

ZAKŁAD ELEKTRONIKI PRZEMYSŁOWEJ

INSTYTUT STEROWANIA I ELEKTRONIKI PRZEMYSŁOWEJ
WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

LABORATORIUM TEORII PRZEKSZTAŁTNIKÓW

I_PI. UKŁADY PRZEKSZTAŁTNIKÓW IMPULSOWYCH

dr inż. Mieczysław Nowak, prof. dr hab. Roman Barlik

1. WPROWADZENIE - INFORMACJE OGÓLNE
2. PODSTAWOWE INFORMACJE O SYMULATORZE TCAD
3. PRZEKSZTAŁTNIKI IMPULSOWE - EKSPERYMENTY SYMULACYJNE
4. PODSTAWOWE INFORMACJE O STANOWISKU LABORATORYJNYM
5. BADANIA PRZEKSZTAŁTNIKÓW RZECZYWISTYCH

1.WPROWADZENIE - INFORMACJE OGOLNE

Laboratorium jest prowadzone z zastosowaniem stanowisk laboratoryjnych pozwalających na podstawowe eksperymenty rzeczywiste w obwodach o stosunkowo niewielkiej mocy (poniżej 500 W) oraz przy pomocy pakietu symulacyjnego TCAD¹, przeznaczonego do badania układów przekształtnikowych i a także całych urządzeń i systemów energoelektronicznych z uwzględnieniem układów sterowania i regulacji.

Metodyka pracy w laboratorium zakłada wstępne zapoznanie się z podstawowymi właściwościami układów przy pomocy symulatora na PC. W kolejnym kroku powinno zostać przeprowadzone badanie układów na stanowiskach laboratoryjnych a następnie po zweryfikowaniu zgodności modeli symulacyjnych z obwodami rzeczywistymi, poszerzenie wiadomości na podstawie dodatkowych symulacji komputerowych uzupełnionych o pomiary wartości średnich, skutecznych, analizy spektralnej itp.

Badania symulacyjne są prowadzone na podstawie przygotowanych modeli i nie jest konieczna dogłębna znajomość symulatora a jedynie informacje podane w rozdziale drugim. Łatwość w posługiwaniu się symulatorem pozwala na samodzielne modyfikowanie modeli i tworzenie nowych w ramach rozszerzonego programu ćwiczenia, jednak wyłącznie po uzgodnieniu z prowadzącym. Pełna instrukcja symulatora TCAD jest dostępna w laboratorium.

Specyfika układów badanych eksperymentalnie w drugiej części laboratorium wynikająca ze stosowania przyrządów sterowanych w rodzaju IGBT narzuca znacznie większą ostrożność w badaniach na rzeczywistych stanowiskach laboratoryjnych . Wobec braku w pełni efektywnych zabezpieczeń przed przeciążeniami konieczne jest niezwykle staranne i przemyślane przeprowadzanie eksperymentów i dokładne sprawdzanie parametrów obwodu (RLC) a także nastaw obwodu sterowania (częstotliwość łączy, współczynnik załączenia D)

UWAGA Studenci nie są uprawnieni do jakichkolwiek działań na komputerach laboratoryjnych poza strefą symulatora. Próby ingerencji bez uzgodnienia z prowadzącym w inne katalogi, pliki ustawień itp. będą prowadziły do wykluczeń z ćwiczeń laboratoryjnych.

Stanowiska do badania obwodów rzeczywistych są bezpieczne jednak przy pracy na nich jest konieczna normalna ostrożność a także dbałość o sprzęt pomiarowy (np. niekręcenie w sposób bezmyślny pokrętkami nastawników oscyloskopów itp.)

**W SYTUACJACH AWARYJNYCH NALEŻY NACISNAĆ
CZERWONY PRZYCISK NA TABLICY ZASILAJĄCEJ**

¹ Opracowany przez prof. R. Szczęsnego i mgr K. Iwana z Politechniki Gdańskiej

. 2. PODSTAWOWE INFORMACJE O SYMULATORZE TCAD

Po uruchomieniu z ikony WINDOWS SYMULATORA pojawia się podstawowy pulpit roboczy. Umożliwia on wywoływanie w formie 'kliknięcia' przycisku – ikonki, następujących operacji:
PRZYCISK 1 i 2- wczytanie i zapisanie pliku tekstowego opisującego formalnie topologię i parametry modelu (pliki typu *.txt) W kursie podstawowym nie przewiduje się pracy z tymi plikami.
PRZYCISKI 3-6 - Pomoc w edycji (wycięcie, kopiowanie, wklejenie, poszukiwanie tekstu)
PRZYCISK 7 - symulacja w DOS-ie (nie przewidywana).
PRZYCISK 8 - Uruchomienie graficznego edytora modelu
PRZYCISK 9 – symulacja w środowisku WIN
PRZYCISK 10 – wywołanie postprocesora przebiegów (wyników).

W programie laboratorium należy wywołać EDYTOR GRAFICZNY (PRZYCISK 8)

W menu przycisków - ikon przewiduje się tu

PRZYCISK 1 i 2 - wczytanie i zapisanie pliku opisującego graficznie model (pliki typu *.sch z katalogu c:\TCAD62\schem).
PRZYCISKI 3 i 4 - powiększenie i zmniejszenie pola pulpitu graficznego
PRZYCISKI 5-7 - Pomoc w edycji graficznej (wycięcie, kopiowanie, wklejenie)
PRZYCISKI 8 i 9 - grupowanie elementów - pomoc w edycji
PRZYCISK 10 - uruchomienie symulacji w środowisku WIN
PRZYCISK 11 - uruchomienie graficznego postprocesora wyników

Zgodnie z programem ćwiczeń laboratoryjnych należy wczytać model przewidziany do badań (np. obw_rlc.sch) (PRZYCISK 1 w menu edytora).

Teraz można przeprowadzić rozeznanie modelu i identyfikację parametrów elementów obwodu głównego, sterowania oraz rejestratorów (rejestratory z monitorem służą do podglądu w czasie symulacji, rejestratory z dyskiem zapisują wielkości do pliku *.wnk).

Poznanie lub zmiana parametrów wymaga zaznaczenia poprzez podwójne kliknięcie na pulpicie w pobliżu elementu i 'naciśnięcie' PRZYCISKU „E” - listwa edycji po prawej stronie.

Po dopasowaniu parametrów do programu badań (wpisując potrzebne dane do wywoływanych przyciskiem E tabelki - np. indukcyjności, rezystancji, kąta wysterowania) można przystąpić do uruchomienia **SYMULACJI**.

UWAGA! – przedtem celowe jest posłużenie się operacjami z menu obliczenia przez wywołanie „**Sprawdzenia schematu**” oraz określenie „**Parametrów symulacji**” (czas, krok, krok rejestracji).
Możliwe jest również w obrębie tego menu utworzenie pliku typu tekstowego (np. obw_osc.txt), który będzie stosowany przy symulacjach w trybie podstawowej planszy

Po wywołaniu **SYMULACJI** (PRZYCISK 10 lub pasek „ Symulacje (MS Windows)) na monitorze widoczne są przebiegi „on line” pozwalające ocenić poprawność działania modelu. Jednocześnie na dysku zapisywany jest plik wyników (np. obw_rlc.wnk) . Na jego podstawie możliwe jest wykreślenie na ekranie przebiegów rejestrowanych wielkości po wywołaniu **POSTPROCESORA PRZEBIEGÓW** (PRZYCISK 11).

Menu przycisków - ikon na pulpicie prezentacji wyników umożliwia :

PRZYCISK 1 - wybór wielkości prezentowanych

PRZYCISKI 2 i 3 - wczytanie i zapis pliku typu *.ppt (np. obw_rlc.ppt) które ułatwiają szybkie wywołanie przebiegów w uprzednio określonym formacie.

PRZYCISK 4 - określenie parametrów skali

PRZYCISKI 5 i 6 - powiększenie lub pomniejszenie skali zaznaczonego fragmentu przebiegów.

PRZYCISK 7 - uruchomienie analizy spektralnej.

Dla obserwacji określonych przebiegów należy je wybrać (PRZYCISK 1) i na wywołanej tablicy „**Parametry Przebiegów**” zaznaczyć „**Wypełnianie automatyczne**”, w rubryce „**Nazwa Pliku**” wskazać określony plik (np. obw_rlc.wnk) i „odhaczyć” te wielkości, które są aktualnie interesujące. Następnie wywołać skalowanie (przycisk na tablicy „Parametry Przebiegów”) i wypełnić tabelę „**Parametry Skali**”. Przycisk **OK**. wizualizuje przebiegi.

Jeżeli konieczne jest powtórzenie symulacji przy tym samym formacie oglądanych wielkości warto zapisać plik *.ppt (np. obw_rlc.ppt), który uwolni od ponownego opisu parametrów prezentacji graficznej (wciśnięcie PRZYCISKU 3 na listwie ikon).

Przy ponownym oglądaniu wyników w tym samym formacie wystarczy wczytać (PRZYCISK 2) plik stanu pulpitu prezentacji (np. obw_rlc.ppt),.

UWAGA: Kopiowanie wyników na własnych dyskietch np. w postaci plików bitowych lub w innej formie jest niedozwolona

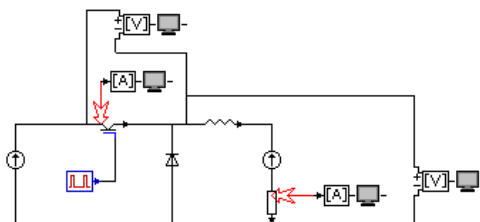
3. PRZEKSZTAŁTNIKI IMPULSOWE – EKSPERYMENTY SYMULACYJNE

NPZwE – Nastawy Parametrów Zalecane w Eksperymentcie – wartości i obszary parametrów zalecanych w trakcie badań symulacyjnych

WzE – Wnioski z Eksperymentu - Pytania kluczowe dla zrozumienia istoty ćwiczenia

1_STEP_DOWN

Przekształtnik impulsowy obniżający napięcie (step-down. buck)



Zadanie 1: Zbadac wpływ parametrów obwodu i współczynnika $D = t_{z}/T$ na napięcie i prąd odbiornika

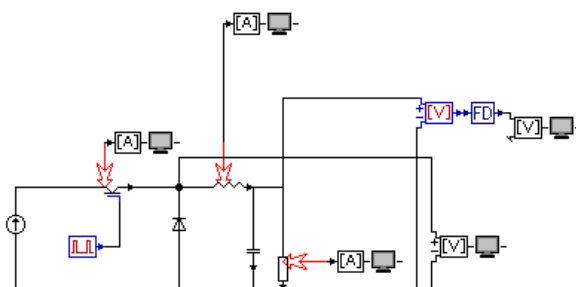
NPZwE: a) $R_o=0.5 \text{ ohm}$, $L_o = 0.001..0.05\text{H}$, $E_o = U_d \cdot (t_z/T)/R_o$, $D=0.1..0.9$.

WzE: Jak tetnienie prądu odbiornika zależy od parametrów obwodu?

Zadanie 2: Dobrac parametry obwodu tak by uzyskać pracę przy impulsowym prądzie w dławiku.

2_STEP_DOWN_C_FILTER

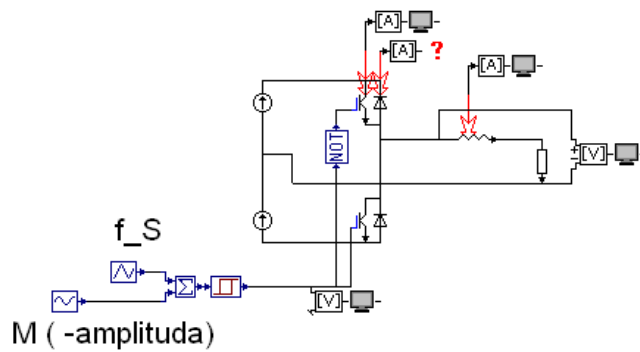
Przekształtnik impulsowy obniżający z pojemnościowym filtrem wyjściowym



Zadanie 1: Wyznaczyć charakterystyki zewnętrzne układu ($U_w=f(I_o)$) dla różnych wartości współczynnika $D = t_z/T$

3_STEP_UP

Falownik jednofazowy, jednogaleziowy sterowany wg. metody PWM



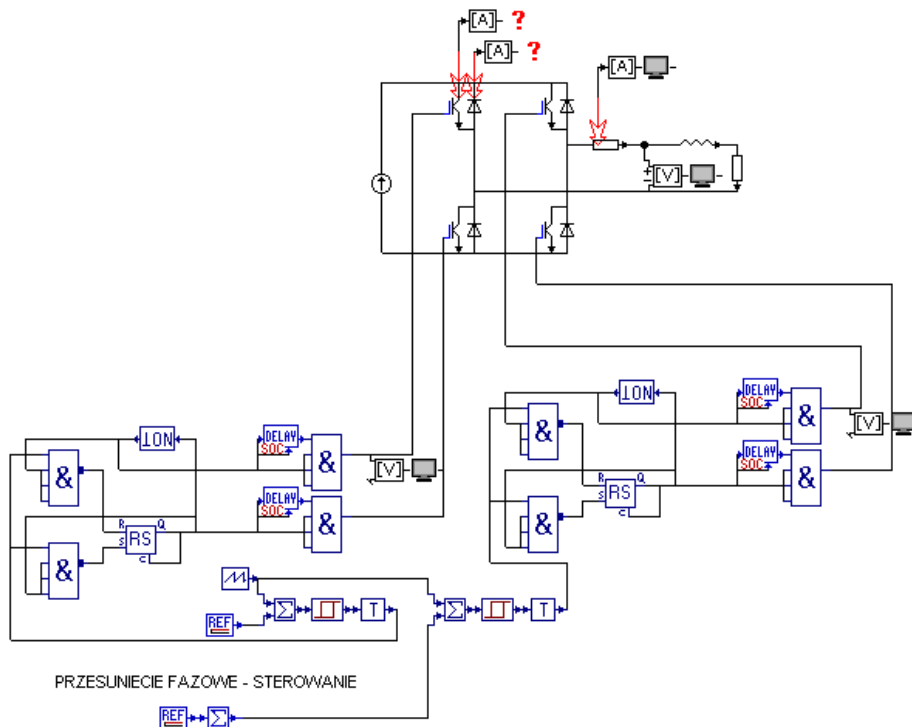
Zadanie 1. Zaobserwować przebiegi prądu odbiornika przy różnych częstotliwościach impulsowania

NPZwE: a) $R_o=0.5..10 \text{ ohm}$, $L_o=0.01..0.1 \text{ H}$, $f_S = 500-5000\text{Hz}$, $M=(0.1..0.9..10)$

Zadanie 2: Nastawić parametry sterowania aby nie występowało zjawisko PWM (praca w nadmodulacji)

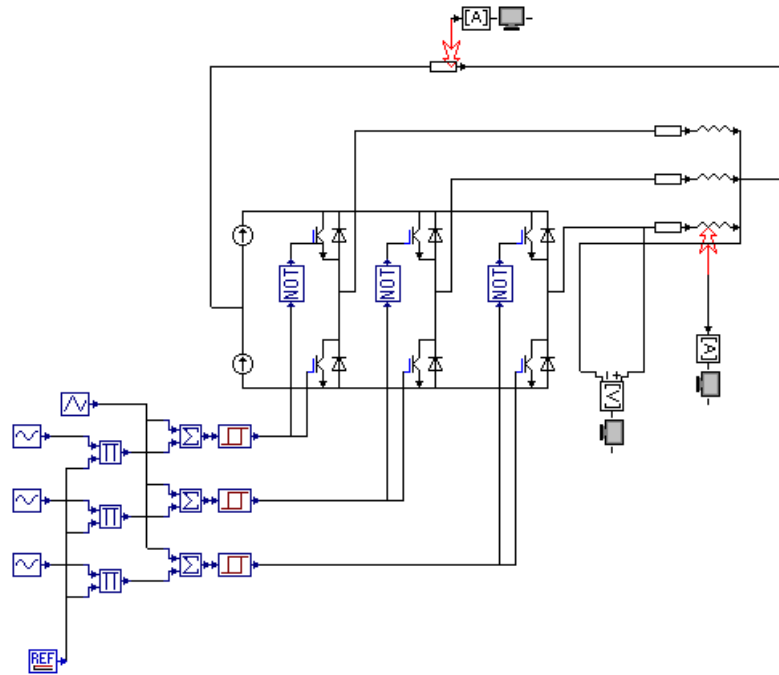
6_FAL_MOST_1F

Falownik mostkowy o regulowanym napięciu wyjściowym



7_FAL_MOST3f_PWM

Falownik 3-fazowy mostkowy o regulowanym napięciu wyjściowym PWM



4. PODSTAWOWE INFORMACJE O STANOWISKU LABORATORYJNYM

4.1. OPIS STANOWISKA

Do prowadzenia badań eksperymentalnych przekształtników niezależnych sterowanych impulsowo służą stanowiska w postaci ażurowych (ramowych) stojaków, ustawionych na stołach laboratoryjnych (rys. 4.1). W stojakach tych umieszczone są panele z zamontowanymi odpowiednimi podzespołami energoelektronicznymi i sterującymi. Na płytach czołowych paneli znajdują się symbole graficzne oraz gniazda radiowe połączone wewnątrz panelu z zaciskami tych podzespołów. Prezentowany system laboratoryjny został opracowany przez niemiecką firmę LEYBOLD DIDACTIC GMBH.

Przed przystąpieniem do wykonywania ćwiczenia należy wybrać niezbędne podzespoły (panele) i umieścić je w stojaku w odpowiedniej kolejności tak, aby można było jak najkrótszymi przewodami połączyć modelowany układ. Połączenia należy wykonywać giętkimi przewodami oraz zworami.



Rys. 1. Widok ogólny stanowiska laboratoryjnego

4.2. PANELE

Poniżej przedstawiono opis poszczególnych paneli z podziałem na podzespoły wchodzące w skład obwodów energetycznych i sterujących modelowanych układów energoelektronicznych.

Dioda (rys. 4.2)

Szybka dioda krzemowa z dołączanym obwodem przeciwprzepięciowym. Połączenia tego obwodu z diodą należy wykonać jak najkrótszym przewodem (zworą). Diody można wykorzystać do budowy prostowników niesterowanych lub jako diody rozładowcze.

Parametry diody:

- dopuszczalne powtarzalne szczytowe napięcie wsteczne $U_{RRM}=1000V$
- dopuszczalna wartość skuteczna prądu przewodzenia diody $I_{FRMS}=10A$.

Trójfazowy mostek diodowy (rys.4.3)

Niesterowany prostownik mostkowy sześciopulsowy, wykorzystywany jako źródło napięcia jednokierunkowego w przemiennikach częstotliwości z pośredniczącym obwodem napięcia stałego i jako różnego rodzaju zasilacze sieciowe napięcia stałego.

Parametry mostka:

- znamionowa wartość skuteczna wejściowego trójfazowego napięcia przemiennego:

$$U_N=400V$$

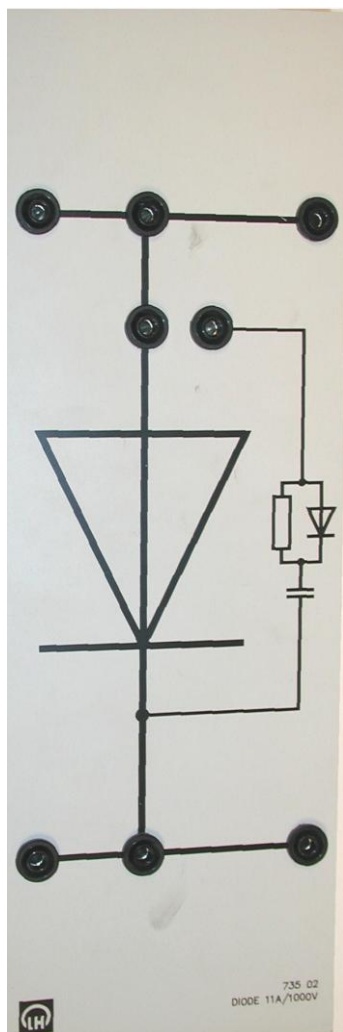
- znamionowa wartość średnia prądu wyprostowanego: $I_{dN}=10A$
- niepowtarzalny szczytowy prąd wyjściowy mostka: $I_{FSM}=300A$
- parametr przeciążeniowy: $(I^2t)=450A^2s$
- spadek napięcia w stanie przewodzenia (każdej diody): $U_F=1V$.

Tranzystor IGBT (rys. 4.5)

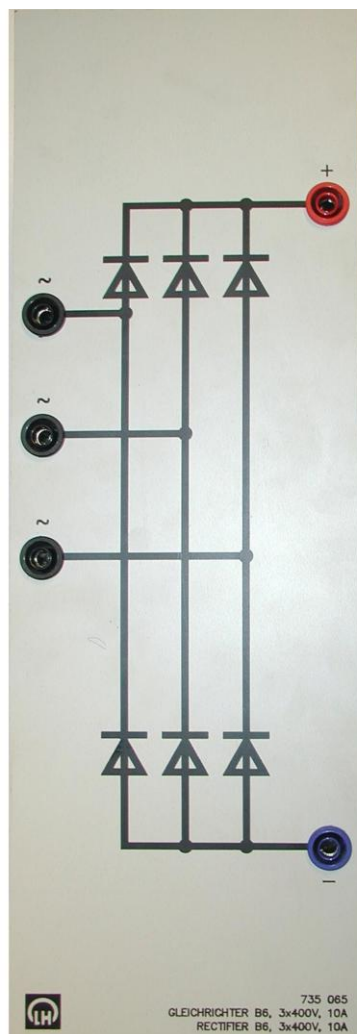
Tranzystor IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) wykazuje od strony wejścia (obwodu sterowania) właściwości tranzystora polowego (MOS FET) a od strony wyjścia właściwości tranzystora bipolarnego mocy. Równolegle do tranzystora IGBT jest podłączona dioda zwrotna. Istnieje też możliwość podłączenia obwodu przeciwprzepięciowego DRC. Panel można wykorzystać jako szybki łącznik wysokonapięciowy w przekształtnikach energii prądu stałego w energię prądu stałego – sterownikach napięcia stałego, obniżających, podwyższających i obniżająco – podwyższających, prostownikach impulsowych i falownikach niezależnych.

Parametry tranzystora:

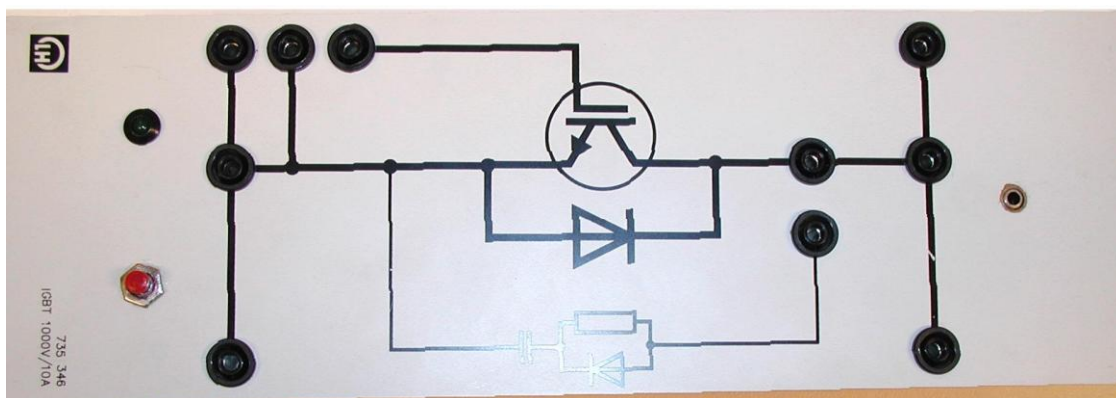
- maksymalne napięcie kolektor-emiter $U_{CES}=1000V$
- dopuszczalna wartość średnia prądu kolektora $I_{CAV}=10A$
- spadek napięcia kolektor-emiter nasyconego tranzystora $U_{CE SAT}=3,5V$
- pojemność wejściowa bramka-emiter $C_{GE}=1,8nF$
-



Rys. 4.2. Panel z diodą



Rys. 4.3. Panel z trójfazowym mostkiem diodowym



Rys. 4.5. Panel z tranzystorem IGBT

Tranzystor MOSFET (rys. 4.6)

Tranzystor polowy z kanałem typu **n** z szybką zintegrowaną diodą zwrotną. W panelu znajduje się również obwód przeciwprzepięciowy DRC, który można połączyć równolegle z tranzystorem. Panel może być wykorzystany przy budowie przekształtników impulsowych napięcia stałego na napięcie stałe (sterowników napięcia stałego), prostowników sterowanych impulsowo i falowników napięcia o podwyższonej częstotliwości przełączeń.

Parametry tranzystora:

napięcie dren-źródło $U_{DS}=500V$

stały prąd drenu $I_D=10A$

rezystancja dren-źródło w stanie załączenia $R_{DS(ON)}=0,6\Omega$

Bezpieczniki topikowe (rys. 4.7)

Zestaw trzech bezpieczników topikowych (6A lub 10A), super szybkich, umożliwiających ochronę elementów półprzewodnikowych przed skutkami zwarć.

Transformator trójfazowy (rys.4.8)

Panel zawiera transformator trójfazowy, obniżający napięcie. Napięcie wtórne transformatora po wyprostowaniu jest wykorzystywane do zasilania modelowanych przekształtników niezależnych. W panelu umieszczono także wyłącznik ręczny trójbiegunowy, trzy czerwone lampki kontrolne oraz trzy termomagnetyczne wyłączniki przeciążeniowe, zainstalowane po stronie pierwotnej transformatora (0,8A).

Parametry transformatora:

moc znamionowa $S=400VA$

napięcie fazowe uzwojenia pierwotnego $U_1=220V$

napięcia fazowe uzwojenia wtórnego (z odczepem pośrodku) $U_2=45V+45V$

znamionowy prąd uzwojenia wtórnego $I_2=1,5A$

częstotliwość znamionowa $f_N=50Hz$

Dodatkowo w panelu zainstalowano prostownik sześciopulsowy o parametrach wyjściowych 220V / 1A.

Kondensatory (rys. 4.9)

W panelu znajdują się dwa kondensatory elektrolityczne, charakteryzujące się odpornością na przepływ prądów impulsowych (w tym zwarciovych). Są używane do filtracji napięć wyjściowych prostowników w zasilaczach i w obwodach pośredniczących napięcia stałego przemienników częstotliwości. Kondensatory są zabezpieczone przed doprowadzeniem napięcia o nieodpowiedniej polaryzacji.

Parametry kondensatora:

pojemność znamionowa $C=2 \times 1000\mu F$

napięcie znamionowe (stałe) $U=385V$

Obciążenie układów energoelektronicznych (rys. 4.10)

Panel zawiera rezystory, dławiki i kondensatory, które można wykorzystać jako obciążenie dla wszystkich jedno- i trójfazowych układów energoelektronicznych.

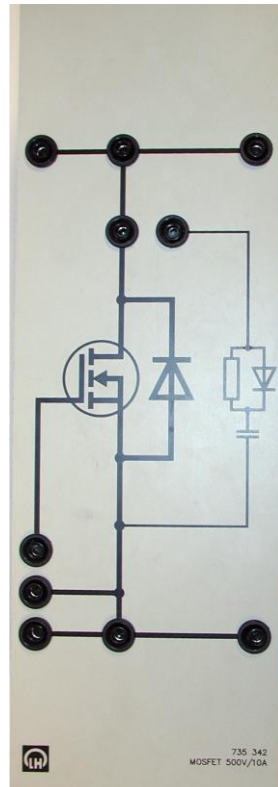
Parametry obciążenia:

Trzy rezystory 100Ω o obciążalności 1A, zabezpieczone bezpiecznikami topikowymi 1,2A

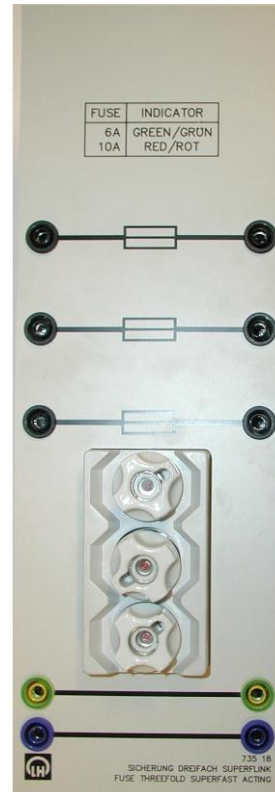
Jeden rezystor 1000Ω o obciążalności 220mA

Dwa dławiki o indukcyjności 50mH z odczepem (12,5mH). Obciążalność dławików wynosi 2,5A

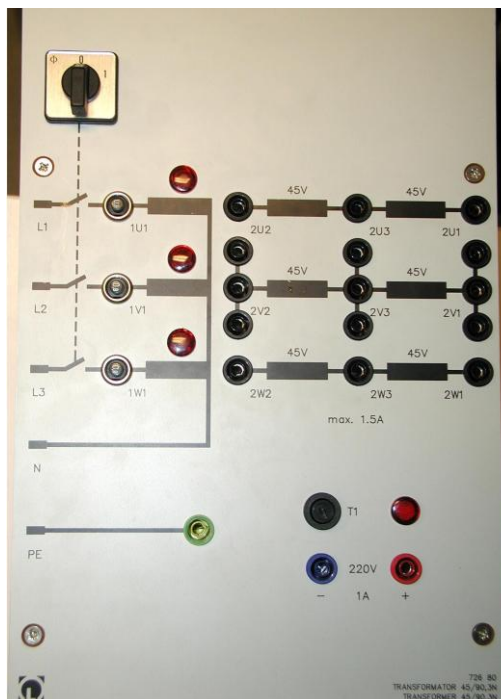
Trzy kondensatory o pojemnościach 4/8/16 μF i dopuszczalnych wartościach skutecznych napięcia przemiennego (AC) równych 450V.



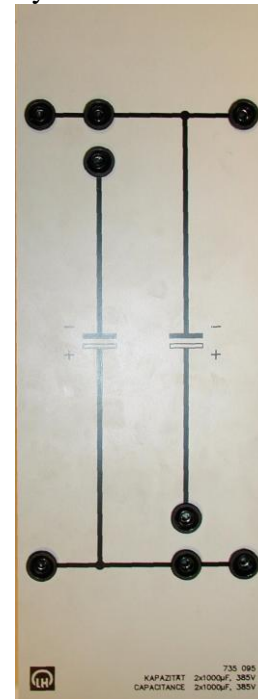
Rys. 4.6. Panel z tranzystorem MOSFET



Rys. 4.7. Panel z bezpiecznikami topikowymi



Rys.4.8. Panel z transformatorem trójfazowym



Rys. 4.9. Panel z kondensatorami elektrolitycznymi

Transformator o podwyższonej częstotliwości (rys. 4.11)

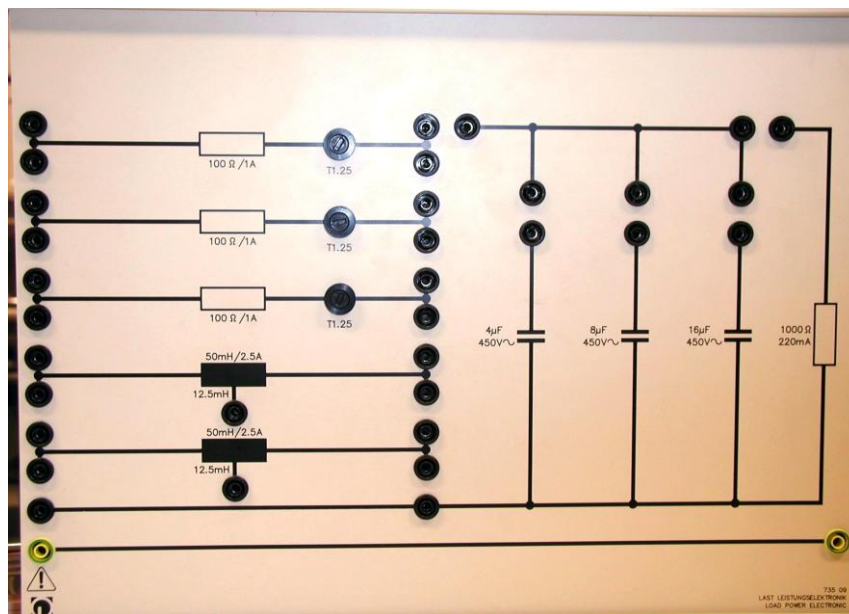
Transformator jest przeznaczony do realizacji pośrednich jednotaktowych przekształtników energii prądu stałego w energię prądu stałego z transformatorem w obwodzie podwyższonej częstotliwości. Mając do dyspozycji tranzystory mocy oraz szybkie diody można zrealizować następujące transformatorowe przekształtniki napięcia stałego:

- przekształtnik transformatorowy jednotaktowy jedno tranzystorowy
- przekształtnik jednotaktowy dwutranzystorowy półmostkowy (push-pull) z prostownikiem wyjściowym dwupulsowym
- przekształtnik jednotaktowy dwutranzystorowy półmostkowy asymetryczny
- przekształtnik jednotaktowy mostkowy

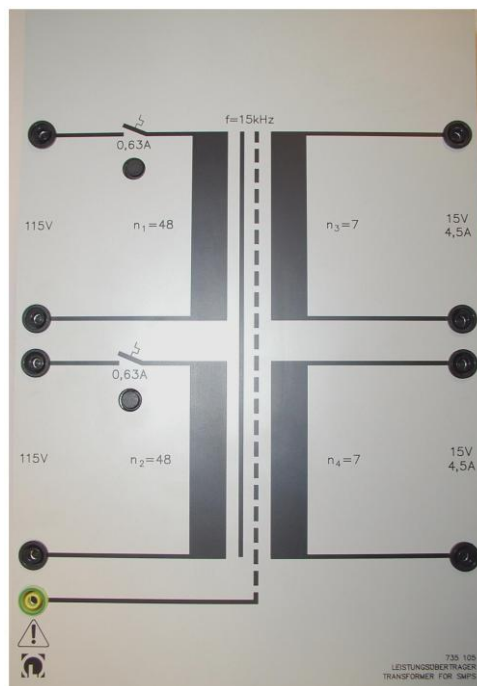
Dzięki uzwojeniu ekranującemu transformator umożliwia realizację zasilaczy zapewniających bezpieczną izolację galwaniczną między źródłem energii i odbiornikiem. Uzwojenia pierwotne są chronione od przeciążeń za pomocą bezpieczników termicznych.

Parametry transformatora:

- moc znamionowa $P_N=135\text{VA}$
- częstotliwość znamionowa $f_N \geq 15\text{kHz}$
- liczba zwojów uzwojenia pierwotnego $N_1=2 \times 48$
- napięcie znamionowe każdej sekcji uzwojenia pierwotnego $U_1=115\text{V}$
- liczba zwojów uzwojenia wtórnego $N_2=2 \times 7$
- napięcie znamionowe każdej sekcji uzwojenia wtórnego $U_2=15\text{V}$
- znamionowy prąd uzwojenia wtórnego $I_2=4,5\text{A}$.



Rys. 4.10. Panel z rezystorami, dławikami i kondensatorami stanowiącymi obciążenie przekształtników



Rys. 4.11. Panel z transformatorem o podwyższonej częstotliwości

4.3 BLOKI STERUJĄCE

Zasilacz stabilizowany (rys. 4.12)

Zasilacz dostarcza dwa niezależne wyjściowe napięcia stabilizowane o wartościach +15V i –15V. Tętnienia tych napięć nie przekraczają 0,3mV. Maksymalna ciągła wartość prądu wyjściowego nie powinna przekroczyć 2,4A. Dopuszcza się krótkotrwałe przeciążenia do 3A. Zasilacz jest odporny na zwarcia. Dopuszczalne zmiany temperatury otoczenia wynoszą 0...50°C.

Dodatkowo w panelu zainstalowano:

- podświetlony przełącznik sieciowy
- dwie zielone diody świecące LED jako wskaźniki napięć stabilizowanych.

Z tyłu panelu jest wyprowadzony kabel, który należy podłączyć do linii zasilającej 220V.

Generator przebiegów funkcyjnych (rys. 4.13)

Generowane funkcje: sinus/trójkąt/prostokąt

Sygnał prostokątny może mieć nastawiane wypełnienie.

Zakres zmian częstotliwości: 0,2Hz...200kHz.

Napięcie wyjściowe (wartość międzyszczytowa) regulowane bezstopniowo: 0...20V

Wyjścia dodatkowe: sygnały zredukowane -20dB

-40dB

wyjście przerzutnikowe

Napięcie zasilania (220VV/50Hz) jest doprowadzane za pomocą kabla sieciowego.

Zadajnik (rys. 4.14)

Służy do uzyskiwania analogowego sygnału wartości zadanej. Wykonany jest za pomocą potencjometru o liniowej zależności między napięciem wyjściowym a kątem położenia suwaka. Napięcie wyjściowe zmienia się w zakresie 0...+10V z możliwością przełączenia (za pomocą zwo-ry) na zakres -10V...+10V.

Sygnał wyjściowy może być zmieniony skokowo za pomocą przełącznika kabelkowego na jedno z napięć ekstremalnych (+10V lub -10V) bądź na napięcie równe zeru. W tym ostatnim przypadku można wykorzystać zwozę, łącząc szynę 0V i U_{REF} . Napięcie zasilania potencjometru wynosi $\pm 15V$.

Układ sterowania PWM/PFM (rys. 4.15)

Jest to uniwersalny układ sterowania, umożliwiający sterowanie impulsowych przekształtników niezależnych takich jak bezpośrednie i pośrednie (transformatorowe) przekształtniki energii prądu stałego (sterowniki napięcia stałego, przekształtniki jednotaktowe) czy też falowniki jednofazowe. Sygnały wyjściowe układu zapewniają sterowanie wszystkich zaworów półprzewodnikowych takich jak tyrystory klasyczne, tyrystory wyłączalne GTO, tranzystory MOSFET, tranzystory bipolarne i tranzystory IGBT. Sygnały te są uzyskiwane z wzajemnie odizolowanych galwanicznie wzmacniaczy wyjściowych. W zależności od potrzeby można wybrać następujące rodzaje sterowania:

- modulacja szerokości impulsów (pulse width modulation – PWM)
- modulacja częstotliwości impulsów (puls frequency modulation – PFM)
- regulacja dwustanowa (nadażna)

Układ charakteryzuje się następującymi parametrami:

Napięcie wejściowe sterujące (dla wszystkich metod sterowania): 0...10V.

M o d u l a t o r P W M:

- zakres zmian częstotliwości: 20...200Hz/0,2...2kHz/2...20kHz
- zakres zmian wypełnienia impulsów (t_{ON}/T): 0...0,95

M o d u l a t o r c z ę s t o t l i w o ś c i

- zakres nastawianego czasu trwania impulsów: 5...50 μ s/50...500 μ s/0,5...5ms
- zakres zmian częstotliwości impulsów: 20Hz...20kHz

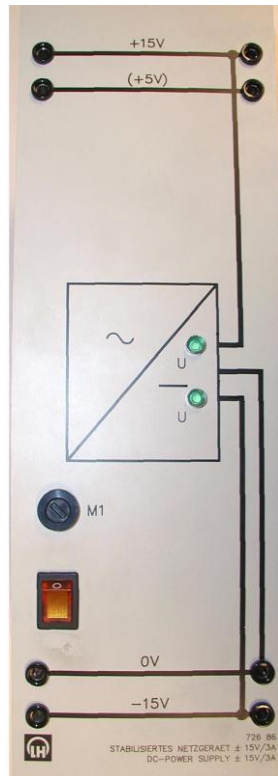
R e g u l a c j a d w u s t a n o w a (nadażna)

- zakres zmian histerezy: 0...2V

W z m a c n i a c z e w y j ś c i o w e:

- odporne na długotrwałe zwarcie
- wskaźniki optyczne (dwie diody LED) stanów załączenia
- 2 x 2 galwanicznie izolowane wyjścia (wytrzymałość izolacji 3kV)
- wejście INHIBIT (blokada)

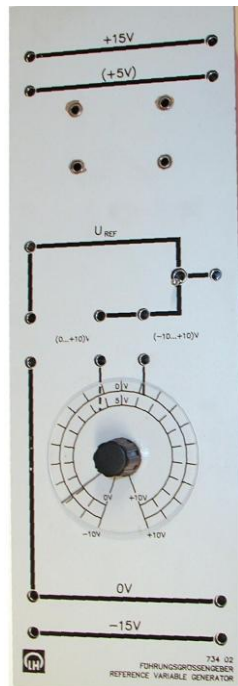
Napięcie zasilania układu wynosi $\pm 15V$ i musi być doprowadzone z zewnątrz z panelu zasilacza.



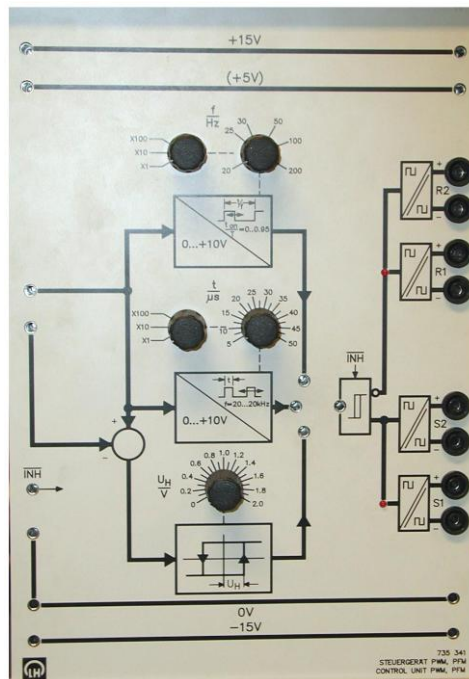
Rys. 4.12. Panel z zasilaczem stabilizowanym



Rys. 4.13. Panel z generatorem funkcyjnym



Rys. 4.14. Panel z zadajnikiem potencjometrycznym

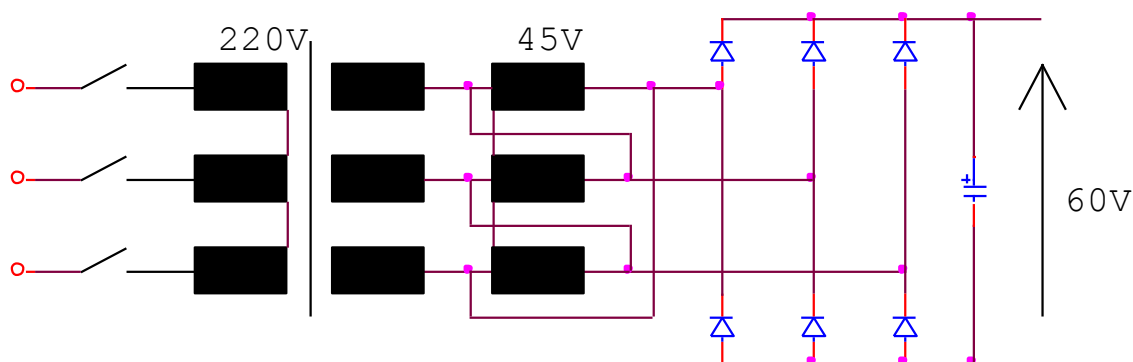


Rys. 4.15. Układ sterowania PWM/PFM

5. BADANIA PRZEKSZTAŁTNIKÓW RZECZYWISTYCH

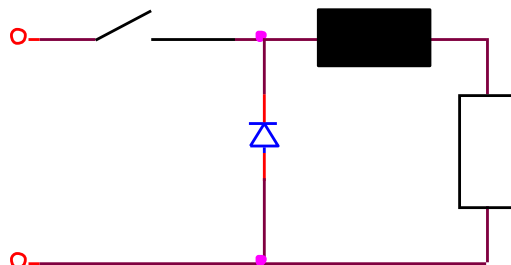
5.1. BADANIA BEZPOŚREDNICH STEROWNIKÓW NAPIĘCIA STAŁEGO

Badane sterowniki napięcia stałego należy zasilac napięciem stałym otrzymanym z trójfazowego prostownika mostkowego zasilanego z transformatora 3 x 220/45V (/Δ). Schemat układu zasilania podano na rys. 5.1.



Rys. 5.1. Układ zasilania bezpośrednich sterowników napięcia stałego

A. STEROWNIK OBNIŻAJĄCY NAPIĘCIE



1. Połączyć obwód energetyczny, wykorzystując panele z tranzystorem MOSFET lub IGBT i diodą rozładowczą. Zalecane parametry obciążenia: $R_o=30 \dots 100\Omega$; $L_o = 10 \dots 50 \text{ mH}$. Wiedząc, że napięcie zasilania $E=60\text{V}$, zwrócić uwagę na dopuszczalne obciążenie prądowe użytych elementów.

Jaka jest teoretyczna relacja między wartością średnią napięcia wyjściowego a napięciem wejściowym i współczynnikiem załączenia $D=t_{ON}/T$?

2. Uruchomić układ sterowania PWM. Zalecana częstotliwość przełączeń $f_s = 5 \dots 10\text{kHz}$ (MOSFET) lub $1 \dots 3\text{kHz}$ (IGBT). Przeprowadzić obserwacje sygnału sterującego i sprawdzić zakres zmian współczynnika załączenia D .

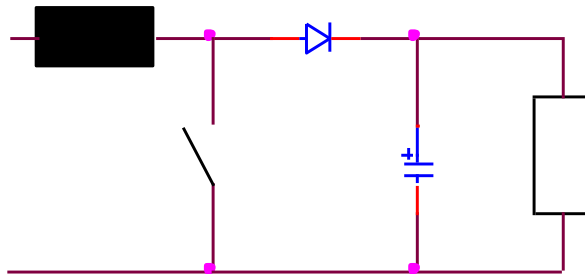
Doprowadzić sygnał sterujący do tranzystora.

3. Załączyć obwód energetyczny przekształtnika (wyłącznik ręczny w panelu transformatora trójfazowego). Zaobserwować przebiegi czasowe napięć i prądów w układzie. Pomierzyć i

wykreślić charakterystykę tętnienia prądu $\Delta I_o = f(D)$ dla ustalonej wartości częstotliwości łążeń f_s i kilku różnych relacji L_o/R_o odbiornika.

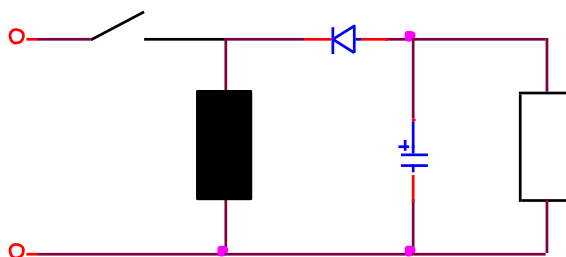
4. Zdjąć charakterystykę sterowania przekształtnika $U_o = f(D)$. Wartość średnią napięcia wyjściowego U_o należy określić przy użyciu oscyloskopu, korzystając z przełącznika „wejście prądu przemiennego ac - i stałoprądowe dc”.
5. Dołączyć równolegle do rezystancji odbiornika R_o kondensator filtrujący C_f (np. $28\mu F$). Określić warunki, przy których prąd dławika L_o ma przebieg ciągły. Sprawdzić relację $U_o = f(D)$.
6. Zaobserwować przebieg napięcia tranzystora w czasie przełączania przy odłączonym i załączonym obwodzie przeciwnapięciowym DRC. Wyjaśnić działanie tego obwodu.

B. STEROWNIK PODWYŻSZAJĄCY NAPIĘCIE



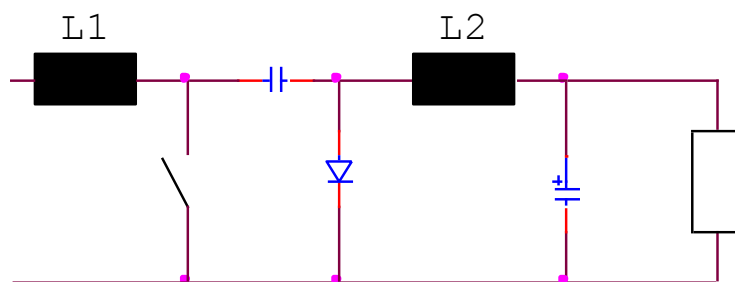
1. Skonfigurować obwód energetyczny przekształtnika. Zalecana indukcyjność dławika wejściowego $L=50mH$. Zalecane parametry odbiornika i filtru $R_o=30...300\Omega$; $C_f=28\mu F$. Jaka jest teoretyczna zależność wartości średniej napięcia odbiornika od napięcia wejściowego E i współczynnika załączania $D=t_{ON}/T$ przy ciągłym prądzie dławika?
2. Uruchomić układ sterowania PWM i zasilić obwód energetyczny. Dobrać częstotliwość łążeń f_L w zależności od rodzaju tranzystora.
3. Zaobserwować przebiegi czasowe napięć i prądów przy impulsowym i ciągłym prądzie dławika. Dla ustalonych wartości f_s , R_o , L zdjąć charakterystykę sterowania $U_o = f(D)$, zaznaczając zakres ciągłego ewentualnie impulsowego prądu dławika. Nie przekraczać wartości $U_o=100V$. Wartość średnia napięcia wyjściowego określić za pomocą oscyloskopu.
4. Dla kilku ustalonych wartości D określić charakterystyki wyjściowe $U_o = f(R_o)$ – przy $C_f = const$ i $f_s = const$.
5. Dla ustalonych parametrów R_o , C_f , f_s i L zmierzyć tętnienia prądu dławika w zależności od współczynnika D . Obserwacje przeprowadzić dla kilku wybranych R_o .
6. Jak w punkcie 5 w odniesieniu do tętnienia napięcia kondensatora filtru C_f .
7. Przeprowadzić obserwacje napięć i prądów przy zmianach częstotliwości łążeń f_s . Jak wpływa ta częstotliwość na tętnienia prądu dławika i napięcia odbiornika?

C. STEROWNIK OBNIŻAJĄCO-PODWYŻSAJĄCY NAPIĘCIE



1. Połączyć obwód energetyczny przekształtnika. Zalecana indukcyjność dławika $L=10...50\text{mH}$. Zalecane parametry odbiornika i filtru $R_o=30...300\Omega$; $C_f=30\mu\text{F}$. Należy zwrócić uwagę na zmianę biegunowości napięcia wyjściowego w odniesieniu do wejściowego. Jaka jest zależność wartości średniej napięcia odbiornika od napięcia wejściowego i współczynnika załączenia $D=t_{\text{ON}}/T$ przy ciągłym prądzie dławika?
2. Uruchomić układ sterowania PWM i zasilić obwód energetyczny. Dobrać częstotliwość łączeń f_s w zależności od rodzaju wybranego tranzystora.
3. Zaobserwować przebiegi czasowe napięć i prądów przy impulsowym i ciągłym prądzie dławika. Dla ustalonych wartości f_s , R_o , L zdjąć charakterystykę sterowania $U_o=f(D)$, starając się zachować warunek ciągłości prądu dławika. Nie należy przekraczać wartości napięcia odbiornika $U_o=100\text{V}$. Wartość średnią napięcia U_o określić za pomocą oscyloskopu używając wejścia stało- i przemiennoprądowego (dc/ac).
4. Dla kilku ustalonych wartości D zdjąć charakterystyki wyjściowe $U_o=f(R_o)$ przy $C_f=\text{const}$ i $f_L=\text{const}$ (zaznaczyć zakresy prądu ciągłego i impulsowego prądu dławika).
5. Dla ustalonych parametrów R_o , C_f , f_s i L zmierzyć tętnienia prądu dławika i napięcia kondensatora filtru C_f w zależności od współczynnika D . Obserwacje przeprowadzić dla kilku wybranych R_o . Które wielkości mają wpływ na tętnienia napięcia odbiornika?

D. STEROWNIK CUK'A



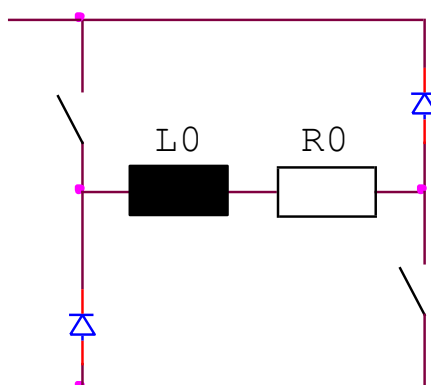
1. Połączyć obwód energetyczny przekształtnika. Zalecane wartości parametrów poszczególnych podzespołów wynoszą: $L_1=10...50\text{mH}$; $L_2=10...50\text{mH}$; $C=16\mu\text{F}$; $C_f=12\mu\text{F}$. W zależności od rodzaju wybranego tranzystora MOSFET lub IGBT dobrać częstotliwość $f_s=5...10\text{kHz}$ lub

1...3kHz. {Zwrócić uwagę na zmianę biegunowości napięcia wyjściowego w odniesieniu do napięcia wejściowego.}

2. Określić zależność wartości średniej napięcia odbiornika od napięcia wejściowego i współczynnika załączenia $D=t_{ON}/T$ przy ciągłych prądach dławików L_1 i L_2 . Zaobserwować przebiegi czasowe prądów i napięć w układzie przy ciągłym i impulsowym prądzie w dławikach L_1 i L_2 .
Dalszy przebieg ćwiczenia wg punktów C.3 ... C6

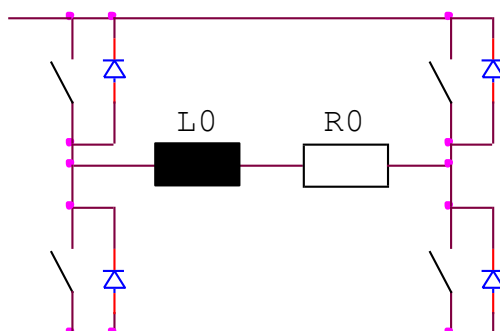
5.2. BADANIA WIELOKWADRANTOWYCH STEROWNIKÓW NAPIĘCIA STAŁEGO

A. STEROWNIK O ZMIENNYM KIERUNKU NAPIĘCIA (DWUKWADRANTOWY)



1. Połączyć obwód energetyczny przekształtnika, wykorzystując panele z tranzystorami MOSFET lub IGBT (z obwodami DRC) i diodami. Zalecane wartości parametrów sterowników: $R_o=30...100\Omega$; $L_o=50\text{mH}$.
2. Uruchomić układ sterowania PWM. W zależności od rodzaju użytych tranzystorów wybrać częstotliwość łączeń $f_L=5...10\text{kHz}$ (MOSFET) lub 1...3kHz (IGBT).
3. Zaobserwować przebiegi czasowe prądu i napięcia odbiornika. Określić zakresy zmian współczynnika D odpowiadające impulsowemu i ciągłemu prądowi odbiornika.
4. Wyznaczyć wzór opisujący charakterystykę sterowania ($U_{o(AV)}=f(D)$) i sprawdzić eksperymentalnie jego poprawność.

B. STEROWNIK O ZMIENNYM KIERUNKU NAPIĘCIA I PRĄDU ODBIORNIKA (CZTEROKWADRANTOWY)



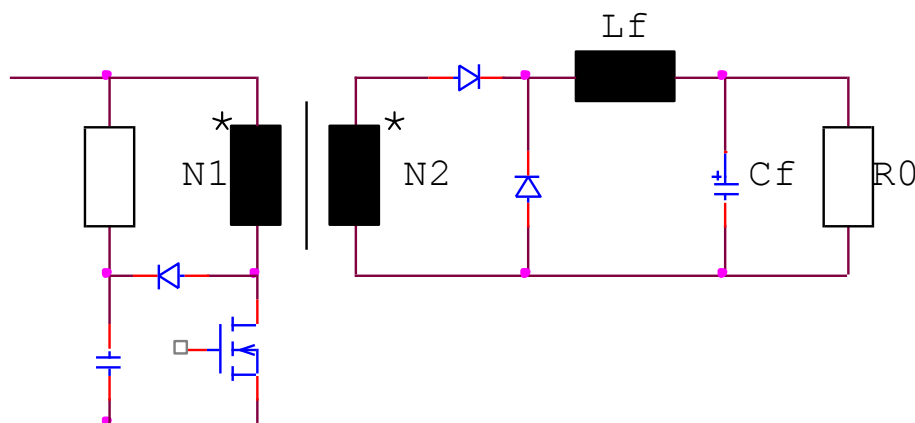
1. Połączyć obwód energetyczny przekształtnika wykorzystując tranzystory MOSFET (zbocznikowane diodami zwrotnymi), wyposażone w obwody odciażające DRC. Zalecane parametry obciążenia: $R_o=30\dots100\Omega$; $L_o=50\text{mH}$.
2. Uruchomić układ sterowania PWM. Ograniczyć częstotliwość przełączeń do ok. 500Hz. Impulsy sterujące powinny być doprowadzone jednocześnie do tranzystorów nie należących do tej samej gałęzi („po przekątnej mostka”).

UWAGA: ZAŁĄCZENIE OBU TRANZYSTORÓW Z TEJ SAMEJ GAŁĘZI MOSTKA POWODUJE ZWARCIE ŹRÓDŁA ZASILANIA I USZKODZENIE KOSZTOWNYCH TRANZYSTORÓW. W PRZYPADKU WYSTĄPIENIA AWARII BĘDĄCEJ WYNIKIEM TAKIEGO „BŁĘDU W SZTUCE”, KOSZTY ZNISZCZONYCH ELEMENTÓW PÓLPRZEWODNIKOWYCH PONOSZĄ STUDENCI.

3. Zaobserwować przebiegi czasowe prądu i napięcia odbiornika. Wyznaczyć wzór opisujący charakterystykę sterowania $U_{o(AV)}=f(D)$. Zwrócić uwagę na znak wartości średniej napięcia i kierunek przepływu prądu odbiornika.

5.3. BADANIA STEROWNIKÓW NAPIĘCIA STAŁEGO Z IZOLACJĄ TRANSFORMATYROWĄ

A.1. STEROWNIK JEDNOTRANZYSTOROWY Z POMOCNICZYM ŹRÓDŁEM NAPIĘCIA (KONDENSATOREM)

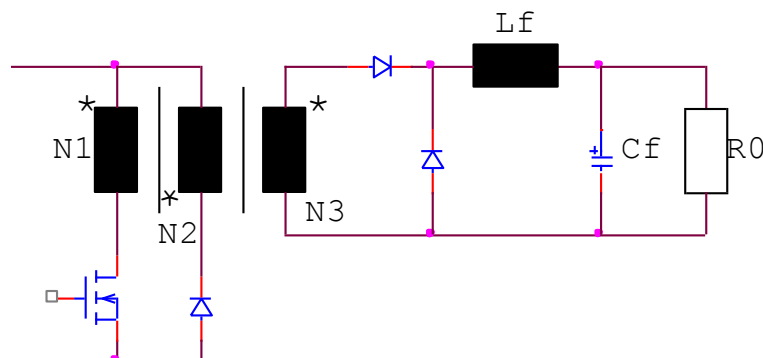


1. Połączyć obwód energetyczny przekształtnika, wykorzystując tranzystor MOSFET wraz z obwodem DRC, transformator o podwyższonej częstotliwości (uzwojenia $N_1=N_2=48$ zw), diody oraz inne elementy o zalecanych parametrach: $R=30 \dots 100\Omega$; $C=1000\mu\text{F}$; $L_f=10 \dots 50\text{mH}$; $C_f=20\mu\text{F}$; $R_o=30 \dots 300\Omega$. Zwrócić uwagę na kierunek nawinięcia uzwojeń N_1 i N_2 .
2. Uruchomić układ sterowania PWM. Przyjąć częstotliwość przełączeń $f_s=15\text{kHz}$.
3. Zaobserwować przebiegi czasowe napięć uzwojenia transformatora, napięcia odbiornika i napięcia kondensatora C. Określić relację między współczynnikiem D a napięciem odbiornika.

Wyjaśnić, jakie zjawisko decyduje o konieczności ograniczenia maksymalnej wartości współczynnika załączenia D ?

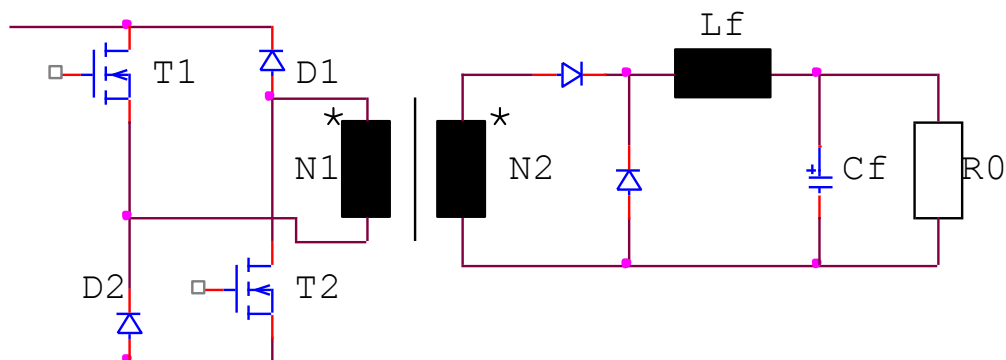
4. Sprawdzić jaka jest zależność między napięciem kondensatora C a współczynnikiem D ?

A.2. STEROWNIK JEDNOTRANZYSTOROWY Z DODATKOWYM UZWOJENIEM ROZMAGNESOWUJĄCYM



1. Połączyć obwód energetyczny przekształtnika, wykorzystując tranzystor MOSFET wraz z obwodem DRC, transformator o podwyższonej częstotliwości ($N_1=N_2=48$ zw, $N_3=7$ zw), diody oraz inne elementy o zalecanych parametrach $L_f=10 \dots 50\text{mH}$; $C_f=20 \dots 1000\mu\text{F}$; $R_o=30 \dots 300\Omega$. Należy zwrócić uwagę na kierunek nawinięcia uzwojeń transformatora. Jaką maksymalną wartość może przyjmować współczynnik D jeśli $N_1=N_2$?
2. Uruchomić układ sterowania PWM. Przyjąć częstotliwość przełączeń $f_s=15\text{kHz}$.
3. Zaobserwować przebiegi czasowe napięć uzwojeń transformatora i napięcia odbiornika dla różnych współczynników D i parametrów obciążenia.
4. Wyznaczyć charakterystykę sterowania $U_{oAV}=f(D)$.
5. Określić maksymalną wartość napięcia tranzystora i diody.
6. Dlaczego należy przyjmować podwyższoną częstotliwość przełączeń?

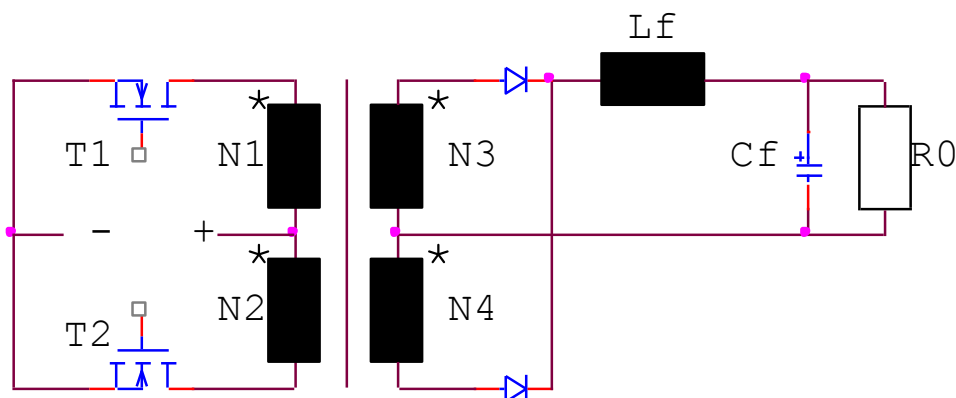
B. STEROWNIK DWUTRANZYSTOROWY Z DIODAMI ZWROTNYMI



1. Połączyć obwód energetyczny przekształtnika, wykorzystując tranzystory MOSFET (z obwo- dem DRC), transformator o podwyższonej częstotliwości ($N_1=N_2=48$ zw), diody oraz inne ele- menty o zalecanych parametrach: $L_f=10 \dots 50\text{mH}$; $C_f=20 \dots 1000\mu\text{F}$; $R_o=30 \dots 300\Omega$. Jaka jest teoretyczna zależność napięcia odbiornika od współczynnika załączenia D , napięcia wejściowe- go E i przekładni transformatora? Jaka maksymalna wartość może przyjmować współczynnik D przy $N_1=N_2$?
2. Uruchomić układ sterowania PWM. Przyjąć częstotliwość przełączeń $f_s=15\text{kHz}$.
3. Zaobserwować przebiegi czasowe napięć uzwojeń transformatora, diod, tranzystorów i obciąże- nia przy różnych R_o , C_f i różnych współczynnikach D . Określić wartości szczytowe napięć tran- zystorów i diod.
4. Wyznaczyć charakterystykę obciążenia $U_{oAV}=f(I_o)$ przy kilku wartościach D .

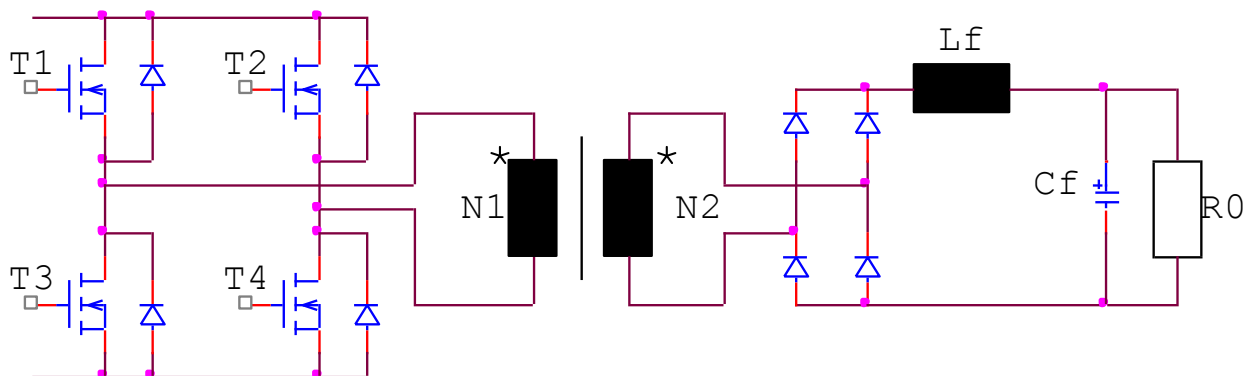
C. PRZEKSZTAŁNIK PÓLMOSTKOWY I MOSTKOWY

C.1. PRZEKSZTAŁNIK PÓLMOSTKOWY (PUSH-PULL)



1. Połączyć obwód energetyczny przekształtnika, wykorzystując tranzystory MOSFET (z obwo- dem DRC), transformator o podwyższonej częstotliwości ($N_1=N_2=48$ zw, $N_3=N_4=7$ zw), diody oraz inne elementy o zalecanych parametrach: $L_f=10 \dots 50\text{mH}$; $C_f=20 \dots 1000\mu\text{F}$; $R_o=30 \dots 300\Omega$. Jaka jest teoretyczna zależność napięcia odbiornika od napięcia wejściowego, współ- czynnika D oraz przekładni transformatora? Jak sterować tranzystory $T1$ i $T2$ aby uniknąć pod- magnesowania rdzenia transformatora?
2. Uruchomić układ sterowania PWM. Przyjąć częstotliwość przełączeń $f_s=15\text{kHz}$.
3. Zaobserwować przebiegi czasowe napięć na uzwojeniach transformatora, tranzystorach oraz na odbiorniku przy różnych D oraz C_f i R_o .
4. Określić wartości szczytowe napięcia tranzystorów.

C.2. PRZEKSZTAŁTNIK MOSTKOWY

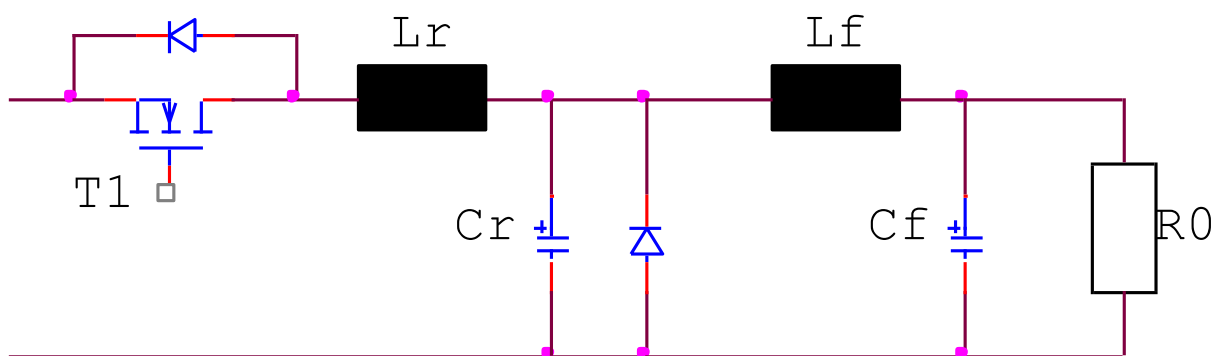


1. Połączyć obwód energetyczny układu, wykorzystując transformator o podwyższonej częstotliwości ($N_1=N_2=48$ zw), tranzystory MOSFET, diody oraz $L_f=10 \dots 50\text{mH}$; $R_o=30 \dots 300\Omega$; $C_f=20 \dots 1000\mu\text{F}$. Jaka jest relacja między napięciem wyjściowym a napięciem wejściowym, współczynnikiem D i przekładnią transformatora?

UWAGA: JEDNOCZESNE ZAŁĄCZENIE TRANZYSTORÓW W TEJ SAMEJ GAŁĘZI GROZI USZKODZENIEM TYCH ELEMENTÓW!

2. Uruchomić układ sterowania PWM. Przyjąć częstotliwość $f_s=15\text{kHz}$. Tranzystory T1 i T4 oraz T2 i T3 są sterowane parami na przemian.
3. Zaobserwować przebiegi czasowe napięć na uzwojeniach transformatora, na tranzystorach oraz na obciążeniu.
4. Wyznaczyć charakterystykę sterowania $U_{oAV}=f(D)$.
5. Wyznaczyć charakterystykę obciążenia dla kilku wartości D i dwóch, znacznie różniących się pojemnościach filtru C_f .

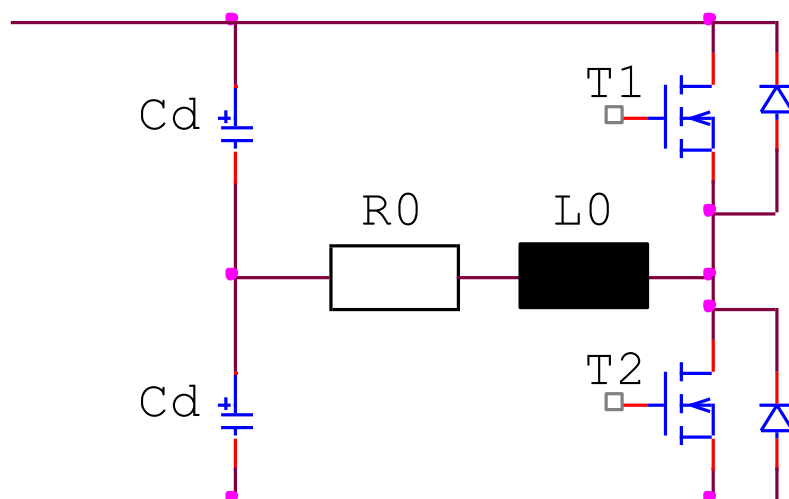
5.4. BADANIA PRZEKSZTAŁTNIKÓW REZONANSOWYCH STEROWNIK REZONANSOWY Z PRZEŁĄCZANIEM TRANZYSTORA PRZY ZERZE PRĄDU



1. Połączyć obwód energetyczny układu. Zalecane parametry elementów wynoszą: $L_r=12,5\text{mH}$; $C_r=4\mu\text{F}$; $L_f=50\text{mH}$; $C_f=1000\mu\text{F}$; $R_o=30 \dots 300\Omega$.
2. Uruchomić układ sterowania PFM. Dobrać częstotliwość przełączeń f_s tak, aby była mniejsza – co najwyżej równa, częstotliwości rezonansowej ($f_s=50 \dots 500\text{Hz}$). Czas trwania impulsu sterującego $T_i=1\text{ms}$.
3. Zaobserwować przebiegi czasowe napięcia na tranzystorze, dławiku L_r i kondensatorze C_r .
4. Wyznaczyć charakterystykę obciążenia $U_{oAV}=f(I_o)$ przy ciągłym prądzie dławika L_f .
5. Wyznaczyć charakterystykę sterowania $U_{oAV}=f(f_s)$ przy zachowaniu stałego prądu obciążenia

5.5 FALOWNIKI

A. FALOWNIK JEDNOGAŁĘZIOWY

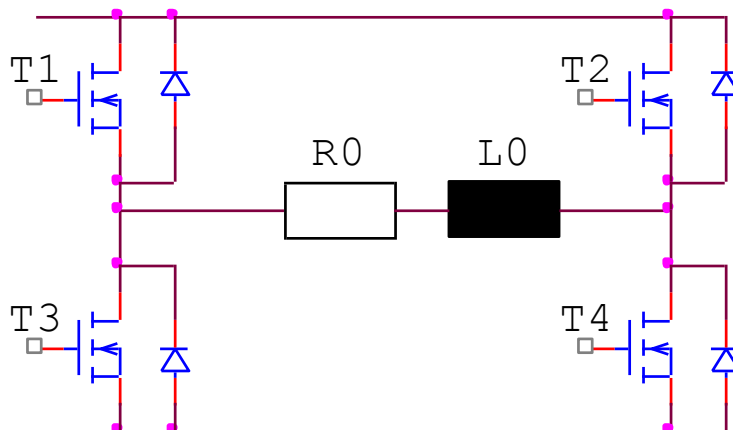


1. Połączyć obwód energetyczny falownika, wykorzystując tranzystory IGBT. Zalecane parametry elementów: $C_d=1000\mu\text{F}$; $L_o=10 \dots 50\text{mH}$; $R_o=0 \dots 300\Omega$.
2. Uruchomić układ sterowania PWM. Sprawdzić działanie tego układu sterowania przy pracy bez modulacji (prostokątne napięcie odbiornika) i z modulacją szerokości impulsów (częstotliwość przebiegu nośnego przyjąć z zakresu $1 \dots 3\text{kHz}$).

UWAGA: JEDNOCZESNE ZAŁĄCZENIE OBU TRANZYSTORÓW MOŻE SPOWODOWAĆ ZNISZCZENIE TYCH ELEMENTÓW!

3. Przeprowadzić obserwację przebiegów czasowych prądu i napięcia odbiornika przy prostokątnym (niemodulowanym, o częstotliwości niskiej, np. 50Hz) przebiegu czasowym napięcia wyjściowego falownika. Obserwację przeprowadzić dla różnych parametrów obwodu obciążenia,
4. Jak w punkcie 3 przy sterowaniu z sinusoidalną modulacją szerokości impulsów. Przebieg modulujący powinien mieć częstotliwość ok. 50Hz .

B. FALOWNIK JEDNOFAZOWY MOSTKOWY O STEROWANEJ PROSTOKĄTNEJ FALI NAPIĘCIA WYJŚCIOWEGO



1. Połączyć obwód energetyczny, wykorzystując tranzystory IGBT z diodami zwrotnymi. Zalecane parametry elementów: $L_0=10 \dots 50\text{mH}$; $R_0=0 \dots 300\Omega$.
2. Uruchomić układ sterowania PWM. Sprawdzić działanie układu przy sterowaniu prostokątnym oraz przy sterowaniu jednoimpulsowym o modulowanej szerokości. Ustalić częstotliwość impulsów na poziomie $f=50\text{Hz}$.
3. Przeprowadzić obserwację przebiegów czasowych napięcia i prądu odbiornika dla różnych parametrów L_0 i R_0 i różnych wysterowań układu.
4. Dobrać filtr pasmowy LC kształtu Γ (gałąź rezonansowa szeregową i równoległą) dostrojony na częstotliwość $f=50\text{Hz}$. Zaobserwować przebiegi czasowe napięcia i prądu odbiornika.

C. FALOWNIK JEDNOFAZOWY MOSTKOWY Z MODULACJĄ SZEROKOŚCI IMPULSÓW (PWM)

1. Połączyć obwód energetyczny wg punktu B.
2. Uruchomić układ sterowania PWM. Częstotliwość trójkątnej fali nośnej nie powinna przekraczać $f_s=3\text{kHz}$. Sinusoidalna fala modulująca powinna mieć częstotliwość $f=50\text{Hz}$.
3. Przeprowadzić badania wg punktu A.3.4. Porównać uzyskane wyniki