



ANALOGOWE I MIESZANE STEROWNIKI PRZETWORNIC

Ćwiczenie 1

Silnik prądu stałego jako element wykonawczy Pomiar momentu obrotowego i prędkości obrotowej

Ramowy plan pracy

15'	30'	45'	1 ^h	1 ^h 15'	1 ^h 30'	po zajęciach

Opracowanie ćwiczenia i instrukcji:
Radosław Tomala, Bartosz Pękosławski, Michał Rajczak

Łódź 2019

wer. 1.0.0. 9.03.2019

Spis treści

B Wprowadzenie do ćwiczenia	5
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
C Doświadczenie.....	10
3. Pomiary	10
3.1. Układ pomiarowy [1]	10
3.2. Wykonanie pomiarów	17
D Wyniki.....	19
4. Opracowanie i analiza wyników	19
E Informacje.....	21
5. Literatura	21

Wprowadzenie do ćwiczenia

1. Cel i przebieg ćwiczenia

Celem tego ćwiczenia jest poznanie jednej z metod pomiaru momentu obrotowego i prędkości obrotowej silnika. Wykonane pomiary posłużą do wyznaczenia charakterystyk zewnętrznych silnika: mechanicznej, $n = f(M_{op})$ dla $U = const.$ oraz charakterystyki sterowania, $n = f(U)$ dla $M_{op} = const.$

2. Podstawy teoretyczne

2.1. Wprowadzenie

Silnik elektryczny zalicza się do najbardziej rozpowszechnionych elementów wykonawczych. Jest także najważniejszym obiektem układów automatycznej regulacji i stabilizacji. Dla celów automatycznej stabilizacji prędkości obrotowej mierzy się prędkość obrotową i wielkości pomocnicze: prąd twornika i moment obrotowy.

2.2. Matematyczny opis pracy silnika

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

Napęd z silnikiem elektrycznym można modelować za pomocą równoważnego układu elektromechanicznego.

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⁻¹)] 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 – siła elektromotoryczna w stanie ustalonym

ω – prędkość obrotowa w stanie dynamicznym

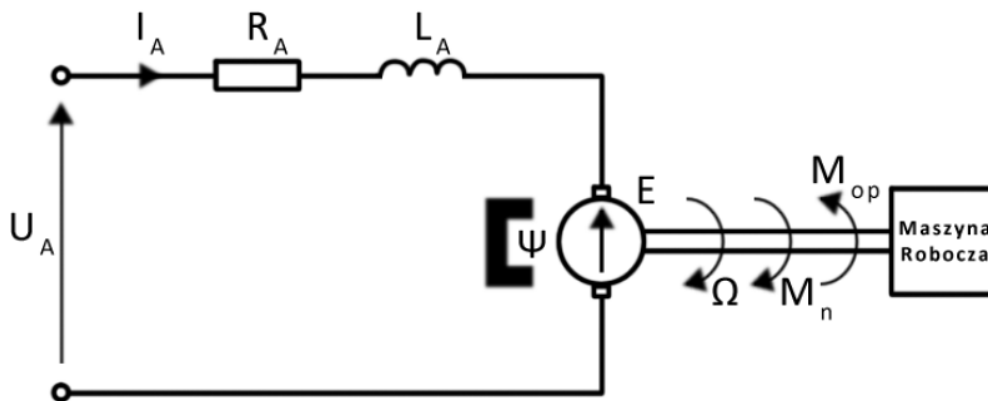
Ω lub n – prędkość obrotowa w stanie ustalonym

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:

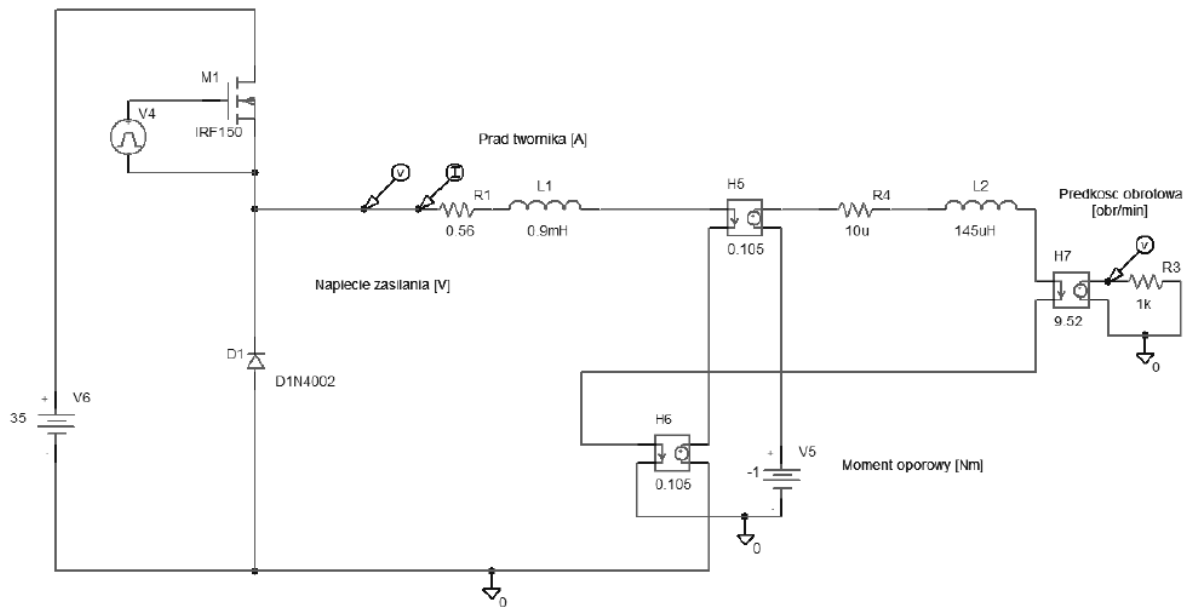
$$\begin{cases} u_A = i_A R_A + L_A \frac{di_A}{dt} + e \\ e = c_E \omega \\ m_n = c_M i_A \\ m_n - m_{op} = J \frac{d\omega}{dt} \end{cases}$$

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

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

Po przekształceniu części mechanicznej na dziedzinę elektryczną, także za pomocą układu elektrycznego, który może być symulowany np. w programie PSpice.

W prezentowanym na rys. 2 układzie napędowym prądu stałego może być zmieniana 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 można zastosować prosty przekształtnik DC-DC w postaci przerywacza okresowego z jednym tranzystorem. Do rozładowania energii twornika służy dioda zerowa (zwrotna).



Rys. 2. Równowazny układ elektryczny z przerywaczem tranzystorowym

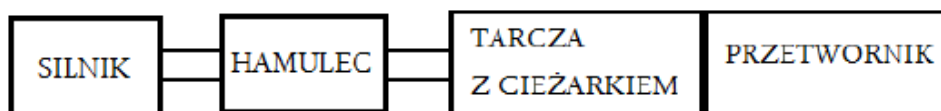
3. Pomiary

3.1. Układ pomiarowy [1]

Badany ciąg mechaniczny składa się z silnika, hamulca elektrodynamicznego oraz tarczy z ciężarkiem o znanej masie. Sama metoda opiera się na pomiarze kąta skręcenia tarczy. Na rys. 3 widać zdjęcie opisanego ciągu mechanicznego natomiast na rys. 4 znajduje się jego poglądowy schemat.



Rys. 3. Zdjęcie ciągu mechanicznego

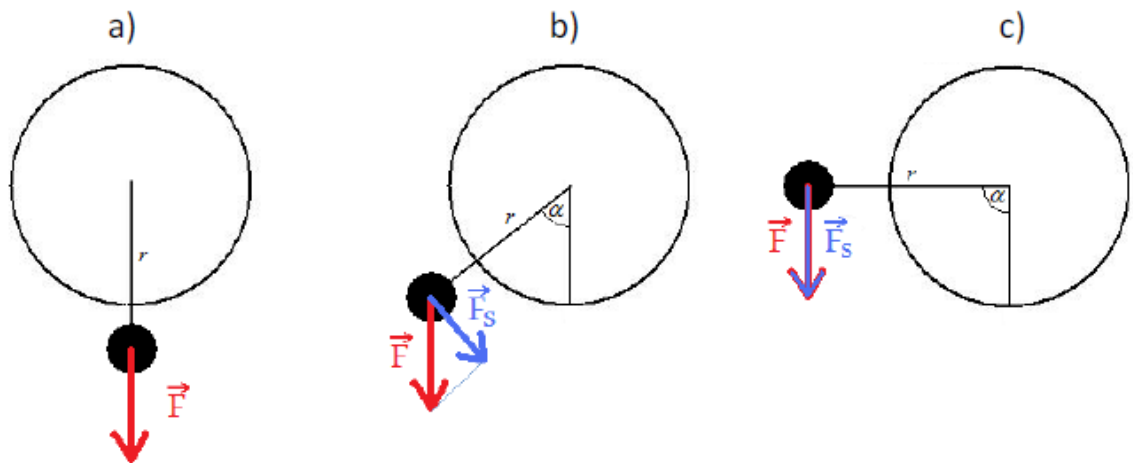


Rys. 4. Schemat ciągu mechanicznego

Moment obrotowy wytworzony przez silnik jest przenoszony przez hamulec elektromagnetyczny na wał z tarczą. Tarcza obracając się powoduje przemieszczenie ciężarka z najniższego położenia. Ciężarek staje się źródłem siły, która próbuje skrócić tarczę w stronę przeciwną do kierunku ruchu. Została ona pokazana na rys. 5 b) oraz c) i oznaczona jako F_s – siła skręcająca. Jest to składowa siły ciężkości F prostopadła do promienia tarczy, będącej wynikiem oddziaływania pola grawitacyjnego Ziemi. Wartość siły F_s nie jest stała i zależy od kąta skrócenia tarczy.

$$F_s = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

gdzie: m – masa ciężarka,
 g – stała grawitacyjna Ziemi,
 α – kąt skrócenia tarczy.



Rys. 5. Rozkład sił działających na ciężarek dla różnych kątów α : a) 0° , b) między 0° a 90° , c) 90°

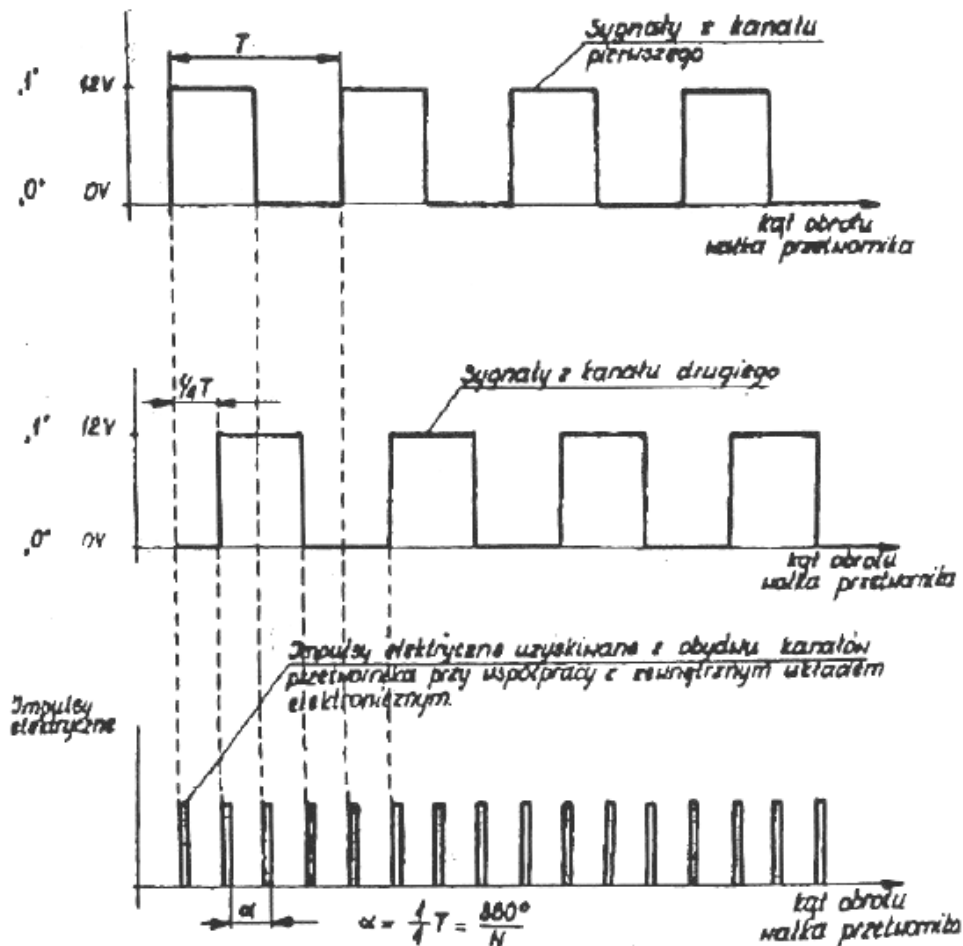
Na rys. 5 a) nie ma zaznaczonej siły F_s , ponieważ w tym wypadku kąt α wynosi 0° i zgodnie z powyższym wzorem jej wartość jest równa zero.

Siła skręcająca tarczę generuje moment obrotowy, który przeciwstawia się momentowi produkowanemu przez silnik. W momencie osiągnięcia stanu równowagi, tzn. kiedy tarcza z ciężarkiem zatrzyma się w miejscu, oba momenty są sobie równe, zgodnie z pierwszą zasadą dynamiki dla ruchu obrotowego. Dzięki temu, że znamy masę ciężarka, w łatwy sposób możemy obliczyć wartość momentu obrotowego:

$$M = r \cdot F_s = r \cdot m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

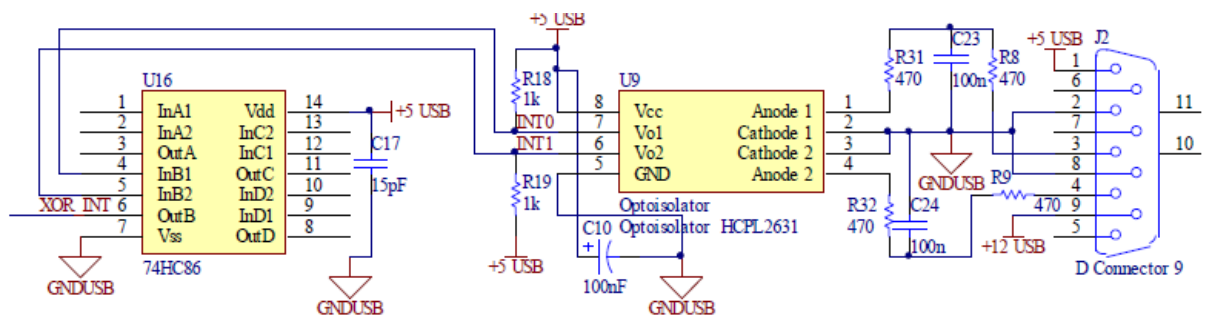
gdzie: r – odległość środka ciężkości ciężarka od osi obrotu.

W celu wyznaczenia kąta skrócenia tarczy, na końcu ciągu jest umieszczony przetwornik obrotowo-impulsowy. Przetwornik ten jest urządzeniem służącym do zamiany kąta obrotu wałka wejściowego przetwornika na sygnały elektryczne. W czasie obrotu wałka uzyskuje się na dwóch wyjściach przetwornika elektryczne sygnały prostokątne, przesunięte wzajemnie o $\frac{1}{4}$ okresu (rys. 6). Analizując te sygnały można uzyskać informację o kącie skrócenia wałka oraz kierunku jego obrotu.



Rys. 6. Sygnaly wyjściowe przetwornika obrotowo impulsowego[2]

Na rys. 7 został przedstawiony schemat wykorzystywanego modułu odpowiadającego za pomiar momentu obrotowego. Do połączenia przetwornika z płytką wykorzystano gniazdo z rodziny D-Sub, ponieważ przewód wychodzący z przetwornika jest zakończony taką samą wtyczką.



Rys. 7. Schemat modułu odpowiadającego za pomiar momentu obrotowego

Moduł odpowiedzialny za pomiar prędkości obrotowej został oparty o prostą metodę pomiaru wykorzystującą fotodiode. Metoda polega na zliczeniu impulsów generowanych przez fotodiode w określonym przedziale czasowym. Fotodiode jest oświetlona niewielką żarówką. Pomiędzy fotodiode i żarówką znajduje się przymocowana do wału silnika tarcza z dwudziestoma otworami.

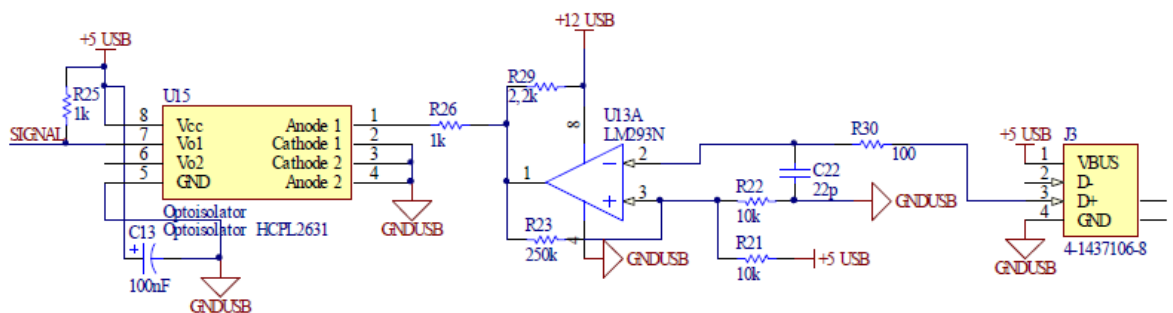
Podczas pracy silnika tarcza się obraca powodując, że fotodiode jest oświetlana dwudziestokrotnie w czasie jednego obrotu wału. Impulsy z fotodiody trafiają do układu kondycjonowania, znajdującego się w cylindrycznej obudowie, który zamienia je na falę prostokątną o amplitudzie 2,5 V i składowej stałej 2,5 V. Taki sygnał jest doprowadzony do płytki i przez filtr pasywny RC trafia do przerzutnika

Schmitta, a następnie przez transoptor do mikroprocesora. Tam jest przeliczany w celu otrzymania wartości prędkości obrotowej w obr/min.

Przerzutnik Schmitta jest stosowany w celu zwiększenia stromości zboczy sygnału. Zdjęcie zastosowanej fotodiody z układem kondycjonującym znajduje się na rys. 8, zaś na rys. 9 został przedstawiony schemat modułu do pomiaru prędkości obrotowej.



Rys. 8. Fotodiody z układem kondycjonującym



Rys. 9. Schemat modułu odpowiadającego za pomiar prędkości obrotowej

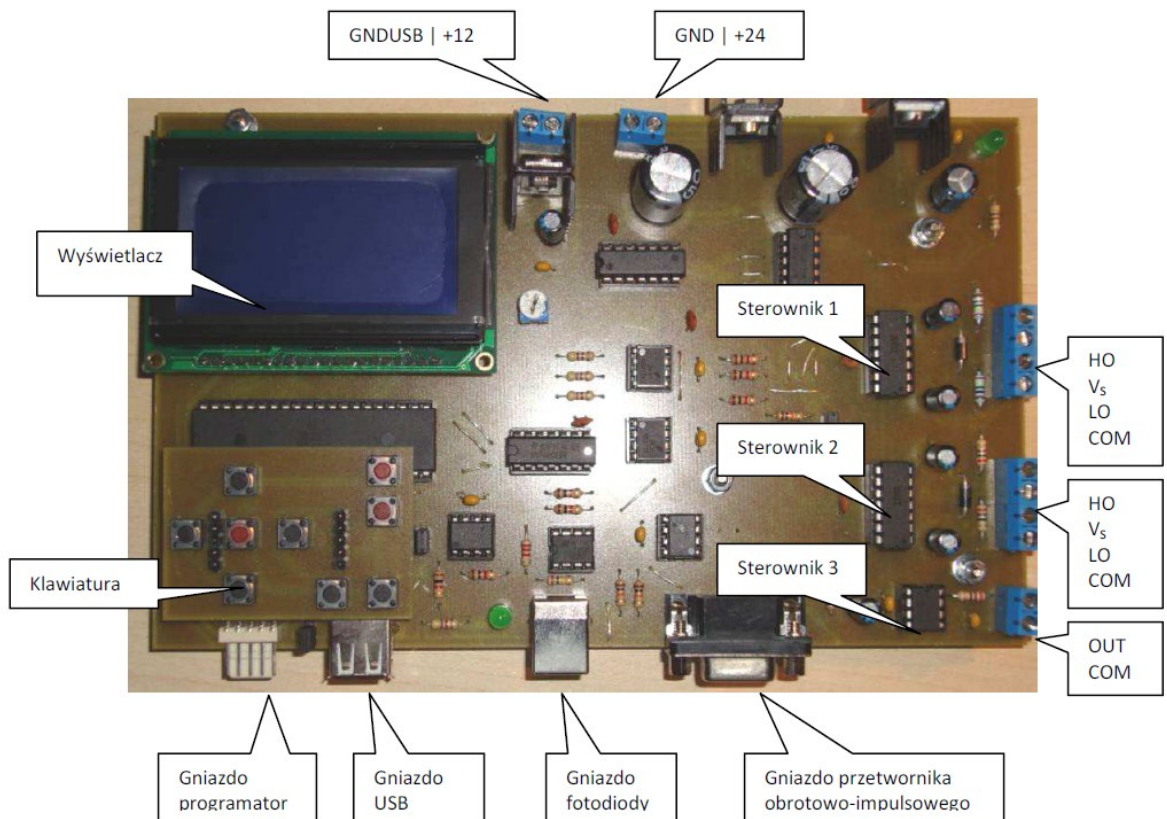
Układ do pracy wymaga dwóch zasilaczy:

- dwusegmentowego – do zasilania części cyfrowej (8 – 12 V) i hamulca elektrodynamicznego (do 60 V),
- jednosegmentowego – do zasilania silnika elektrycznego i sterownika: napięcie 24 V i prąd maksymalny 20 A.

Złącze do podłączenia napięcia zasilającego wraz z oznaczeniem biegunowości dla części cyfrowej i sterownika na płytce zostały pokazane na rys. 10:

- część cyfrowa: +12, GNDUSB,
- sterownik: +24, GND.

Część sterownika zasilamy tylko, gdy sterujemy silnikiem przy użyciu płytki.



Rys. 10. Zdjęcie układu z opisem najważniejszych elementów oraz gniazd

Hamulec elektrodynamiczny posiada dwa nieoznaczone zaciski do podłączenia zasilania. Należy je podłączyć do osobnego źródła zasilania.

Silnik podłącza się na dwa sposoby:

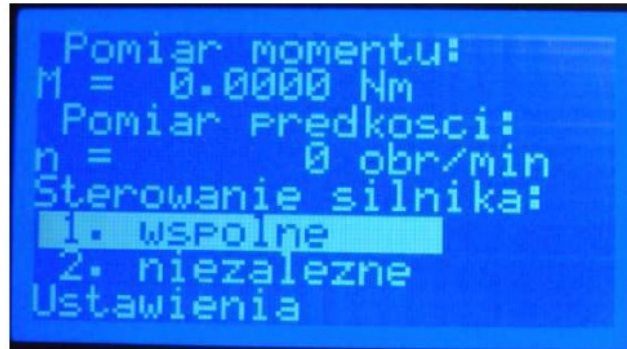
- w konfiguracji bocznikowej – zacisk wspólny silnika do zacisku „-” zasilacza, zacisk wirnika silnika do zacisku „+” zasilacza, zacisk stojana silnika zwiera się z zaciskiem wirnika,
- w konfiguracji obcowzbudnej – zacisk wspólny silnika do zacisku „-” zasilacza, zacisk stojana silnika do zacisku „+” zasilacza, zacisk wirnika do źródła tranzystora i katody diody zwrotnej (przewód oznaczony „wirnik”).

Obwód sterujący silnikiem (tranzystor i diodę zwrotną) podłącza się w ten sposób, że anodę diody (przewód oznaczony „-”) do zacisku „-” zasilacza, natomiast dren tranzystora (przewód oznaczony „+”) do zacisku „+” zasilacza. Oprócz tego bramka i źródło tranzystora muszą zostać podłączone do pierwszego sterownika IR2112: bramka do wyjścia HO, natomiast źródło do wejścia VS.

Możliwe są modyfikacje powyższej konfiguracji, jak zastosowanie półmostka lub pełnego mostka. W takim wypadku jedna gałąź jest podłączana do jednego sterownika bramkowego IR2112 zgodnie z notą katalogową producenta. W przypadku sterowania pojedynczym tranzystorem po stronie dolnej można wykorzystać układ TC4427.

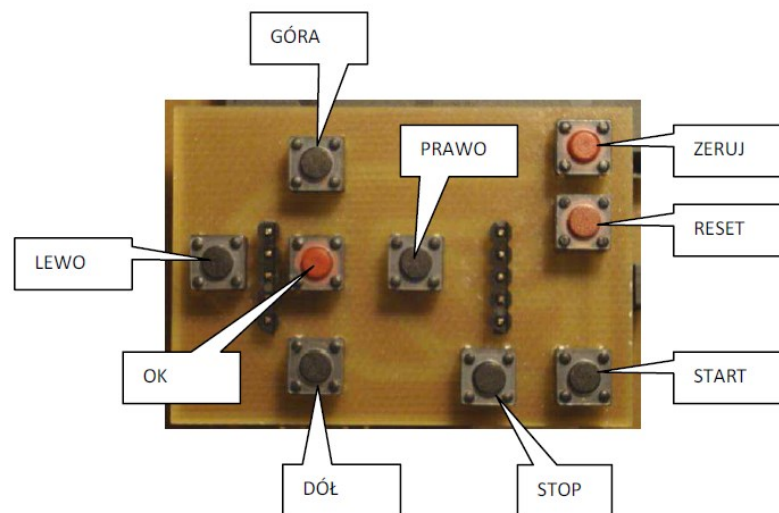
Oprócz zasilania należy podłączyć dwa przetworniki: obrotowo-impulsowy oraz fotodiodę. Służą do tego odpowiednie gniazda na płytce. Podłączenia dokonuje się przy użyciu przygotowanych wcześniej kabli.

Ekran wyświetlacza po włączeniu zasilania powinien wyglądać następująco:



Rys. 11 Ekran początkowy

Wszelkich zmian ustawień oraz sterowania użytkownik dokonuje przy pomocy klawiatury:



Rys. 12 Zdjęcie klawiatury z opisem przycisków

Po włączeniu zasilania dokonywany jest już pomiar momentu obrotowego i prędkości obrotowej. Przed rozpoczęciem jakichkolwiek pomiarów należy zawsze skalibrować przetwornik momentu obrotowego za pomocą przycisku „zeruj”. W przypadku silnika w konfiguracji bocznikowej należy tylko dopasować ustawienia ciężarka i ustawić napięcie na silniku pokrętkiem zasilacza, ponieważ w tej konfiguracji sterownik silnika znajdujący się na płycie nie jest wykorzystywany.

Domyślne ustawienia dla ciężarka to:

- masa: 0,63 kg,
- promień: 13,6 cm.

W celu zmiany ustawień należy zaznaczyć pole „USTAWIENIA” przy pomocy przycisków „góra”, „dół” i zatwierdzić wybór klawiszem „Ok”. Zmiany masy i promienia dokonuje się przyciskami odpowiednio „góra”, „dół” oraz „lewo”, „prawo”. Wybór potwierdza się przyciskiem „Ok”, następuje powrót do ekranu początkowego.

W przypadku silnika w konfiguracji obcowzbudnej należy wybrać rodzaj sterowania w taki sam sposób jak przechodzi się do menu ustawień. Do wyboru są dwie opcje:

- wspólne,
- niezależne.

Sterowanie wspólne jest przeznaczone do sterowania mostkiem i półmostkiem. Przyciskami „lewo”, „prawo” steruje się wypełnieniem obu przebiegów PWM, natomiast przyciskami „góra”, „dół” zmienia się wartość czasu martwego. Sterowanie niezależne jest przeznaczone raczej do pojedynczego tranzystora, ale może zostać użyte w innych konfiguracjach. W tym wypadku przyciskami „lewo”, „prawo” steruje się wypełnieniem jednego przebiegu PWM, natomiast

przyciskami „górn”, „dół” zmienia się wypełnienie drugiego przebiegu PWM. W obu przypadkach uruchomienie silnika następuje po wciśnięciu przycisku „start”, natomiast zatrzymanie po wciśnięciu przycisku „stop”. Po zatrzymaniu silnika przyciskiem stop można powrócić do ekranu początkowego przez wciśnięcie przycisku „Ok”.

Napięcie zasilające silnik należy ustawić na poziomie 24 V dopiero, gdy wybrane są już ustawienia ciężarka i chcemy przejść do sterowania silnikiem. W przeciwnym razie, jeśli silnik jest zatrzymany i jest podane napięcie na uzwojenie stojana, może się on przegrzać w wyniku przepływającego przez to uzwojenie prądu.

3.2. Wykonanie pomiarów

1. Połączyć układ pomiarowy w konfiguracji bocznikowej. Nie włączać zasilania. Poprosić prowadzącego o sprawdzenie połączeń.
2. Dla stałego napięcia zasilania silnika równego 12V zanotować prędkość obrotową i moment oporowy przy zmiennym napięciu zasilania hamulca elektrodynamicznego (kilkanaście wartości od 0 do 60V).
3. Powtórzyć punkt 2 dla napięć zasilania silnika 18V i 24V.
4. Utrzymując stały moment oporowy równy 0,2 Nm zanotować prędkość obrotową przy zmieniającym się napięciu zasilania silnika (kilka wartości od 9 do 24 V).
5. Powtórzyć punkt 4 dla momentów oporowych 0 Nm i 0,5 Nm.
6. Wyłączyć zasilanie silnika, hamulca i sterownika.
7. Odłączyć przewody zasilające hamulec elektrodynamiczny.
8. Połączyć układ pomiarowy w konfiguracji obcowzbudnej. Nie włączać zasilania. Poprosić prowadzącego o sprawdzenie połączeń.
9. W trybie sterowania „niezależnego” odczytać i zanotować prędkość obrotową dla współczynnika wypełnienia D równego 0,5, 0,25 i 0,75.
10. Wyłączyć zasilanie.
11. Rozłączyć układ pomiarowy.

4. Opracowanie i analiza wyników

1. Zebrać dane pomiarowe z pkt. 3.2.2 w tabelach
2. Wyznaczyć charakterystykę $n(M_{op})$
3. Zebrać dane pomiarowe z pkt. 3.2.4 w tabelach
4. Wyznaczyć charakterystykę $n(U_A)$
5. Skomentować otrzymane charakterystyki.
6. Na podstawie danych z pkt. 3.2.9 wyjaśnić ideę sterowania silnikiem DC za pomocą sygnałów PWM.

5. Literatura

- [1] Rajczak M., *Projekt i realizacja elektronicznego układu do pomiaru momentu obrotowego silnika*, Katedra Mikroelektroniki i Technik Informatycznych, Politechnika Łódzka, Łódź 2010
- [2] *Przetwornik obrotowo impulsowy serii CPP*, Polskie Zakłady Optyczne, Warszawa