programu i pętla sterowania

### 4.4 Modernizacja stanowiska i połączenia elektryczne

## 5. Testy eksperymentalne i analiza wyników

### 5.1 Metodyka badań

### 5.2 Wyniki testów

### 5.3 Porównanie wyników symulacyjnych i eksperymentalnych

### 5.4 Ocena skuteczności regulatora

## 6. Podsumowanie i wnioski

### 6.1 Podsumowanie zrealizowanych etapów

### 6.2 Wnioski końcowe

### 6.3 Kierunki dalszych badań

# Bibliografia

- [1] V. Utkin, "Sliding Modes in Control and Optimization", Springer, 1992.
- [2] C. Edwards, S. Spurgeon, "Sliding Mode Control: Theory and Applications", Taylor & Francis, 1998.
- [3] STMicroelectronics, "STM32F4 Reference Manual", 2023.
- [4] K. Ogata, "Modern Control Engineering", Prentice Hall, 2010.



## A. Kody źródłowe programu

Listing A.1: Fragment programu w języku C dla STM32

```
void ControlLoop(void)
{
    float error = omega_ref - omega_meas;
    u = u + k1 * sqrt(fabs(error)) * sign(error) + k2 * error;
    SetPWM(u);
}
```

## B. Schemat połączeń stanowiska

Rysunek B.1: Schemat stanowiska laboratoryjnego