

## R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej pt. „Falownik ZVS-1S w zastosowaniu do nagrzewania indukcyjnego”, mgr inż. Aleksandra Skały. Promotorem jest Prof. dr hab. inż. Stanisław Piróg. Recenzja zrealizowana na zlecenie Pana Dziekana Wydziału EAIiB AGH w Krakowie pismem L. Dz. WEAIiB-b/ Sekr 162/14 z dnia 25 marca 2014 roku.

### 1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawę stanowi praca pt. „Falownik ZVS-1S w zastosowaniu do nagrzewania indukcyjnego”, której objętość wynosi 145 stron tekstu wraz z wykazem literatury i dodatkiem. Tekst główny podzielony jest na 7 rozdziałów i część zatytułowaną jako „Dodatek”. W wykazie literatury wymieniono 35 pozycji. Przedmiotem pracy jest badanie przekształtnika energoelektronicznego o topologii wymagającej niewielkiej ilości elementów i charakteryzującej się dużą sprawnością podczas pracy z częstotliwością wykorzystywaną w zadaniach nagrzewania indukcyjnego. Praca dotyczy ważnej i aktualnej problematyki naukowej i aplikacyjnej związanej z wykorzystaniem energoelektroniki i sterowania w technice nagrzewania indukcyjnego, dlatego wybór tematu zasługuje na pozytywną ocenę. Wysoko należy również ocenić sposób prowadzenia badań, w których wykorzystano metody analityczne, symulacje komputerowe, a także eksperymentalne, jak również uzyskane wyniki.

W rozdziale początkowym pracy autor sprecyzował cel i zakres pracy, który obejmuje szczegółową analizę problematyki związanej z realizowanym układem, modelowanie matematyczne i symulacyjne wybranych zagadnień, wypracowanie i weryfikacja koncepcji sterowania układem, a także budowa stanowiska laboratoryjnego i przeprowadzenie badań eksperymentalnych. Rozprawa stanowi więc zastawienie prac koncepcyjnych, analitycznych, symulacyjnych i eksperymentalnych, mających na celu potwierdzenie założeń dotyczących własności przekształtnika, a także możliwości realizacji procesu nagrzewania indukcyjnego z wykorzystaniem tej topologii i opracowanych sposobów sterowania. Ze względu na zastosowanie falownika do nagrzewania indukcyjnego w pracy znalazło się wiele informacji dotyczącej specyfiki tej techniki nagrzewania i zjawisk jakie determinują własności obciążenia falownika. Takie zagadnienia występują już w rozdziale wprowadzającym, gdzie dokonano również klasyfikacji falowników, scharakteryzowano aspekty wyboru częstotliwości pracy, łączników półprzewodnikowych, metod ograniczania strat energii w układach z miękkim przełączaniem, a także omówiono własności falownika klasy E i wybranego układu jednołącznikowego.

W rozdziale 2 zamieszczono schemat układu oraz jego szczegółowy opis i zasadę działania. Autor wyszczególnił cykle pracy układu oraz dokonał szczegółowej analizy zjawisk zachodzących w układzie związanych z dostarczaniem energii do układu i oscylacyjnym charakterem przebiegów. Bardzo przejrzyście wyróżniono pracę optymalną układu, ze względu na minimalizację strat energii, od możliwych przypadków pracy nieoptymalnej. Dla poszczególnych stanów pracy układu przedstawiono szczegółową analizę matematyczną. Bardzo istotne są tu zależności (2.9) i (2.10) umożliwiające wyznaczenie czasu załączenia tranzystora dla uzyskania warunków pracy optymalnej, a także wyznaczenie zakresu pracy optymalnej i

parametrów sygnałów tym trybie pracy. Bardzo istotny jest tu także podrozdział 2.6, gdzie omówiono własności regulacyjne falownika napięcia ZVS-1S.

W rozdziale 3 autor prezentuje obliczenia parametrów falownika. Jest to ściśle związane z parametrami wzbudnika, stąd wiele miejsca poświęcono w tej części pracy analizie, pomiarom i realizacji modelu matematycznego wzbudnika. W rozdziale tym dokonane zostają założenia wstępne dla pracy falownika takie jak częstotliwość minimalna, zakres napięcia wejściowego, moc czynna wyjściowa wynikająca z parametrów wsadu i sposobu jego nagrzewania. Dla wyliczenia parametrów schematów zastępczych wzbudnika wykorzystano trzy metody uzyskując znaczne różnice wyników. Przyczyny tych różnic zostały uzasadnione przez autora, który omówił specyficzne założenia i uproszczenia wykorzystane w metodach obliczeniowych. Do dalszej analizy przyjęto uśrednione wartości wyników parametrów odbiornika.

W rozdziale tym autor zamieścił również podstawowe obliczenia charakteryzujące układ drugiego rzędu jakim można opisać zjawiska występujące w analizowanym falowniku.

W podrozdziale 3.6 autor przedstawił oszacowanie strat energii w tranzystorze, co jest niezbędne do założeń parametrów zastosowanego podczas testów eksperymentalnych radiatora. Jest tu również zamieszczona analiza koncepcji metody załączenia układu, gdzie wymagane jest wstępne naładowanie kondensatora. Autor rozwiązuje ten istotny problem proponując dodatkowy obwód z elementami mocy ograniczającymi prąd ładowania i sterowanym łącznikiem zawierającym te elementy po zakończeniu ładowania kondensatora. Są to niezbędne prace inżynierskie i koncepcyjne umożliwiające przeprowadzenie eksperymentu, które autor z powodzeniem rozwiązuje.

Rozdział 4 pracy poświęcony jest badaniom symulacyjnym układu. Przedstawiono tu model układu, a także przebiegi w poszczególnych stanach pracy oraz liczne komentarze wynikające z obserwacji działania układu. Szczegółowo przeanalizowano problem możliwości osiągnięcia optymalnej pracy układu przy zwiększaniu obciążenia. Jest to bardzo istotne, jeżeli zmiana współczynnika tłumienia wymaga zmian współczynnika wypełnienia i częstotliwości impulsowania, która może być dodatkowo zdeterminowana przez głębokość wnikania. Wynika z tego, że dobór wartości elementów układu jest zadaniem bardzo złożonym.

Z wykorzystaniem wyników symulacyjnych oszacowano sprawność układu i ilość energii traconej w tranzystorze w funkcji obciążenia i współczynnika wypełnienia.

W rozdziale 5 autor przedstawia zagadnienia związane z projektem falownika. Niezwykle istotna jest tu prezentacja koncepcji układów sterowania. Analizowany w pracy układ wymaga dedykowanego podejścia do realizacji regulacji, ponieważ wartość częstotliwości impulsowania, a także współczynnika wypełnienia w punkcie pracy optymalnej zależą od obciążenia. Na uwagę zasługuje fakt, że autor w pracy omówił 4 koncepcje układu regulacji. W rozdziale 5 wyjaśniono ich funkcje oraz symulacyjną weryfikację działania. Przedstawiono na tym etapie pracy modele symulacyjne dwóch koncepcji sterowania oraz ich przebiegi. Omówienie funkcjonalności elementów modeli, a także uzyskanych przebiegów jest skromne, jednak w dalszej części tego rozdziału przedstawiono topologie układów funkcyjnych układu regulacji wykonanego dla badań eksperymentalnych falownika.

Rozdział 6 stanowi istotny element pracy, ponieważ przedstawiono w nim opis stanowiska laboratoryjnego oraz wyniki badań eksperymentalnych falownika. Z opisu tego wyraźnie wynika, że przygotowanie eksperymentu wymagało od doktoranta dużej wiedzy inżynierskiej i zaangażowania. Ze względu na wysoką częstotliwość pracy falownika wymagane było zapewnienie odpowiedniej szybkości działania układów elektronicznych. Problem ten rozwiązano przez realizację pomocniczych układów elektronicznych w technice analogowej i co

bardzo istotne, przekształtnik doprowadzony został do postaci autonomicznie działającego układu.

W rozdziale tym znajdują się również wyniki pomiarów parametrów obciążenia. Bardzo interesującym jest tu porównanie wyników pomiarowych z obliczeniowymi.

Oszacowanie mocy i sprawności układu to kolejny podrozdział, związany z eksperymentalnymi badaniami analizowanego układu, w którym autor dokonuje weryfikacji wcześniejszych obliczeń i wyników symulacyjnych. Dokonano pomiarów w zakresie mocy do 785.46W dla różnych wartości zainstalowanej pojemności oraz rodzaju nagrzewanego elementu. Zdefiniowano sprawność termiczną i elektryczną oraz wyliczono wartości dla poszczególnych przypadków. Interesujące jest uzyskanie sprawności elektrycznej dochodzącej do 90%.

Kolejnym zagadnieniem, które zostało zbadane eksperymentalnie była praca układu w stanach przejściowych. Układ regulacji sprowadza falownik do pracy ZVS, czyli do pracy optymalnej. Jest to bardzo istotne zagadnienie, ponieważ podczas pracy nieoptymalnej układ pracuje z mniejszą sprawnością, a więc szybkość procesów przejściowych może być zdeterminowana możliwością odprowadzania ciepła z tranzystora. W tej części nie podano schematu układu regulacji, ale z opisu badań wynika, że testowano koncepcję z regulatorem napięcia na tranzystorze sprowadzającym układ do warunków ZVS omówioną w rozdziale 5.3.2. Autor przedstawia końcowe rezultaty badań, w których uzyskał zadawalające wyniki udowadniając w ten sposób, że możliwy jest dobór parametrów proponowanego układu regulacji do współpracy z analizowanym falownikiem.

W podsumowaniu autor zwięźle komentuje zawartość pracy, realizację badań i uzyskane wyniki, a także kierunki dalszych badań.

W spisie literatury wymienione są zarówno istotne dla analizowanej problematyki artykuły naukowe, jak i pozycje książkowe. Wynika z tego, że doktorant ma podstawy wiedzy w dziedzinie, w której realizował pracę doktorską, a także zapoznaje się z osiągnięciami naukowców pojawiającymi się w wydawnictwach naukowych o zasięgu międzynarodowym.

## 2. Wartość naukowa pracy

Podjęty temat jest aktualny ze względów poznawczych, a także ze względu na możliwe zastosowania przemysłowe. Badany układ jest to przekształtnikiem energoelektronicznym, którego działania opiera się na wykorzystaniu pojedynczego sterowanego elementu półprzewodnikowego mocy. Ta oszczędna topologia wymaga jednak dedykowanego sterowania i odpowiedniego projektu w celu uzyskania poprawnego działania, odpowiedniej funkcjonalności i sprawności. Autor w pracy wykazał wagę tych problemów wykorzystując metody analityczne, symulacyjne i eksperymentalne dla weryfikacji założenia o możliwości wykorzystania badanego przekształtnika do nagrzewania indukcyjnego. W pracy wyartykułowanych jest również wiele istotnych pytań dotyczących natury zjawisk badanego problemu, co nadaje jej naukowy charakter.

Za oryginalne osiągnięcia autora zamieszczone w pracy, które mogą mieć znaczenie dla nauki i techniki, można uznać:

- analizę pracy falownika i obliczenie zakresu pracy optymalnej, a także parametrów układu dla tego stanu pracy,
- opracowanie koncepcji sterowania falownikiem,
- wykonanie układu sterowania i regulacji w celu przeprowadzenia badań eksperymentalnych, co wiąże się z wykorzystaniem wiedzy inżynierskiej do właściwego doboru elementów, projektu układu i jego wykonania.

### 3. Wniosek końcowy

Podsumowując, z pracy wynika, że autor przeprowadził badania naukowe i dokonał oryginalnych rozwiązań problemów naukowych w obszarze zagadnienia falownika ZVS-1S w zastosowaniu do nagrzewania indukcyjnego. Autor ponadto wykazał się dużą ogólną wiedzą w dziedzinie elektrotechniki, oraz umiejętnościami inżynierskimi na wysokim poziomie realizując modele symulacyjne i układ laboratoryjny analizowanego przekształtnika, a także przeprowadzając badania eksperymentalne. Pracę oceniam wysoko, a przedstawione w recenzji uwagi dyskusyjne i uwagi dotyczące edycji pracy nie wpływają znacząco na ogólną pozytywną ocenę.

Stwierdzam, że rozprawa mgr inż. Aleksandra Skały pt. „Falownik ZVS-1S w zastosowaniu do nagrzewania indukcyjnego” spełnia warunki określone w art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenia mgr inż. Aleksandra Skałę do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

#### UWAGI DYSKUSYJNE:

1. Przedstawiona w rozdziale 3.7 metoda oszacowania strat energii w tranzystorze bazuje na szczególnym przypadku przedstawionym na rys. 3.10, ładowania kondensatora przez tranzystor z równoległe dołączonego źródła napięcia. Autor podaje przykład przyrostu temperatury tranzystora w czasie 1 sekundy oraz jednej minuty. W innych częściach pracy wyjaśnione jest, że stan pracy, do którego mogłaby się odnosić ta analiza nie jest stanem optymalnym. W tym miejscu nie jest wyjaśnione, czy układ może pozostawać w takim nieoptymalnym stanie pracy przez czas, który spowodowałby istotny przyrost prądu tranzystora, oraz w jaki sposób model zjawisk przedstawiony na rys. 3.11 koresponduje z pracą rzeczywistego układu falownika, gdzie energia dostarczana jest do obciążenia ze źródła również po naładowaniu kondensatora utrzymując wartość napięcia na kondensatorze na stałym poziomie.
2. Na rys. 3.13 podano wyniki testu nagrzewania tranzystora prądem stałym dla różnych mocy. Nie podano jednak wartości prądu płynącego przez tranzystor podczas testu, co mogłoby dać pogląd na warunki nagrzewania tranzystora w analizowanym przekształtniku.
3. Na wykresie 4.8 przedstawiono sprawność układu w funkcji tłumienia uzyskaną z wykorzystaniem badań symulacyjnych. Nie są podane wartości liczbowe mocy, tak by było możliwe porównanie wyników symulacyjnych z wyliczonymi na podstawie strat energii w tranzystorze, lub uzyskanymi eksperymentalnie.
4. Autor podaje w pracy różne koncepcje sterowania falownikiem. Nie wszystkie zostały wykorzystane w eksperymencie, dlatego interesujące byłoby czy występują istotne różnice w technicznej realizacji i działaniu prezentowanych koncepcji w rozdziale 5.3.2.
5. Na rys. 6.2a i 6.2b przedstawiono przebiegi pomiarów oscyloskopowych, gdzie prąd podawany jest w jednostkach napięcia, przy czym nie podano informacji dotyczącej wzmocnienia sond prądowych, lub toru pomiarowego prądu w tym eksperymencie. Można oczywiście wnioskować, że są to sygnały mierzone w eksperymentalnym układzie regulacji.
6. W rozdziale 6 wyliczana jest moc strat elektrycznych przez mnożenie sygnału pomiarowego napięcia na tranzystorze oraz prądu tranzystora. Nie zostało jednak podane, w jaki sposób zmierzono prąd w tym eksperymencie (jeżeli jest to czujnik wprowadzający opóźnienie to czy zostało ono uwzględnione w obliczeniach) i jaka jest dokładność

- pomiaru oscyloskopowego oraz funkcji mnożenia. Przy tak szybkich zmianach w przebiegach te parametry są niezwykle istotne.
7. Na str. 126 w ostatnim akapicie pojawia się komentarz dotyczący spadku sprawności układu przy zwiększaniu pojemności, z uwagą, że jest to spowodowane konstrukcją połączeń zestawu kondensatorów i zmianą wartości parametrów pasożytniczych. Nie jest to jednak poparte żadnymi wynikami, można więc przypuszczać, że zjawisko ma bardziej złożony wymiar.
  8. Na schematach układu zamieszczonych w pracy, np. na rys. 2.1 napięcie ud występuje na wyjściu źródła napięcia. Nie jest wyjaśnione, dlaczego w przebiegach przedstawionych na rys. 6.74 do 6.81 w napięciu ud występuje zmiana wartości (nawet znaczenie przekraczająca 20V).
  9. W ostatnim akapicie na stronie 130 autor pisze, że „regulator szybko sprowadza napięcie  $U_c$  do stanu ustalonego, w którym odpowiada ono co do wartości napięcia zasilania  $U_d$ ”, jednak analizując przebiegi przedstawione np. na rys. 6.78 trudno to stwierdzić, ponieważ napięcie  $U_d$  ustala się na poziomie ok. 60V, natomiast sygnał  $U_c$  na poziomie poniżej 6V, a nie zostało podane, gdzie prezentowany sygnał  $U_c$  został zmierzony i jakie jest wzmocnienie toru pomiarowego.
  10. Tytuł rozdziału 2.6 i pierwsze jego zdanie informuje o wykorzystaniu obliczeń numerycznych, a do przedstawienia wyników wykorzystano zależności analityczne (2.9) i (2.10). Jeżeli wykorzystano metody numeryczne w tym rozdziale to nie zostało omówione w jaki sposób.
  11. Modele symulacyjne przedstawione na rys. 5.8 i 5.10 nie są omówione w pracy ze szczegółami dotyczącymi działania poszczególnych elementów, takich jak Gen\_Start, Gen\_Ster, Det\_Io.

#### UWAGI ZWIĄZANE Z EDYCJĄ PRACY:

1. Od strony 27 równania przestały być numerowane.
2. Str. 50: W wyniku obliczenia wartości energii kondensatora (pierwsze równanie od góry pod rysunkiem) podana jest dziesięciokrotnie mniejsza wartość niż wynika to ze składników równania. Jednak w kolejnym obliczeniu wykorzystana została prawidłowa wartość.
3. Str. 74: w przedostatnim wierszu użyto prawdopodobnie błędnie słowa „filtacji”,
4. Str. 77: błędnie użyto słowa „przejscia”

Kraków, 28 kwietnia 2014

Dr hab. inż. Robert Stala