

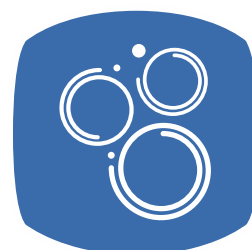
Instrukcja do wykonania ćwiczenia z przedmiotu:

Napęd elektryczny i energoelektronika

Temat ćwiczenia:

Falowniki jednofazowe

V0.00



Spis treści

1	Cel ćwiczenia	3
2	Wprowadzenie	3
2.1	Topologie autonomicznych falowników jednofazowych	3
2.1.1	Falownik półmostkowy	3
2.1.2	Falownik mostkowy	4
2.2	Metody sterowania autonomicznych falowników jednofazowych	5
2.2.1	Metoda półokresowa	6
2.2.1.1	Falownik półmostkowy z przewodzeniem półokresowym	6
2.2.1.2	Falownik mostkowy z przewodzeniem półokresowym	7
2.2.2	Metoda modulacji szerokości pojedynczego impulsu w półokresie	8
2.2.3	Komparacyjna metoda sinusoidalnej modulacji szerokości impulsów (PWM)	9
2.2.3.1	Metoda PWM z modulacją dwubiegunową	10
2.2.3.2	Metoda PWM z modulacją jednobiegunową	11
2.3	Dobór filtru wyjściowego dla falownika jednofazowego	12
2.3.1	Dobór pojemności kondensatora filtracyjnego	13
2.3.2	Dobór indukcyjności dławika filtrującego	13
2.3.2.1	Dobór indukcyjności dławika ze względu na poziom tętnień prądu	13
2.3.2.2	Dobór indukcyjności dławika ze względu na dopuszczalny spadek napięcia	14
3	Badania symulacyjne autonomicznych falowników jednofazowych	15
3.1	Badania symulacyjne falownika półmostkowego	15
3.2	Badania symulacyjne falownika mostkowego	16
3.2.1	Badania symulacyjne modelu falownika mostkowego ze sterowaniem półokresowym.	17
3.2.2	Badania symulacyjne modelu falownika mostkowego, sterowanego zgodnie z założeniami metody modulacji szerokości pojedynczego impulsu w półokresie napięcia wyjściowego	18
3.2.3	Badania symulacyjne modelu falownika mostkowego, sterowanego zgodnie z założeniami komparacyjnej metody sinusoidalnej modulacji szerokości impulsów	20
3.2.3.1	Budowa i badania modelu symulacyjnego falownika mostkowego sterowanego zgodnie z założeniami bipolarnej metody sinusoidalnej modulacji PWM	20
3.2.3.2	Budowa i badania modelu symulacyjnego falownika mostkowego sterowanego zgodnie z założeniami unipolarnej metody sinusoidalnej modulacji PWM	23
4	Przygotowanie do badań laboratoryjnych falowników jednofazowych	25
4.1	Dostosowanie parametrów i struktury modelu symulacyjnego do parametrów układów dostępnych w laboratorium	25
4.2	Pozyskiwanie przebiegów z symulacji	25

1 Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie uczestników zajęć z budową i zasadą działania autonomicznych falowników napięcia. Studentom zostaną przedstawione podstawowe topologie inwerterów jednofazowych oraz metody ich sterowania. W pierwszej części zajęć omówione zostaną topologie jednofazowych falowników napięcia: falownika półmostkowego oraz falownika mostkowego. W dalszej części zajęć studenci zostaną zaznajomieni z metodami sterowania inwerterów, takimi jak: metoda sterowania półokresowego, metoda sterowania półokresowego z zawężeniem pojedynczego impulsu, bipolarna metoda komparacyjnego sterowania szerokością impulsu czy unipolarna metoda komparacyjnego sterowania szerokością impulsu. Kolejna część zajęć będzie ukierunkowana na praktyczne wykorzystanie zdobytej wiedzy i symulacyjną weryfikację poznanych topologii falowników i ich metod sterowania. Studenci, korzystając z oprogramowania Matlab - Simulink przygotują modele symulacyjne omówionych układów, a następnie porównają zachowanie zbudowanych modeli falowników jednofazowych w przypadku zastosowania różnych metod ich sterowania.

2 Wprowadzenie

Falowniki napięcia są urządzeniami służącymi do przekształcania energii prądu stałego w energię prądu przemiennego, zapewniając przy tym optymalne wartości chwilowe napięć i prądów płynących przez dołączony do nich odbiornik. Obecnie układy falownikowe stały się bardzo popularne i możemy je spotkać w instalacjach pozyskujących energię ze źródeł odnawialnych, układach napędowych maszyn elektrycznych a nawet w urządzeniach AGD. Zagadnienia poruszane w tym konspekcie dotyczą falowników autonomicznych, które są stosowane w sieciach wyspowych, czyli mikro instalacjach odizolowanych od ogólnodostępnej sieci elektroenergetycznej. Zadaniem tego typu inwerterów jest przekształcenie energii prądu stałego pozyskanej np. z instalacji fotowoltaicznej i zmagazynowanej w połączonych z nią akumulatorach na energię prądu przemiennego, wykorzystywaną później do celów gospodarczych. Z uwagi na fakt, że falowniki autonomiczne nie współpracują z siecią elektroenergetyczną (nie dostarczają do niej energii), muszą być w stanie samodzielnie wygenerować dla siebie referencyjny sygnał sterujący. Następnie na podstawie tego sygnału, sterownik falownika generuje odpowiedni ciąg impulsów bramkowych dla łączników energoelektronicznych pracujących w danym urządzeniu, tak aby za ich pomocą uzyskać sygnał wyjściowy przekształtnika, będący odwzorowaniem sygnału referencyjnego. W większości przypadków, kontroler falownika generuje ciąg impulsów sterujących, które pozwalają dostarczyć do zacisków wyjściowych urządzenia sinusoidalny przebieg napięcia o wartości skutecznej wynoszącej 230V oraz częstotliwości 50Hz. Nic nie stoi jednak na przeszkodzie, aby w wymagających tego rozwiązaniach, referencyjny sygnał sinusoidalny został zastąpiony przez sygnał trapezoidalny lub inny sygnał odkształcony. W dalszej części instrukcji opisano dwie najczęściej spotykane topologie falowników jednofazowych oraz podstawowe metody sterowania tego typu układów.

2.1 Topologie autonomicznych falowników jednofazowych

Do najczęściej spotykanych topologii wśród falowników jednofazowych zalicza się układy mostkowe oraz półmostkowe. Każde z tych rozwiązań układowych charakteryzuje się innymi właściwościami, które wpływają na możliwości stosowania tych układów w praktycznych rozwiązaniach. Aspekty jakie należy wziąć pod uwagę przy wyborze odpowiedniej topologii dla projektowanego inwertera to przede wszystkim: parametry źródła napięcia, z którego będzie zasilany budowany falownik, oczekiwane możliwości regulacyjne, dopuszczalny poziom generowanych zakłóceń, ilość elementów wymaganych do skonstruowania danego inwertera oraz finalna cena gotowego urządzenia.

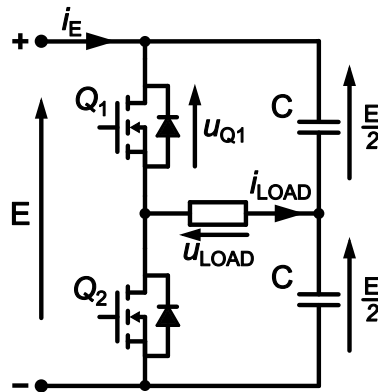
2.1.1 Falownik półmostkowy

Najprostszym jednofazowym falownikiem napięcia jest układ półmostkowy, który przedstawiono na rys. 1. Urządzenia tego typu składają się jedynie z dwóch łączników aktywnych, dwóch diod zwrotnych (o ile nie zastosowano tranzystorów zawierających diody w swojej strukturze), oraz dwóch kondensatorów tworzących wejściowy dzielnik pojemnościowy. Wspomniane łączniki energoelektroniczne są ze sobą połączone szeregowo tworząc gałąź, równoległą do wejściowego dzielnika pojemnościowego. Napięcie wyjściowe falownika dostępne jest pomiędzy punktem środkowym gałęzi łączników, a punktem środkowym dzielnika pojemnościowego, skąd trafia na filtr dolnoprzepustowy lub jest bezpośrednio dostarczane do odbiornika, jeżeli ten jest dostosowany do pracy z napięciem odkształconym.

Podstawową kwestią o jaką należy zadbać projektując kontroler dla jakiegokolwiek układu mostkowego to zapewnienie odpowiednio długiego czasu martwego (*eng. dead-time*) pomiędzy impulsami sterującymi pracą tranzystorów w jednej gałęzi mostka. Sprowadza się to do zapewnienia wymaganej ilości czasu na wyłączenie łącznika, który do tej pory przewodził, zanim zostanie złączony drugi łącznik w danej gałęzi. Niezapewnienie

odpowiednio długiego czasu martwego, prowadzi do zwarcia w gałęzi mostka a tym samym do uszkodzenia łączników i samego urządzenia.

Doysterowania falownika półmostkowego mogą zostać wykorzystane różne metody generowania impulsów sterujących, jednak niezależnie od tego jaka metoda sterowania zostanie wykorzystana, napięcie na wyjściu tego układu może przyjąć jedną z trzech wartości. Załączenie łącznika Q_1 sprawia, że na odbiorniku odkłada się napięcie o wartości $\frac{E}{2}$. Po załączeniu łącznika Q_2 i uprzednim wyłączeniu łącznika Q_1 napięcie na odbiorniku zmieni się i w efekcie przeprowadzonych przełączeń osiągnie wartość $-\frac{E}{2}$. Ostatnią, zerową wartość napięcia wyjściowego falownika osiąga się poprzez wyłączenie obu łączników. W przedstawionej topologii oprócz łączników sterowanych występują również diody. W idealnym przypadku, gdy do falownika dołączony byłby odbiornik o charakterze czysto rezystancyjnym, a wszystkie połączenia byłyby bezindukcyjne to nie dochodziłoby do komutacji pomiędzy tranzystorami a diodami. W takiej sytuacji wspomniane diody nie byłyby w ogóle potrzebne, gdyż na żadnym etapie cyklu pracy falownika nie przewodziłyby prądu. W rzeczywistości jednak takie sytuacje się nie zdarzają, a odbiorniki najczęściej podłączane do falowników mają charakter silnie indukcyjny. W takim przypadku diody okazują się niezbędne, a do komutacji dochodzi przy każdym wyłączeniu łącznika sterowanego. Z uwagi na fakt, że odbiornik jest elementem silnie indukcyjnym to w momencie w którym ścieżka przepływu prądu tego odbiornika zostanie przerwana otwarciem łącznika sterowanego, dzięki właściwościom elementu indukcyjnego (odbiornika), napięcie na nim zmieni się skokowo przyjmując wartość przeciwną. Wskutek tego zjawiska prąd odbiornika utrzyma dotychczasowy kierunek, a obwód zamknie się przez diodę dołączoną równolegle do drugiego tranzystora.



Rys. 1. Topologia falownika półmostkowego.

Przykładowo, jeśli w momencie gdy przewodzi łącznik Q_1 , jego sygnał sterujący zmieni swoją wartość na 0, a łącznik otwierając się przerwie dotychczasową ścieżkę przepływu prądu to dzięki energii zgromadzonej w polu magnetycznym elementu indukcyjnego zlokalizowanego w odbiorniku, dotychczasowy kierunek przepływu prądu przez odbiornik zostanie podtrzymany. Napięcie na zaciskach odbiornika zmieni znak polaryzując diodę równoległą do łącznika Q_2 w kierunku przewodzenia. Prąd będzie płynąć przez wspomnianą diodę do chwili załączenia drugiego tranzystora lub do momentu, w którym prąd płynący przez odbiornik zaniknie. W czasie przewodzenia diody energia zgromadzona w polu magnetycznym odbiornika jest częściowo zwracana do źródła, co tłumaczy dlaczego diody te nazywamy diodami zwrotnymi.

Odpowiedni dobór czasu trwania stanów, w których poszczególne tranzystory są załączone lub wyłączone pozwala ukształtować przemienny przebieg napięcia wyjściowego o amplitudzie odpowiadającej wymaganiom dołączonego odbiornika. Po zastosowaniu filtra dolnoprzepustowego przemienny przebieg prostokątny przyjmuje kształt zbliżony do fali sinusoidalnej.

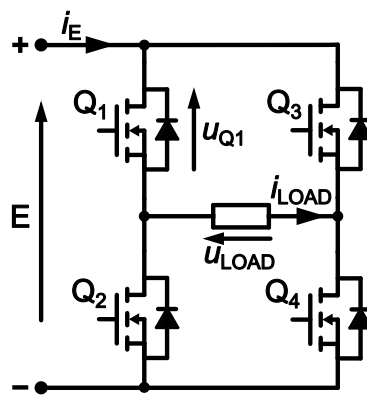
Istotną wadą tej topologii jest to, że amplituda napięcia wyjściowego jest dwukrotnie mniejsza niż napięcie źródła zasilającego ten falownik. Niekorzystnie przedstawia się również poziom stresów napięciowych występujących na łącznikach. Mimo faktu, iż amplituda napięcia wyjściowego jest równa tylko połowie wartości napięcia zasilającego to wartości naprężeń napięciowych występujących na łącznikach sięgają pełnej wartości napięcia zasilającego inwerter. Właściwość ta implikuje konieczność stosowania łączników charakteryzujących się wyższymi dopuszczalnymi wartościami napięć przy których mogą pracować, co skutkuje wzrostem ceny całego urządzenia.

2.1.2 Falownik mostkowy

Najbardziej rozpowszechnionym typem jednofazowych falowników napięcia jest układ mostkowy, który przedstawiono na rys. 2. Obwód mocy tego typu inwerterów zbudowany jest z czterech łączników aktywnych, rozlokowanych w dwóch gałęziach połączonych równolegle ze źródłem napięcia zasilającego falownik. Łączniki, w każdej z nich są ze sobą połączone szeregowo, a pomiędzy punkty środkowe tych gałęzi wpięty jest odbiornik, tworzący tzw. gałąź poprzeczną mostka.

Istnieje wiele metod sterowania falowników mostkowych, jednak niezależnie od tego jaka metoda sterowania zostanie wykorzystana, napięcie na wyjściu tego układu może przyjąć jedną z trzech wartości: E , $-E$ lub 0 . Jeżeli jednocześnie załączone zostaną łączniki Q_1 oraz Q_4 to na odbiornik zostanie podane napięcie o wartości E . W przypadku, gdy układ sterujący jednocześnie wysteruje łączniki Q_2 oraz Q_3 to na odbiorniku odłoży się napięcie o wartości $-E$. Zero na wyjściu omawianego układu pojawi się, gdy nie zostanie wysterowany żaden łącznik lub jednocześnie zostaną uruchomione dwa łączniki połączone z ujemnym bądź dodatnim biegunem źródła napięcia zasilającego falownik (Q_1 i Q_3 lub Q_2 i Q_4).

W przedstawionej topologii oprócz łączników sterowanych występują również diody, połączone równolegle z każdym łącznikiem aktywnym. Ich funkcja uwidacznia się w momencie, gdy do falownika zostanie podłączony odbiornik o charakterze indukcyjnym, a łączniki aktywne przerwą dotychczasową ścieżkę przepływu prądu tego odbiornika. W takiej sytuacji dochodzi do komutacji pomiędzy uprzednio przewodzącymi łącznikami, a diodami zlokalizowanymi przy pozostałych dwóch łącznikach. Skutkiem przerywania prądu przepływającego przez element indukcyjny jest zmiana znaku napięcia na zaciskach odbiornika, co pozwala utrzymać dotychczasowy kierunek przepływu prądu odbiornika. Zmian zwrotu napięcia elementu indukcyjnego pozwala na spolaryzowanie wspomnianych diod w kierunku przewodzenia, co skutkuje zestawieniem nowej ścieżki przepływu prądu odbiornika. Diody przewodzą do momentu załączenia drugiej pary łączników, a przez krótki czas w którym nie przewodzi żaden z łączników aktywnych (czas martwy) energia za ich pośrednictwem jest zwracana do źródła zasilającego falownik.



Rys. 2. Topologia falownika mostkowego.

Przykładowo, jeśli w momencie gdy przewodzi łącznik Q_1 oraz Q_4 , jego sygnał sterujący zmieni swoją wartość na 0, a łącznik otwierając się przerwie dotychczasową ścieżkę przepływu prądu to dzięki energii zgromadzonej w polu magnetycznym elementu indukcyjnego zlokalizowanego w odbiorniku, dotychczasowy kierunek prądu przepływającego przez odbiornik zostanie podtrzymany. Napięcie na zaciskach odbiornika zmieni znak polaryzując diody równoległe do łącznika Q_2 oraz Q_3 w kierunku przewodzenia. Prąd będzie płynąć przez wspomniane diody do chwili załączenia drugiej pary tranzystorów lub do momentu, jego zaniku. W czasie przewodzenia diod, energia zgromadzona w polu magnetycznym odbiornika jest częściowo zwracana do źródła, co podobnie jak w przypadku falownika półmostkowego tłumaczy dlaczego diody te nazywamy diodami zwrotnymi.

Odpowiednia kombinacja czasu trwania poszczególnych przełączeń pozwala stworzyć z tych trzech możliwych do osiągnięcia wartości napięcia wyjściowego falownika modulowany przebieg napięcia, który po odpowiednim odfiltrowaniu jest zbliżony kształtem do fali sinusoidalnej, a jego wartość skuteczna odpowiada wymaganiom stawianym przez podłączony odbiornik. Podobnie jak w przypadku falownika półmostkowego, w tym układzie również należy zadbać o zapewnienie odpowiednio długiego czasu martwego tak, aby zapobiec powstaniu zwarc skrośnych w gałęziach mostka.

Istotną zaletą tej topologii, w porównaniu do układu półmostkowego jest to, że amplituda napięcia wyjściowego falownika może osiągnąć w przybliżeniu wartość równą napięciu zasilającemu falownik, co stanowi wartość dwukrotnie wyższą niż miało to miejsce w przypadku poprzednio omawianego układu. Oznacza to, że falownik mostkowy może być zasilany ze źródła napięcia o wartości dwukrotnie niższej niż falownik półmostkowy generując jednocześnie napięcie wyjściowe o takich samych parametrach napięciowych.

2.2 Metody sterowania autonomicznych falowników jednofazowych

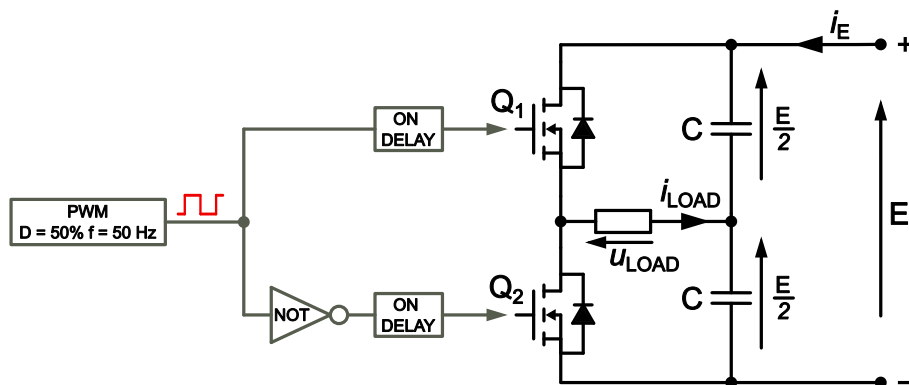
Falowniki napięcia są urządzeniami służącymi do przekształcania energii prądu stałego w energię prądu przemiennego, zapewniając przy tym optymalne dla odbiornika wartości chwilowe napięć i prądów.

2.2.1 Metoda półokresowa

Jedną z najprostszych metod sterowania falowników mostkowych i półmostkowych jest metoda sterowania półokresowego. Zgodnie z założeniami tej metody do przełączeń w obwodzie mocy falownika dochodzi co pół okresu przebiegu napięcia generowanego przez inwerter. Sterownik dokonuje przełączeń łączników z częstotliwością dwukrotnie wyższą niż częstotliwość napięcia wyjściowego falownika, generując tym samym na jego wyjściu przemienny sygnał prostokątny.

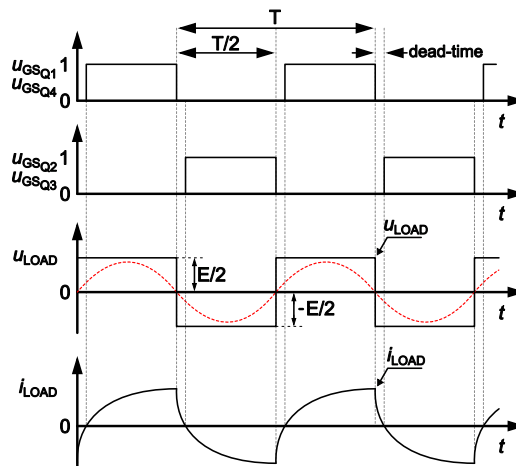
2.2.1.1 Falownik półmostkowy z przewodzeniem półokresowym

Na rysunku 3 przedstawiono uproszczony schemat układu kontrolera falownika półmostkowego, realizującego założenia metody sterowania półokresowego. Prezentowany układ składa się z generatora przebiegu prostokątnego o współczynniku wypełnienia $D = 50\%$ oraz częstotliwości odpowiadającej oczekiwanej częstotliwości przebiegu wyjściowego. W falowniku półmostkowym łączniki sterowane są naprzemiennie. Łącznik Q_1 wysterylizowany jest sygnałem pochodzącym z generatora. Zanim sygnał ten dotrze do tego łącznika, każde z jego zboczy narastających jest opóźniane o zdefiniowany czas. Zabieg ten ma na celu wprowadzenie do układu sterowania tzw. czasu martwego, który pozwoli na skuteczne wyłączenie łącznika dotychczas przewodzącego (Q_2) i zabezpieczy układ przed powstaniem zwarcia skrośnego na skutek zbyt wczesnego załączenia łącznika Q_1 . Łączniki Q_2 jest natomiast sterowany sygnałem, który powstał w wyniku zanegowania sygnału generatora. Również w tym przypadku, narastające zbocza sygnału zanim dotrą do łącznika podlegają opóźnieniu realizowanemu przy pomocy elementu "ONDELAY".



Rys. 3. Falownik półmostkowy wraz z kontrolerem realizującym założenia metody sterowania półokresowego.

Zgodnie z założeniami metody sterowania półokresowego, łączniki aktywne falownika przełączane są z częstotliwością odpowiadającą częstotliwości oczekiwanego przebiegu napięcia wyjściowego inwertera. Przełączenia w strukturze układu dokonywane są tak, aby pomiędzy jego zaciskami wyjściowymi otrzymać przemienny przebieg prostokątny, którego amplituda w przypadku falownika półmostkowego jest w przybliżeniu równa połowie wartości napięcia źródła, zasilającego układ. Stosowny zestaw przebiegów napięć i prądów charakterystycznych dla tego rodzaju falownika, sterowanego zgodnie z założeniami metody półokresowej przedstawiono na rys. 4.



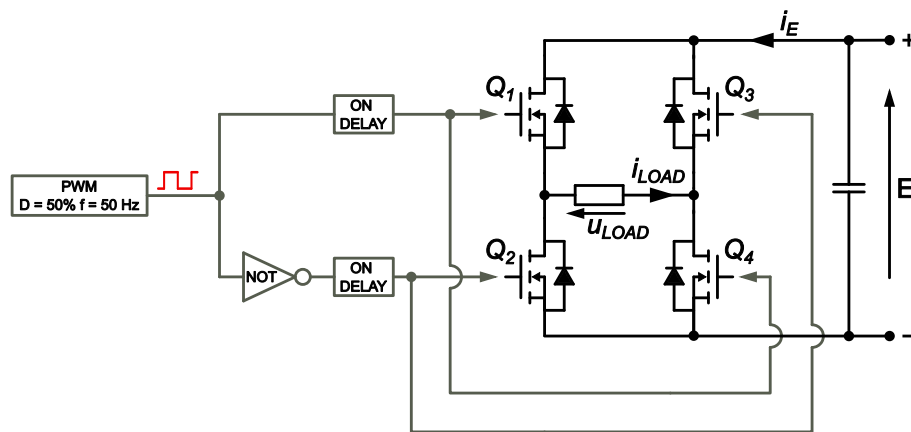
Rys. 4. Metoda sterowania półokresowego - przebiegi impulsów sterujących oraz napięcia i prądu wyjściowego falownika półmostkowego.

Istotną wadą tej metody sterowania jest to, że wartość napięcia wyjściowego falownika może być zmieniana jedynie przez zmianę napięcia zasilającego falownik. Przebieg napięcia wyjściowego falownika może być rozłożony w szereg Fouriera. Po przeprowadzeniu odpowiednich przeliczeń okaże się, że wartość skuteczna podstawowej harmonicznej napięcia generowanego przez falownik to:

$$U_{LOAD} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} E \approx 0.45E \quad (2.1)$$

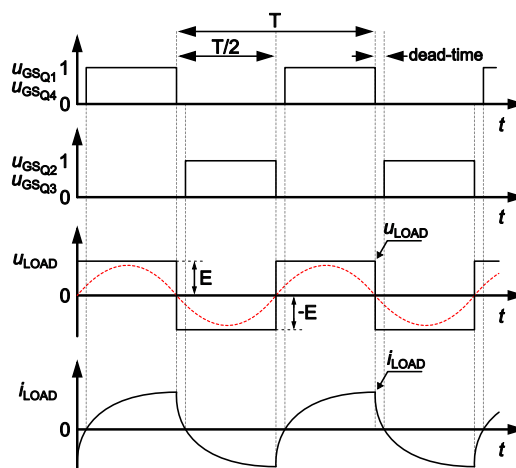
2.2.1.2 Falownik mostkowy z przewodzeniem półokresowym

Na rysunku 5 przedstawiono uproszczony schemat układu kontrolera falownika mostkowego, realizującego założenia metody sterowania półokresowego. Prezentowany układ składa się z generatora przebiegu prostokątnego o współczynniku wypełnienia $D = 50\%$ oraz częstotliwości odpowiadającej oczekiwanej częstotliwości przebiegu wyjściowego. W układzie mostkowym łączniki sterowane są parami. Łączniki Q_1 oraz Q_4 ysterowywane są jednocześnie sygnałem pochodzącym z generatora. Zanim sygnał ten dotrze do łączników, każde z jego zboczy narastających jest opóźniane o zdefiniowany czas. Zabieg ten ma na celu wprowadzenie do układu sterowania tzw. czasu martwego, który pozwoli na skuteczne wyłączenie łącznika dotychczas przewodzącego i zabezpieczy układ przed powstaniem zwarcia skrośnego na skutek zbyt wczesnego załączenia elementów Q_1 oraz Q_4 . Łączniki Q_2 oraz Q_3 są natomiast sterowane sygnałem, który powstał w wyniku zanegowania sygnału generatora. Również w tym przypadku, narastające zbocza sygnału zanim dotrą do łączników podlegają opóźnieniu realizowanemu przy pomocy elementu "ONDELAY".



Rys. 5. Falownik mostkowy wraz z kontrolerem realizującym założenia metody sterowania półokresowego.

Zgodnie z założeniami metody sterowania półokresowego, łączniki aktywne falownika przełączane są z częstotliwością odpowiadającą częstotliwości oczekiwanego przebiegu napięcia wyjściowego inwertera. Przełączenia w strukturze układu dokonywane są tak, aby pomiędzy jego zaciskami wyjściowymi otrzymać przemienny przebieg prostokątny, którego amplituda w przypadku falownika mostkowego jest w przybliżeniu równa wartości



Rys. 6. Metoda sterowania półokresowego - przebiegi impulsów sterujących oraz napięcia i prądu wyjściowego falownika mostkowego.

napięcia źródła, zasilającego układ. Stosowny zestaw przebiegów napięć i prądów charakterystycznych dla tego rodzaju falownika, sterowanego zgodnie z założeniami metody półokresowej przedstawiono na rys. 6.

Podobnie jak w przypadku falownika półmostkowego, istotną wadą tej metody sterowania jest to, że wartość napięcia wyjściowego falownika może być zmieniana jedynie przez zmianę napięcia zasilającego falownik. Przebieg napięcia wyjściowego falownika może być rozłożony w szereg Fouriera.

Po przeprowadzeniu odpowiednich przeliczeń okaże się, że wartość skuteczna podstawowej harmonicznej napięcia generowanego przez falownik to:

$$U_{LOAD} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E \approx 0.9E \quad (2.2)$$

2.2.2 Metoda modulacji szerokości pojedynczego impulsu w półokresie

Metoda modulacji szerokości pojedynczego impulsu w półokresie jest stosowana do sterowania falowników mostkowych. Głównym założeniem tej metody jest to, że łączniki obu gałęzi mostka są przełączane z tą samą częstotliwością, ale moment przełączenia łączników w jednej z tych gałęzi jest opóźniony. Innymi słowy, sygnały sterujące pracą łączników są względem siebie przesunięte w fazie o czas definiowany za pomocą poniższego wzoru:

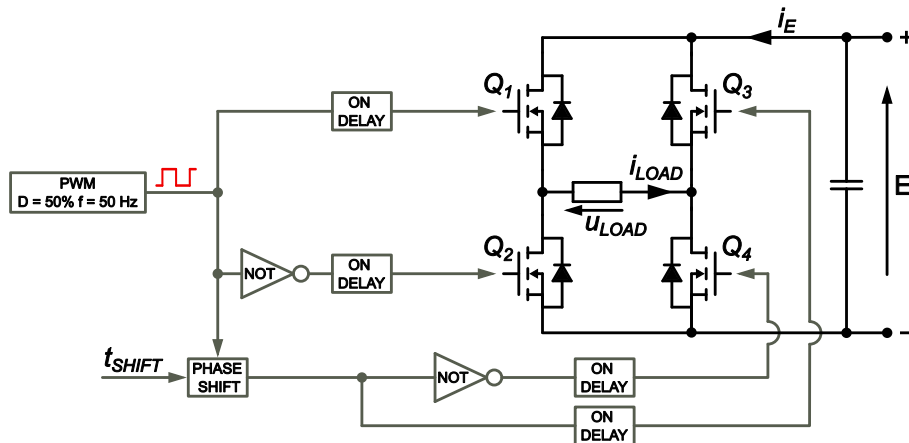
$$t_{SHIFT} = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{\alpha}{2\pi} T \quad (2.3)$$

gdzie:

T - okres napięcia wyjściowego,

α - kąt opóźnienia dobierany przez użytkownika lub układ regulacji z zakresu: $0 \leq \alpha \leq \pi$

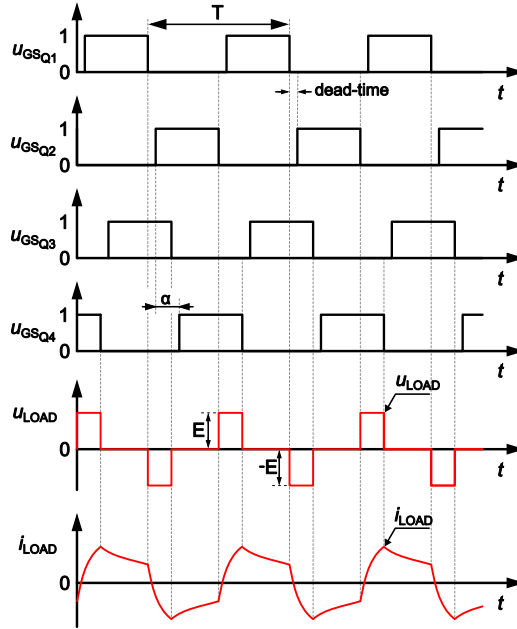
Na rysunku 7 przedstawiono uproszczony schemat układu sterowania falownika mostkowego pozwalający na realizację przełączeń zgodnie z założeniami metody, w której modulacji podlega szerokość pojedynczego impulsu w czasie jednego półokresu sygnału wyjściowego inwertera. Podstawowym elementem tego kontrolera jest generator dostarczający sygnał prostokątny o współczynniku wypełnienia $D = 50\%$ oraz częstotliwości zgodnej z oczekiwaną częstotliwością sygnału wyjściowego falownika. Wygenerowany sygnał trafia do łączników znajdujących się w pierwszej gałęzi mostka (Q_1 oraz Q_2) przechodząc wcześniej przez element odwracający fazę sygnału sterującego, tak aby łączniki w tej gałęzi załączały się naprzemiennie. W tej części układu sterowania występują również elementy "ONDELAY" opóźniające każde zbocze narastające sygnałów sterujących pracą łączników energoelektronicznych. Zabieg ten wprowadza do układu sterowania tzw. czas martwy, który pozwala skutecznie zabezpieczyć falownik przed uszkodzeniem wskutek powstania zwarć skośnych w gałęziach mostka. Czas ten musi być tak dobrany aby zapewnić aktualnie przewodzącym łącznikom możliwość pełnego wyłączenia, zanim do drugiego łącznika w gałęzi dotrze sygnał sterujący, wymuszający jego załączenie. Łączniki Q_3 oraz Q_4 znajdujące się w drugiej gałęzi mostka są wysterowywane za pomocą sygnałów, opóźnionych o czas t_{SHIFT} względem sygnałów sterujących łącznikami ułożonymi w pierwszej gałęzi. Funkcje pozostałych elementów, jakie znajdują się w tej części kontrolera są takie same jak w przypadku elementów doprowadzających sygnały sterujące do łączników Q_1 oraz Q_2 . Sygnał t_{SHIFT} dostarczany jest do sterownika z zewnątrz przez użytkownika lub jest on generowany przez sam kontroler w sytuacji, gdy układ pracuje w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego. Sterownik utrzymuje wtedy zadane parametry prądowo-napięciowe sygnału wyjściowego układu.



Rys. 7. Falownik mostkowy wraz z kontrolerem realizującym założenia metody modulacji pojedynczego impulsu w półokresie napięcia wyjściowego inwertera.

Zestaw przebiegów charakterystycznych dla metody modulacji szerokości pojedynczego impulsu w jednym półokresie napięcia wyjściowego falownika mostkowego przedstawiono na rysunku 8. Tak sterowany falownik mostkowy pozwala na regulację wartości skutecznej podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego przez zmianę kąta przesunięcia fazowego α pomiędzy sygnałami sterującymi pracą łączników w obu gałęziach. Korzystając z szeregu Fouriera można zapisać wzór pozwalający wyliczyć wartość skuteczną podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego tak sterowanego falownika:

$$U_{LOAD}(t_{SHIFT}) = 0.9 \cdot E \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot t_{SHIFT}}{T}\right) \quad dla \quad 0 \leq t_{SHIFT} \leq \pi \quad (2.4)$$

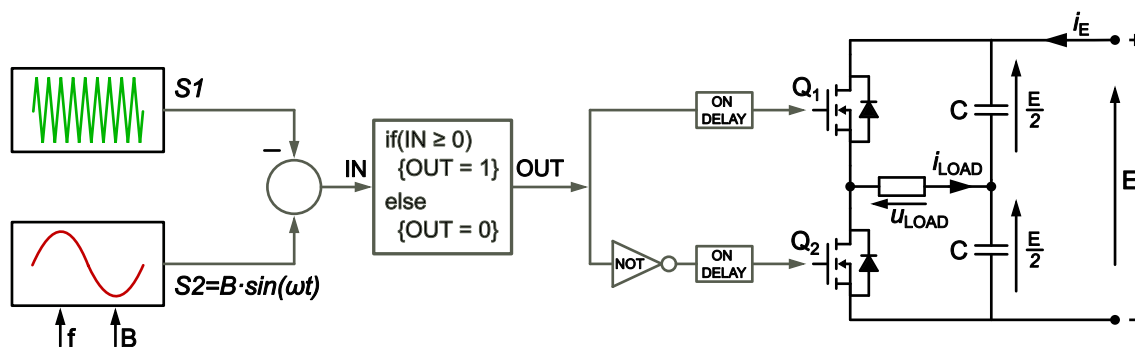


Rys. 8. Metoda modulacji szerokości pojedynczego impulsu w półokresie napięcia wyjściowego - przebiegi impulsów sterujących oraz napięcia i prądu wyjściowego falownika mostkowego.

Charakterystyczną wartością kąta przesunięcia fazowego pomiędzy sygnałami sterującymi jest kąt wynoszący $\alpha = \pi$. Jeżeli sygnały sterujące łącznikami w gałęziach mostka zostaną przesunięte względem siebie dokładnie o pół okresu sygnału wyjściowego falownika, to spowoduje to wejście inwertera w stan przewodzenia półokresowego.

2.2.3 Komparacyjna metoda sinusoidalnej modulacji szerokości impulsów (PWM)

Stany przewodzenia łączników energoelektronicznych w tej metodzie są wyznaczane na podstawie porównania dwóch sygnałów pomocniczych. Pierwszy sygnał pomocniczy S_1 to tzw. sygnał nośny. Jest to sygnał okresowy, którego wartość zmienia się w sposób liniowy w czasie jego całego okresu osiągając w szczycie wartość równą A . Zwykle sygnał ten jest sygnałem trójkątnym, którego częstotliwość f_1 jest wielokrotnie wyższa od żądanej częstotliwości napięcia wyjściowego falownika. Drugi sygnał pomocniczy S_2 to najczęściej przemienny sygnał sinusoidalny, którego wartość chwilowa jest proporcjonalna do wartości chwilowej napięcia wyjściowego inwertera. Sygnał ten, poza podstawowym przemiennym przebiegiem sinusoidalnym, może przyjmować także kształt trapezoidalny a w szczególnych aplikacjach znajduje tutaj również zastosowanie sygnał odkształcony, będący sumą przebiegów sinusoidalnych o różnej częstotliwości. Częstotliwość f_2 przebiegu modulującego odpowiada oczekiwanej częstotliwości napięcia wyjściowego falownika. Wartość szczytowa tego sygnału B , decyduje o amplitudzie pierwszej harmonicznej napięcia wyjściowego inwertera. Dokładność odtworzenia zadanej sygnałem S_2 wartości chwilowej napięcia wyjściowego inwertera u_{LOAD} , a w szczególności wartość jego podstawowej i wyższych harmonicznych zależy od współczynnika głębokości modulacji amplitudy $m_a = \frac{B}{A}$, współczynnika głębokości modulacji częstotliwości $m_f = \frac{f_1}{f_2}$ oraz kształtu sygnałów pomocniczych S_1 i S_2 . W większość praktycznych rozwiązań stosuje się synchroniczną modulację PWM, czyli taką, przy której współczynnik modulacji częstotliwościowej jest liczbą całkowitą. Jeśli jednak układ pracuje ze stałą częstotliwością fali nośnej (impulsowania) a zmienia się częstotliwość przebiegu referencyjnego to mówimy wówczas o asynchronicznej modulacji PWM. Co ważne, przy małych wartościach współczynnika głębokości modulacji częstotliwościowej, asynchroniczna modulacja PWM wprowadza niesymetrię do przebiegów napięć falownika. Zjawisko to staje się pomijalne, gdy wartość współczynnika głębokości modulacji przybiera wartości większe od 21.

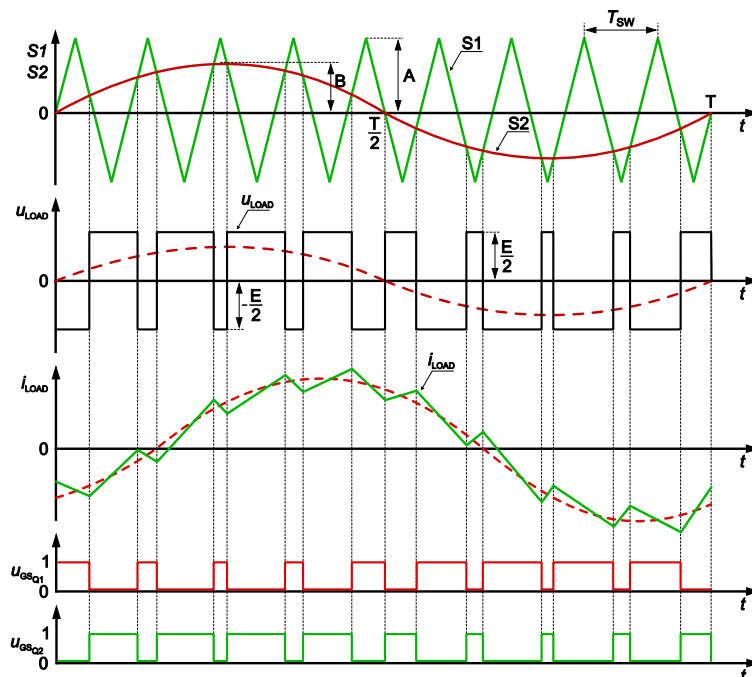


Rys. 9. Falownik półmostkowy wraz z kontrolerem realizującym założenia dwubiegunowej metody modulacji PWM

2.2.3.1 Metoda PWM z modulacją dwubiegunową

Na rysunku 9 przedstawiono falownik półmostkowy połączony z układem modulatora realizującego koncepcję sterowania tego inwertera zgodną z założeniami metody dwubiegunowej modulacji PWM. Jak wspomniano powyżej, w metodzie komparacyjnej występują dwa sygnały pomocnicze: sygnał trójkątny nazywany sygnałem nośnym oraz sygnał referencyjny, będący najczęściej sygnałem sinusoidalnym. Przedstawiony na rys. 9 modulator ciągle porównuje oba te sygnały, ustawiając stan wysoki na swoim wyjściu za każdym razem, gdy wartość chwilowa sygnału nośnego S_1 przewyższa wartość chwilową sygnału modulującego S_2 . Wyjście modulatora przyjmuje stan niski, za każdym razem gdy, wartość chwilowa przebiegu modulującego jest wyższa od wartości chwilowej przebiegu nośnego. Modulowany sygnał logiczny trafia z wyjścia komparatora na łączniki aktywne półmostka. Łącznik Q_1 sterowany jest przez komparator, dostarczający sygnał sterujący wprost do tego łącznika. Sytuacja wygląda nieco inaczej w przypadku łącznika Q_2 . Tym razem źródłem sygnału sterującego dla tego łącznika również jest wyjście komparatora, jednak zanim sygnał sterujący dotrze do łącznika podlega dodatkowo negacji. W celu zabezpieczenia układu przed powstaniem zwarcia skrośnego w gałęzi łączników, modulator za pomocą elementów "ONDELAY" wprowadza do sygnałów sterujących pracę łączników tzw. czas martwy. Wskutek zastosowania tych elementów, każde zbocze narastające sygnałów sterujących zostaje opóźnione o wspomniany czas martwy (eng. *dead-time*). Wprowadzenie do schematu sterowania falownika, krótkiego czasu kiedy żaden z sygnałów sterujących łącznikami nie przyjmuje stanu wysokiego gwarantuje całkowite wyłączenie uprzednio przewodzącego łącznika przed załączeniem kolejnego.

Na rysunku 10 przedstawiono zasadę kształtowania przebiegu napięcia wyjściowego falownika jednogłównego, zasilanego napięciem o wartości E , podzielonym po równo, co do wartości, pomiędzy dolny i górny



Rys. 10. Falownik półmostkowy wraz z kontrolerem realizującym założenia dwubiegunowej metody modulacji PWM - przebiegi impulsów sterujących oraz napięcia i prądu wyjściowego falownika półmostkowego.

kondensator wejściowego dzielnika pojemnościowego. Przełączenia łączników następują w chwilach zrównania się wartości chwilowych sygnałów pomocniczych S_1 i S_2 . Oba łączniki falownika przełączane są naprzemiennie, doprowadzając do odbiornika w każdym okresie impulsowania $T_i = \frac{1}{f_i}$ napięcie prostokątne o wartości $\frac{E}{2}$ oraz $-\frac{E}{2}$. Przy sterowaniu falownika półmostkowego z wykorzystaniem metody modulacji szerokości impulsu można wpływać na wartość amplitudy jego podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego zmieniając wartość współczynnika głębokości modulacji amplitudowej. Dla zakresu zmian współczynnika głębokości modulacji amplitudy z zakresu $0 \div 1$ wartość podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego falownika jednogłęziowego zmienia się w sposób liniowy zgodnie ze wzorem:

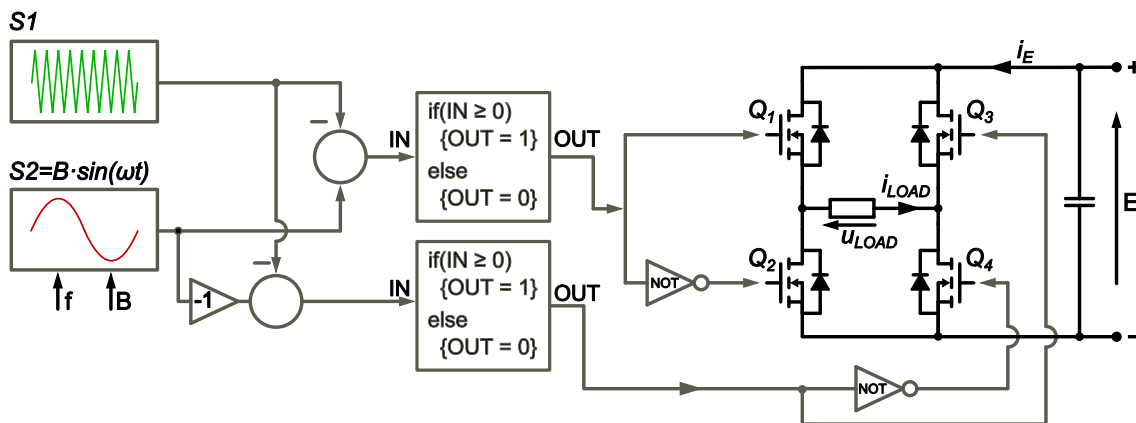
$$U_{LOAD_MAX} = m_a \cdot \frac{E}{2} \quad (2.5)$$

Dla wartości współczynnika $1 \leq m_a \leq 3$ powyższa zależność przestaje być prawdziwa, a zależność wartość amplitudy pierwszej harmonicznej napięcia wyjściowego falownika staje się nieliniowa. Gdy współczynnik głębokości modulacji amplitudowej osiąga wartość większą niż trzy, zdolność inwertera do modulacji napięcia wyjściowego zanika, a sam falownik wchodzi w tryb przewodzenia półokresowego.

2.2.3.2 Metoda PWM z modulacją jednobiegunową

Na rysunku 11 przedstawiono falownik mostkowy połączony z układem modulatora realizującego koncepcję sterowania tego inwertera zgodną z założeniami metody jednobiegunowej modulacji PWM. Jak wspomniano powyżej, w metodzie komparacyjnej występują dwa sygnały pomocnicze: sygnał trójkątny nazywany sygnałem nośnym oraz sygnał referencyjny, będący najczęściej sygnałem sinusoidalnym. W przypadku unipolarnej modulacji PWM występują dwa sygnały referencyjne, z których jeden stanowi odwrotność drugiego. Każdy z tych sygnałów wykorzystywany jest przez modulator do generowania impulsów sterujących łącznikami znajdującymi się w jednej z dwóch gałęzi mostka. Przedstawiony na rys. 11 modulator składa się z dwóch komparatorów, które ciągle porównują oba sygnały referencyjne z sygnałem nośnym. Każdy z tych dwóch komparatorów steruje łącznikami znajdującymi się w innej gałęzi mostka. Stan na wyjściu komparatorów zmienia się za każdym razem, gdy wartości chwilowe sygnału referencyjnego oraz sygnału nośnego się ze sobą zrównają. W sytuacji, gdy sygnał nośny S_1 lub $-S_1$ przyjmuje wartości wyższe od wartości przyjmowanych w tym samym czasie przez sygnał referencyjny, to na wyjściu komparatora utrzymuje się stan wysoki. Modulowany sygnał logiczny trafia z wyjścia komparatora na łączniki aktywne mostka. Elementy sterowalne Q_1 oraz Q_2 są kontrolowane przez jeden komparator, natomiast Q_3 oraz Q_4 przez drugi. Łączniki Q_1 i Q_3 są sterowane bezpośrednio przez sygnały pojawiające się na wyjściach komparatorów. Sytuacja wygląda nieco inaczej w przypadku łączników Q_2 oraz Q_4 . W tym przypadku sygnały sterujące również pochodzą z komparatorów, jednak, zanim sygnały te dotrą do łączników, podlegają dodatkowo negacji. W celu zabezpieczenia układu przed powstaniem zwarcia skrośnego w gałęzi łączników, modulator za pomocą elementów "ONDELAY" wprowadza do sygnałów sterujących pracą łączników tzw. czas martwy. Wskutek zastosowania tych elementów, każde zbocze narastające sygnałów sterujących zostaje opóźnione o wspomniany czas martwy (*eng. dead-time*). Wprowadzenie do schematu sterowania falownika, krótkiego czasu kiedy żaden z sygnałów sterujących łącznikami nie przyjmuje stanu wysokiego gwarantuje całkowite wyłączenie uprzednio przewodzącego łącznika przed załączeniem kolejnego.

Na rysunku 12 przedstawiono zasadę kształtowania przebiegu napięcia wyjściowego falownika mostkowego, zasilanego napięciem o wartości E zgodną z metodą unipolarnej modulacji PWM. Przełączenia łączników następują w chwilach zrównania się wartości chwilowych sygnałów pomocniczych S_1 lub $-S_1$ z sygnałem nośnym S_2 .



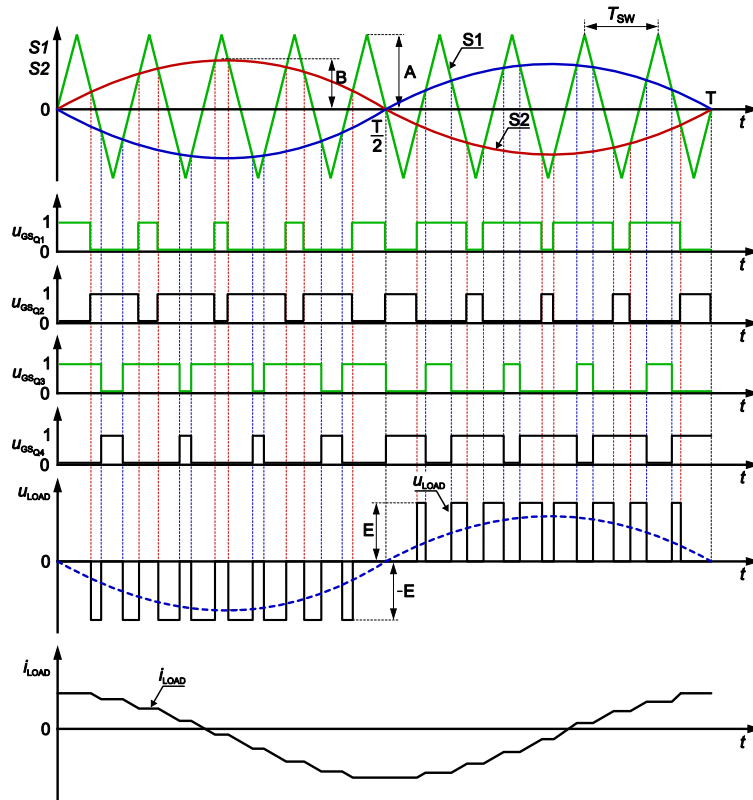
Rys. 11. Falownik mostkowy wraz z kontrolerem realizującym założenia jednobiegunowej metody modulacji PWM

Łączniki znajdujące się w mostku przełączane są w taki sposób, że w sytuacji, gdy przebieg pierwszej harmonicznej napięcia wyjściowego falownika przyjmuje wartości dodatnie (dodatni półokres), to na zaciski odbiornika trafia napięcie o przebiegu prostokątnym zmieniającym swoją wartość pomiędzy wartością 0 oraz E . W przypadku, gdy pierwsza harmoniczna tego napięcia przyjmuje wartości mniejsze od zera (ujemny półokres), to na zaciski odbiornika trafia napięcie o przebiegu prostokątnym zmieniającym swoją wartość pomiędzy wartością 0 oraz $-E$. Analizując przebiegi przedstawione na rys. 12 można zauważyć, że zastosowanie tej metody sterowania gwarantuje uzyskanie jednobiegunowej modulacji przebiegu wyjściowego falownika, ale również dwukrotne zwiększenie częstotliwości pojawiania się pulsów w napięciu wyjściowym inwertera.

Tak samo jak w przypadku falownika półmostkowego, również w falowniku mostkowym stosując metodę modulacji szerokości impulsu można wpływać na wartość amplitudy jego podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego zmieniając wyłącznie wartość współczynnika głębokości modulacji amplitudowej. Dla zakresu zmian współczynnika głębokości modulacji amplitudy z zakresu $0 \div 1$ wartość podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego falownika jednogłęziowego zmienia się w sposób liniowy zgodnie ze wzorem:

$$U_{LOAD_MAX} = m_a \cdot E \quad (2.6)$$

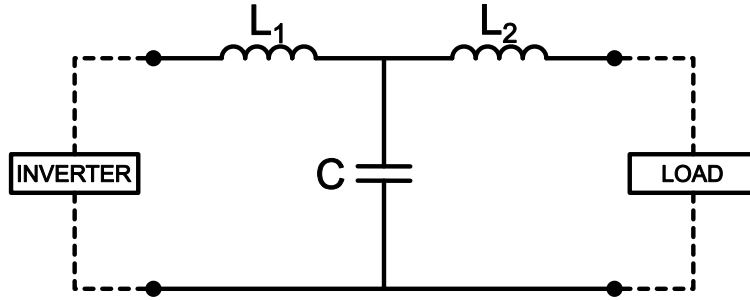
Podobnie jak w przypadku falownika jednogłęziowego, dla wartości współczynnika $1 \leq m_a \leq 3$ powyższa zależność przestaje być prawdziwa, a zależność wartości amplitudy pierwszej harmonicznej napięcia wyjściowego falownika staje się nieliniowa. Gdy współczynnik głębokości modulacji amplitudowej osiąga wartość większą niż trzy ($m_a > 3$), zdolność inwertera do modulacji napięcia wyjściowego zanika, a sam falownik wchodzi w tryb przewodzenia półokresowego.



Rys. 12. Falownik mostkowy wraz z kontrolerem realizującym założenia jednobiegunowej metody modulacji PWM - przebiegi impulsów sterujących oraz napięcia i prądu wyjściowego falownika mostkowego.

2.3 Dobór filtra wyjściowego dla falownika jednofazowego

W przypadku, gdy do falownika (mostka) dołączony jest odbiornik o charakterze rezystancyjnym, wówczas kształt napięcia wyjściowego falownika przybiera przebieg prostokątny. Wartości tego przebiegu zmieniają się pomiędzy zerem, a wartością napięcia zasilającego falownik, lub w przypadku falowników półmostkowych, połową tego napięcia. Aby na wyjściu inwertera otrzymać przebieg sinusoidalny należy zastosować odpowiedni filtr wyjściowy. Najczęściej stosowanymi filtrami w takiej aplikacji są filtry LC lub LLC. Głównym zadaniem tego rodzaju filtrów jest usunięcie z przebiegu napięcia wyjściowego inwertera zakłóceń w postaci wyższych harmonicznych pochodzących od częstotliwości kluczkowania łączników mostka pozostawiając tylko przebieg



Rys. 13. Schemat filtra dolnoprzepustowego typu LLC

podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego falownika. Schemat filtra dolnoprzepustowego przedstawiono na rysunku 13.

Projektując filtr dolnoprzepustowy, który będzie współpracował z falownikiem należy wziąć pod uwagę warunki pracy układu takie jak:

- Wartość napięcia zasilającego falownik E ,
- Znamionowe napięcie wyjściowe projektowanego falownika U_{LOAD} ,
- Znamionową częstotliwość napięcia wyjściowego falownika f_{OUT} ,
- Znamionową moc pozorną falownika S_{OUT} ,
- Częstotliwość przełączeń łączników f_{SW} ,
- Dopuszczalny poziom tętnień prądu dławika $I_{Ripple} = 20\%$.

2.3.1 Dobór pojemności kondensatora filtracyjnego

Dobierając pojemność kondensatora filtrującego napięcie wyjściowe falownika należy się kierować zasadą, która mówi, iż pojemność tego kondensatora powinna być dobrana w taki sposób, aby moc bierna jaka wydzieli się na tym elemencie stanowiła 5% znamionowej mocy pozornej inwertera. Pojemność tego kondensatora wyznacza się na podstawie poniższych zależności:

$$Q_{CAP} = \frac{U_{LOAD}^2}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{U_{LOAD}^2}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{OUT} \cdot C}} \quad (2.7)$$

Uwzględniając wcześniej podaną zasadę, mówiącą o zależności mocy biernej pobieranej przez kondensator filtrujący od znamionowej mocy pozornej falownika otrzymuje się wzór na wymaganą pojemność kondensatora filtrującego:

$$C = \frac{0.05 \cdot S_{OUT}}{U_{LOAD}^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{OUT}} \quad (2.8)$$

2.3.2 Dobór indukcyjności dławika filtrującego

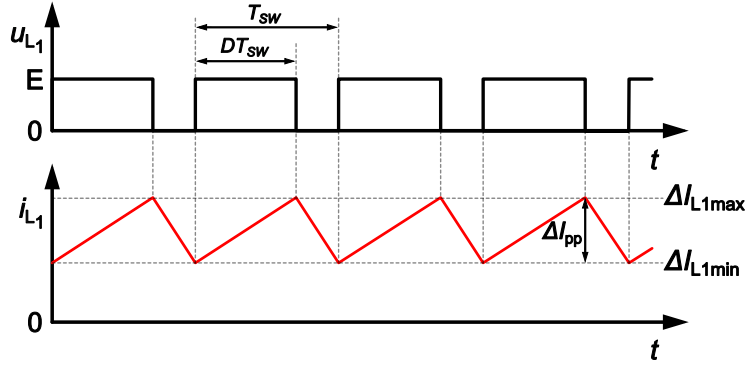
Dobierając indukcyjność dławika filtrującego dla filtra LLC należy uwzględnić dwa warunki:

- Tętnienia prądu dławika L1 nie powinny przekraczać 20% znamionowego prądu wyjściowego falownika ,
- Sumaryczny spadek napięcia na dławikach L_1 oraz L_2 nie powinien przekroczyć 10% napięcia wyjściowego falownika.

2.3.2.1 Dobór indukcyjności dławika ze względu na poziom tętnień prądu

Aby spełnić pierwszy z postawionych warunków należy w pierwszej kolejności przeanalizować przebieg zmian prądu i napięcia na indukcyjności L_1 . Odpowiednie przebiegi przedstawiono na rysunku 14. Z teorii elektrotechniki wiadomo, że napięcie i prąd każdego dławika są ze sobą powiązane następującą zależnością:

$$u_L = L \frac{di}{dt} \quad (2.9)$$



Rys. 14. Przebiegi napięcia i prądu dławika filtru dolnoprzepustowego falownika.

Uwzględniając w równaniu 2.9 charakterystyczne parametry zaznaczone na rysunku 14 otrzymujemy zależność opisującą poziom tętnień prądu dławika L_1 :

$$\Delta I_{Lpp} = \frac{D \cdot T_{SW} \cdot (E - U_{OUT})}{L_1} \quad (2.10)$$

Dla każdego inwertera o sinusoidalnym przebiegu napięcia wyjściowego prawdziwa jest zależność opisująca zmiany współczynnika wypełnienia sygnałów sterujących:

$$D(\omega t) = m_a \cdot \sin(\omega t) \quad (2.11)$$

Ponadto, napięcie wyjściowe układu można opisać jak:

$$U_{OUT} = D \cdot E \quad (2.12)$$

Uwzględniając zależności 2.11 oraz 2.12 w równaniu 2.10 otrzymuje się wzór określający poziom tętnień prądu dławika, wyrażony za pomocą znany lub możliwych do określenia, na podstawie parametrów układu sterowania, zmiennych:

$$\Delta I_{Lpp} = \frac{m_a \cdot \sin(\omega t) \cdot T_{SW} \cdot E(1 - m_a \cdot \sin(\omega t))}{L_1} \quad (2.13)$$

Aby z równania 2.13 wyznaczyć zależność na maksymalną wartość tętnień prądu dławika L_1 należy obliczyć pochodną z tego wyrażenia, a następnie przyrównać ją do zera:

$$\frac{d(\Delta I_{Lpp})}{dt} = 0 \Rightarrow \sin(\omega t) = \frac{1}{2m_a} \quad (2.14)$$

Po podstawieniu otrzymanego wyrażenia do równania 2.13 otrzymujemy wzór opisujący maksymalną wartość tętnień prądu dławika L_1 :

$$\Delta I_{Lppmax} = \frac{E \cdot T_{SW}}{4 \cdot L_1} \quad (2.15)$$

Przekształcając wzór 2.15, otrzymujemy zależność pozwalającą obliczyć wymaganą wartość indukcyjności dławika, która zagwarantuje utrzymanie jego tętnień na zakładanym poziomie:

$$L_1 = \frac{E}{4 \cdot f_{SW} \cdot \Delta I_{Lppmax}} \quad (2.16)$$

2.3.2.2 Dobór indukcyjności dławika ze względu na dopuszczalny spadek napięcia

Zgodnie z tym warunkiem, spadek napięcia jaki powstaje na indukcyjności filtra falownika nie powinien przekraczać 10% napięcia wyjściowego inwertera. Aby spełnić ten warunek należy wyliczyć reaktancję zastępczą zespołu dławików, z których jeden znajduje po stronie mostka (L_1), a drugi po stronie obciążenia (L_2). Reaktancję zastępczą zespołu tych dwóch dławików określa poniższy wzór:

$$X_L = \omega(L_1 + L_2) = 2 \cdot \pi \cdot f_{OUT}(L_1 + L_2) \quad (2.17)$$

Wiedząc, że dopuszczalny spadek napięcia na indukcyjności dławików filtra może maksymalnie wynosić 10% napięcia wyjściowego falownika, możemy zapisać:

$$U_L = \frac{S}{U_{OUT}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{OUT}(L_1 + L_2) = 0.1 \cdot U_{OUT} \quad (2.18)$$

Przekształcając równanie 2.18 można zapisać:

$$L_2 = \frac{0.1 \cdot (U_{OUT})^2}{2 \cdot \pi \cdot f_{OUT} \cdot S} - L_1 \quad (2.19)$$

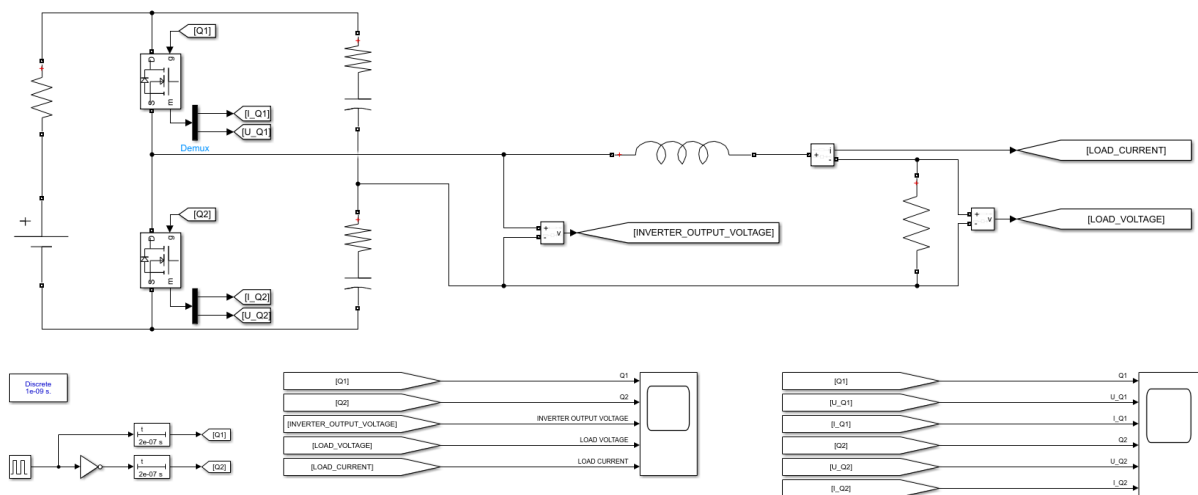
3 Badania symulacyjne autonomicznych falowników jednofazowych

W tej części zajęć studenci wykorzystają zdobytą wiedzę i przeprowadzą badania symulacyjne autonomicznych falowników jednofazowych. Przedmiotem badań będą poznane wcześniej topologie tych układów oraz metody ich sterowania. Plan zajęć przewiduje, iż część z poniżej opisanych ćwiczeń zostanie wykonana w czasie ich trwania, natomiast pozostałe zagadnienia będą opracowane samodzielnie przez studentów po zakończeniu zajęć. W instrukcji oznaczono, które punkty powinny zostać wykonane w czasie zajęć, a które powinny zostać potraktowane jako zadanie domowe. W sprawozdaniu należy odnieść się do każdego z poniższych ćwiczeń, krytycznie oceniając otrzymane wyniki i wyciągając odpowiednie wnioski.

3.1 Badania symulacyjne falownika półmostkowego

W praktycznych aplikacjach falowniki półmostkowe są stosowane w układach, których moc zazwyczaj zawiera się w przedziale od kilku do kilkudziesięciu watów, a ich przebiegi wyjściowe charakteryzują się częstotliwościami znacznie wyższymi niż częstotliwość sieci elektroenergetycznej. Powodem tego są kondensatory znajdujące się w dzielniku pojemnościowym półmostka. Współpraca inwertera jednogałęziowego z obciążeniami o znacznych wartościach wymagałaby zastosowania w dzielniku wejściowym kondensatorów o bardzo dużych pojemnościach, co nie jest uzasadnione ani funkcjonalnie ani ekonomicznie, w sytuacji gdy do dyspozycji pozostają nam układy pełnomostkowe. Półmostki zdecydowanie lepiej sprawdzają się w falownikach pracujących z niewielkimi obciążeniami, które akceptują przemienne przebiegi prostokątny o częstotliwość sięgającej nawet kilkudziesięciu kiloherców. Przykładem aplikacji, w której często wykorzystuje się półmostki są izolowane przetwornice DC-DC. W takim układzie falownik półmostkowy współpracuje z niewielkim transformatorem wysokoczęstotliwościowym, oraz prostownikiem. Dzięki obecności transformatora układ zapewnia izolację galwaniczną pomiędzy wejściem i wyjściem przetwornicy, co pozwala na zastosowanie jej np. jako źródła napięcia dla zasilania sterowników (eng. driver'ów) tranzystorów zlokalizowanych w górnej części układów mostkowych i półmostkowych.

W tym ćwiczeniu należy skorzystać z modelu symulacyjnego falownika półmostkowego (rys. 15), dostarczonego przez prowadzącego zajęcia. W otrzymanym pliku znajdują Państwo kompletny model inwertera jednogałęziowego, który uprzednio został skonfigurowany zgodnie z poniższą tabelą.



Rys. 15. Model falownika półmostkowego sterowany zgodnie z założeniami metody półokresowej zbudowany w środowisku Simulink

Parametry konfiguracyjne elementów wchodzących w skład falownika półmostkowego

Parametr	Wartość	Jednostka
Napięcie źródła	15	V
Rezystancja wewnętrzna źródła	100	$m\Omega$
Pojemność kondensatorów wejściowego dzielnika pojemnościowego	47	μF
ESR kondensatorów wejściowego dzielnika pojemnościowego	10	$m\Omega$
Napięcie początkowe kondensatorów wejściowego dzielnika pojemnościowego	7.5	V
Rezystancja kanału tranzystora MOSFET	20	$m\Omega$
Rezystancja wewnętrznej diody tranzystora MOSFET	40	$m\Omega$
Napięcie przewodzenia wewnętrznej diody tranzystora	1	V
Rezystancja obciążenia	200	Ω
Indukcyjność dławika	4	μH
Czas martwy	200	ns
Częstotliwość generatora PWM	10	kHz
Współczynnik wypełnienia przebiegu sterującego	50	%
Czas trwania symulacji	500	μs
Typ symulacji	dyskretna	
Metoda całkowania	zmiennokrokowa	
Maksymalny krok całkowania	1	ns

W sprawozdaniu proszę odnieść się do wszystkich poniższych zadań. W każdym przypadku wymagany jest komentarz opisujący badane zjawisko oraz odpowiedni zestaw przebiegów potwierdzających jego występowanie. Przebiegi powinny być stosownie opisane, a samo zjawisko na nich zaznaczone. Istotne jest również to, aby krótko podsumować każdą z przeprowadzonych symulacji wyjaśniając jaki wpływ na pracę falownika ma badane zjawisko.

Plan badań:

1. Proszę zarejestrować przebiegi sygnałów sterujących pracą tranzystorów półmostka, a następnie zweryfikować występowanie czasu martwego w tych przebiegach. Bazując na wynikach przeprowadzonych symulacji proszę wyjaśnić czym jest tzw. dead-time i dlaczego jego stosowanie jest wymagane w układach mostkowych i półmostkowych? Jaki wpływ na pracę układu ma zastosowanie zbyt długiego i zbyt krótkiego czasu martwego?
2. Proszę zaobserwować przebiegi wyjściowe falownika, a następnie zwiększać obciążenie układu aż do wyraźnej zmiany kształtu przebiegu napięcia wyjściowego inwertera. Wyjaśnić, dlaczego przebiegi wyjściowe falownika zmieniają kształt. Co należy zmodyfikować w układzie, aby przy zwiększonym obciążeniu zachować prostokątny przebieg napięcia wyjściowego układu.
3. Proszę ustawić rezystancję obciążenia równą $5\ \Omega$, a następnie zarejestrować przebiegi sygnałów sterujących, oraz napięć i prądów tranzystorów, w chwili gdy dochodzi do przekazania przewodzenia z tranzystora Q_2 do tranzystora Q_1 . Proszę przeanalizować pozyskane przebiegi i wytłumaczyć charakterystyczne „anomalie” widoczne w przebiegach napięć i prądów tranzystorów.
4. Proszę przeanalizować zarejestrowane w poprzednim punkcie przebiegi pod kątem warunków prądowo - napięciowych, w których dochodzi do załączenia tranzystorów. Czy załączenie tranzystorów następuje w warunkach korzystnych? Jaki wpływ na straty łączeniowe występujące w całym układzie ma fakt załączania tranzystorów w takich warunkach?
5. Proszę ponownie ustawić rezystancję obciążenia na poziomie $200\ \Omega$, a następnie przeprowadzić rejestrację sygnałów sterujących, oraz napięć i prądów tranzystorów, w chwili gdy dochodzi do przekazania przewodzenia z tranzystora Q_2 do tranzystora Q_1 . Co zmieniło się w zarejestrowanych przebiegach względem tych zarejestrowanych w punkcie 4? Proszę wyjaśnić skąd wynikają wszystkie różnice.
6. **Zadanie domowe:** Korzystając z zarejestrowanych przebiegów oraz schematu falownika półmostkowego, w sprawozdaniu proszę omówić kiedy diody zwrotne przewodzą oraz dlaczego ich stosowanie w tego typu układach jest konieczne.

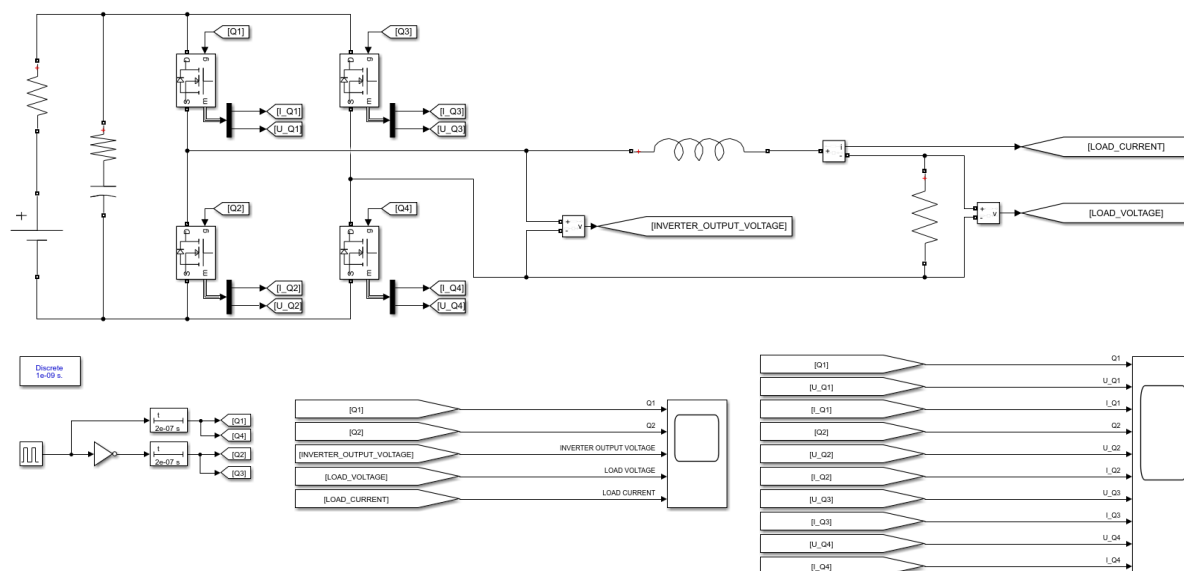
3.2 Badania symulacyjne falownika mostkowego

Falowniki mostkowe w porównaniu do inwerterów jednogłęziowych są układami o znacznie szerszym spektrum zastosowań. Sprawdzają się one zarówno w aplikacjach charakteryzujących się niewielkimi mocami znamionowymi, jak również w aplikacjach przemysłowych, których moce sięgają nawet 10 kW. Jedną z możliwych

aplikacji tej topologii są jednofazowe falowniki napięcia generujące napięcie przemiennie o parametrach odpowiadających napięciu sieci elektroenergetycznej. Takie urządzenia najczęściej współpracują z instalacjami fotowoltaicznymi dostarczając energię do ogólnodostępnej sieci elektroenergetycznej. Zdarza się również, że nie są one połączone z publiczną siecią dystrybucyjną, a jedynie zasilają tzw. sieci wyspowe, gdzie stanowią główne źródło energii dla podłączonych do nich odbiorników. Inną powszechną aplikacją mostkowych falowników napięcia są inwertery generujące przemiennie przebiegi prostokątne, wykorzystywane w zasilaczach impulsowych, w strukturze, których zastosowano transformatory wysokoczęstotliwościowe. Przykładem takich zasilaczy mogą być szeroko stosowane w urządzeniach większych mocy, układy LLC oraz DAB (eng. *Dual Active Bridge*), będące podstawą wielu zasilaczy i ładowarek.

3.2.1 Badania symulacyjne modelu falownika mostkowego ze sterowaniem półokresowym.

Falowniki mostkowe sterowane półokresowo najczęściej występują jako element większego systemu energoelektronicznego współpracując za pośrednictwem transformatorów wysokoczęstotliwościowych z innymi mostkami (układ DAB) lub prostownikami (układ LLC). Podobnie jak w przypadku falownika półmostkowego sterowanego półokresowo, również na wyjściu układu mostkowego pojawia się prostokątny przebieg napięcia o wysokiej częstotliwości. W tej części ćwiczenia zostaną ze sobą porównane przebiegi wyjściowe tych układów, jak również warunki pracy łączników w każdej z badanych topologii. Na rysunku 16 przedstawiono model układu mostkowego, przeznaczonego do analizy w tej części zajęć.



Rys. 16. Model falownika mostkowego sterowany zgodnie z założeniami metody półokresowej zbudowany w środowisku Simulink

Proszę zmodyfikować strukturę modelu z poprzedniego ćwiczenia zgodnie z przykładem przedstawionym na rysunku 16. Następnie, proszę wprowadzić lub zmodyfikować parametry modelu symulacyjnego zgodnie z danymi zawartymi w poniższej tabeli. Pozostałe parametry symulacji należy pozostawić bez zmian.

Zaktualizowane parametry konfiguracyjne elementów wchodzących w skład falownika mostkowego

Parametr	Wartość	Jednostka
Pojemność kondensatora wejściowego	23.5	μF
ESR kondensatora wejściowego	10	$m\Omega$
Napięcie początkowe kondensatora wejściowego	15	V
Rezystancja kanału tranzystora MOSFET	20	$m\Omega$
Rezystancja obciążenia	200	Ω
Indukcyjność dławika	4	μH
Czas martwy	200	ns
Częstotliwość generatora PWM	10	kHz
Współczynnik wypełnienia przebiegu sterującego	50	%

W sprawozdaniu proszę odnieść się do wszystkich poniższych zadań. W każdym przypadku wymagany jest komentarz opisujący badane zjawisko oraz odpowiedni zestaw przebiegów potwierdzających jego występowanie. Przebiegi powinny być stosownie opisane, a samo zjawisko na nich zaznaczone. Istotne jest również to, aby krótko podsumować każdą z przeprowadzonych symulacji wyjaśniając jaki wpływ na pracę falownika ma badane zjawisko.

Plan badań:

1. Proszę zarejestrować przebiegi sygnałów sterujących pracą tranzystorów mostka. W jakiej kolejności należy załączać tranzystory, aby uzyskać przemienny przebieg prostokątny na jego wyjściu.
2. Proszę zaobserwować przebiegi wyjściowe falownika, oraz porównać je z odpowiadającymi im oscylogramami zarejestrowanymi w czasie badań układu półmostkowego.
3. Proszę zwiększyć moc obciążenie falownika mostkowego do wartości przy której w falowniku półmostkowym widoczne były odkształcenia jego napięcia wyjściowego. Dlaczego w układzie mostkowym zaobserwowane wcześniej zaburzenia nie występują?
4. **Zadanie domowe:** Proszę przeanalizować przebiegi prądów płynących w obwodzie, a następnie na schemacie układu zaznaczyć ścieżkę przepływu prądu w następujących przypadkach:
 - a) W sytuacji, gdy przewodzi pierwsza para łączników,
 - b) W sytuacji, gdy przewodzi pierwsza para diod zwrotnych,
 - c) W sytuacji, gdy przewodzi druga para łączników,
 - d) W sytuacji, gdy przewodzi druga para diod zwrotnych,
5. **Zadanie domowe:** Proszę zastąpić łączniki Q_1 oraz Q_2 równoległym połączeniem łącznika idealnego (Ideal Switch) oraz diody prostowniczej (Diode). Następnie, zrealizować pomiar prądu obu tych elementów (diody oraz łącznika idealnego), a wyniki wyświetlić na wspólnym „oscyloskopie” razem z przebiegami prądów i napięć pozostałych tranzystorów. W kolejnym kroku należy przeprowadzić dwie symulacje obciążając mostek kolejno rezystancją o wartości $R = 200 \Omega$ oraz $R = 5 \Omega$. W obu tych przypadkach, w czasie komutacji proszę dokonać analizy przebiegu prądu łączników idealnych oraz połączonych z nimi diod zwrotnych. Po przeprowadzeniu symulacji dla obu wartości rezystancji obciążenia proszę zmierzyć czas przewodzenia diody zwrotnej oraz wskazać od czego zależą zmierzone wartości.

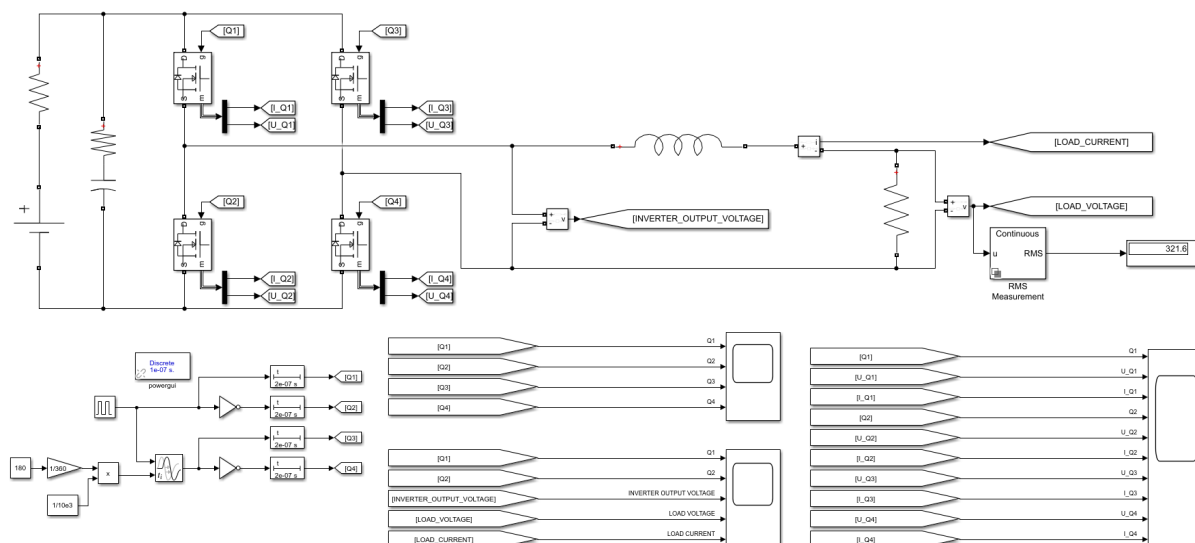
3.2.2 Badania symulacyjne modelu falownika mostkowego, sterowanego zgodnie z założeniami metody modulacji szerokości pojedynczego impulsu w półokresie napięcia wyjściowego

Napięcie wyjściowe falownika mostkowego sterowanego półokresowo może przyjmować tylko dwie wartości, z których jedna to wartość napięcia źródła zasilającego inwerter, a druga to jego odwrotność. Oznacza to, że falownik sterowany w taki sposób nie ma możliwości regulacji wartości skutecznej swojego napięcia wyjściowego. Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie metody modulacji szerokości pojedynczego impulsu w półokresie napięcia wyjściowego falownika. W tej metodzie układ kontrolujący pracę łączników, poprzez odpowiednie dobranie momentów ich przełączeń, wprowadza dodatkowy stan, w którym napięcie na wyjściu inwertera jest równe zero. Z uwagi na fakt iż, czas przez który napięcie na wyjściu tak sterowanego układu wynosi zero może być płynnie regulowany, płynnie regulowana może być również wartość skuteczna napięcia wyjściowego falownika co stanowi istotną zaletę tej metody regulacji w porównaniu do metody półokresowej.

Przed rozpoczęciem badań symulacyjnych proszę dodać do modelu z poprzedniego ćwiczenia elementy z poniższej listy:

1. Element „**Variable Transport Delay**”, za jego pomocą zostanie zrealizowane przesunięcie fazowe pomiędzy podstawowym sygnałem sterującym, a sygnałem kontrolującym pracę tranzystorów w drugiej gałęzi mostka,
2. Dwa elementy „**Constant**”, z których jeden posłuży do zadawania wartości kąta przesunięcia fazowego, a drugi będzie stanowił stałą wykorzystywaną w przeliczaniu kąta przesunięcia fazowego na odpowiadający czas, o jaki sygnał wyjściowy elementu „Variable Transport Delay” ma być opóźniony względem jego sygnału wejściowego,
3. Element „**Product**”, przekazujący na swoje wyjście wynik iloczynu jego dwóch sygnałów wejściowych,

4. Element „*RMS Measurement*” zostanie wykorzystany do obliczenia wartości skutecznej napięcia wyjściowego badanego falownika,
5. Element „*Display*” posłuży jako wyświetlacz, na którym wyświetlana będzie aktualna wartość skuteczna napięcia wyjściowego falownika.



Rys. 17. Model falownika mostkowego sterowany zgodnie z założeniami metody modulacji szerokości pojedynczego impulsu w półokresie napięcia wyjściowego falownika zbudowany w środowisku Simulink

Proszę zmodyfikować strukturę modelu z poprzedniego ćwiczenia zgodnie z wzorem przedstawionym na rysunku 17. Następnie, proszę wprowadzić lub zmodyfikować parametry modelu symulacyjnego zgodnie z danymi zawartymi w poniższej tabeli. Pozostałe parametry symulacji należy pozostawić bez zmian.

Zaktualizowane parametry konfiguracyjne elementów wchodzących w skład falownika mostkowego

Parametr	Wartość	Jednostka
Pojemność kondensatora wejściowego	1000	μF
ESR kondensatora wejściowego	10	$m\Omega$
Napięcie początkowe kondensatora wejściowego	325	V
Rezystancja kanału tranzystora MOSFET	20	$m\Omega$
Rezystancja obciążenia	200	Ω
Indukcyjność dławika	96	μH
Czas martwy	200	ns
Częstotliwość generatora PWM	10	kHz
Współczynnik wypełnienia przebiegu sterującego	50	%

Plan badań:

1. Proszę uruchomić układ, oraz zarejestrować przebiegi jego napięcia i prądu wyjściowego. Wyjaśnić czym różnią się przebiegi wyjściowe falownika sterowanego zgodnie z założeniami metody modulacji szerokości pojedynczego impulsu w napięciu wyjściowym inwertera od przebiegów rejestrowanych w przypadku falownika sterowanego półokresowo. W sprawozdaniu proszę zamieścić odpowiednie oscylogramy i je porównać.
2. Proszę zweryfikować możliwość regulacji wartości skutecznej napięcia odbiornika przez zmianę kąta przesunięcia fazowego. Dla jakich wartości tego kąta osiąga się maksymalną wartość napięcia? Jak wyglądają przebiegi wyjściowe falownika, przy tej specyficznej wartości kąta przesunięcia fazowego?
3. **Zadanie domowe:** Proszę wyznaczyć charakterystykę zmian wartości skutecznej napięcia na obciążeniu falownika, w zależności od zadanej wartości kąta przesunięcia fazowego. Na osi pionowej proszę przedstawić względne wartości napięcia odbiornika odniesione do wartości napięcia zasilającego falownik, a na osi poziomej proszę umieścić wartości kąta przesunięcia fazowego. Badania przeprowadzić zmieniając zadawany kąt przesunięcia fazowego co 10° w zakresie od 0° do 360° . Zebrane dane proszę przedstawić na wykresie

w postaci charakterystyki oraz dołączyć do sprawozdania w formie tabeli. Aby przyspieszyć symulację można zwiększyć krok całkowania do 100 ns.

4. **Zadanie domowe:** Proszę omówić zasadę działania układu sterującego pracą falownika. Wyjaśnić jaką rolę w układzie kontrolującym pracę inwertera mostkowego działającego zgodnie z założeniami metody modulacji szerokości pojedynczego impulsu w przebiegu napięcia wyjściowego falownika, pełnią jego poszczególne elementy.
5. **Zadanie domowe:** Korzystając z uproszczonych schematów mostka połączonego z obciążeniem, proszę zaznaczyć ścieżki przepływu prądu w układzie, w każdej z pięciu konfiguracji obwodu występujących w czasie trwania jednego okresu napięcia wyjściowego inwertera. Proszę powiązać poszczególne rysunki z odpowiednimi „schodkami” napięcia wyjściowego badanego falownika.

3.2.3 Badania symulacyjne modelu falownika mostkowego, sterowanego zgodnie z założeniami komparacyjnej metody sinusoidalnej modulacji szerokości impulsów

Do tej pory analizie podlegały falowniki napięcia, które zostały zaprojektowane tak, aby do odbiornika dostarczały prostokątny przebieg napięcia o wysokiej częstotliwości. Poza wspomnianymi układami, istotnym obszarem zastosowań układów mostkowych są również jednofazowe falowniki sieciowe. Zazwyczaj stanowią one połączenie układu mostkowego oraz filtra dolnoprzepustowego. Mostek dostarcza na wejście filtra dolnoprzepustowego odpowiednio zmodulowany przebieg prostokątny, a filtr tłumi sygnały o wyższych częstotliwościach dostarczając użytkownikowi sygnał wyjściowy będący przebiegiem sinusoidalnym o żądanym napięciu oraz częstotliwości. Istnieje kilka sposobów sinusoidalnej modulacji napięcia gałęzi poprzecznej mostka. W tym ćwiczeniu zbadają Państwo falownik pracujący zgodnie z założeniami dwóch metod komparacyjnej modulacji PWM: metody unipolarnej oraz bipolarnej. Co do zasady, w każdej z tych metod sygnał nośny modulowany jest sygnałem referencyjnym. Sygnały te są ze sobą porównywane, a na podstawie wyniku tej operacji układ sterowania decyduje o załączeniu lub wyłączeniu poszczególnych tranzystorów, co prowadzi do uformowania przebiegu napięcia wyjściowego mostka, składającego się z ciągu impulsów prostokątnych o różnej szerokości. Czas trwania poszczególnych impulsów zależy od sygnału referencyjnego i zmienia się wraz ze zmianą wartości chwilowej sygnału modulującego (referencyjnego).

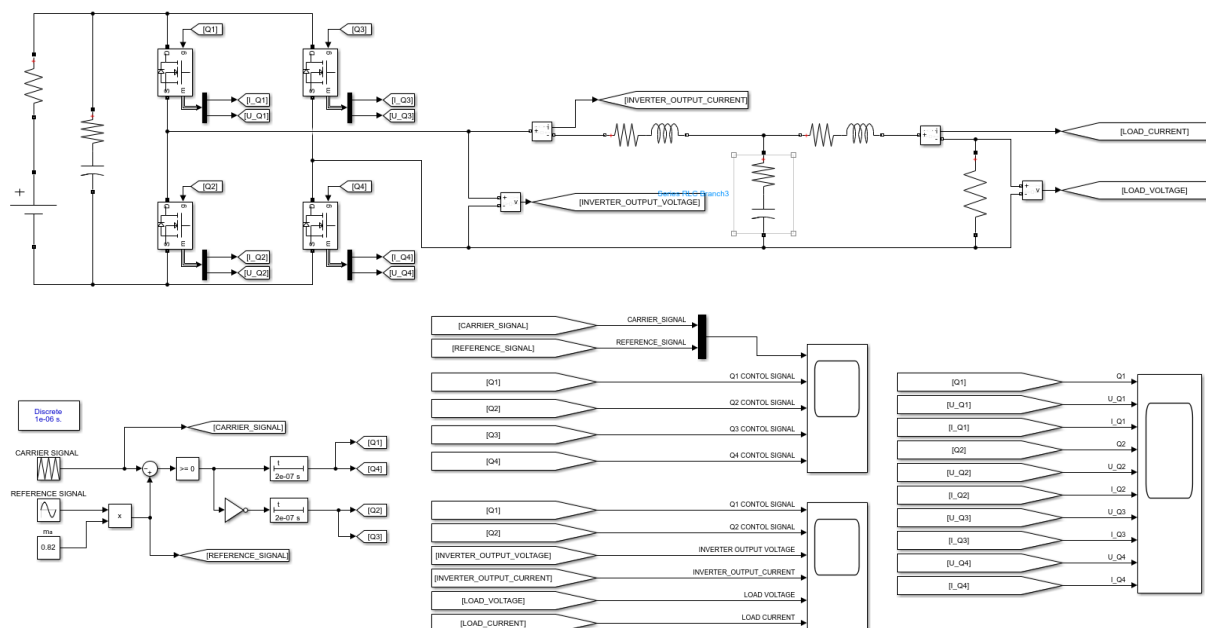
3.2.3.1 Budowa i badania modelu symulacyjnego falownika mostkowego sterowanego zgodnie z założeniami bipolarnej metody sinusoidalnej modulacji PWM

Bipolarna metoda sinusoidalnej modulacji PWM należy metod komparacyjnych. Jak wcześniej wspomniano, przebieg napięcia wyjściowego jest modulowany na podstawie porównania dwóch sygnałów: sygnału nośnego (modulowanego) oraz referencyjnego (modulującego). Jest to typowo podejście, na którym bazują wszystkie metody komparacyjne. Cechami charakterystycznymi bipolarnej metody modulacji PWM są: częstotliwość przebiegu prostokątnego generowanego przez falownik wynosząca tyle co częstotliwość sygnału nośnego oraz to, że w momencie przełączenia tranzystorów napięcie w gałęzi poprzecznej mostka zmienia swoją wartość z wartości równej napięciu zasilania falownika na przeciwną (*Lub odwrotnie, w zależności od wybranego punktu początkowego analizy*).

Przed rozpoczęciem badań symulacyjnych proszę dodać do modelu z poprzedniego ćwiczenia elementy z poniższej listy:

1. Element „**Repeating Sequence**”, za jego pomocą zostanie wygenerowany przebieg trójkątny będący sygnałem nośnym dla budowanego układu sterowania. Wartości generowanego sygnału powinny zmieniać się w przedziale od -1 do 1, a jego częstotliwość powinna wynosić 10 kHz.
Konfiguracja:
 - a) wektor czasu: [0 0.5/10e3 1/10e3],
 - b) wektor wartości: [-1 1 -1].
2. Element „**Sine Wave**”, za jego pomocą zostanie wygenerowany przebieg sinusoidalny będący sygnałem referencyjnym dla budowanego układu sterowania. Wartości generowanego sygnału powinny zmieniać się w przedziale od -1 do 1, a jego częstotliwość powinna wynosić 50 Hz.
3. Element „**Sum**”, za jego pomocą zostanie obliczona różnica wartości chwilowych przebiegu referencyjnego i nośnego.
4. Element „**Compare To Zero**”, za jego pomocą zostanie wygenerowany sygnał logiczny, którego wartość zmienia się w zależności od tego czy różnica sygnału referencyjnego i nośnego jest większa czy mniejsza od zera. Element ten stanowi źródło sygnałów sterujących tranzystorami mostka.

- Trzy elementy „*Series RLC Branch*”, z których dwa należy skonfigurować jako elementy RL a jeden jako element RC. Będą one tworzyć dolnoprzepustowy filtr wyjściowy falownika.
- Element „*Mux*”, który zostanie wykorzystany do przedstawienia dwóch sygnałów (nośnego i referencyjnego) na jednej płaszczyźnie wykresu.



Rys. 18. Model falownika mostkowego sterowany zgodnie z założeniami bipolarnej metody modulacji szerokości impulsu, zbudowany w środowisku Simulink

Proszę zmodyfikować strukturę modelu z poprzedniego ćwiczenia zgodnie z wzorem przedstawionym na rysunku 18. Następnie, proszę wprowadzić lub zmodyfikować parametry modelu symulacyjnego zgodnie z danymi zawartymi w poniższej tabeli. Pozostałe parametry symulacji należy pozostawić bez zmian. Po przeprowadzeniu wszystkich niezbędnych modyfikacji układowych proszę zrealizować ćwiczenia i obserwacje wymienione w planie badań.

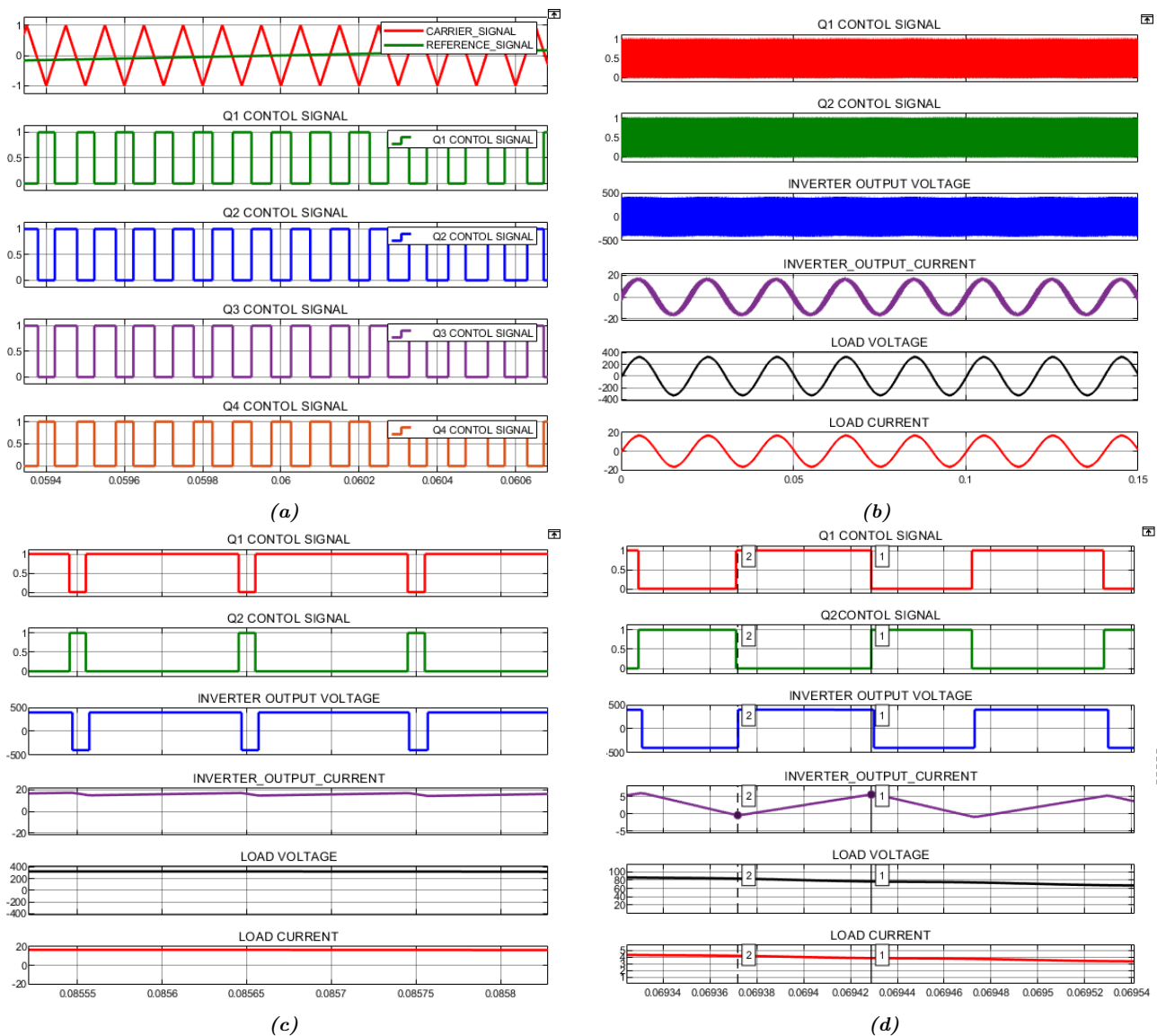
Zaktualizowane parametry konfiguracyjne elementów wchodzących w skład falownika mostkowego

Parametr	Wartość	Jednostka
Napięcie źródła DC	400	V
Napięcie początkowe kondensatora wejściowego	400	V
Rezystancja obciążenia	20	Ω
Indukcyjność dławika po stronie mostka	1.63	mH
Rezystancja dławika po stronie mostka	30	$m\Omega$
Indukcyjność dławika po stronie obciążenia	1.74	mH
Rezystancja dławika po stronie obciążenia	30	$m\Omega$
Pojemność kondensatora filtrującego	15	μF
Napięcie początkowe kondensatora filtrującego	Wyłączyć	
Amplituda sygnału nośnego	1	V
Częstotliwość sygnału nośnego	10	kHz
Amplituda sygnału referencyjnego	1	V
Częstotliwość sygnału referencyjnego	50	Hz
Krok całkowania	1	μs

Plan badań:

- Proszę uruchomić model i zweryfikować poprawność działania symulacji poprzez porównanie otrzymanych przebiegów z przebiegami zamieszczonymi na rysunku 19. W przypadku stwierdzenia rozbieżności proszę o nich poinformować prowadzącego zajęcia.
- Proszę zarejestrować przebiegi sterujące pracą tranzystorów tak, aby były skorelowane w czasie z przebiegami sygnału modulującego i modulowanego. Czy zarejestrowane sygnały spełniają założenia metody modulacji bipolarnej? Uzasadnienie odpowiedzi proszę zamieścić w sprawozdaniu.

3. Proszę ustawić współczynnik głębokości modulacji amplitudowej $m_a = 0.25$. Ile wynosi wartość skuteczna napięcia mierzona na odbiorniku przy takiej wartości tego parametru? Proszę tak dobrać wartość współczynnika modulacji amplitudowej, aby wartość skuteczna napięcia obciążenia wynosiła 230 V.
4. Proszę stopniowo wydłużać czas martwy układu sterowania jednocześnie obserwując zmiany zachodzące w przebiegu napięcia na obciążeniu. Jak zmienia się kształt oraz wartość skuteczna tego napięcia wskutek wprowadzanych zmian?
5. Proszę zmierzyć oraz zanotować wartość tętnień prądu wyjściowego inwertera.
6. **Zadanie domowe:** Proszę wyznaczyć charakterystykę zmian wartości skutecznej napięcia na obciążeniu falownika, w zależności od zadanej wartości współczynnika modulacji amplitudowej. Na osi pionowej proszę przedstawić względne wartości skuteczne napięcia odbiornika odniesione do wartości napięcia zasilającego falownik, a na osi poziomej proszę umieścić wartości współczynnika modulacji amplitudowej. Wartości współczynnika modulacji amplitudowej proszę zwiększać co 0.1 w zakresie od 0 do 2. Zebrane dane proszę przedstawić również w formie tabeli.
7. **Zadanie domowe:** Proszę omówić zasadę działania układu sterującego pracą falownika. Wyjaśnić jaką rolę w układzie kontrolującym pracę inwertera mostkowego działającego zgodnie z założeniami metody modulacji bipolarnej, pełnią jego poszczególne elementy.



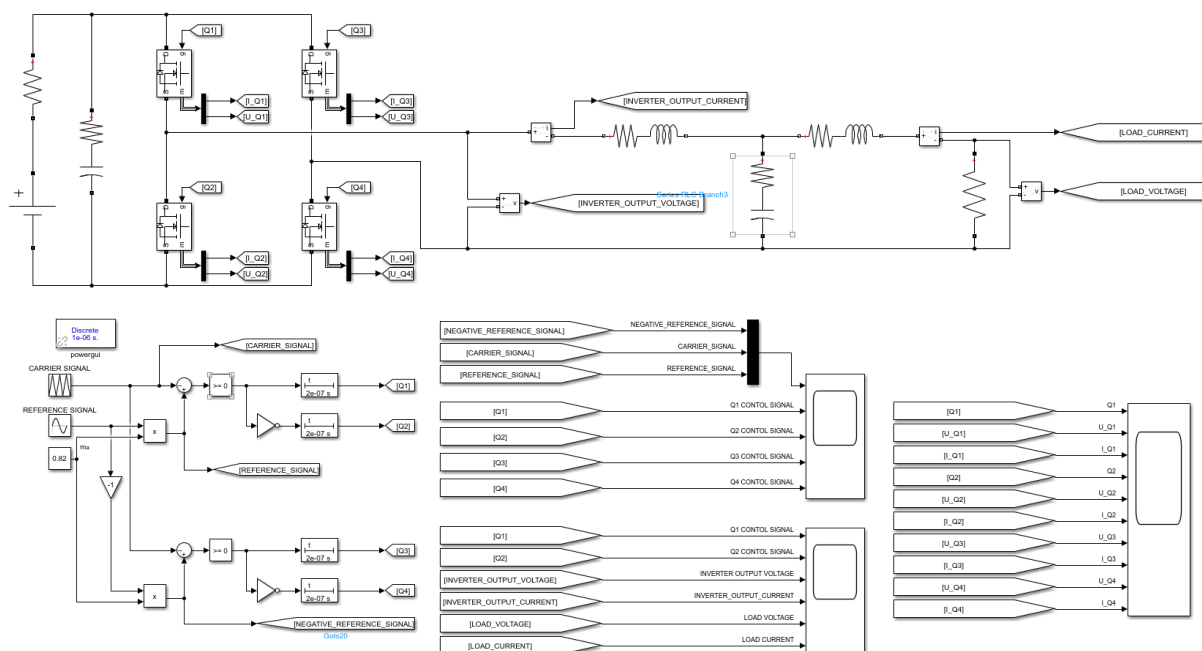
Rys. 19. Przykładowe przebiegi symulacyjne falownika pracującego zgodnie z założeniami metody modulacji bipolarnej: a) Sygnały sterujące na tle sygnału modulowanego oraz modulującego, b) Przebiegi sterujące tranzystorów pierwszej gałęzi oraz przebiegi wyjściowe, c) Przebiegi sterujące tranzystorów pierwszej gałęzi oraz przebiegi wyjściowe - powiększenie, d) Pomiar tętnień prądu wyjściowego mostka za pomocą kursorów.

3.2.3.2 Budowa i badania modelu symulacyjnego falownika mostkowego sterowanego zgodnie z założeniami unipolarnej metody sinusoidalnej modulacji PWM

Unipolarna metoda sinusoidalnej modulacji PWM należy do grupy metod komparacyjnych. Jak wcześniej wspomniano, przebieg napięcia wyjściowego jest modulowany na podstawie porównania dwóch sygnałów: sygnału nośnego (modulowanego) oraz referencyjnego (modulującego). Jest to typowe podejście, na którym bazują wszystkie metody komparacyjne. Cechami charakterystycznymi unipolarnej metody modulacji PWM są:

- Dwukrotnie wyższa częstotliwość przebiegu prostokątnego generowanego przez falownik od częstotliwość sygnału nośnego,
- Sposób generowania napięcia gałęzi poprzecznej mostka polegający na tym, że w czasie trwania pierwszego półokresu napięcia modulującego, napięcie w tej gałęzi przy każdym przełączeniu tranzystorów zmienia swoją wartość pomiędzy zerem a wartością napięcia zasilającego falownik. W drugim półokresie napięcia modulującego, napięcie gałęzi poprzecznej mostka przy każdym przełączeniu tranzystorów zmienia swoją wartość pomiędzy zerem a odwrotnością wartości napięcia zasilającego falownik.

Proszę zmodyfikować strukturę modelu z poprzedniego ćwiczenia zgodnie z wzorem przedstawionym na rysunku 20. Następnie, proszę zrealizować ćwiczenia i obserwacje wymienione w planie badań. Przykładowe przebiegi zarejestrowane w poprawnie działającym modelu przedstawiono na rysunku 21.

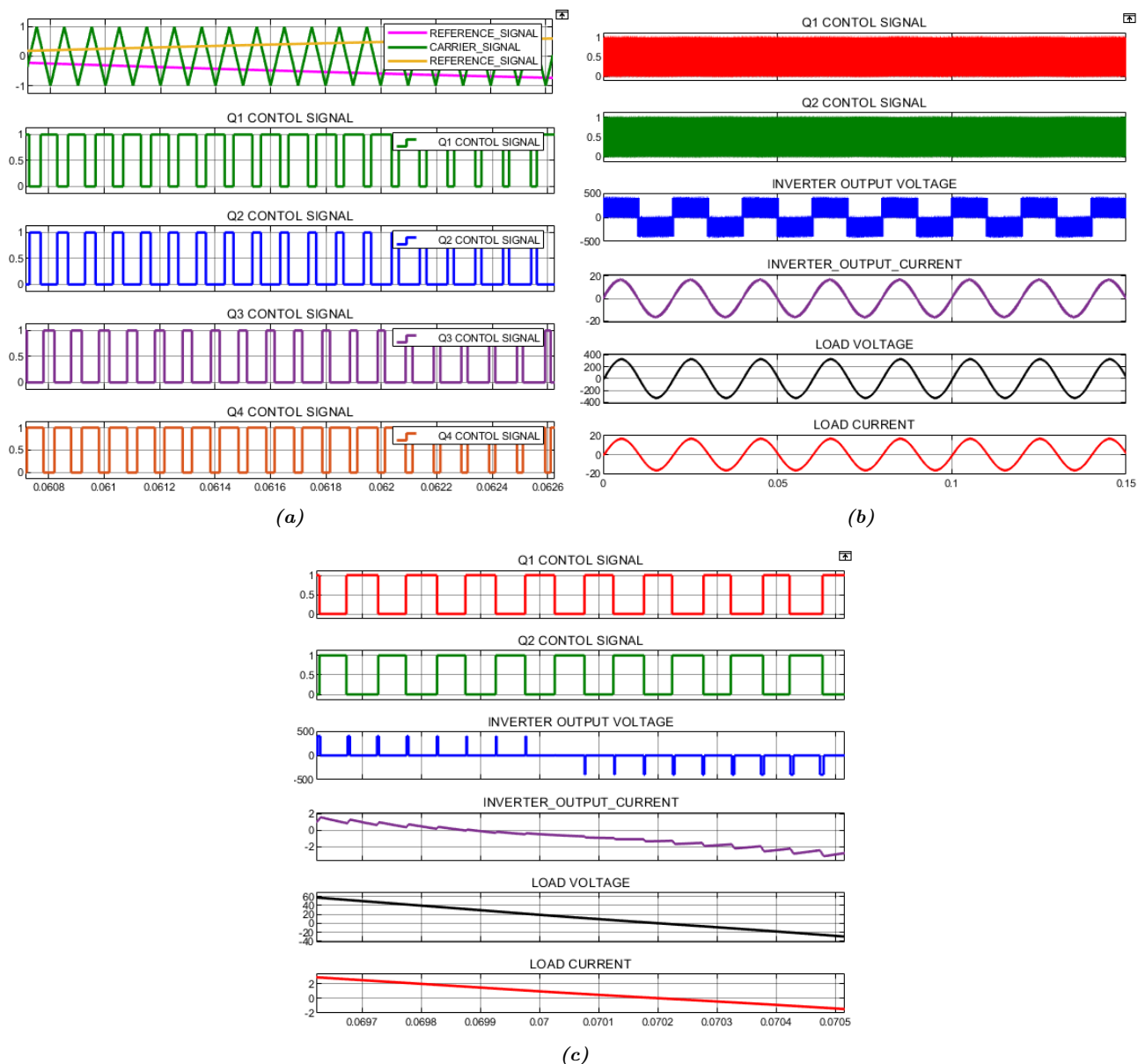


Rys. 20. Model falownika mostkowego sterowany zgodnie z założeniami unipolarnej metody modulacji szerokości impulsu, zbudowany w środowisku Simulink

Plan badań:

- Proszę uruchomić model i zweryfikować poprawność działania symulacji poprzez porównanie otrzymanych przebiegów z przebiegami zamieszczonymi na rysunku 20. W przypadku stwierdzenia rozbieżności proszę o nich poinformować prowadzącego zajęcia.
- Proszę zarejestrować przebiegi sterujące pracą tranzystorów tak, aby były skorelowane w czasie z przebiegami sygnału modulującego i modulowanego. Czy zarejestrowane sygnały spełniają założenia metody modulacji bipolarnej? Uzasadnienie odpowiedzi proszę zamieścić w sprawozdaniu.
- Proszę ustawić współczynnik głębokości modulacji amplitudowej $m_a = 0.25$. Ile wynosi wartość skuteczna napięcia mierzona na odbiorniku przy takiej wartości tego parametru? Proszę tak dobrać wartość współczynnika modulacji amplitudowej, aby wartość skuteczna napięcia obciążenia wynosiła 230 V.
- Proszę stopniowo wydłużać czas martwy układu sterowania jednocześnie obserwując zmiany zachodzące w przebiegu napięcia na obciążeniu. Jak zmienia się kształt oraz wartość skuteczna tego napięcia wskutek wprowadzanych zmian?

5. Proszę zmierzyć oraz zanotować wartość tętnień prądu wyjściowego inwertera.
6. **Zadanie domowe:** Proszę wyznaczyć charakterystykę zmian wartości skutecznej napięcia na obciążeniu falownika, w zależności od zadanej wartości współczynnika modulacji amplitudowej. Na osi pionowej proszę przedstawić względne wartości skuteczne napięcia odbiornika odniesione do wartości napięcia zasilającego falownik, a na osi poziomej proszę umieścić wartości współczynnika modulacji amplitudowej. Wartości współczynnika modulacji amplitudowej proszę zwiększać co 0.1 w zakresie od 0 do 2. Zebrane dane proszę przedstawić również w formie tabeli.
7. **Zadanie domowe:** Proszę omówić zasadę działania układu sterującego pracą falownika. Wyjaśnić jaką rolę w układzie kontrolującym pracę inwertera mostkowego działającego zgodnie z założeniami metody modulacji bipolarnej, pełnią jego poszczególne elementy.

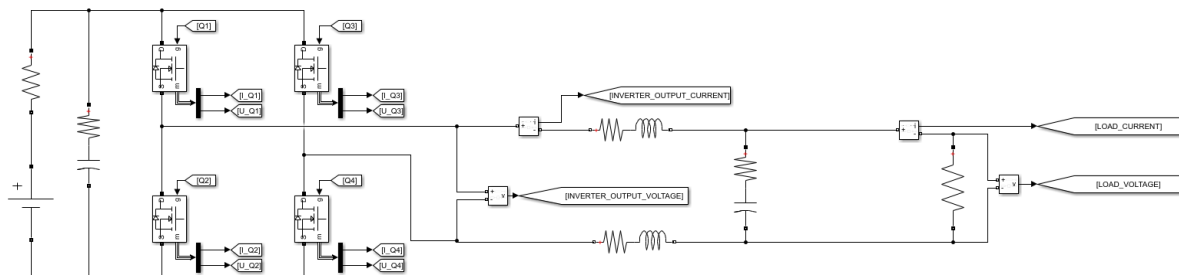


Rys. 21. Przykładowe przebiegi symulacyjne falownika pracującego zgodnie z założeniami metody modulacji unipolarnej: a) Sygnały sterujące na tle sygnału modulowanego oraz modulującego, b) Przebiegi sterujące tranzystorów pierwszej gałęzi oraz przebiegi wyjściowe, c) Przebiegi sterujące tranzystorów pierwszej gałęzi oraz przebiegi wyjściowe - powiększenie

4 Przygotowanie do badań laboratoryjnych falowników jednofazowych

4.1 Dostosowanie parametrów i struktury modelu symulacyjnego do parametrów układów dostępnych w laboratorium

Jednym z Państwa zadań w czasie ćwiczeń laboratoryjnych będzie porównanie przebiegów otrzymanych w czasie symulacji oraz eksperymentu. W tym celu niezbędne okaże się przygotowanie modelu, którego parametry będą odpowiadały parametrom falowników, na których będą Państwo realizować część praktyczną tego ćwiczenia. W związku powyższym proszę zmodyfikować modele falownika mostkowego sterowanego zgodnie z założeniami metod unipolarnej oraz bipolarnej modulacji szerokości impulsów PWM. Od strony układowej modyfikacji podlega, struktura filtra dolnoprzepustowego oraz parametry poszczególnych elementów. Strukturę zmodyfikowanego układu przedstawiono na rysunku 22, natomiast w poniższej tabeli zebrano wszystkie parametry wymagające modyfikacji.



Rys. 22. Model falownika mostkowego odpowiadający swojej strukturze układowi, który będzie badany w czasie zajęć laboratoryjnych.

Parametry modelu symulacyjnego wymagające modyfikacji

Parametr	Wartość	Jednostka
Napięcie źródła DC	48	V
Napięcie początkowe kondensatora wejściowego	48	V
Rezystancja obciążenia	7.7	Ω
Indukcyjności dławików	147	μH
Rezystancja dławików	30	$m\Omega$
Pojemność kondensatora filtrującego	6x4.7	μF
Napięcie początkowe kondensatora filtrującego	Wyłączyć	
Metoda całkowania	sałkrokowa	μs
Krok całkowania	1	

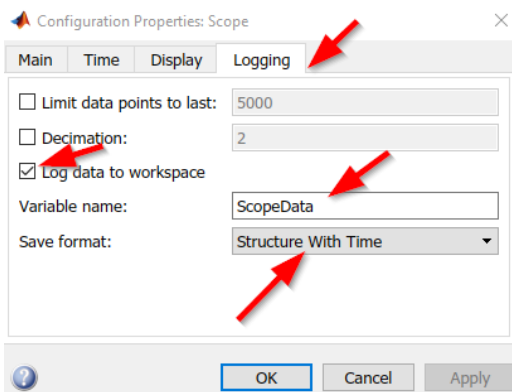
Pozostałe parametry należy pozostawić bez zmian.

4.2 Pozyskiwanie przebiegów z symulacji

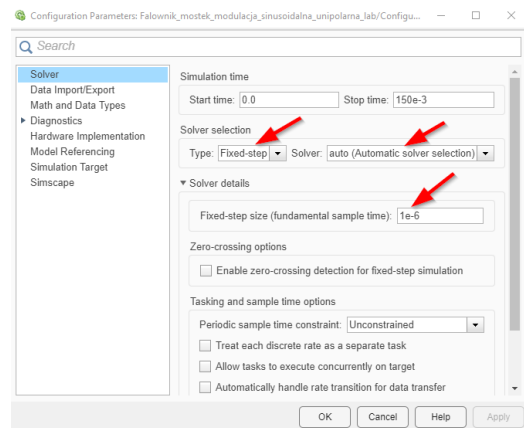
Gdy w modelu symulacyjnym zostały już wprowadzone wszystkie niezbędne modyfikacje można przejść do zapisu interesujących nas danych do pliku, celem późniejszego ich porównania z przebiegami eksperymentalnymi.

Aby zapisać poszczególne przebiegi do pliku należy kolejno wykonać poniższe czynności:

1. Proszę włączyć możliwość zapisu danych z elementu „Scope” do przestrzeni roboczej. Aby tego dokonać należy przejść do ustawień oscyloskopu prezentującego interesujące nas przebiegi. W zakładce „Logging”, aktywujemy opcję „Log Data to workspace”. Następnie podajemy nazwę zmiennej do jakiej mają być zapisywane dane oraz jej format. W naszym przypadku będzie to zmienna o nazwie „ScopeData”, a jej format to „Structure With Time”. Rysunek 23(a) przedstawia poprawne ustawienia elementu „Scope”.
2. Zmienić metodę całkowania na sałkrokową rys. 23(b).
3. Proszę dokonać konfiguracji narzędzia „callback” zgodnie z wzorem przedstawionym na rys. 24.
4. Uruchomić symulację i poczekać na wygenerowanie stosownego pliku zawierającego interesujące nas przebiegi. Plik ten powinien znajdować się w katalogu z modelem symulacyjnym

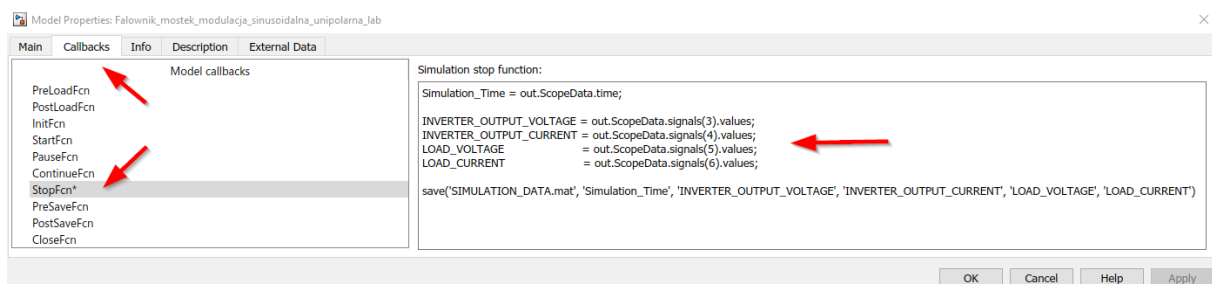


(a)



(b)

Rys. 23. Konfiguracja elementów symulatora Simulink: a) Poprawna konfiguracja elementu „Scope” umożliwiająca zapis danych do przestrzeni roboczej MATLAB, b) Zmiana ustawień symulatora - zastosowanie sałokrokowej metody całkowania

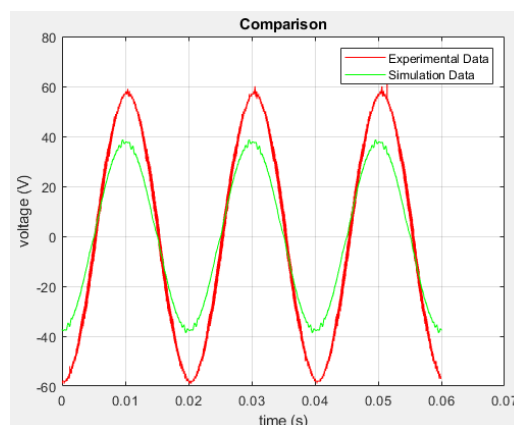


Rys. 24. Poprawna konfiguracja narzędzia callback

5. Dysponując już plikiem zawierającym wyniki z przeprowadzonej symulacji należy napisać krótki program w języku Matlab , który pozwoli:

- Łaadować do przestrzeni roboczej dane z pliku wygenerowanego przez symulator,
- Łaadować do przestrzeni roboczej dane z pliku CSV wygenerowanego przez oscyloskop w czasie zajęć laboratoryjnych,
- Odpowiednio spójycjonować względem siebie porównywane przebiegi,
- Wyświetlić badane przebiegi w sposób umożliwiający ich łatwe porównanie,

Przykładowy wykres wygenerowany za pomocą takiego programu przedstawiono na rysunku 25, a szkielet programu pozwalający na jego wygenerowanie, wraz z przykładowymi plikami wejściowymi został dołączony do tej instrukcji. Proszę zapoznać się z dostarczonym programem i dostosować go do swoich potrzeb.



Rys. 25. Przykładowy wykres wygenerowany przez program służący do porównywania przebiegów zarejestrowanych w czasie badań symulacyjnych i eksperymentalnych