

Trójfazowy falownik napięcia z łagodnym przełączaniem tranzystorów odpornym na zakłócenia sterowania

Streszczenie Pracy Doktorskiej

1. Wstęp

Sprawność falowników napięcia jest wysoka i zawiera się w przedziale od 97 do 99 procent. Pomimo wysokiej sprawności falowników napięcia, wiele ośrodków naukowych nadal prowadzi badania, które mają na celu zmniejszenie strat w falownikach, przy czym badania te są szczególnie istotne w przypadku falowników napięcia pracujących przy stosunkowo wysokich częstotliwościach przełączeń. Zasadniczy wpływ na sprawność falowników napięcia mają straty mocy powstające w tranzystorach oraz w ich diodach zwrotnych. Straty w tranzystorach falownika są sumą strat przewodzenia oraz strat przełączania. Straty przewodzenia zależą głównie od wartości prądu i napięcia występującego między kolektorem a emiterem tranzystora w czasie jego przewodzenia. Użytkownik falownika nie ma możliwości ograniczenia tych strat, ponieważ wymaga to zmniejszenia napięcia przewodzenia tranzystora, co może być osiągnięte wyłącznie na etapie jego konstrukcji. Straty przełączania powstają w procesie załączania i wyłączania tranzystorów. Przyczyną tych strat jest jednoczesna zmiana prądu i napięcia tranzystora w czasie trwania procesów przełączania. W przypadku falowników średniej i dużej mocy już przy częstotliwościach przełączeń rzędu kilku kiloherców straty te zaczynają przewyższać straty przewodzenia tranzystorów falownika. Ograniczenie strat przełączania możliwe jest przez zastosowanie układów wspomagających przełączanie tranzystorów, zwanych układami łagodnego lub częściej miękkiego przełączania, które powodują, że załączanie i wyłączanie tranzystorów falownika napięcia następuje przy ich prądzie lub napięciu bliskim zeru. Ograniczenie strat przełączania wpływa na zwiększenie sprawności falowników napięcia, ale również powoduje obniżenie temperatury pracy tranzystorów i ich diod zwrotnych, co pozwala na zastosowanie elementów chłodzących o mniejszych gabarytach i w konsekwencji zmniejszenie wymiarów samego falownika.

W literaturze naukowej i w bazach patentowych przedstawione i omawiane są różne rozwiązania mające na celu ograniczenie strat przełączania tranzystorów trójfazowych, dwupoziomowych falowników napięcia. W większości proponowanych układów miękkiego przełączania tranzystorów w falownikach napięcia występują połączenia, które negatywnie wpływają na niezawodność pracy falowników w przypadku wystąpienia zakłóceń sterowania. W układach tych istnieje niebezpieczeństwo udarowego rozładowania kondensatorów równolegle dołączonych do tranzystorów falownika napięcia lub ryzyko przerwania prądu dławików szeregowo połączonych z tranzystorami układu miękkiego przełączania, co grozi wystąpieniem przepięć i uszkodzeniem tranzystorów. Mankamentami dużej części proponowanych dotychczas układów miękkiego przełączania są również rozbudowane algorytmy sterowania przełączaniem tranzystorów głównych falownika napięcia.

Praca przedstawia układu miękkiego przełączania tranzystorów w trójfazowych falownikach napięcia, w którym nie występuje zagrożenie udarowego rozładowania kondensatorów przez przewodzące tranzystory falownika napięcia oraz nie ma możliwości przerwania prądu dławików, skutkującego powstaniem przepięć powodujących uszkodzenie tranzystorów układu miękkiego przełączania. Wyeliminowanie tych zagrożeń, zostało osiągnięte poprzez zastosowanie dodatkowych układów wspomagających przełączanie tranzystorów włączonych w strukturę typowego trójfazowego, falownika napięcia, przy czym na każdy z tranzystorów głównych falownika napięcia przypada jeden układ wspomagający przełączanie, wyposażony w jeden tranzystor pomocniczy oraz elementy magazynujące energię tj. kondensator i dwa dławiki indukcyjne.

2. Straty w falownikach napięcia

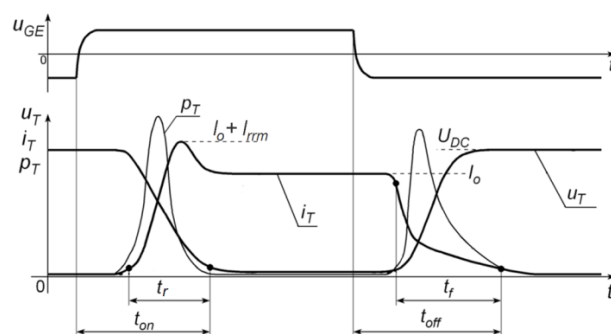
Głównymi elementami obniżającymi sprawność falowników napięcia są tranzystory, zwłaszcza jeśli falowniki pracują z modulacją szerokości impulsów i wysokimi częstotliwościami przełączeń. Drugim elementem, istotnie wpływającym na zmniejszenie sprawności falowników napięcia, są diody zwrotne. Zdecydowanie mniejszy wpływ na sprawność falowników napięcia mają straty w układach przeciwprzepięciowych oraz w rezystancjach obwodów bramek tranzystorów, jednakże nie powinno się ich pomijać w określeniu całkowitych strat mocy w falownikach napięcia.

Straty mocy w tranzystorach falownika można podzielić na straty przewodzenia, występujące w czasie ich przewodzenia oraz straty przełączania, powstające podczas procesów przełączania tranzystorów. Straty przewodzenia zależą od wartości prądu i napięcia tranzystora, występującego między kolektorem a emiterem w czasie jego przewodzenia oraz od czasu jego przewodzenia. Straty przewodzenia tranzystora, przypadające na jeden okres jego przełączania, mogą być oszacowane na podstawie zależności:

$$\Delta P_{T_{con}} = \frac{1}{T_i} \int_0^{t_{con}} i_T(t) u_T(t) dt \quad (2.1)$$

gdzie: T_i – okres przełączania tranzystora, t_{con} – czas przewodzenia tranzystora, $i_T(t)$ – prąd tranzystora, $u_T(t)$ – napięcie tranzystora, występujące między kolektorem a emiterem w czasie jego przewodzenia.

Straty przełączania powstają w procesie załączania i wyłączania tranzystorów. Przyczyną tych strat jest jednoczesna zmiana prądu i napięcia tranzystora w czasie trwania procesów przełączania. Na rysunku 2.1 przedstawiono poglądowe przebiegi prądu i napięcia tranzystora podczas jego załączania i wyłączania. W czasie obu tych procesów powstają straty mocy, których wartość zależy nie tylko od prądu i napięcia tranzystora podczas procesów przełączania, ale w znaczącym stopniu straty te zależą od czasu trwania tych procesów.



Rys. 2.1. Poglądowe przebiegi podczas procesu załączania i wyłączania tranzystora: u_{GE} – napięcie sterowania tranzystora, i_T – prąd tranzystora, I_o – prąd odbiornika, I_{rm} – prąd wsteczny diody zwrotnej drugiego tranzystora danej fazy falownika, u_T – napięcie tranzystora, p_T – straty mocy w procesie załączania i wyłączania tranzystora

Straty przełączania tranzystorów w trójfazowych falownikach napięcia w jednym okresie napięcia wyjściowego są sumą strat powstających podczas kolejnych procesów przełączania. Całkowite straty mocy podczas przełączania tranzystora przypadające na jeden okres napięcia wyjściowego falownika można wyznaczyć z zależności:

$$\Delta P_{T_{sw}} = f_m \sum_{n=1}^{\frac{m_f}{2}} \left(\int_0^{t_r} i_{T_{rn}}(t) u_{T_r}(t) dt + \int_0^{t_r} i_{T_{fn}}(t) u_{T_f}(t) dt \right) \quad (2.2)$$

gdzie: f_m – częstotliwość przebiegu modulującego, m_f – współczynnik modulacji częstotliwości, n – numer kolejnego przełączenia, $i_{T_{rn}}(t)$ – przebieg prądu tranzystora podczas n -tego procesu załączania, $u_{T_r}(t)$ – przebieg napięcia tranzystora podczas procesu załączania, $i_{T_{fn}}(t)$ – przebieg prądu tranzystora podczas n -tego procesu wyłączania, $u_{T_f}(t)$ – przebieg napięcia tranzystora podczas procesu wyłączania.

Udział strat przełączania w całkowitych stratach mocy występujących w tranzystorze rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości. Zagadnienie to dotyczy zwłaszcza falowników napięcia pracujących z modulacją szerokości impulsów. Już przy częstotliwościach kilku kiloherców straty przełączania

mogą być większe od strat przewodzenia. Wzrost strat prowadzi nie tylko do zmniejszenia sprawności falowników, ale przede wszystkim powoduje problemy z odpowiednim chłodzeniem tranzystorów.

Wyznaczenie całkowitych strat mocy w falownikach napięcia wymaga uwzględnienia strat powstających w diodach zwrotnych falownika. Stanowią one drugi, po tranzystorach, element obniżający sprawność falowników napięcia. Straty w diodach zwrotnych, podobnie jak w tranzystorach, można podzielić na straty przewodzenia i straty przełączania, przy czym straty przełączania powstają tylko podczas przechodzenia diody ze stanu przewodzenia do stanu zaporowego. Istotny wpływ na wartość strat przewodzenia diod zwrotnych ma prąd diody, jej napięcie przewodzenia i czas przewodzenia.

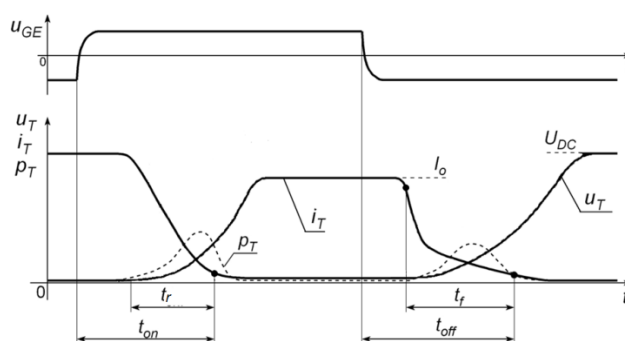
Podczas przechodzenia diody ze stanu przewodzenia do stanu zaporowego pojawia się impuls prądu wstecznego diody. Prąd wsteczny, który powstaje w wyniku zmiany polaryzacji przewodzącej diody zwrotnej drugiego tranzystora płynie przez pierwszy tranzystor danej fazy falownika, co wpływa na dodatkowe zwiększenie strat załączania tego tranzystora. Straty mocy w tym procesie równe są całce z iloczynu prądu wstecznego diody i narastającego jej ujemnego napięcia z uwzględnieniem częstotliwości przełączeń. Ich wartość może być porównywalna do wartości strat przełączania powstających w tranzystorach falownika napięcia.

Tranzystory i ich diody zwrotne nie są jedynymi elementami falownika, w których powstają straty mocy. W analizie strat mocy w falownikach napięcia należy również uwzględnić straty powstające w rezystancjach obwodów bramek tranzystorów oraz straty w układach przeciwprzepięciowych falownika, związane z rozpraszaniem energii pola magnetycznego pasożytniczych indukcyjności obwodu zasilania falownika. Jednak straty te mają pomijalnie mały wpływ na sprawność falowników napięcia. Analiza całkowitych strat mocy powstających w falownikach napięcia na przykładzie dwóch wybranych falowników została zamieszczona w treści rozprawy.

3. Metody miękkiego przełączania tranzystorów

Ograniczenie strat przełączania tranzystorów możliwe jest przez zastosowanie odpowiednich układów, które powodują, że załączanie lub wyłączanie tranzystorów falownika napięcia następuje przy ich prądzie lub napięciu bliskim zero. Uproszczone przebiegi prądu i napięcia tranzystora w procesie przełączenia tranzystorów w falowniku, w którym zastosowano układ miękkiego przełączania przedstawiono na rysunku 3.1. Podczas procesu załączania tranzystora jego napięcie zmniejsza się szybko, natomiast prąd narasta powoli. Z kolei w procesie wyłączania prąd maleje szybko, a jego napięcie narasta powoli. Taki przebieg procesów przełączania prowadzi do zmniejszenia strat przełączania (przebieg p_T na rysunku 3.1) względem tych strat w falowniku bez miękkiego przełączania (przebieg p_T na rysunku 2.1).

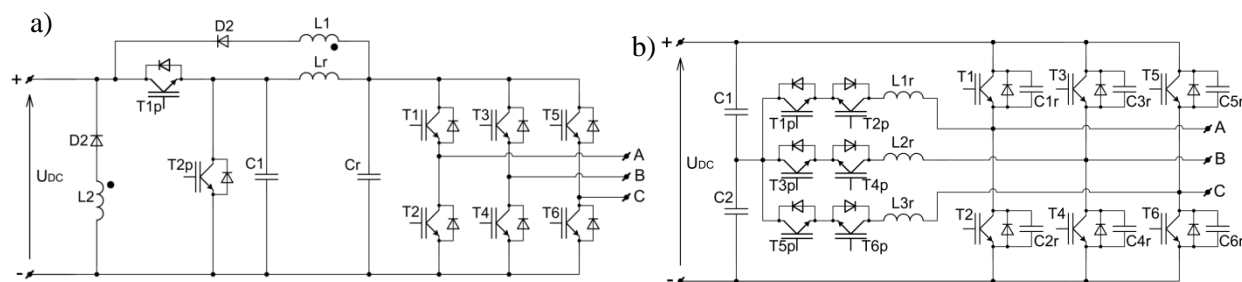
Miękkie przełączenie tranzystorów głównych falownika jest osiągnięte przez zastosowanie tranzystorów pomocniczych oraz dodatkowych elementów biernych włączonych w strukturę trójfazowego, dwupoziomowego falownika napięcia.



Rys. 3.1. Uproszczone przebiegi podczas procesu załączania i wyłączania tranzystora w falowniku napięcia z układem miękkiego przełączania: u_{GE} – napięcie sterowania tranzystora, i_T – prąd tranzystora, u_T – napięcie tranzystora, p_T – straty mocy w procesie załączania i wyłączania tranzystora

Prezentowane w literaturze rozwiązania układów miękkiego przełączania w trójfazowych, dwupoziomowych falownikach napięcia można podzielić na dwie grupy: układy ze wspomaganie grupowym oraz układy ze wspomaganie indywidualnym. Do układów ze wspomaganie grupowym należą rozwiązania, w których za miękkie przełączanie wszystkich tranzystorów falownika odpowiedzialny jest jeden układ miękkiego przełączania (rys. 3.2a). Ich istotną zaletą jest mała ilość elementów dodatkowych układu miękkiego przełączania, natomiast wadą większości układów ze wspomaganie grupowym jest złożony algorytm sterowania oraz znaczna ilość etapów pracy układu przypadających na jedno przełączenie tranzystora głównego. Układy ze wspomaganie grupowym charakteryzują się większymi ograniczeniami maksymalnej wartości częstotliwości przełączeń falownika niż układy ze wspomaganie indywidualnym. W większości układów z grupowym wspomaganie przełączania występują równoległe połączenia tranzystorów pomocniczych z kondensatorami bądź szeregowe połączenia tranzystorów pomocniczych z dławikami, co w przypadku wystąpienia zakłóceń sterowania stwarza niebezpieczeństwo uszkodzenia falownika.

Druga grupa obejmuje układy, które wspomagają przełączanie tranzystorów indywidualnie w poszczególnych fazach. W najczęściej stosowanych układach indywidualnego, łagodnego przełączania tranzystorów w każdej fazie falownika stosowane są dodatkowo dwa tranzystory pomocnicze, jeden lub kilka dławików indukcyjnych oraz dwa kondensatory, najczęściej równoległe dołączone do poszczególnych tranzystorów głównych w danej fazie falownika napięcia (rys. 3.2b).



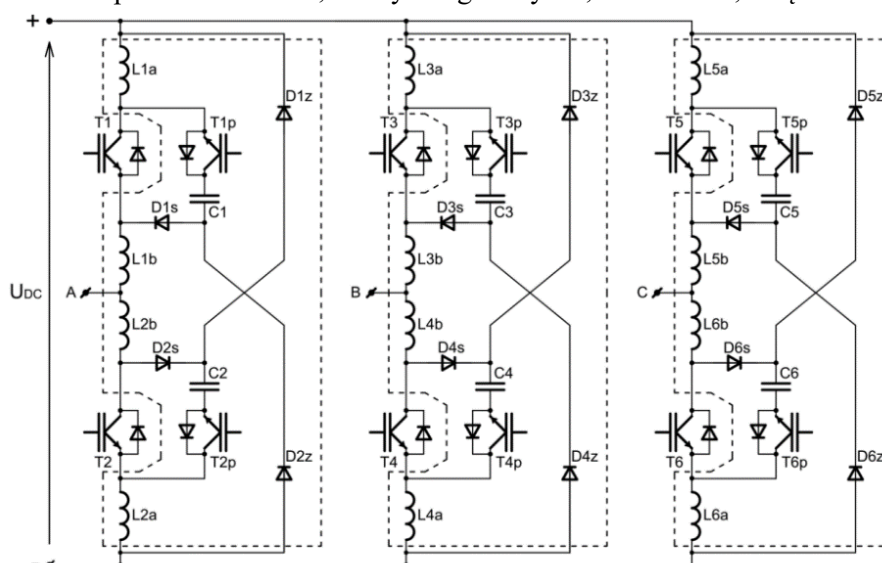
Rys. 3.2. Falownik z układem a) grupowego wspomaganie przełączania, b) indywidualnego wspomaganie przełączania

Układy indywidualnego miękkiego przełączania tranzystorów charakteryzują się możliwością pracy w szerokim zakresie zmian częstotliwości napięcia wyjściowego. Mogą więc być stosowane w falownikach pracujących z modulacją szerokości impulsów. Mankamentem większości dotychczasowych układów indywidualnego, miękkiego przełączania tranzystorów w trójfazowych falownikach napięcia jest złożone sterowanie tranzystorów głównych i pomocniczych. Najczęściej przed załączeniem jednego z dwóch tranzystorów głównych danej fazy falownika musi zostać załączony odpowiedni tranzystor pomocniczy ze ściśle określonym wyprzedzeniem. Prowadzi to do komplikacji algorytmu sterowania zwłaszcza przy pracy falownika ze sterowaniem wektorowym. W większości dotychczas opracowanych układów miękkiego przełączania tranzystorów występują równoległe połączenia kondensatorów z tranzystorami głównymi lub szeregowe połączenia dławików z tranzystorami pomocniczymi. W rozwiązaniach, w których kondensatory połączone są równoległe z tranzystorami głównymi istnieje niebezpieczeństwo ich uszkodzenia na skutek udarowego rozładowania kondensatora przez tranzystor główny, co może nastąpić w przypadku wystąpienia zakłóceń w układzie sterowania. Natomiast przerwanie prądu dławika szeregowo połączonego z tranzystorem pomocniczym prowadzi do powstania przepięcia mogącego powodować uszkodzenia tranzystorów. Szersza analiza dostępnych rozwiązań mających na celu ograniczenie strat przełączania tranzystorów na przykładzie kilku wybranych rozwiązań jest częścią rozprawy doktorskiej.

4. Układ miękkiego przełączania tranzystorów odporny na zakłócenia sterowania

Układ indywidualnego, miękkiego przełączania tranzystorów w trójfazowym, dwupoziomowym falowniku napięcia, w którym nie występuje zagrożenie udarowego rozładowania kondensatorów przez przewodzące tranzystory główne oraz nie ma możliwości przerwania prądu dławików, skutkującego powstaniem przepięć powodujących uszkodzenie tranzystorów przedstawiono na rysunku 4.1. Założono, że przełączanie tranzystorów pomocniczych jest uzależnione od przełączania tranzystorów głównych a nie odwrotnie, jak to ma miejsce w dotychczas proponowanych układach miękkiego przełączania tranzystorów w trójfazowych, dwupoziomowych falownikach napięcia. Na każdy tranzystor główny falownika napięcia przypada jeden indywidualny układ wspomagający jego przełączanie, składający się z tranzystora pomocniczego, kondensatora, dwóch dławików indukcyjnych oraz dwóch diod. Dołączenie kondensatorów do tranzystorów głównych za pośrednictwem diod zwrotnych tranzystorów pomocniczych i diod D1s, D3s, D5s oraz diod D2s, D4s, D6s ma na celu ograniczenie szybkości narastania napięcia na tranzystorach głównych w czasie procesu ich wyłączania. Podstawową rolę dławików L1a, L3a, L5a oraz dławików L2a, L4a, L6a, łączących tranzystory główne z dodatnim lub ujemnym zaciskiem źródła zasilania, jest ograniczenie szybkości narastania prądów tych tranzystorów podczas procesu ich załączania. Z kolei dławiki L1b, L3b, L5b oraz dławiki L2b, L4b, L6b, łączące tranzystory główne z zaciskami odbiornika, nie pozwalają na udarowe rozładowanie kondensatorów przez źródło zasilania i przez tranzystory główne po załączeniu tranzystorów pomocniczych. Dodatkowo wszystkie dławiki układu miękkiego przełączania ograniczą stromość narastania prądu zwarciovego w przypadku błędnego, jednoczesnego wystereowania do przewodzenia dwóch tranzystorów głównych jednej fazy falownika.

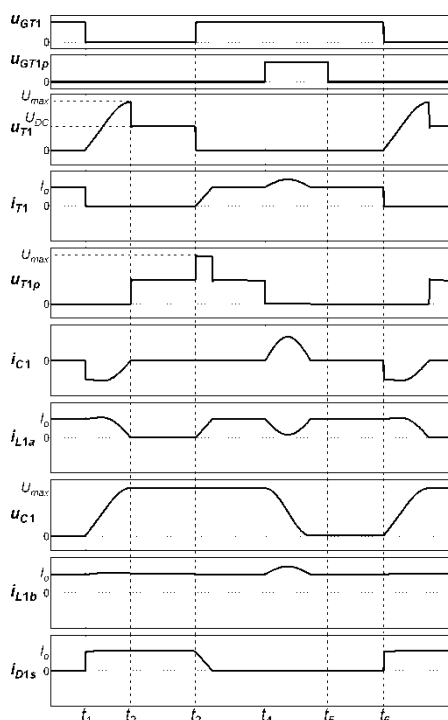
Tranzystory pomocnicze w proponowanym układzie są załączane z niewielkim opóźnieniem względem chwil załączania odpowiednich tranzystorów głównych, zależnym od czasu narastania prądu tranzystorów głównych do wartości prądu odbiornika. Z kolei ich wyłączanie następuje po zakończeniu procesów rozładowania rezonansowego kondensatorów, lecz nie później niż wyłączenie odpowiadających im tranzystorów głównych. Wyłączenie tranzystorów pomocniczych może zatem następować równocześnie z wyłączeniem odpowiednich tranzystorów głównych. Dla uproszczenia opisu działania założono, że w jednym cyklu przełączania tranzystorów wartość chwilowa prądu odbiornika nie ulega znaczącym zmianom. Zatem można przyjąć, że prąd wpływający do fazy odbiornika ma wartość stałą w jednym cyklu przełączania tranzystorów. Jako stan wyjściowy do analizy pracy układu łagodnego przełączania przyjęto stan, w którym: tranzystor T1 jest w stanie przewodzenia, pozostałe tranzystory są w stanie nieprzewodzenia, kondensator C1 jest rozładowany, natomiast kondensator C2 jest naładowany do napięcia źródła zasilania, prąd płynie od dodatniego zacisku źródła zasilania przez dławik L1a, tranzystor główny T1, dławik L1b, fazę A odbiornika.



Rys. 4.1. Trójfazowy falownik napięcia z miękkim przełączaniem tranzystorów odpornym na zakłócenia sterowania

Poglądowe przebiegi ilustrujące działanie układu łagodnego przełączania tranzystorów jednej fazy falownika napięcia przedstawione są na rysunku 4.2.

W chwili t_1 następuje wyłączenie tranzystora głównego T1, którego prąd maleje skokowo do zera. Kondensator C1 ładuje się rezonansowo do napięcia wyższego od napięcia źródła zasilania U_{DC} , a prąd tego kondensatora płynie przez: L1a, diodę zwrotną tranzystora pomocniczego T1p, C1, D1s, L1b i fazę A odbiornika. Prąd dławika L1a i kondensatora C1 maleje do zera, natomiast napięcie kondensatora C1 i napięcie tranzystora głównego T1 narasta łagodnie i osiąga wartość maksymalną w chwili t_2 . Prąd fazy A odbiornika płynie od ujemnego zacisku źródła zasilania częściowo przez D2z, D1s, L1b a częściowo przez L2a, diodę zwrotną tranzystora T2 i L2b. W tym przypadku rozptyw prądów zależy od indukcyjności wymienionych dławików, ich rezystancji oraz od spadków napięć na diodach w czasie ich przewodzenia. Napięcie na tranzystorze głównym T1 ustala się na poziomie napięcia źródła zasilania U_{DC} . Ponieważ napięcie na tranzystorze głównym T1 podczas wyłączenia jest bliskie zeru z uwagi na ładowanie kondensatora C1, to tranzystor T1 jest wyłączany łagodnie przy napięciu bliskim zeru.



Rys. 4.2. Poglądowe przebiegi prądów i napięć w układzie łagodnego przełączania: u_{GT1} , u_{GT1p} – sygnały sterujące pracą odpowiednio tranzystora głównego T1 i tranzystora pomocniczego T1p, i_{T1} , u_{T1} – prąd i napięcie tranzystora głównego T1, u_{T1p} – napięcia tranzystora pomocniczego T1p, i_{C1} , u_{C1} – prąd i napięcia kondensatora C1, i_{L1a} , i_{L1b} – prądy dławików L1a i L1b, i_{D1s} – prąd diody D1s

W przedziale t_2 , t_3 tranzystor T1 nie przewodzi, a napięcia na poszczególnych elementach nie zmieniają swoich wartości. W chwili t_3 następuje załączenie tranzystora głównego T1. Prąd dławika L1a i tranzystora T1 zaczyna narastać łagodnie do wartości prądu odbiornika. Natomiast prąd płynący przez diody D1s i D2z oraz prąd płynący przez dławik L2a, diodę zwrotną tranzystora T2 i dławik L2b zaczynają maleć łagodnie do zera. Ponieważ załączanie tranzystora głównego T1 następuje przy prądzie bliskim zeru ze względu na charakter narastania prądu dławika L1a, to tranzystor główny T1 jest załączany łagodnie. Gdy prąd dławika L1a osiągnie wartość prądu odbiornika, to prąd płynący przez diody D1s i D2z oraz prąd płynący przez dławik L2a, diodę zwrotną tranzystora T2 i dławik L2b osiągną wartość równą zeru. W chwili t_4 załączany jest tranzystor pomocniczy T1p i rozpoczyna się proces rezonansowego rozładowania kondensatora C1 w obwodzie C1, T1p, L1a, źródła zasilania, D2z. Ze względu na rezonansowy charakter prądu kondensatora C1 tranzystor pomocniczy T1p jest załączany przy prądzie bliskim zeru. Wyłączenie tego tranzystora następuje w chwili t_5 po zakończeniu procesu rezonansowego rozładowania kondensatora C1, jednak nie później niż wyłączenie tranzystora głównego T1. W trakcie wyłączania tranzystora T1p zarówno jego prąd jak

i napięcia są równe zero; przełączanie tranzystora pomocniczego jest więc także łagodne. Dla poprawnie dobranych kondensatorów i dławików, kondensator rozładuje się do napięcia równego zero. W czasie rozładowania kondensatora zmniejszeniu ulega prąd dławika L1a, co oznacza że ze źródła zasilania pobierana jest mniejsza ilość energii. Od chwili t_5 tranzystor pomocniczy T1p jest w stanie nieprzewodzenia, natomiast tranzystor główny T1 nadal przewodzi. Prąd płynie od dodatniego zacisku źródła zasilania przez dławik L1a, tranzystor T1 oraz dławik L1b do fazy A odbiornika. Kondensator C1 pozostaje rozładowany; stan ten trwa do chwili ponownego wyłączenia tranzystora T1. W chwili t_6 następuje ponowne wyłączenie tranzystora głównego T1 i rozpoczyna się następny cykl pracy układu. Dla przeciwnego kierunku prądu odbiornika drugi tranzystor główny T2 danej fazy oraz drugi tranzystor pomocniczy T2p są załączane analogicznie jak tranzystor główny T1 oraz tranzystor pomocniczy T1p.

Istotny wpływ na procesy załączania i wyłączania tranzystorów głównych i pomocniczych mają dobrane wartości pojemności kondensatorów oraz indukcyjności dławików układu miękkiego przełączania. Rolą dławików zewnętrznych (rys. 4.1) jest ograniczenie stromości narastania prądu tranzystorów głównych w procesie ich załączania tak, aby załączanie tranzystorów przebiegało przy prądzie bliskim zero. Po załączeniu tranzystora głównego jego prąd narasta od zera liniowo względem czasu. Przyjmując, że prąd tranzystorów głównych do chwili zakończenia procesu ich załączania nie może narosnąć do wartości wyższej niż wartość prądu I_{Ton} , indukcyjność L_a dławików zewnętrznych układu łagodnego przełączania (rys. 4.1) można wyrazić za pomocą zależności:

$$L_a = \frac{U_{DC}}{I_{Ton}} t_r \quad (4.1)$$

gdzie: U_{DC} – napięcie zasilania falownika, t_r – przedział czasu w procesie załączania pomiędzy chwilą, w której prąd tranzystora głównego narasta od 10% wartości maksymalnej a chwilą, w której napięcie tranzystora głównego obniży się do 10% maksymalnej wartości tego napięcia.

Należy podkreślić, że wartość prądu I_{Ton} jest jedynym parametrem zakładanym przy doborze indukcyjności L_a . Dławiki wewnętrzne układu miękkiego przełączania (rys. 4.1) zapobiegają udarowemu rozładowaniu kondensatorów poprzez tranzystory główne i źródło zasilania po załączeniu tranzystorów pomocniczych. Dobór ich indukcyjności nie jest jednak krytyczny.

Od chwili rozpoczęcia procesu wyłączania tranzystora głównego T1 (chwila t_1 - rys. 4.2) prąd dławika L1a płynie przez diodę zwrotną tranzystora pomocniczego T1p i kondensator C1. Do momentu, w którym napięcie kondensatora osiągnie wartość napięcia zasilania U_{DC} (rys. 4.2), przez kondensator płynie stały prąd równy wartości prądu odbiornika, co powoduje, że napięcie kondensatora narasta liniowo względem czasu. Przyjmując, że wszystkie kondensatory układu miękkiego przełączania mają tę samą pojemność oraz że maksymalna wartość napięcia kondensatora w chwili zakończenia procesu wyłączania tranzystora głównego wynosi U_{Coff} , to pojemność C kondensatora może być wyznaczona na podstawie zależności:

$$C = t_f \frac{I_{Tmax}}{U_{Coff}} \quad (4.2)$$

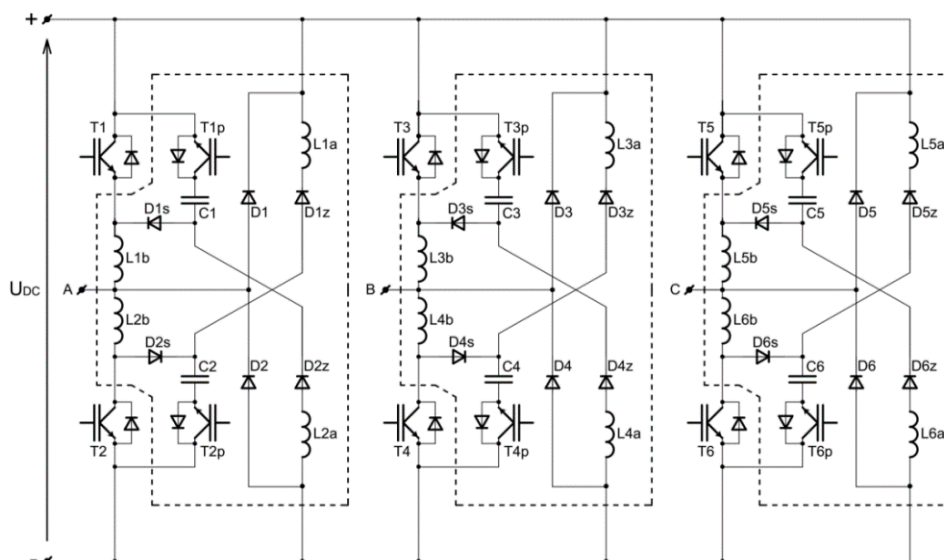
gdzie: t_f – przedział czasu, w którym podczas procesu wyłączania prąd tranzystora głównego zmniejsza się od 90% jego wartości maksymalnej do 10% tej wartości, I_{Tmax} – maksymalna wartość prądu tranzystora.

Miękkie wyłączanie tranzystorów głównych jest możliwe wtedy, gdy kondensatory przed wyłączeniem odpowiednich tranzystorów są całkowicie rozładowane. Ten warunek jest spełniony, jeżeli maksymalna wartość napięcia kondensatorów (w danym cyklu przełączania) będzie co najmniej dwukrotnie większa od napięcia zasilania falownika U_{DC} . W przeciwnym wypadku napięcie kondensatora będzie większe od zera przy kolejnym wyłączeniu tranzystora głównego.

Proces doboru indukcyjności dławików oraz pojemności kondensatorów układu miękkiego przełączania na podstawie zależności (4.1 - 4.2) omówiono w treści rozprawy. Ponieważ procesy rezonansowe zachodzące w układach miękkiego przełączania w falownikach napięcia wpływają na napięcie i prąd pracy tranzystorów zwrócono również uwagę na dobór tranzystorów.

W pracy przedstawiono również dwie alternatywne wersje bazowego układu miękkiego przełączania tranzystorów. Pierwsze rozwiązanie alternatywne, w którym tranzystory pomocnicze zostały zastąpione tyrystorami pozwala na uproszczenie algorytmu sterowania tyrystorów pomocniczych, które względem tranzystorów nie wymagają sygnału wyłączającego. Ze względu na czasy wyłączania tyrystorów (również tyrystorów impulsowych), zastosowanie układu miękkiego przełączania z tyrystorami pomocniczymi wydaje się być uzasadnione szczególnie w falownikach napięcia średniej i dużej mocy, w których czasy przełączania zastosowanych tranzystorów głównych pracujących przy napięciu rzędu kilowoltów wynoszą kilka μs .

Pewnym mankamentem bazowego układu miękkiego przełączania oraz układu z tyrystorami pomocniczymi jest to, że prąd rozładowania kondensatora płynie częściowo przez tranzystor główny wraz z prądem odbiornika. Ta niedogodność nie występuje w układzie miękkiego przełączania, który jest drugą wersją alternatywną układu bazowego. W drugim, alternatywnym układzie miękkiego przełączania tranzystorów (rys. 4.3) zmieniono sposób włączenia dławików, które w układzie przedstawionym na rysunku 4.1 łączą tranzystory główne z zaciskami źródła zasilania. Taka zmiana wpłynęła na przebieg procesu rozładowania kondensatorów i spowodowała, że prąd rozładowania kondensatorów nie przepływa przez tranzystory główne. Dodatkową zaletą zmiany sposobu włączenia dławików jest to, że procesy rezonansowe związane z pracą układu miękkiego przełączania nie wpływają na przebieg napięcia odbiornika.



Rys. 4.3. Falownik z układem miękkiego przełączania z alternatywnym włączeniem dławików

Procesy zachodzące w poszczególnych etapach pracy układu z alternatywnym włączeniem dławików różnią się względem procesów występujących w układzie bazowym. Pełny opis pracy układu miękkiego przełączania tranzystorów z alternatywnym włączeniem dławików przedstawiony dla jednego okresu pracy, odnoszącego się do częstotliwości fali nośnej, tranzystora głównego T1 pierwszej fazy falownika został zawarty w treści rozprawy.

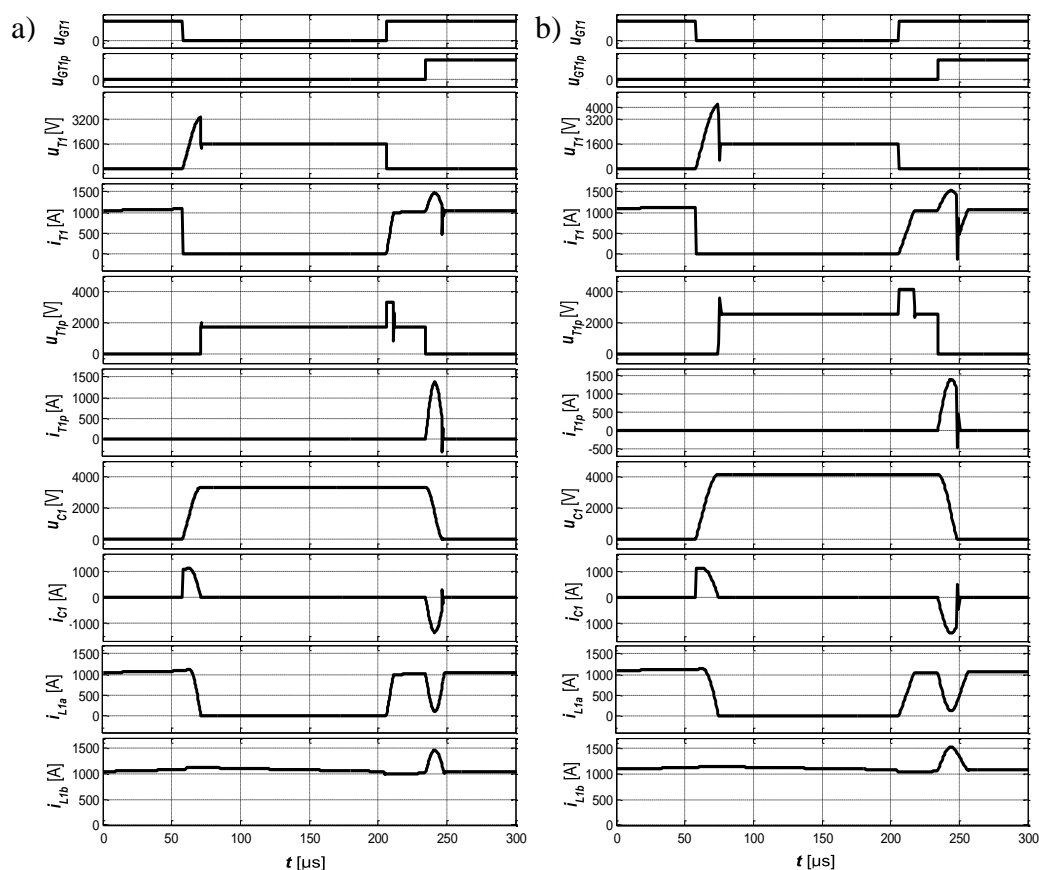
5. Analiza numeryczna pracy falownika napięcia z układem miękkiego przełączania tranzystorów

Analiza pracy trójfazowego falownika napięcia z zaproponowanym układem miękkiego przełączania wymagała przyjęcia modelu numerycznego pozwalającego wyznaczać przebiegi prądów i napięć dla dowolnych warunków pracy, w tym warunków pracy normalnej i warunków pracy związanych z niewłaściwym doбором elementów lub wystąpieniem zakłóceń w układzie sterowania. Model symulacyjny przygotowano w środowisku PSpice. Podstawowymi elementami falownika z układem miękkiego przełączania są tranzystory główne i pomocnicze oraz diody. Przyjęto uproszczony model tranzystora bipolarnego z izolowaną bramką, uwzględniający jedynie najistotniejsze cechy i właściwości tranzystora rzeczywistego. Jako diody falownika z układem

miękkiego przełączania zastosowano standardowy model diody dostępny w programie PSpice pozwalający zadawać wartości szeregu parametrów kształtujących właściwości diody, np. wsteczne napięcie przebicia, rezystancję szeregową. Dławiki układu miękkiego przełączania zostały zamodelowane jako elementy idealne posiadające jedynie indukcyjność; pominięto ich rezystancję z uwagi na to, że jest to parametr zależny od wykonania dławika. Kondensatory i źródło zasilania zamodelowano również jako elementy idealne.

Na podstawie przygotowanego modelu symulacyjnego przeprowadzono analizę numeryczną pracy falownika napięcia z bazowym układem miękkiego przełączania oraz z alternatywnym włączeniem dławików. Wykonano obliczenia dla różnych wartości pojemności kondensatorów i indukcyjności dławików spełniających przyjęte warunki miękkiego przełączania, przy czym falownik z układem miękkiego przełączania obciążany był odbiornikiem RL lub silnikiem indukcyjnym klatkowym. Przykładowe wyniki analizy numerycznej pracy falownika napięcia z bazowym układem miękkiego przełączania przy obciążeniu silnikiem indukcyjnym klatkowym Sh500H6As o mocy 800 kW i następujących parametrach znamionowych: $U_{sN} = 690$ V, $I_{sN} = 802$ A, $f_{sN} = 50$ Hz, $\cos(\varphi_{iN}) = 0,86$, $\eta_N = 0,968$, $p = 3$, $n_N = 995$ obr/min przedstawiono na rysunkach 5.1 oraz 5.2.

Na rysunku 5.1a przedstawiono przebiegi napięć i prądów procesu przełączania tranzystora głównego T1 w przypadkach, w których pojemność kondensatorów wynosiła 3,1 μ F, a indukcyjność dławików była równa 24 μ H, przy czym napięcie zasilania falownika U_{DC} było równe 1600 V, a silnik był obciążony momentem znamionowym. W celach porównawczych wykonano także obliczenia numeryczne przy indukcyjności dławików 42 μ H (rys. 5.1b).

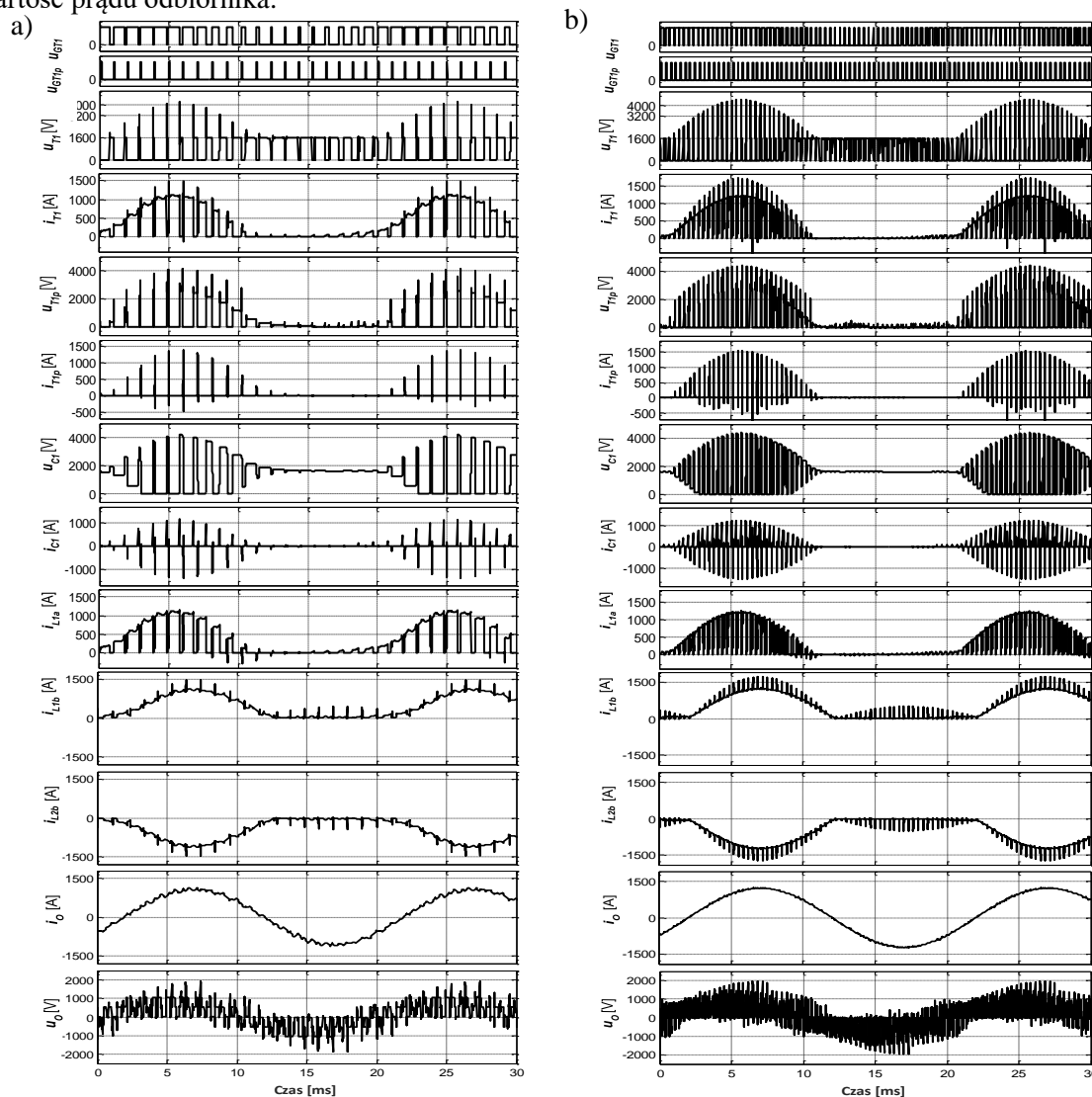


Rys. 5.1. Przebiegi prądów i napięć podczas przełączania tranzystora głównego T1 przy pojemności kondensatorów 3,1 μ F i indukcyjności dławików: a) 24 μ H, b) 42 μ H; u_{GTl} , u_{GTp} – sygnały sterujące pracą odpowiednio tranzystora głównego T1 i tranzystora pomocniczego T1p, i_{T1} , u_{T1} – prąd i napięcie tranzystora głównego T1, i_{T1p} , u_{T1p} – prąd i napięcie tranzystora pomocniczego T1p, i_{C1} , u_{C1} – prąd i napięcie kondensatora C1, i_{L1a} , i_{L1b} – prądy dławików L1a i L1b

W przedstawionych na rysunkach 5.1a oraz 5.1b symulacjach procesu przełączania tranzystora T1 kondensator C1 naładował się odpowiednio do około 3200 V oraz do około 4100 V, przy czym minimalna wartość napięcia przy której kondensator C1 może się całkowicie rozładować wynosi

3200 V (dwukrotna wartość napięcia zasilania U_{DC}). Dla obu wartości indukcyjności od momentu wyłączenia tranzystora T1 jego napięcie narasta łagodnie od zera, a proces wyłączenia tranzystora ma miękki charakter. Stromość narastania prądu tranzystora głównego T1 w procesie jego załączania przy indukcyjności dławików równej $42 \mu\text{H}$ (rys. 5.1b) jest około dwukrotnie mniejsza względem stromości narastania tego prądu w przypadku indukcyjności wynoszącej $24 \mu\text{H}$ (rys. 5.1a).

Na rysunku 5.2 przedstawiono przebiegi napięć i prądów podczas procesów przełączania tranzystora głównego T1 dla całego okresu napięcia wyjściowego falownika przy częstotliwości przełączeń 1 kHz (rys. 5.2a) oraz 3 kHz (rys. 5.2b). W przebiegu napięcia tranzystora T1, zarówno przy częstotliwości 1 kHz jak i 3 kHz, występują charakterystyczne dla pracy zaproponowanego układu miękkiego przełączania wartości napięcia większe od wartości napięcia zasilania U_{DC} . Należy zaznaczyć, że proces wyłączenia tranzystora głównego T1 ma miękki charakter, gdy kondensator C1 naładuje się do napięcia co najmniej dwukrotnie większego względem napięcia zasilania U_{DC} po wyłączeniu tranzystora T1 we wcześniejszym procesie przełączania. Warunek ten jest zachowany w około 60 procentach przełączeń pokazanych na rysunku 5.6. Kondensator C1 nie rozładowuje się do zera jedynie przy małych wartościach prądu odbiornika przepływającego przez tranzystor główny. Ze względu na to, że niewielka część prądu rozładowania kondensatora C1 przepływa przez tranzystor T1 oraz dławiki L1b, L2b, prądy tych elementów w trakcie procesów rozładowania kondensatora C1 chwilowo zwiększają swoją wartość. Procesy rozładowania kondensatora C1 nie wpływają jednak na wartość prądu odbiornika.



Rys. 5.2. Przebiegi symulacyjne wybranych prądów i napięć dla całego okresu napięcia wyjściowego falownika przy indukcyjności dławików $42 \mu\text{H}$, pojemności kondensatorów $3,1 \mu\text{F}$ i częstotliwości przełączania: a) 1 kHz, b) 3 kHz; i_{L2b} – prąd dławika L2b, i_o , u_o – prąd i napięcie fazowe odbiornika; pozostałe oznaczenia przebiegów jak na rysunku 5.1

Pełna analiza numeryczna pracy falownika napięcia z bazowy układem miękkiego przełączania oraz z układem z alternatywnym włączeniem dławików, zawierająca również wyniki przeprowadzonych obliczeń numerycznych dla kilku różnych zakłóceń, które potencjalnie mogą wystąpić w układzie sterowania zawarta została w pełnej treści rozprawy.

6. Badania laboratoryjne falownika napięcia z układem miękkiego przełączania tranzystorów

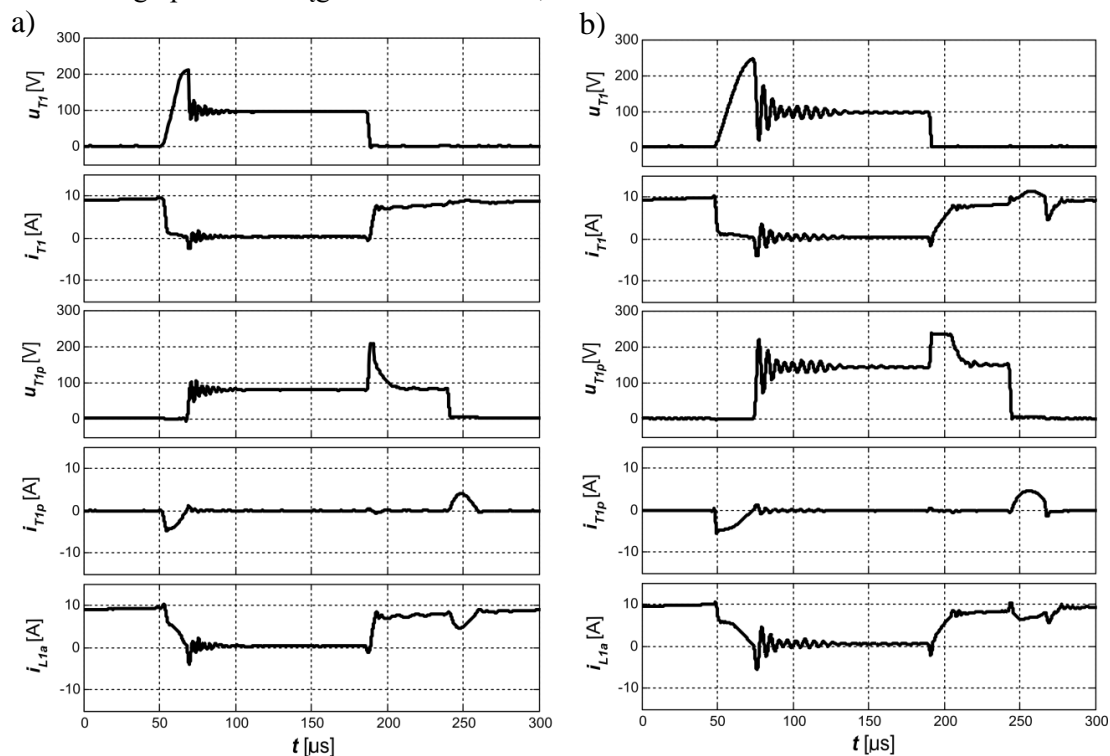
Weryfikacji poprawności pracy zaproponowanego układu łagodnego przełączania tranzystorów falownika napięcia dokonano w laboratoryjnym układzie o mocy około 1,5 kW. Maksymalna wartość napięcia zasilania falownika wynosiła 100 V, a dopuszczalna wartość prądu zasilania była równa 15 A. Aby ograniczyć ryzyko uszkodzenia laboratoryjnego układu falownika zdecydowano się zastosować elementy półprzewodnikowe o znacznie większych wartościach parametrów prądowych i napięciowych względem założonych wartości napięcia i prądu zasilania. Jako tranzystory główne i pomocnicze zastosowano tranzystory typu IRG4PH50KD, których znamionowy prąd i napięcie wynoszą odpowiednio 24 A (100°C) i 1200 V, a czasy załączania i wyłączania są równe odpowiednio 139 ns oraz 700 ns. W układzie laboratoryjnym wykorzystano diody typu IDP30E120XKSA1 o znamionowym prądzie 30 A i napięciu 1200 V. Falownik zasilany był ze źródła napięcia stałego z możliwością płynnej regulacji napięcia. Odbiornikiem zasilanym przez falownik był trójfazowy odbiornik rezystancyjno-indukcyjny lub trójfazowy silnik indukcyjny klatkowy.

Istotną kwestią był dobór wartości pojemności kondensatorów i indukcyjności dławików układu miękkiego przełączania. Pomiary wykonano dla pojemności kondensatorów równej 1,0 μF oraz indukcyjności dławików wynoszącej 100 μH . Wartości wymienionych parametrów wynikają z przyjętego napięcia zasilania falownika wynoszącego 100 V, maksymalnej wartości prądu odbiornika 10 A i przyjętych warunków miękkiego przełączania tranzystorów, które zakładają, że prąd tranzystora może narosnąć do 10 procent jego wartości maksymalnej w czasie załączania, a napięcie tranzystora w czasie jego wyłączania nie powinno przekroczyć 10 procent wartości napięcia zasilania. W celach porównawczych wykonano również pomiary dla pojemności kondensatorów równej 0,5 μF oraz indukcyjności dławików wynoszącej 300 μH .

Podczas pracy falownika napięcia zasilającego trójfazowy odbiornik RL połączony w gwiazdę dokonano rejestracji przebiegów prądów i napięć tranzystora głównego T1 i pomocniczego T1p (z integralnie dołączonymi diodami zwrotnymi) oraz prądu dławika L1a. Na rysunku 6.1a przedstawiono wybrane przebiegi prądów i napięć dla przypadku, w którym pojemność kondensatorów wynosi 0,5 μF , a indukcyjność dławików jest równa 100 μH . W chwili około 50 μs następuje wyłączenie tranzystora głównego T1 i rozpoczyna się proces ładowania kondensatora C1. Od chwili rozpoczęcia procesu wyłączania tranzystora głównego T1 jego napięcie narasta łagodnie od zera i w chwili zakończenia tego procesu osiąga wartość około 9 V. Napięcie kondensatora w momencie zakończenia procesu jego ładowania jest wyższe od dwukrotnej wartości napięcia zasilania U_{DC} (210 V); tak samo zmienia się napięcie tranzystora głównego T1. Załączenie tranzystora głównego T1 następuje w chwili około 185 μs . Napięcie tranzystora T1 maleje skokowo do zera, podczas gdy jego prąd narasta liniowo od zera i w chwili zakończenia procesu jego załączania wynosi około 0,8 A. Po czasie około 50 μs od załączenia tranzystora głównego T1 następuje załączenie tranzystora pomocniczego T1p i rozpoczyna się proces rezonansowego rozładowania kondensatora C1. Ze względu na rezonansowy charakter procesu rozładowania kondensatora C1 prąd tranzystora T1p narasta łagodnie i w chwili zakończenia procesu załączania tranzystora T1p osiąga wartość około 0,6 A. Wyłączanie tranzystora pomocniczego T1p, które następuje po zakończeniu procesu rezonansowego rozładowania kondensatora C1, przebiega przy prądzie i napięciu tego tranzystora równym zero.

Przebiegi prądów i napięć dla przypadku, w którym pojemność kondensatorów wynosiła 1,0 μF a indukcyjność dławików była równa 300 μH przedstawiono na rysunku 6.1b. Dwukrotne zwiększenie pojemności kondensatora C1 powoduje zmniejszenie stromości narastania napięcia tranzystora głównego T1 podczas jego wyłączania, skutkiem czego napięcie to w momencie zakończenia procesu

wyłączania tranzystora T1 osiąga wartość około 5 V. Napięcie tranzystora głównego T1 po czasie 30 μs od momentu jego wyłączenia osiąga wartość maksymalną równą około 250 V. Podczas załączania tranzystora głównego T1 jego prąd narasta łagodnie i z końcem tego procesu wynosi około 0,3 A. Załączenie tranzystora pomocniczego T1p następuje po około 50 μs od momentu załączenia tranzystora głównego T1. Prąd tranzystora T1p w procesie jego załączania narasta łagodnie i w chwili zakończenia tego procesu osiąga wartość około 0,4 A.

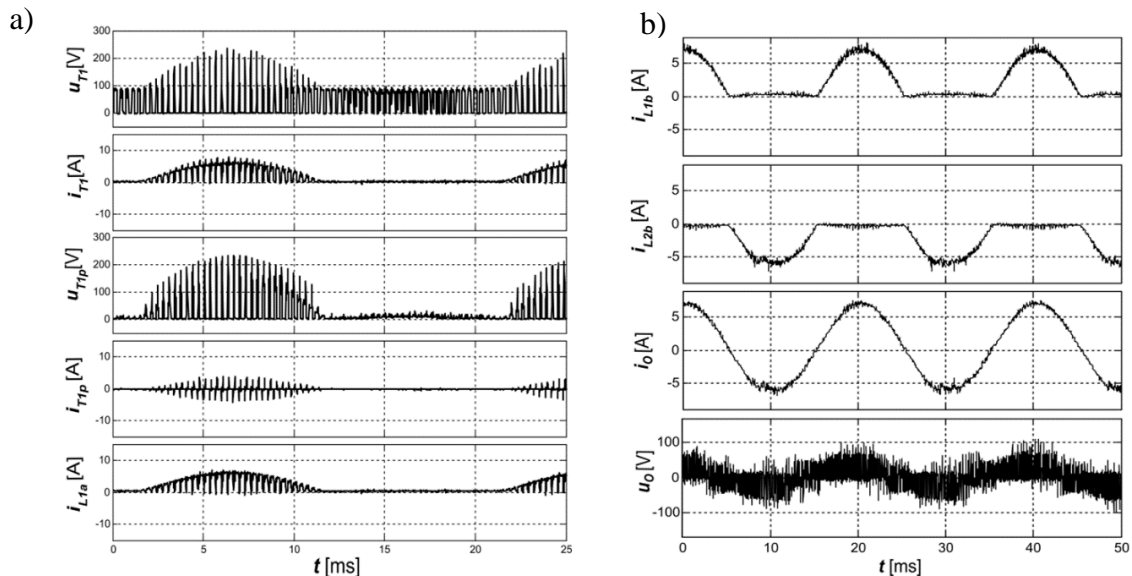


Rys. 6.1. Przebiegi wybranych prądów i napięć podczas przełączania tranzystora głównego T1 falownika zasilającego odbiornik RL (2,1 Ω , 3,1 mH) przy pojemności kondensatorów i indukcyjności dławików a) 0,5 μF i 100 μH , b) 1,0 μF i 300 μH ; u_{T1} , i_{T1} , – napięcie i prąd tranzystora głównego T1, u_{T1p} – napięcie tranzystora pomocniczego T1p, i_{T1p} – prąd tranzystora pomocniczego T1p i jego diody zwrotnej, i_{L1a} – prąd dławika L1a

Na rysunku 6.2a przedstawiono przebiegi napięć i prądów zarejestrowane w układzie laboratoryjnym podczas procesów przełączania tranzystora głównego T1 dla całego okresu napięcia wyjściowego falownika przy częstotliwości przełączeń 3 kHz. W przebiegu napięcia tranzystora T1, występują charakterystyczne dla pracy układu miękkiego przełączania wartości napięcia większe od wartości napięcia zasilania U_{DC} . Wartość napięcia tranzystora głównego T1, przekraczająca dwukrotną wartość napięcia zasilania, występuje w około 50 procentach przełączeń przypadających na półokres napięcia wyjściowego falownika. Ponieważ napięcie kondensatora C1 w procesie jego ładowania jest takie samo jak napięcie tranzystora głównego T1, to można stwierdzić, że połowa procesów wyłączania tranzystora głównego T1 rozpoczyna się przy jego napięciu równym zero. Należy podkreślić, że prąd rozładowania kondensatora C1 w niewielkim stopniu wpływa na wartość prądu tranzystora głównego T1.

Na rysunku 6.2b zamieszczono przebiegi prądu i napięcia fazowego odbiornika typu RL oraz przebiegi prądu dławików L1b, L2b zarejestrowane również przy indukcyjności dławików 300 μH i pojemności kondensatorów 1,0 μF . Przebiegi te pozwalają ocenić wpływ pracy falownika napięcia z układem miękkiego przełączania na kształt prądu i napięcia odbiornika. Wpływ procesów rozładowania kondensatora C1 na przebieg prądu dławika L1b oraz dławika L2b jest znikomy. Prąd odbiornika jest w niewielkim stopniu odkształcony względem przebiegu sinusoidalnego.

Szerszy zakres przeprowadzonych pomiarów laboratoryjnych pracy falownika napięcia z odpornym na zakłócenia sterowania układem miękkiego przełączania przy obciążeniu odbiornikiem RL, jak również silnikiem indukcyjnym przedstawiono w pełnej treści rozprawy.



Rys. 6.2. Przebiegi prądów i napięć przy indukcyjności 300 μH , pojemności 1,0 μF i częstotliwości przełączeń 3 kHz a) dla całego okresu napięcia wyjściowego falownika; b) dla dwóch okresów napięcia wyjściowego falownika; i_{L1b} , i_{L2b} – prądy dławików L1b, L2b, i_o , u_o – prąd i napięcie fazowe odbiornika; pozostałe oznaczenia przebiegów jak na rysunku 6.1

7. Wpływ miękkiego przełączania tranzystorów na pracę falownika napięcia

7.1 Ograniczenia sterowania

Układy miękkiego przełączania tranzystorów w falownikach napięcia umożliwiają zmniejszenie strat przełączania tranzystorów, jednak wpływają na ograniczenia dotyczące zakresu dopuszczalnych zmian parametrów sterowania falowników, tj. maksymalnej częstotliwości przełączeń oraz maksymalnej wartości współczynnika modulacji amplitudy. Aby tranzystory główne mogły być przełączane przy możliwie najmniejszych stratach, żaden z procesów rezonansowych nie może zostać przerwany przed jego zakończeniem. Przerwanie procesu rezonansowego spowodowane na przykład wyłączeniem tranzystora głównego może skutkować tym, że tranzystor nie będzie wyłączany miękko.

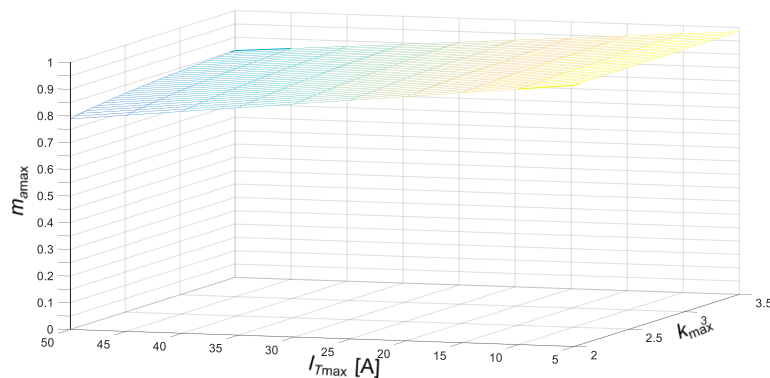
Uwzględniając procesy zachodzące w trakcie cyklu przełączania tranzystora głównego wyznaczono minimalny, dopuszczalny czas przewodzenia t_{pmin} tranzystora głównego falownika napięcia z bazowym układem miękkiego przełączania równy sumie czasu t_{nar} narastania prądu tranzystora głównego do wartości prądu odbiornika oraz czasu t_{Croz} rezonansowego rozładowania kondensatora układu miękkiego przełączania. Z kolei minimalny, dopuszczalny czas nieprzewodzenia tranzystora głównego t_{npmin} jest równy czasowi t_{clad} ładowania kondensatora układu miękkiego przełączania do wartości maksymalnej napięcia w danym cyklu przełączania. Ponieważ długości czasów przewodzenia i nieprzewodzenia tranzystorów głównych zależą od parametrów sterowania falownika, to w celu określenia ograniczeń parametrów sterowania w falowniku napięcia z bazowym układem miękkiego przełączania niezbędne jest wyznaczenie zarówno wartości czasu t_{pmin} jak i t_{npmin} . Analiza przeprowadzona w treści rozprawy pokazała, że wartości czasu t_{pmin} są większe od wartości czasu t_{npmin} w całym zakresie badanych zmian wartości prądu odbiornika oraz zmian parametrów układu miękkiego przełączania. Zatem zależność określająca maksymalną, dopuszczalną wartość współczynnika głębokości modulacji m_{amax} w falowniku napięcia z układem miękkiego przełączania przyjmuje postać:

$$m_{amax} = 1 - 2f_i t_{pmin} \quad (7.1)$$

gdzie: f_i – częstotliwość przełączeń falownika.

Na podstawie zależności (7.1) wyznaczono wpływ indukcyjności dławików oraz pojemności kondensatorów na maksymalne, dopuszczalne wartości współczynnika modulacji amplitudy m_{amax} dla falownika napięcia z układem miękkiego przełączania (rys 7.1), przy czym przyjęto następujące wartości parametrów: $U_{DC} = 100 \text{ V}$, $f_i = 1 \text{ kHz}$, $f_m = 50 \text{ Hz}$, $L_a = L_b = 300 \mu\text{H}$, pojemność C kondensatorów zmieniano w zakresie od 0,7 μF do 1,9 μF , co przy zmianach prądu odbiornika

w zakresie od 5 do 50 A odpowiada zmianom współczynnika k_{max} (krotność maksymalnej wartości napięcia kondensatora względem napięcia zasilania U_{DC}) w przedziale od 2,0 do 3,5.



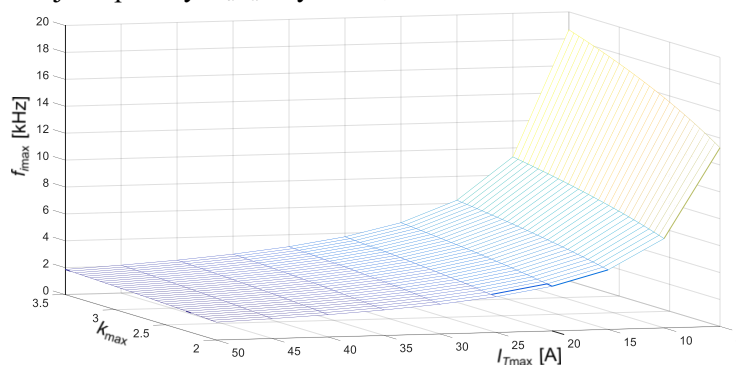
Rys. 7.1 Zakres maksymalnych, dopuszczalnych wartości współczynnika głębokości modulacji amplitudy m_{amax}

Maksymalna, dopuszczalna wartość współczynnika m_{amax} falownika napięcia z układem miękkiego przełączania dla zadanych wartości pojemności kondensatorów i indukcyjności dławików oraz dla określonej wartości prądu odbiornika jest zależna od częstotliwości fali nośnej f_i (częstotliwości przełączeń). Im wyższa jest wartość częstotliwości fali nośnej, tym mniejszy jest zakres zmian współczynnika głębokości modulacji amplitudy m_a . Należy zaznaczyć, że przy pracy falownika napięcia z maksymalną, dopuszczalną wartością współczynnika m_{amax} , częstotliwość fali nośnej jest również maksymalna, a obydwa wymienione parametry sterowania są wzajemnie zależne.

Zakres zmian współczynnika głębokości modulacji amplitudy m_a jest często zadany a priori. Dlatego też maksymalną, dopuszczalną wartość częstotliwości fali nośnej f_{imax} należy wyznaczyć dla maksymalnej, zadanej wartości współczynnika modulacji amplitudy m_{amax} . Zależność określająca maksymalną, dopuszczalną wartość częstotliwości fali nośnej f_{imax} falownika napięcia z układem miękkiego przełączania ma więc postać:

$$f_{imax} = \frac{1 - m_{amax}}{2t_{pmin}} \quad (7.2)$$

Wykorzystując zależność (7.2) wyznaczono zakres zmian maksymalnych, dopuszczalnych wartości częstotliwości fali nośnej f_{imax} (rys. 7.2), przy czym przyjęto, że maksymalna wartość współczynnika głębokości modulacji amplitudy m_{amax} wynosi 0,75.



Rys. 7.2. Zakres zmian maksymalnych, dopuszczalnych wartości częstotliwości fali nośnej f_{imax}

7.2 Straty w falowniku napięcia z układem miękkiego przełączania

W falowniku napięcia z układem miękkiego przełączenia procesy załączania tranzystorów głównych przebiegają przy ich prądzie bliskim zero, natomiast procesy wyłączania tranzystorów głównych zachodzą przy ich napięciu bliskim zero. Straty przełączania tranzystorów głównych są znacząco ograniczone, jednak nie są równe zero i powinny zostać uwzględnione w bilansie całkowitych strat mocy falownika napięcia z układem miękkiego przełączania. Przeprowadzona w treści rozprawy analiza pozwoliła na wyprowadzenie zależności na straty załączania ΔP_{Ton} i straty wyłączania ΔP_{Toff} tranzystorów głównych falownika napięcia z układem miękkiego przełączania. Całkowite straty przełączania ΔP_{Tsw} tranzystorów głównych falownika napięcia z układem miękkiego

przełączania są sumą strat załączania oraz strat wyłączenia. Przykładowe zestawienie wartości tych strat dla przyjętych w treści rozprawy parametrów zamieszczono w tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Całkowite straty przełączania tranzystorów głównych

Częstotliwość przełączeń f_i		Falownik o mocy 100 kW			Falownik o mocy 1 MW		
		1 kHz	3 kHz	6 kHz	1 kHz	3 kHz	6 kHz
Całkowite straty załączania tranzystorów [W]	$k_{max} = 3,0$	0,11	0,34	0,69	1,93	5,79	11,59
	$k_{max} = 2,5$	0,11	0,34	0,69	1,93	5,79	11,59
	$k_{max} = 2,0$	0,11	0,34	0,69	1,93	5,79	5,79
Całkowite straty wyłączenia tranzystorów [W]	$k_{max} = 3,0$	1,45	4,98	10,05	38,62	129,15	259,32
	$k_{max} = 2,5$	2,35	7,48	14,98	55,56	171,34	345,70
	$k_{max} = 2,0$	4,16	12,79	25,64	110,49	339,84	681,23
Całkowite straty przełączania tranzystorów [W]	$k_{max} = 3,0$	1,57	5,33	10,75	40,55	134,95	270,92
	$k_{max} = 2,5$	2,46	7,83	15,68	57,49	177,14	357,30
	$k_{max} = 2,0$	4,28	13,14	26,34	112,42	345,64	692,83

Całkowite straty mocy powstające podczas załączania tranzystorów głównych falownika napięcia z układem miękkiego przełączania są o około rząd wielkości mniejsze niż straty wyłączenia tych tranzystorów. Na straty mocy powstające podczas wyłączenia tranzystorów głównych w istotny sposób wpływa założona maksymalna wartość współczynnika k_{max} , która zależy od przyjętych wartości pojemności kondensatorów układu miękkiego przełączania. Przy wartości współczynnika k_{max} równej 3 i częstotliwości przełączeń wynoszącej 3 kHz straty przełączania tranzystorów głównych w falowniku z miękkim przełączaniem stanowią około 13% strat powstających podczas przełączania tranzystorów falownika bez miękkiego przełączania.

W bilansie całkowitych strat mocy w falowniku napięcia należy uwzględnić również straty powstające w elementach układów miękkiego przełączania. W zaproponowanym układzie miękkiego przełączania na każdy tranzystor główny falownika napięcia przypada jeden indywidualny układ wspomagający jego przełączanie, składający się z tranzystora pomocniczego z diodą zwrotną, kondensatora, dwóch dławików indukcyjnych oraz dwóch diod (rys. 4.1). Dla tranzystorów pomocniczych należy wyznaczyć zarówno straty przewodzenia jak i straty przełączania. Straty we wszystkich diodach falownika z układem łagodnego przełączania powstają tylko podczas procesu przewodzenia tych diod (Podczas wyłączenia diod nie dochodzi do przepływu prądu wstecznego). Straty w dławikach związane są z ich rezystancją wewnętrzną. Całkowite straty mocy w układzie miękkiego przełączania są sumą strat przewodzenia i strat przełączania tranzystorów pomocniczych, strat przewodzenia diod oraz strat mocy powstających w dławikach. Analiza strat mocy powstających w wymienionych elementach układu łagodnego przełączania jest zawarta w treści rozprawy.

Przeprowadzenie bilansu całkowitych strat mocy falownika napięcia z układem miękkiego przełączania pozwala określić, w jakim stopniu zastosowanie układu miękkiego przełączania wpływa na wzrost sprawności falownika napięcia. Wyniki zawartej w pracy analizy całkowitych strat mocy falownika napięcia z układem miękkiego przełączania dla dwóch falowników o mocy 100 kW oraz 1 MW porównano do strat mocy powstających w falownikach bez miękkiego przełączania.

8. Podsumowanie

Należy oczekiwać, że opracowany układ miękkiego przełączania ograniczający straty przełączania pozwoli zmniejszyć gabaryty układów chłodzenia tranzystorów i znacząco obniżyć dynamiczne efekty wahań temperatury pracy tranzystorów. Zaprezentowany układ miękkiego przełączania pełni również funkcję zabezpieczenia przeciwprzepięciowego tranzystorów. Dodatkowo dławiki układu miękkiego przełączania ograniczą stromość narastania prądu w przypadku jednoczesnego załączenia dwóch tranzystorów głównych danej fazy falownika napięcia. Pełne podsumowanie, w którym zawarto najważniejsze wnioski oraz określono kierunki dalszych badań związanych z ograniczaniem strat przełączania tranzystorów w falownikach napięcia jest treścią ostatniego rozdziału rozprawy.