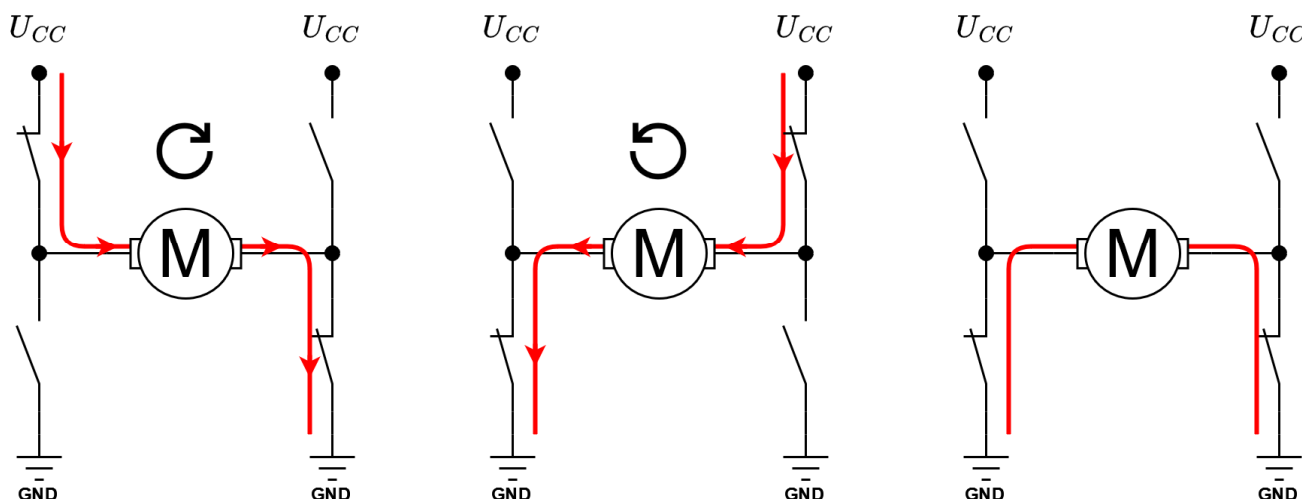


Sterownik silnika DC

Wymagania do realizacji ćwiczenia (zakres zagadnień i umiejętności koniecznych do wykonania zadania):

- reprezentacja liczb w systemie dziesiętnym, binarnym i szesnastkowym;
- zakładanie projektu w programie Quartus Prime;
- tworzenie modułu sprzętowego (symbolu) w programie Quartus Prime na podstawie pliku schematu (*.bdf);
- tworzenie modułu sprzętowego (symbolu) w programie Quartus Prime na podstawie pliku z kodem źródłowym (np. *.vhd);
- umiejętność upraszczania wyrażeń logicznych metodą tablic Karnaugh;
- umiejętność implementacji schematu z bramek logicznych na podstawie równania algebraicznego;
- projektowanie licznika mod 2^N ;



**Clockwise
rotation**

**Counterclockwise
rotation**

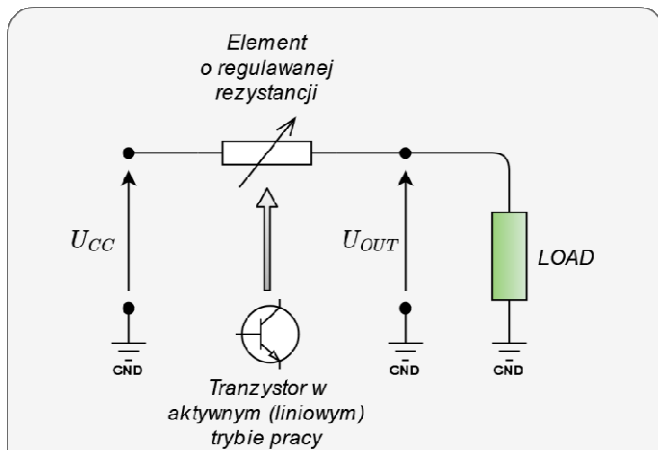
**Dynamic
Braking**

1. Modulacja PWM

Modulacja PWM (ang. *Pulse Width Modulation*) jest powszechnie wykorzystywaną metodą generowania sygnałów sterujących w układach impulsowych. Sygnał PWM ma stałą częstotliwość oraz amplitudę, zmiennym parametrem jest szerokość wypełnienia impulsu (ang. *Duty*).

Sterowanie Napięciem / Prądem / Mocą

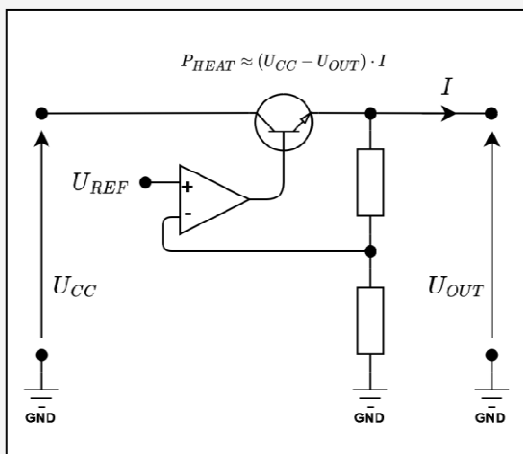
Układy liniowe



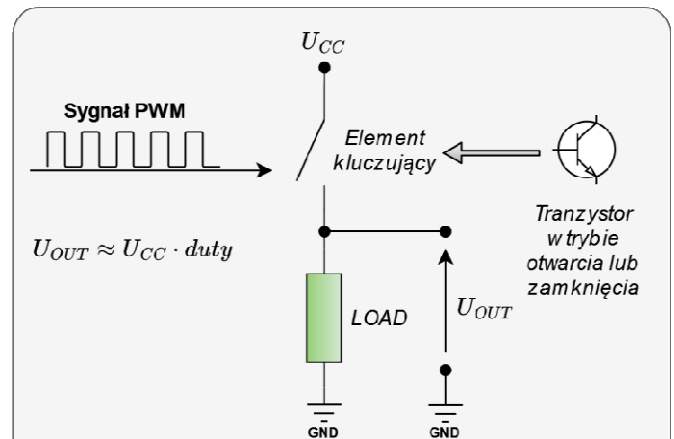
Zastosowanie:

- liniowe stabilizatory napięcia;
- liniowe zasilacze;
- wzmacniacze akustyczne (w klasie A/AB/B);
- stopnie mocy przetworników piezoelektrycznych.

Przykład: Liniowy stabilizator napięcia



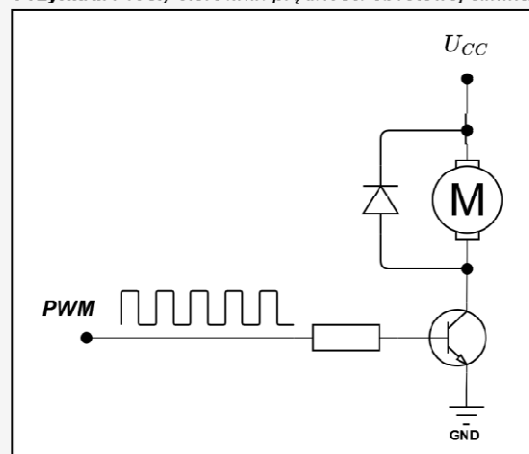
Układy impulsowe



Zastosowanie:

- impulsowe stabilizatory napięcia;
- przetwornice DC-DC;
- zasilacze impulsowe;
- wzmacniacze akustyczne (w klasie D);
- falowniki napędów AC/PMSM/BLDC;
- sterowniki i stopnie mocy silników DC oraz krokowych.

Przykład: Prosty sterownik prędkości obrotowej silnika DC



Zalety:

- ⊕ prosta budowa;
- ⊕ niski poziom generowanych zakłóceń EMC/EMI;
- ⊕ rozwiązanie tanie dla małych mocy.

Wady:

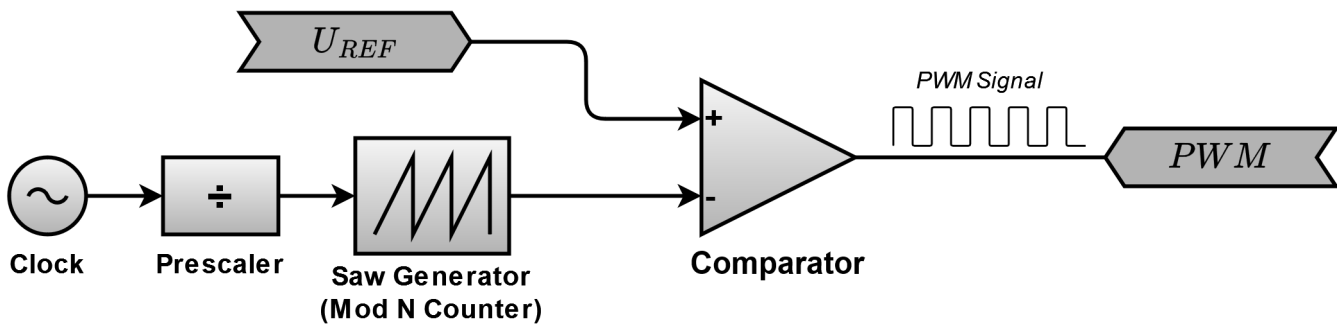
- ⊖ niska sprawność (~ 40 – 50%);
- ⊖ niski stosunek mocy do masy (oraz mocy do objętości) dla aplikacji dużych mocy;
- ⊖ drogie rozwiązanie dla aplikacji dużych mocy.

Zalety:

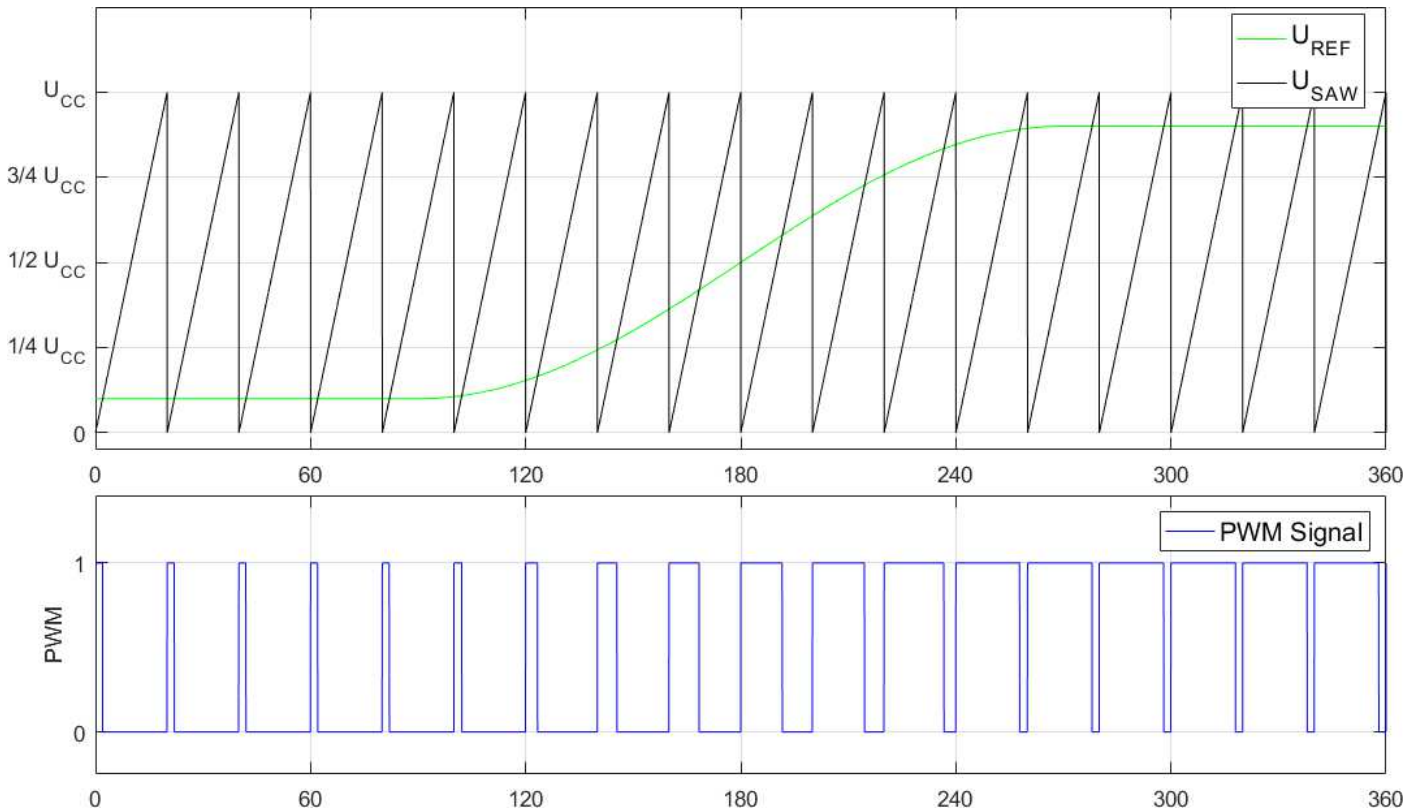
- ⊕ wysoka sprawność (~80 – 90%);
- ⊕ dobry stosunek mocy do masy (oraz mocy do objętości);
- ⊕ tani dla aplikacji dużych mocy.

Wady:

- ⊖ bardziej złożona konstrukcja;
- ⊖ wysoki poziom generowanych zakłóceń EMC/EMI.



Rys. 1: Schemat blokowy modulatora PWM



Rys. 2: Zasada generowania sygnału PWM

2. Silnik DC

Silnik prądu stałego wykorzystywane są w urządzeniach i układach mechatronicznych (najczęściej małych i średnich mocy) ze względu na łatwą regulację prędkości i momentu. Z powodu niewielkiego momentu obrotowego najczęściej współpracują z przekładniami (np. planetarnymi) pozwalającymi na zwiększenie momentu kosztem redukcji prędkości. Na szczególną uwagę zasługuje łatwość regulacji prędkości obrotowej (w przybliżeniu proporcjonalnej do napięcia) i momentu (proporcjonalnego do prądu) oraz łatwość zmiany kierunku obrotów poprzez zmianę polaryzacji napięcia. Dodatkowo silniki DC pozwalają na osiągnięcie bardzo dużych prędkości obrotowych (do kilkunastu tysięcy obr/min). Podstawową wadą silnika prądu stałego jest wykorzystanie w jego budowie mechanicznego komutatora. Powoduje on powstawanie łuku elektrycznego co uniemożliwia wykorzystania tego typu silników w środowiskach niebezpiecznych, a także wymusza konserwację i wymianę szczotek.

Zalety:

- ⊕ łatwe sterowanie (napięciem/prądem stałym);
- ⊕ liniowa zależność generowanego momentu obrotowego od prądu;
- ⊕ w przybliżeniu liniowa zależność prędkości od napięcia;
- ⊕ duże prędkości obrotowe (nawet ponad 20 000 obr/min);
- ⊕ tanie i proste w budowie sterowniki.

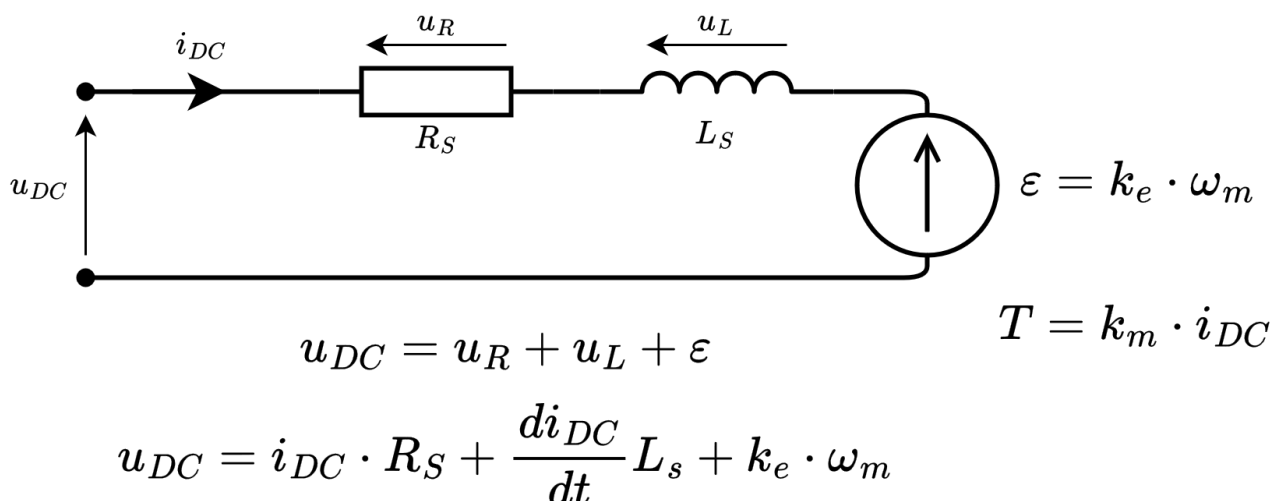
Wady:

- ⊖ konieczność stosowania przekładni w celu osiągnięcia dużego momentu;
- ⊖ konieczna konserwacja i wymiana szczotek;
- ⊖ w czasie przełączania sekcji uzwojeń powstaje łuk elektryczny zwiększający się w miarę zużycia szczotek;
- ⊖ niezalecane w środowiskach niebezpiecznych z uwagi na możliwość powstania otwartego łuku elektrycznego.

Aplikacje:

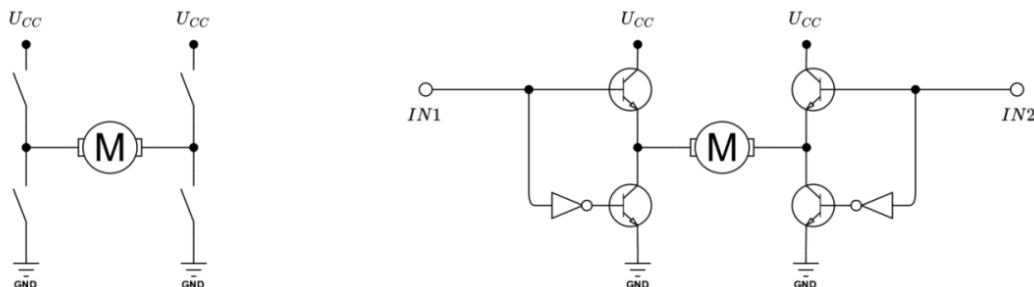
automatyka; motoryzacja; sprzęt AGD; szybkoobrotowe napędy do wrzecion; proste maszyny typu CNC (drukarki 3D, frezarki, plotery).

Uproszczony model matematyczny:

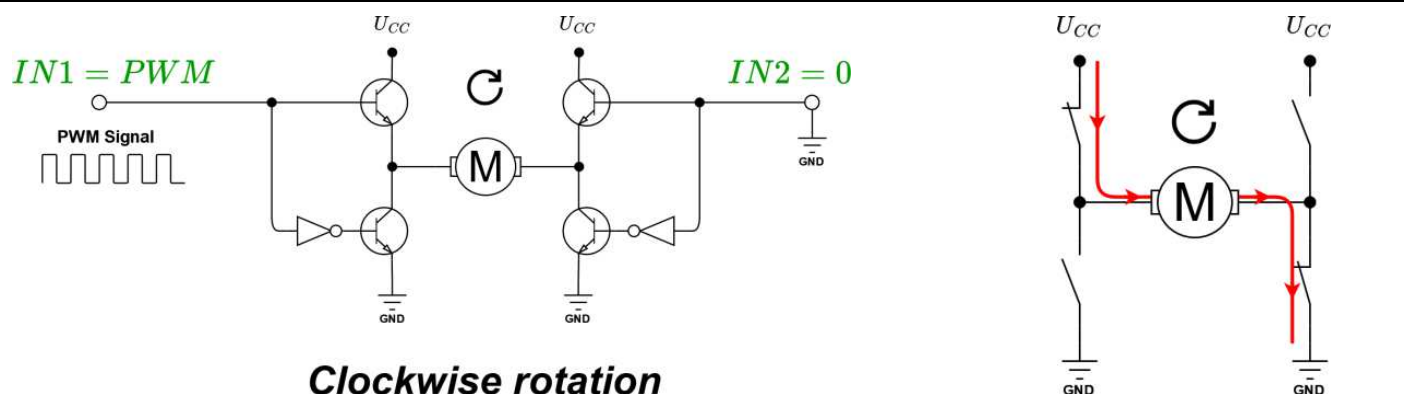


- | | |
|---|---|
| • u_{DC} – napięcie zasilające silnik | • ω_m – prędkość obrotowa wirnika |
| • i_{DC} – prąd fazowy silnika | • k_e – stała elektryczna |
| • R_S – rezystancja uzwojeń | • k_m – stała mechaniczna (stała momentowa) |
| • L_S – indukcyjność uzwojeń | • T – moment obrotowy |
| • ε – siła elektromotoryczna indukcji | |

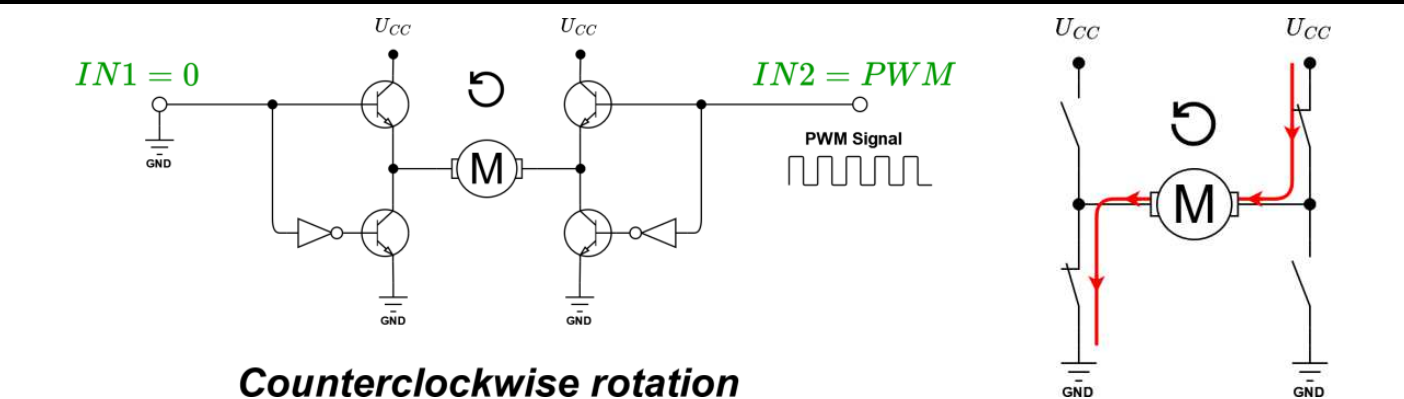
Sterowanie silnikiem DC - Mostek H



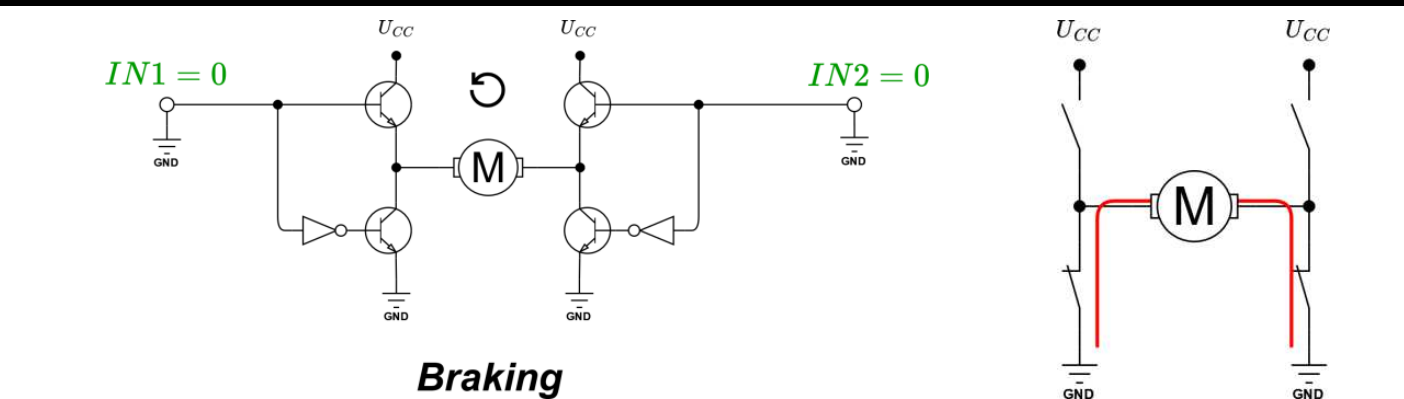
Rys. 3: Budowa mostka H: a) schemat ideowy; b) schemat elektryczny



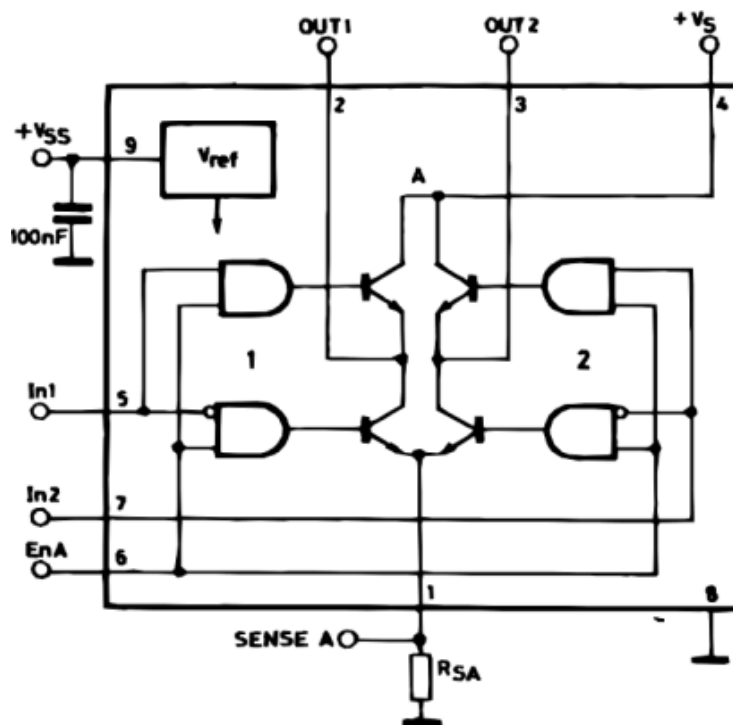
Clockwise rotation



Counterclockwise rotation



Braking



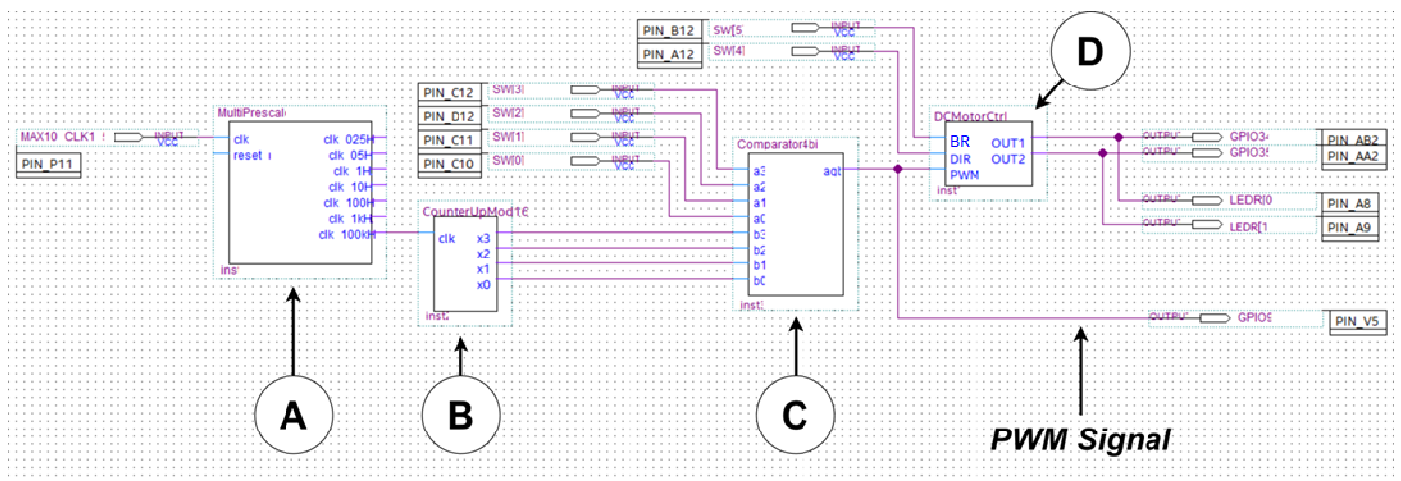
Rys. 4: Mostek H – układ L298N

Hamowanie silnikiem DC

- **Dynamiczne** – polega na podłączeniu do zacisków silnika zewnętrznej rezystancji (w szczególnym przypadku rezystancji zerowej, czyli zwarcie zacisków ze sobą), wartość zewnętrznej rezystancji ogranicza prąd fazowy silnika, czyli moment hamowania. Podczas hamowania dynamicznego silnik działa jako generator przekształcając energię kinetyczną w energię elektryczną. Następnie energia ta jest rozpraszana (zamieniana w ciepło) w rezystancji uzwojeń silnika i rezystancji zewnętrznej. Hamowanie dynamiczne jest mało efektywną metodą hamowania, zależną od prędkości obrotowej silnika.
- **Przeciwprądem** – polega na wymuszeniu przez układ sterowania, prądu fazowego, przeciwnego do kierunku rotacji. Dzięki temu powstaje moment hamujący (proporcjonalny do prądu) przeciwny do kierunku rotacji. Napięcie zasilania oraz siła elektromotoryczna działają w tym samym kierunku, dzięki temu efektywne napięcie na wirniku będzie ich sumą. W ten sposób prąd wirnika jest odwracany i wytwarzany jest wysoki moment hamowania. Hamowanie przeciwprądem jest bardzo skuteczne, jednak pociąga za sobą konieczność dostarczania dodatkowej energii ze źródła zasilania.
- **Prądnicowe (odzyskowe)** – jest to forma hamowania, w której energia kinetyczna silnika jest zwracana do układu zasilania. Ten typ hamowania jest możliwy, gdy napędzane obciążenie zmusza silnik do pracy z prędkością wyższą niż prędkość wynikająca z napięcia zasilającego silnik. Siła elektromotoryczna silnika jest większa niż napięcie zasilania, co odwraca kierunek prądu wirnika. Silnik działa jako generator elektryczny. Hamowanie regeneracyjne jest mało efektywną metodą hamowania, zależną od prędkości obrotowej silnika.

3. Zadanie

Zaprojektować oraz zaimplementować w układzie FPGA regulator prędkości silnika DC składający się z modułu MultiPrescalera, licznika modulo 16, 4-bitowego komparatora oraz modułu kombinacyjnego sterowania. Licznik mod 16 zbudować z przerzutników połączonych w trybie „dwójki liczącej”, jak na rys. 6. 4-bitowy komparator zaimplementować na podstawie tablicy Karnaugh, umieszczonej poniżej (Tab. 1). Moduł kontroli zaimplementować na podstawie tablicy prawdy (Tab. 2). Jako wartość referencyjną (zadaną) dla modulatora użyć 4-bitową liczbę odczytaną z przełączników SW[3..0], znajdujących się na płycie DE10-Lite.



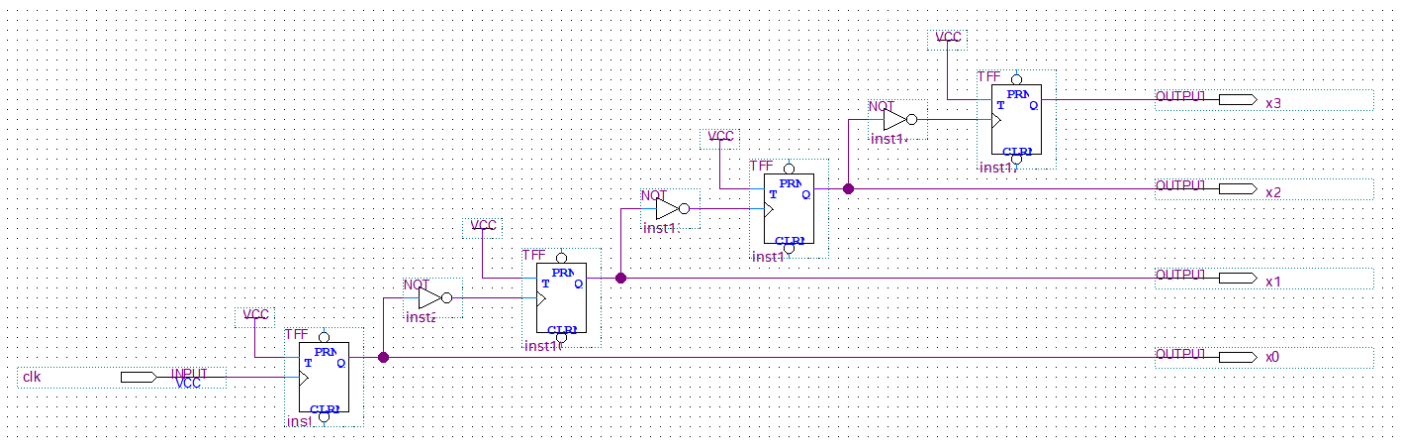
Rys. 5: Schemat Sterownika silnika DC w programie Quartus Prime.

(A) Multipreskaler

Moduł preskalera zaimplementowany na podstawie kodu VHDL.

(B) CounterUpMod16

Moduł licznika mod 16 zaimplementowany na podstawie schematu z rys. 6.



Rys. 6: Licznik liczący w górę mod 16

(C) Comparator4bits

Moduł komparatora dwóch liczb 4-bitowych, zaimplementowany na podstawie poniższej tablicy Karnaugh.

Czy liczba A > B ? (1 – tak, 0 – nie)

$$A_{DEC} = (a_3 a_2 a_1 a_0)_{BIN};$$

$$B_{DEC} = (b_3 b_2 b_1 b_0)_{BIN};$$

$b_3 b_2 b_1 b_0$ $a_3 a_2 a_1 a_0$	0000 (0 _{DEC})	0001 (1 _{DEC})	0011 (3 _{DEC})	0010 (2 _{DEC})	0110 (6 _{DEC})	0111 (7 _{DEC})	0101 (5 _{DEC})	0100 (4 _{DEC})	1100 (12 _{DEC})	1101 (13 _{DEC})	1111 (15 _{DEC})	1110 (14 _{DEC})	1010 (10 _{DEC})	1011 (11 _{DEC})	1001 (9 _{DEC})	1000 (8 _{DEC})
0000 (0 _{DEC})	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0001 (1 _{DEC})	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0011 (3 _{DEC})	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0010 (2 _{DEC})	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0110 (6 _{DEC})	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0111 (7 _{DEC})	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0101 (5 _{DEC})	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0100 (4 _{DEC})	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1100 (12 _{DEC})	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
1101 (13 _{DEC})	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1
1111 (15 _{DEC})	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
1110 (14 _{DEC})	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
1010 (10 _{DEC})	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
1011 (11 _{DEC})	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1
1001 (9 _{DEC})	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1
1000 (8 _{DEC})	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 1: Tablica Karnaugh komparatora 4-bitowego

(D) DCMotorCtrl

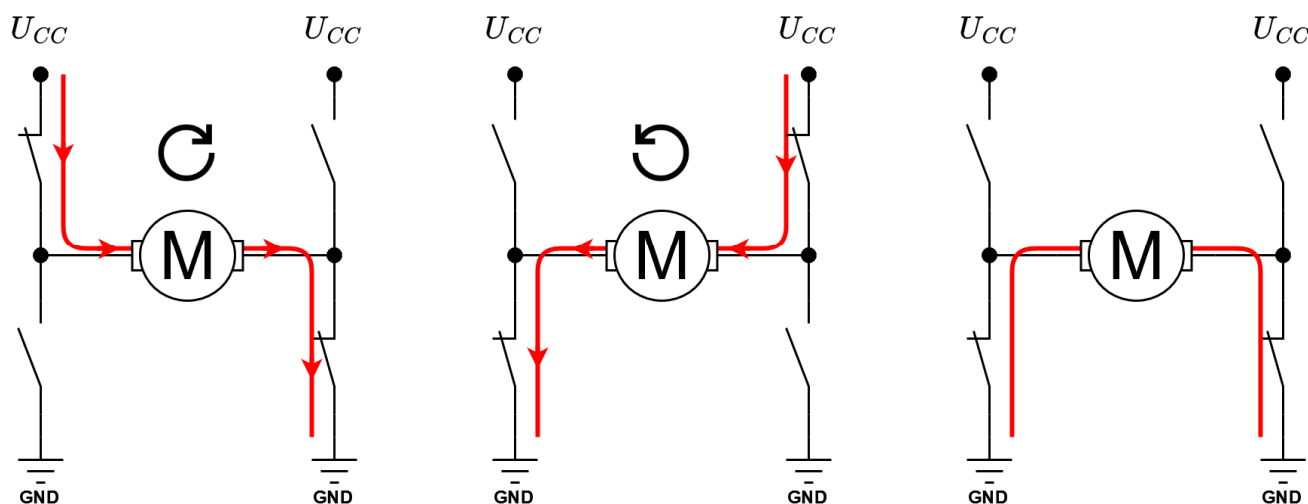
Moduł kontrolny silnika DC. Układ kombinacyjny o trzech wejściach:

- BR – hamowanie (1 - włączone, 0 – wyłączone);
- DIR – zmiana kierunku obrotów;
- PWM – sygnał PWM;

oraz dwóch wyjściach (OUT1 – sygnał do sterowania jednym półmostkiem, OUT2 – sygnał do sterowania drugim półmostkiem). Układ DCMotorCtrl należy zaimplementować na podstawie poniższej tablicy prawdy.

Wejścia układu kombinacyjnego			Wyjścia układu kombinacyjnego	
BR (Brake)	DIR (Direction)	PWM (PWM Signal)	OUT1 (Połączone z IN1 mostka H)	OUT2 (Połączone z IN2 mostka H)
0	0	0		
0	0	1		
0	1	0		
0	1	1		
1	0	0		
1	0	1		
1	1	0		
1	1	1		

Tab. 2: Tablica prawdy modułu DCMotorCtrl



Pytania

- 1) Co to jest PWM?
- 2) Jak wygenerować sygnał PWM?
- 3) Jakie są zalety i wady układów liniowych?
- 4) Jakie są zalety i wady układów impulsowych?
- 5) Jakie są zalety i wady silnika DC?
- 6) Jaka jest zależność napięcia od prędkości w silniku DC?
- 7) Jaka jest zależność prądu od momentu w silniku DC?
- 8) Co to jest stała elektryczna?
- 9) Co to jest stała mechaniczna?
- 10) Co to jest Back EMF?
- 11) Jak zmienić kierunek obrotów w silniku DC?
- 12) Jak nazywa się struktura sprzętowa (stopień mocy) pozwalająca na sterowanie silnikiem DC w obu kierunkach?
- 13) Jakie konsekwencje wywoła podłączenie obu zacisków silnika DC do stałego potencjału np. GND lub VCC (w szczególności zwarcie zacisków ze sobą)?
- 14) Na czym polega hamowanie dynamiczne w silniku DC?