

KATEDRA ENERGOELEKTRONIKI I MASZYN ELEKTRYCZNYCH

Jarosław Guziński

**BADANIE UKŁADU NAPĘDOWEGO Z SILNIKIEM  
PRĄDU STAŁEGO ZASILANYM Z NAWROTNEGO  
PRZEKSZTAŁTNIKA TYRYSTOROWEGO**

Instrukcja do ćwiczenia laboratoryjnego

Gdańsk 2003

Wersja 2 (26.XI.2003)

## 1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie z działaniem układu regulacji prędkości kątovej silnika obcowzbudnego prądu stałego zasilanego z tyrystorowego przekształtnika nawrotnego, zbadanie i zarejestrowanie przebiegów w układzie, przeprowadzenie procedury strojenia regulatorów na obiekcie rzeczywistym oraz przeprowadzenie analizy układu.

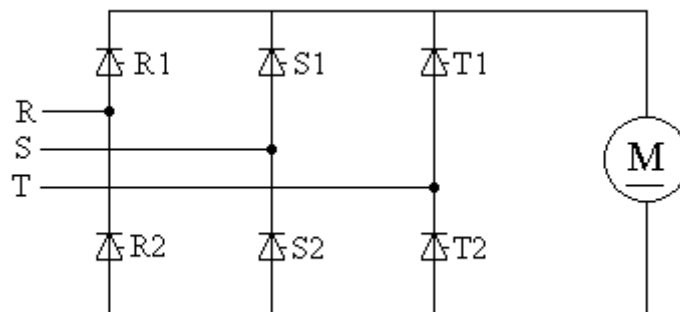
## 2. Wstęp

Najczęściej obecnie stosowaną metodą regulacji prędkości obrotowej silników prądu stałego jest zastosowanie przekształtników tyrystorowych o komutacji sieciowej. Przekształtniki tyrystorowe umożliwiają płynną regulację napięcia i prądu. Przekształtniki wykorzystywane są do zasilania obwodu twornika silnika oraz, w układach dwustrefowej regulacji prędkości, do zasilania obwodu wzbudzenia silnika. Napędy prądu stałego z przekształtnikami tyrystorowymi, przy zastosowaniu odpowiedniego układu regulacji, umożliwiają uzyskanie płynnej regulacji prędkości i innych wymaganych w układzie napędowym wielkości jak np. momentu obrotowego. Układ regulacji umożliwia odpowiednie kształtowanie charakterystyk mechanicznych silnika zapewniając, przy sprzężeniu prędkościowym uzyskanie sztywnych charakterystyk mechanicznych.

W układach napędowych prądu stałego stosuje się najczęściej strukturę szeregową (kaskadową) regulatora prędkości z podporządkowanym regulatorem prądu twornika.

## 3. Tyrystorowy przekształtnik nawrotny

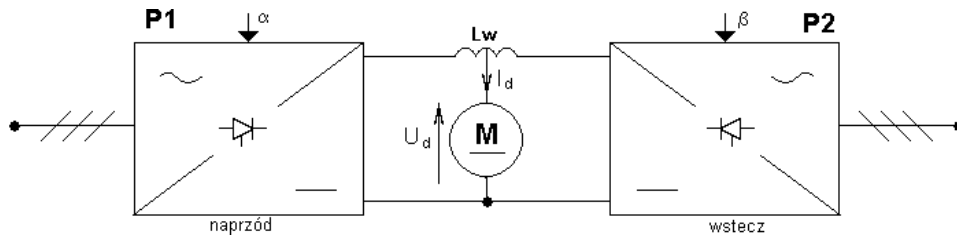
W napędach prądu stałego najchętniej, ze względu na cenę, stosowane są prostowniki tyrystorowe. Przy układach większej mocy stosuje się układy trójfazowe np. prostownik 6T - rys. 1.



Rys. 1. Prostownik 6T zasilający twornik silnika prądu stałego

Układ z rys. 1 jest układem dwukwadrantowym tj. zapewniającym pracę silnikową i prądnicową maszyny przy jednym kierunku wirowania. Zmiana kierunku obrotów silnika w takim układzie wiąże się z koniecznością przełączenia zacisków obwodu twornika lub wzbudzenia maszyny.

Płynna zmiana kierunku obrotów jest możliwa do uzyskania przy zastosowaniu prostownika rewersyjnego (nawrotnego, dwukierunkowego) stanowiącego połączenie dwóch prostowników 6T - rys. 2.



Rys. 2. Przekształtnik nawrotny z dławikiem wyrównawczym

Przekształtnik rewersyjny może pracować przy równoczesnym wysterowaniu tyrystorów obu prostowników 6T lub przy sterowaniu naprzemiennym. Przy równoczesnym sterowaniu obu mostków konieczne jest zapewnienie równości średnich napięć na wyjściach obu układów:

$$U_{d0} \cos \alpha_1 = U_{d0} \cos \beta_2 \quad (1)$$

gdzie:

$\alpha_1$  – kąt opróżnienia włączenia tyrystorów przekształtnika P1

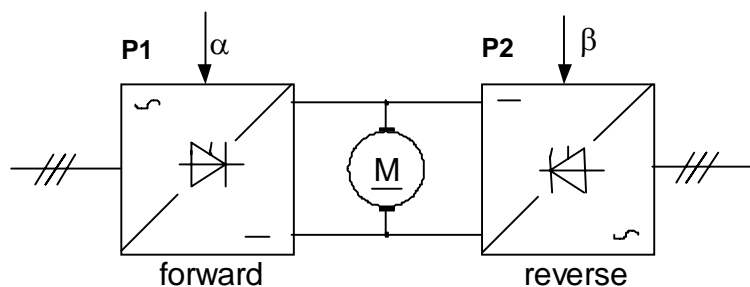
$\beta_2$  – kąt opóźnienia włączenia tyrystorów przekształtnika P2

Na podstawie (1) można stwierdzić, że kąty wyzwania obu prostowników muszą spełniać warunek:

$$\alpha_1 + \beta_1 = 180^\circ \quad (2)$$

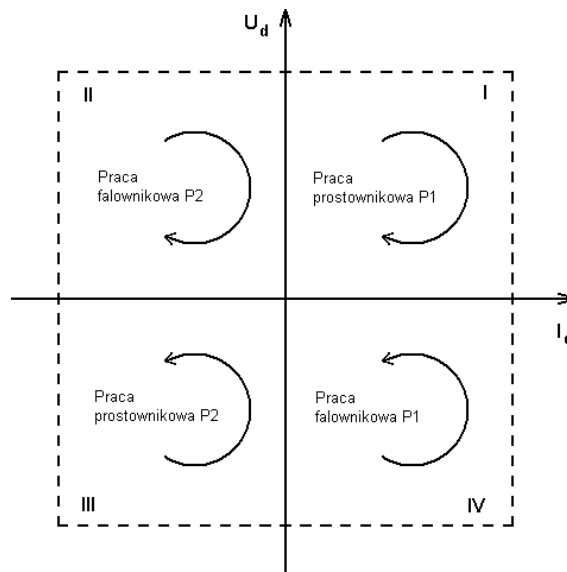
Oznacza to, że jeden z układów znajduje się w zakresie pracy prostownikowej a drugi w zakresie pracy falownikowej. Pomimo tych samych wartości średnich napięć pomiędzy obydwooma układami występuje różnica wartości chwilowych napięć. Różnica ta powoduje przepływ prądu wyrównawczego, którego wartość musi być ograniczona przez wprowadzenie dławika wyrównawczego. Układ z dławikiem wyrównawczym umożliwia płynną zmianę kierunku prądu płynącego przez obciążenie co zapewnia dużą dynamikę układu. Rozwiązanie to jest stosowane dla mniejszych mocy, w których jest możliwy do przyjęcia przepływ prądu wyrównawczego.

W układach większej mocy stosowane jest sterowanie naprzemienne obu prostowników. W danej chwili podawane są impulsy sterujące jedynie na tyrystory jednego mostka. Takie sterowanie eliminuje występowanie prądu wyrównawczego ale pogarsza dynamikę układu. W układzie pracującym bez prądu wyrównawczego przy zmianie kierunku prądu konieczne jest bowiem wprowadzenie krótkiej przerwy beznapięciowej rzędu paru ms zapewniającej zanik prądu obciążenia. Schemat układu przekształtnika nawrotnego bez dławika wyrównawczego przedstawiono na rys. 2.



Rys. 3. Przekształtnik nawrotny bez dławika wyrównawczego

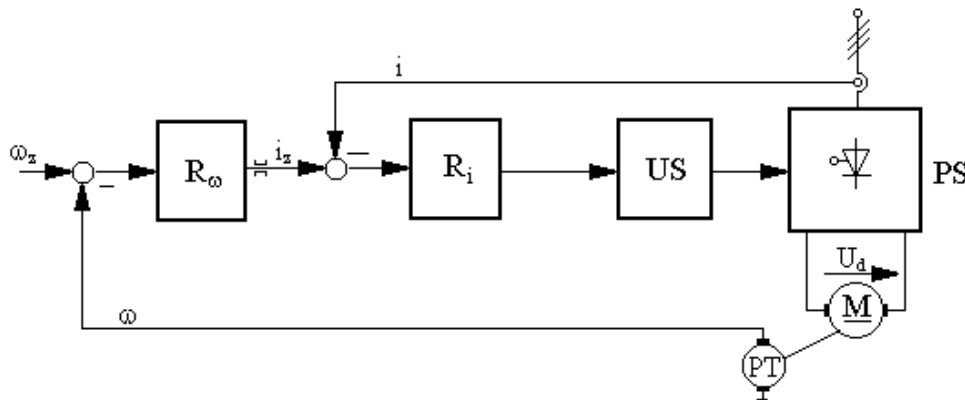
Obszary pracy dla przekształtnika nawrotnego przedstawiono w układzie współrzędnych ( $I_d$ ,  $U_d$ ) na rys. 4.



Rys. 4. Obszary pracy przekształtnika nawrotnego w układzie współrzędnych ( $I_d, U_d$ )

#### **4. Ogólna struktura układu regulacji**

W napędzie prądu stałego stosowana jest przy małych mocach struktura równoległa regulatorów a przy większych mocach struktura szeregową. Struktura szeregową składa się z połączonych kaskadowo regulatorów PI prędkości i prądu twornika - rys. 3.



Rys. 5. Układ regulacji o strukturze szeregowej

W obwodzie nadrzędnym regulator prędkości  $R_\omega$  na podstawie różnicy sygnałów prędkości zadanej  $\omega_z$  i prędkości mierzonej  $\omega$  określa zadaną wartość prądu twornika  $i_z$  dla podporządkowanego regulatora prądu. Regulator prądu za pośrednictwem układu sterowania tyrystorami US wymusza zmianę napięcia zasilającego silnik co powoduje zmianę wartości prądu twornika. Ograniczenie sygnału wyjściowego z regulatora prędkości, umożliwia w tym układzie sterowania, ograniczenie prądu silnika. Ograniczenie napięcia wyjściowego przekształtnika odbywa się przez odpowiednie ograniczenie sygnału wyjściowego regulatora prądu.

## **5. Regulator V**

W przekształtniku nawrotnym pracującym z blokadą prądu wyrównawczego konieczne jest zastosowanie logicznego układu regulatora V. Regulator V decyduje o przebiegu rozruchu, nawrotu lub hamowania, określając momenty zablokowania jednej sekcji i odblokowania drugiej sekcji przekształtnika. Wymagane jest spełnienie przez układ logiczny następujących warunków:

- impulsy wyzwalające tyrystory powinny wprowadzać w stan przewodzenia tylko ten przekształtnik, który dostarcza prądu obciążenia, przekształtnik chwilowo nieczynny powinien być zablokowany,
- przy zmianie znaku sygnału regulatora prędkości musi nastąpić przełączenie układu regulacji z jednej sekcji na drugą,
- zablokowanie impulsów wyzwalających tyrystory w sekcji, może nastąpić dopiero po zmniejszeniu prądu tej sekcji do wartości bliskiej zeru,
- odblokowanie wchodzącej do pracy sekcji, może nastąpić dopiero wtedy, gdy tyrystory sekcji przeciwnej znajdują się w stanie zaporowym,
- w celu osiągnięcia łagodnego przejścia prądu z jednego przekształtnika na drugi należy unikać nieregularnych skoków napięcia wyprostowanego przy zmianie kierunku prądu (średnie napięcia przekształtników powinny być równe).

Ten sposób sterowania pozwala unikać prądów wyrównawczych płynących poza obciążeniem, a w konsekwencji wyeliminować kosztowne dławiki prądu wyrównawczego, co jest szczególnie istotne w układach dużej mocy.

W praktyce wymagania przedstawione powyżej mogą być spełnione, gdy prąd płynący przez obciążenie jest prądem ciągłym. W warunkach, kiedy występuje prąd przerywany, konieczne jest zastosowanie wyszukanych układów sterowania, które mogłyby zapewnić prawidłową pracę systemu przy przejmowaniu obciążenia z jednego układu przekształtnika na drugi.

## **6. Praca układu nawrotnego przy prądzie przerywanym**

Jeżeli średnia wartość pulsacji składowej zmiennej prądu twornika jest mniejsza od składowej stałej wówczas mówimy o przewodzeniu ciągłym przekształtnika. W innym przypadku, jeżeli chwilowa ujemna wartość składowej zmiennej prądu jest wyższa od składowej stałej, przebieg prądu wyprostowanego staje się nieciągły, a przebieg napięcia wyprostowanego różni się od tego, jaki występuje przy przewodzeniu ciągłym. Zmiana kształtu napięcia wpływa na wartość średnią tego przebiegu, zatem zależność między kątem wysterowania tyrystorów i średnim napięciem wyprostowanym zostanie zachwiana, będzie inna niż dla przewodzenia ciągłego.

Dla pracy prostownikowej i falownikowej ciągłość napięcia wyprostowane zależy od charakteru obciążenia. Twornik maszyny prądu stałego, ze względu na indukowanie się w nim siły elektromotorycznej rotacji SEM, charakteryzuje się zdolnością magazynowania napięcia. Wynika z tego, że przy zmianie obciążenia układu ze stanu jałowego do obciążenia znamionowego, przy stałym kącie wysterowania tyrystorów, występuje duży spadek napięcia wyprostowanego. Wynika z tego fakt, że jeżeli chce się utrzymać stałe napięcie wyprostowane zarówno przy przewodzeniu ciągłym jak i przerywanym należy zmienić kąt wysterowania tyrystorów. W przypadku pracy falownikowej dla zapewnienia stałej wartości napięcia wyprostowanego przy pracy z prądem ciągłym i przerywanym konieczne jest również przesunięcie kąta wysterowania tyrystorów.

Wniosek wypływający z powyższych rozważań jest następujący: w przypadku przewodzenia ciągłego napięcie wyprostowane jest jedynie funkcją kąta wysterowania tyrystorów, zaś w przypadku przewodzenia przerywanego zależy do kąta wysterowania i od

obciążenia. Inaczej mówiąc przy przewodzeniu przerywanym i stałym kącie wysterowania tyrystorów zmiana prądu obciążenia powoduje znaczący spadek napięcia wyprostowanego.

Podstawowa trudność w sterowaniu, przy prądzie przerywanym polega na tym, że średnie napięcie wyprostowane przekształtnika nie jest tylko funkcją kąta wysterowania tyrystorów, lecz zależy również od stopnia nieciągłości przebiegu prądu obciążenia. Z tego względu pojawia się szereg niedogodności.

W przypadku przekształtnika nawrotnego, ze względu na nieciągłość prądu, istnieją trudności w osiągnięciu płynnego przejścia prądu obciążenia z prostownika P1 na P2 bądź odwrotnie. Przy przewodzeniu nieciągłym, ze względu na obciążenie, nie musi być spełniony warunek (2). Istota problemu tkwi w tym, aby układ sterowania wygenerował taki kąt wysterowania tyrystorów, przy którym średnia wartość napięcia przekształtnika rozpoczynającego pracę, była taka sama jak średnie napięcie przekształtnika kończącego pracę.

W rozwiązaniach praktycznych aby uniknąć przejściowego skoku napięcia w wyniku zbyt dużego wyprzedzenia wysterowania przekształtnika rozpoczynającego pracę, oraz przeciążenia prądowego, system sterowania jest tak realizowany, aby kąt wysterowania załączanego przekształtnika był początkowo bardzo duży ( $\cong 180^0$ ), a następnie zmniejszał się do wymaganej wartości roboczej w wyniku działania sprzężenia zwrotnego. Ten sposób sterowania może wpłynąć na pogorszenie dynamiki układu i pojawienie się strefy nieczułości w pewnym niewielkim odcinku czasu, w którym prąd obciążenia nie płynie w żadnym z dwóch możliwych kierunków.

## **7. Praca układu ze sprzężeniem napięciowym**

W układach napędowych prądu stałego z silnikiem obcowzbudnym, w których nie zastosowano pomiaru prędkości obrotowej wału, konieczne jest zastąpienie regulatora prędkości przez regulator napięcia twornika. Przy tym sposobie regulacji wykorzystuje się zależność wiążącą prędkość obrotową i napięcie twornika:

$$\omega_r = \frac{U_t - I_t R_t}{c \phi} \quad (3)$$

gdzie:

- $U_t$  - napięcie twornika,
- $I_t$  - prąd twornika,
- $\omega_r$  - prędkość obrotowa,
- $\phi$  - strumień wzbudzenia,
- $c$  - stała maszyny.

Zakładając, że strumień wzbudzenia jest stały i pomijając spadek napięcia na rezystancji twornika można stwierdzić, że prędkość kątowa jest proporcjonalna do napięcia twornika. Zatem zastąpienie regulatora prędkości przez regulator napięcia powinno umożliwić regulację prędkości i uzyskanie sztywnych charakterystyk mechanicznych. Jednak przy obciążeniu silnika znaczący staje się spadek napięcia na rezystancji twornika powodując pogorszenie sztywności charakterystyk napędu. W celu uzyskania sztywnych charakterystyk mechanicznych konieczne jest wprowadzenie w układzie sterowania dodatkowego członu kompensującego niekorzystny wpływ spadku napięcia na rezystancji twornika na charakterystykę mechaniczną układu.

## 8. Dobór nastaw regulatorów

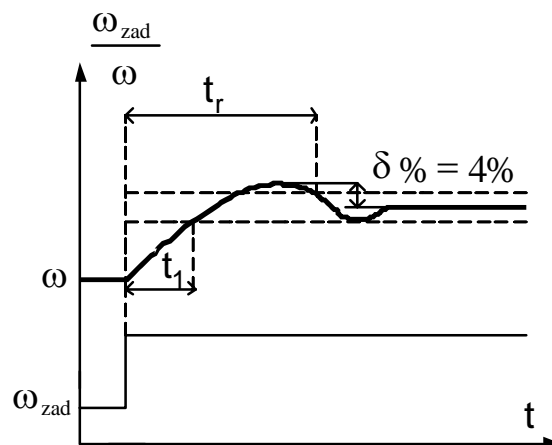
W złożonych układach sterowania istnieje konieczność wyznaczenia nastaw regulatorów drogą analityczną. Współczesna teoria sterowania dysponuje całą gamą metod syntezy układów sterowania. W technice napędów przekształtnikowych stosowane są powszechnie dwa kryteria nastaw regulatorów:

- kryterium optimum modułu,
- kryterium optimum symetrii.

Na podstawie tych dwóch kryteriów można w sposób szybki dokonać syntezy regulatorów w oparciu o znajomość podstawowych parametrów maszyny obcowzbudnej prądu stałego. W praktyce dobór regulatorów może być przeprowadzany na podstawie prób i obserwacji otrzymanych przebiegów. Dąży się aby układ napędowy, poprzez dobór nastaw regulatorów, pracował zgodnie z założeniami.

W układzie napędowym badanym w ćwiczeniu regulatory wielkości sterujących tworzą strukturę szeregową. W układzie tym na wstępie należy dokonać optymalizacji obwodu wewnętrznego, a więc obwodu regulacji prądu wirnika, a później optymalizacji obwodu zewnętrznego, czyli obwodu regulacji prędkości.

W układzie rzeczywistym nastawy regulatorów dobrane w sposób analityczny, na skutek niedokładności wyznaczonych parametrów układu, muszą być dostrojone na obiekcie. Dostrojenie w układzie rzeczywistym przeprowadza się najczęściej przez rejestrację przebiegów zmiennych regulowanych i porównanie ich z zadanymi przebiegami - rys. 6.



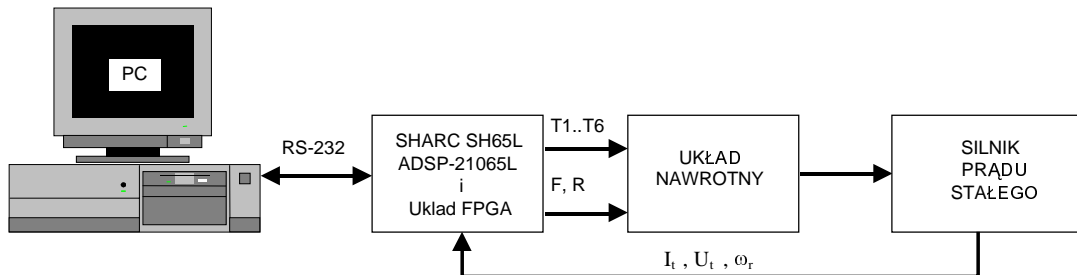
Rys. 6. Przebieg odpowiedzi czasowej układu sterowania na skokowe zmiany wielkości sterującej  $\omega_{zad}$

Nastawy zmienia się tak aby uzyskać jak najszybsze działanie układu przy równoczesnym ograniczeniu lub wyeliminowaniu występujących przeregulowań i uzyskaniu stabilnej pracy układu.

## 9. Laboratoryjny układ napędowy

Stanowisko laboratoryjne składa się z silnika obcowzbudnego zasilanego z tyrystorowego układu nawrotnego pracującego bez prądu wyrównawczego.

Sterowanie układu napędowego składa się ze sterownika mikroprocesorowego i komputera PC - rys. 7.

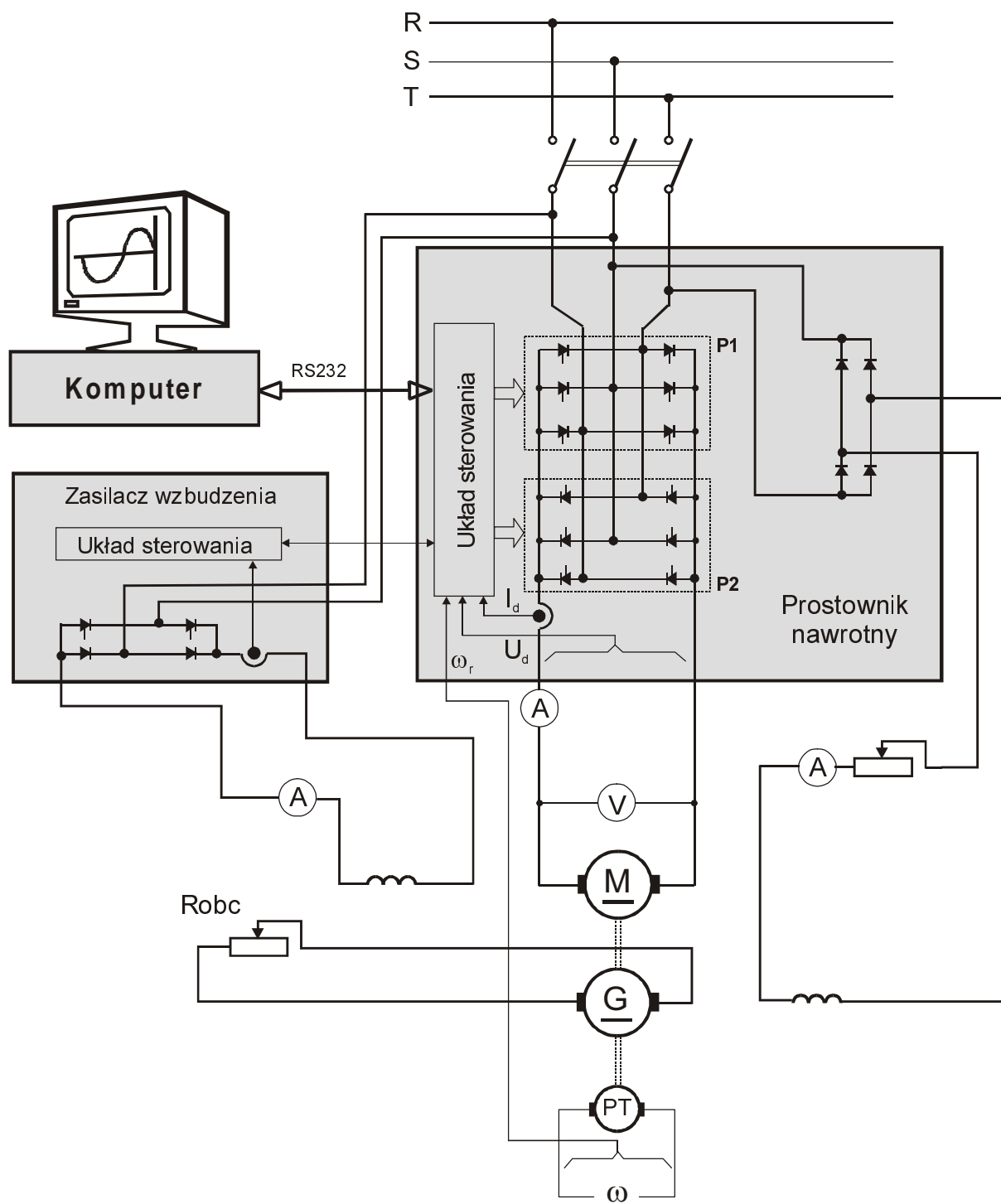


Rys. 7. Sterowanie układu laboratoryjnego

Sterownik mikroprocesorowy składa się z procesora sygnałowego ADSP21065L, układu logiki programowalnej FPGA, dwóch czterokanałowych przetworników analogowo - cyfrowych oraz układów wejść i wyjść cyfrowych. Komputer PC, za pomocą interfejsu RS232, umożliwia ładowanie programu sterowania do pamięci sterownika mikroprocesorowego oraz obsługę układu napędowego przy pomocy programu pulpitu operatora - zadawanie i odczyt parametrów oraz wizualizację przebiegów.

Schemat połączeń układu podany został na rys. 8. Obciążeniem silnika jest prądnica obcowzbudna prądu stałego G. Moment hamujący prądnicy jest proporcjonalny do prędkości kątowej  $\omega$  prądnicy G. Uzwojenie wzbudzenia silnika M jest zasilane z regulatora wzbudzenia stabilizującego wartość prądu wzbudzenia. Prąd wzbudzenia prądnicy nie jest stabilizowany. Podstawowe wielkości w układzie mierzone są za pomocą mierników wskazówkowych. Przebieg prądu silnika można obserwować na oscyloskopie. Dane znamionowe silnika zostały zamieszczone w załączniku.





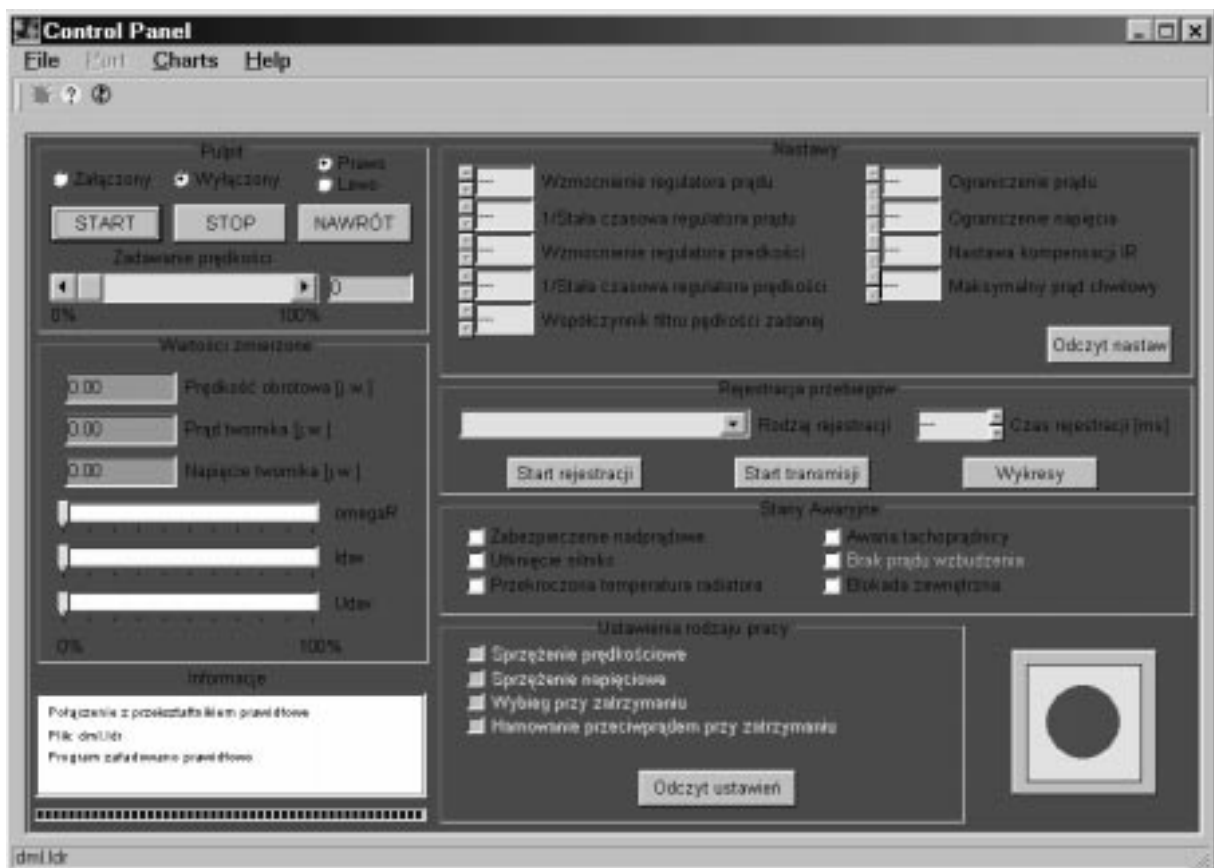
Rys. 8. Układ połączeń do badania napędu

## 10. Oprogramowanie układu sterowania

Do sterowania silnikiem prądu stałego zasilanym z przekształtnika tyrystorowego w ćwiczeniu wykorzystywany jest program panelu operatora "ControlPanel.exe". Uruchomienie układu powoduje pojawienie się informacji o konieczności wcześniejszego załączenia układu:

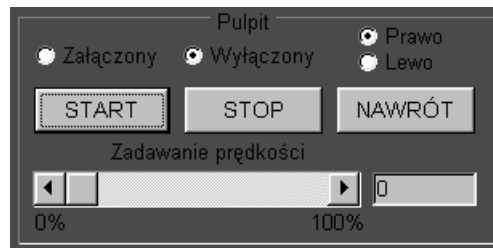


Następnie, po naciśnięciu przycisku OK następuje rozpoczęcie komunikacji pomiędzy komputerem PC i układem napędowym i ładowanie programu sterowania do pamięci mikroprocesora sterującego. Po prawidłowym załadowaniu programu pojawia się formularz główny programu pulpitu operatora:



Panel operatora podzielony został na 6 elementów: pulpit, wartości zmierzone, nastawy, rejestracja przebiegów, stany awaryjne oraz stawienia rodzaju pracy.

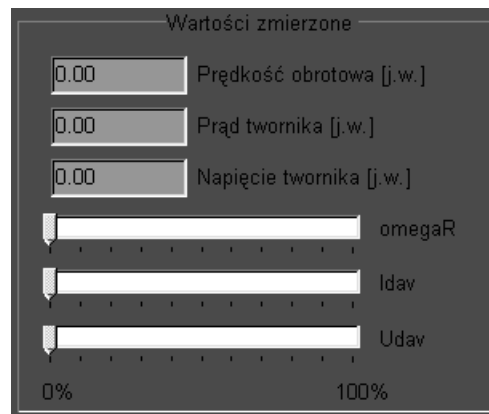
## Pulpit



Pulpit stanowi główną część sterowania napędem. Składa się z następujących elementów:

- Znaczników **Załączony** i **Wyłączony** informujących o stanie pracy układu.
- Znaczników **Prawo** i **Lewo** informujących o tym, który z przekształtników układu jest aktualnie załączony.
- Przycisku **START**. Naciśnięcie przycisku powoduje załączenie przekształtnika.
- Przycisku **STOP**. Naciśnięcie przycisku powoduje wyłączenie przekształtnika.
- Przycisku **NAWRÓT**. Naciśnięcie przycisku powoduje zmianę kierunku wirowania silnika.
- Zadajnika suwakowego **Zadawanie prędkości**. Zmiana ustawienia zadajnika powoduje zmianę zadanej prędkości kątowej silnika z zakresie od 1 do 100% prędkości znamionowej.
- Pola tekstowego, na którym wyświetlana jest wartość względna zadanej prędkości kątowej.

## Wartości zmierzone



Element **Wartości zmierzone** służy do wizualizacji na bieżąco podstawowych wielkości zmiennych mierzonych w układzie napędowym. Wielkości te wyświetlane są w okienkach tekstowych i przedstawiane w postaci graficznej jako wskazania mierników. Przedstawiane są trzy wielkości:

- prędkość obrotowa,
- wartość średnia prądu twornika (uśrednianie co 3.3 [ms]),
- wartość średnia napięcia twornika (uśrednianie co 3.3 [ms]).

Mierzone wielkości przedstawiane są w jednostkach względnych odniesionych odpowiednio do:

- prędkości znamionowej silnika,
- prądu znamionowego silnika,

- maksymalnego napięcia średniego na wyjściu mostkowego prostownika sześciopulsowego zasilanego z sieci 3×380 [V] ( $U_{d0}=513$  [V]).

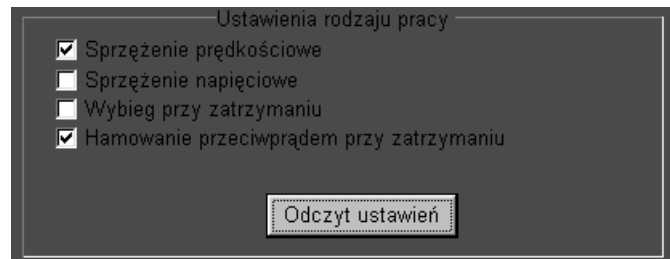
## Nastawy



Element Nastawy umożliwia odczytanie i modyfikację nastaw elementów wchodzących w skład układu regulacji przekształtnika. Są to kolejno:

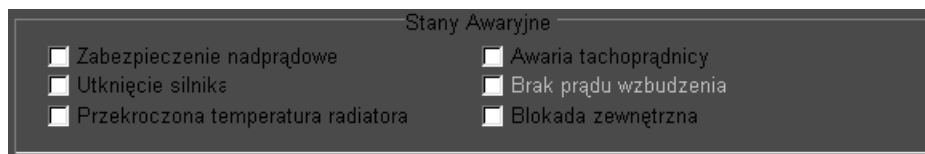
- **Wzmocnienie regulatora prądu.** Nastawa części proporcjonalnej regulatora PI prądu twornika. Zmiana tej nastawy została zablokowana.
- **1/Stała czasowa regulatora prądu.** Odwrotność stałej czasowej regulatora PI prądu twornika. Zmiana tej nastawy została zablokowana.
- **Wzmocnienie regulatora prędkości.** Nastawa części proporcjonalnej regulatora PI prędkości kątowej.
- **1/Stała czasowa regulatora prędkości.** Odwrotność stałej czasowej regulatora PI prędkości kątowej.
- **Współczynnik filtru prędkości zadanej.** Współczynnik określający szybkość zmian sygnału zadanego prędkości kątowej. (wartość 1 odpowiada natychmiastowej zmianie sygnału zadanego, 0.0001 odpowiada wolnej zmianie sygnału zadanego).
- **Ograniczenie prądu.** Wartość ograniczenia sygnału wyjściowego regulatora prędkości. Jest to maksymalna wartość prądu średniego twornika dopuszczalna w układzie napędowym.
- **Ograniczenie napięcia.** Wartość ograniczenia sygnału wyjściowego regulatora prądu. Jest to maksymalna wartość napięcia średniego twornika dopuszczalna w układzie napędowym. Zmiana tej nastawy została zablokowana.
- **Nastawa kompensacji IR.** Wartość współczynnika służącego do kompensacji spadku napięcia na rezystancji twornika. Nastawa IR ma wpływ na działanie napędu tylko przy pracy ze sprzężeniem napięciowym.
- **Maksymalny prąd chwilowy.** Wartość maksymalna prądu chwilowego. Przekroczenie tej wartości powoduje zadziałanie zabezpieczenia nadprądowego przekształtnika i wyłączenie układu. Zmiana tej nastawy została zablokowana.
- **Przycisk Odczyt nastaw.** Naciśnięcie przycisku powoduje odczyt aktualnych nastaw z układu przekształtnikowego. Wymagane jest tylko raz po załączeniu układu.

## Ustawienia rodzaju pracy



Ustawienia rodzaju pracy stanowią informację oraz umożliwiają zmianę aktualnych ustawień rodzaju pracy. Wybór rodzaju pracy polega na wybraniu rodzaju sprzężenia regulatora nadrzędnego: Sprężenie prędkościowe lub Sprężenie napięciowe oraz sposobu zatrzymania silnika: Wybieg przy zatrzymaniu lub Hamowanie przeciwbieżem przy zatrzymaniu. Po uruchomieniu układu konieczne jest wcześniejsze odczytanie ustawień przez naciśnięcie przycisku Odczyt ustawień. Zmiana rodzaju pracy możliwa jest jedynie przy przekształtniku w stanie wyłączenia.

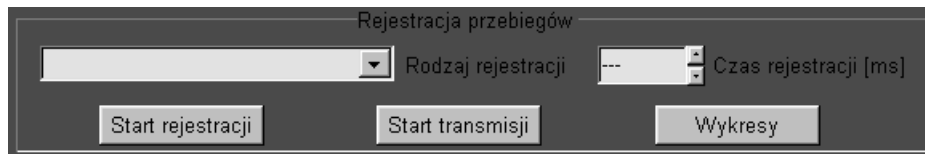
## Stany awaryjne



Układ napędowy sygnalizuje wybrane stany awaryjne:

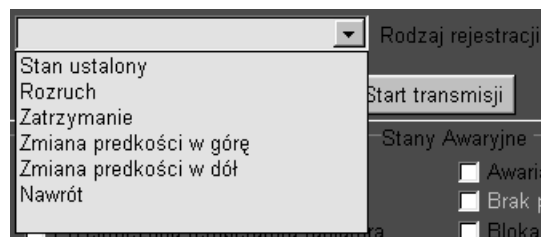
- Zabezpieczenie nadprądowe, występuje gdy przekszoczona zostanie maksymalna wartość prądu chwilowego przekształtnika.
- Utknięcie silnika, występuje po ok. 10 [s] gdy zostanie zablokowany wał silnika przy zadanej prędkości obrotowej większej od 5% prędkości znamionowej.
- Przekroczono temperatura radiatora, występuje w wyniku przegrzania przekształtnika.
- Awaria tachoprądnicy. Występuje gdy nastąpi uszkodzenie tachoprądnicy lub przerwanie przewodów łączących przekształtnik z tachoprądnicą.
- Brak prądu wzbudzenia. Występuje przy braku prądu wzbudzenia z pomocniczego wewnętrznego prostownika niesterowanego układu przekształtnikowego (nieaktywne w stanowisku laboratoryjnym, gdyż obwód wzbudzenia silnika zasilany jest z układu zewnętrznego).
- Blokada zewnętrzna. Wykorzystywana do blokowania przekształtnika przez układy zewnętrzne (w stanowisku laboratoryjnym zabezpieczenie zewnętrzne wykorzystywane jest do kontroli poprawnej pracy zasilacza obwodu wzbudzenia silnika).

## Rejestracja przebiegów



Przy wykorzystaniu programu panelu operatora możliwa jest rejestracja przebiegów wybranych zmiennych mierzonych i występujących w układzie sterowania. Rejestracja przeprowadzana jest dla stanu ustalonego i wybranych stanów przejściowych.

Wybór rodzaju rejestracji umożliwia wybranie następujących stanów:



Rozruch wymaga aby układ był wyłączony i przeprowadzany jest do prędkości ustawionej na zadajniku suwakowy. Zatrzymanie przeprowadzane jest od aktualnej prędkości do zera. Zmiana prędkości w górę i w dół przeprowadzana jest odpowiednio do 80% i 20 % prędkości znamionowej. Przy nawrocie zmieniany jest kierunek obrotów silnika przy niezmienionej względnej wartości sygnału zadanego prędkości.

Przeprowadzenie rejestracji wymaga ustawienia odpowiedniego czasu rejestracji podawanego w [ms]. Wartość ta powinna zostać dobrana do czasu ustalania się odpowiednich przebiegów przejściowych w układzie.

Podczas rejestracji zapisywanych jest sześć zmiennych:

1.  $\omega_{Rzad}$  - zadana prędkość kątowa wirnika,
2.  $\omega_{RF}$  - mierzona prędkość kątowa wirnika,
3.  $I_{dzad}$  - zadana wartość prądu twornika,
4.  $I_{dav}$  - mierzona wartość średnia prądu twornika,
5.  $U_d$  - mierzona wartość chwilowa napięcia wyjściowego przekształtnika (dla czasów rejestracji mniejszych od 250 [ms]) lub  $U_{dzad}$  - wartość zadana napięcia wyjściowego (dla czasów rejestracji większych od 250 [ms]),
6.  $I_d$  - mierzona wartość chwilowa prądu wyjściowego przekształtnika (dla czasów rejestracji mniejszych od 250 [ms]) lub  $U_{dav}$  - mierzona wartość średnia napięcia wyjściowego (dla czasów rejestracji większych od 250 [ms]).

Rozpoczęcie rejestracji, po wybraniu rodzaju i czasu rejestracji, wymaga naciśnięcia przycisku **Start rejestracji**. Po zakończeniu rejestracji uaktywnia się przycisk **Start transmisji**, którego naciśnięcie powoduje rozpoczęcie transmisji zarejestrowanych danych z pamięci procesora sterującego napędem do pamięci komputera PC i zapis na dysku w katalogu bieżącym, w którym znajduje się program "*ControlPanel.exe*". Po zakończeniu tej procedury obejrzenie zarejestrowanych przebiegów możliwe jest po naciśnięciu przycisku **Wykres**. Przycisk **Wykres** uruchamia program "*Wykres.exe*", odczytujący zarejestrowane przebiegi z pliku "*dane.dat*" i przedstawiający je w postaci przebiegów czasowych.

Ponieważ przy każdorazowej transmisji danych przebiegi zapisywane są w pliku o tej samej nazwie "*dane.dat*" dlatego, w celu pozostawienia poprzednio zarejestrowanych przebiegów, należy po zakończeniu transmisji zmienić nazwę pliku "*dane.dat*". Rozszerzenie ".dat" powinno zostać niezmienione.

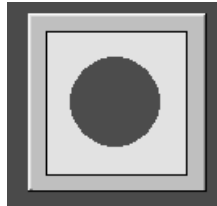
Po obejrzeniu przebiegów przy użyciu programu "Wykres.exe" program ten musi zostać zakończony. Ponowne jego uruchomienie można przeprowadzić naciskając kolejny raz przycisk Wykres.

### Informacje

W okienku Informacje wyświetlane są informacje określające poprawność połączenia z przekształtnikiem i poprawność załadowania programu do procesora sterującego.

### Pozostałe elementy

Oknie panelu operatora występuje dodatkowy przycisk STOP:



Ikony i polecenia menu programu umożliwiają zakończenie pracy programu i zapoznanie z informacjami o programie. Zakończenie działania programu dowolnym z poleceń powoduje równocześnie wyłączenie przekształtnika.

## **11. Program ćwiczenia**

1. Zapoznać się ze stanowiskiem laboratoryjnym.
2. Zapoznać się z obsługą i działaniem układu. Załączyć układ. Zmienić prędkość kątową, przeprowadzić nawrót.
3. Wyznaczyć charakterystyki mechaniczne układu przy sprzężeniu prędkościowym dla 4 różnych prędkości zadanych: 100%, 80%, 60%, i 40%. W sprawozdaniu dodatkowo określić sztywność charakterystyk.
4. Wyznaczyć charakterystykę mechaniczną układu przy sprzężeniu prędkościowym dla 80% prędkości zadanej i 50% prądu ograniczenia.
5. Sprawdzić zakres regulacji prędkości obrotowej
6. Wyznaczyć ustalony uchyb prędkości przy zmianie obciążenia.
7. Wyznaczyć charakterystykę mechaniczną przy sprzężeniu napięciowym. Charakterystykę wyznaczyć dla 80% prędkości zadanej dla różnych nastaw IR. Dobrać wartość IR tak aby uzyskać charakterystykę mechaniczną sztywną.
8. Przeprowadzić rejestrację przebiegów w stanie ustalonym dla 3 różnych wartości prędkości kątowej zadanej. Ustawić minimalny czas rejestracji.
9. Przeprowadzić rejestrację przebiegów przy rozruchu silnika dla 6 różnych prądów ograniczenia. Określić czas rozruchu dla każdego z przypadków. W sprawozdaniu wykreślić dodatkowo charakterystykę czasu rozruchu w funkcji prądu ograniczenia.
10. Zarejestrować przebiegi przy zatrzymaniu silnika wybiegiem i hamowaniu przeciwpędem.
11. Zarejestrować przebiegi przy wzroście prędkości obrotowej.
12. Zarejestrować przebiegi przy zmniejszeniu prędkości obrotowej.
13. Zarejestrować przebiegi przy szybkiej zmianie momentu obciążenia.
14. Zarejestrować przebiegi przy nawrocie silnika przy 50% i 100% prędkości znamionowej. Określić czas przerwy bezprądowej w układzie.

15. Przeprowadzić rejestrację 6 przebiegów przy rozruchu silnika dla różnych nastaw regulatora prędkości kątowej. Przy każdej rejestracji zmieniać tylko jeden ze współczynników (wzmocnienie lub odwrotność stałej czasowej).
16. Przeprowadzić rejestrację przebiegów przy rozruchu silnika i nawrocie silnika dla układu z włączonym filtrem sygnału zadanego prędkości. Wartość współczynnika filtra dobrać tak aby wystąpił wyraźny wpływ filtra na działanie napędu.

### **11. Zagadnienia**

1. Charakterystyka mechaniczna obcowzbudnego silnika prądu stałego i możliwości jej formowania.
2. Narysować przebiegi prądu twornika, momentu i prędkości obrotowej w czasie rozruchu regulowanego układu napędowego bez obciążenia.
3. Narysować przebiegi prądu twornika, momentu i prędkości obrotowej po skokowym wzroście obciążenia od zera do obciążenia znamionowego.
4. Jak ograniczyć wartość prądu w układzie napędowym prądu stałego?
5. Omówić działanie nawrotnego układu napędowego pracującego bez prądów wyrównawczych przy zmianie kierunku obrotów silnika.
6. Jak dobrać regulator prądu w napędzie prądu stałego?
7. Jak dobrać regulator prędkości w napędzie prądu stałego?

### **12. Literatura**

1. Tunia H., Kaźmierkowski M. Automatyka napędu przekształtnikowego. PWN 1987.
2. Grunwald Z. (red): Napęd Elektryczny. Warszawa: WNT 1987.
3. Golusiński L., Rulaff B., Chrzan P.: Laboratorium automatyzacji napędu. Wyd. PG, Gdańsk 1985.

### **13. Załącznik**

Dane silnika obcowzbudnego prądu stałego typu PZMb 64h:

$$\begin{aligned}P_n &= 5,5 \text{ [kW]} \\I_n &= 28,8 \text{ [A]} \\U_n &= 220 \text{ [V]} \\n_n &= 1450 \text{ [obr/min]} \\I_{wn} &= 0,714 \text{ [A]} \\R_t &= 1,6 \text{ [\Omega]} \\L_t &= 6,7 \text{ [mH]} \\R_w &= 252 \text{ [\Omega]} \\L_w &= 11,4 \text{ [H]}\end{aligned}$$

Dane prądnicy obcowzbudnej prądu stałego typu PCMb 54b:

$$\begin{aligned}P_n &= 6,5 \text{ [kW]} \\I_n &= 28,2 \text{ [A]} \\U_n &= 230 \text{ [V]} \\n_n &= 1450 \text{ [obr/min]} \\I_{wn} &= 0,85 \text{ [A]} \\R_t &= 2,5 \text{ [\Omega]} \\L_t &= 10,4 \text{ [mH]} \\R_w &= 179 \text{ [\Omega]} \\L_w &= 4,1 \text{ [H]}\end{aligned}$$

$$J = 0,16 \text{ [kg m}^2\text{]} \quad (\text{całego zespołu napędowego})$$