WPŁYNĘŁO
2022 -04- 07
dn.....

Lublin, 5.04.2023 r.

Dr hab. inż. Paweł Surdacki,
prof. uczelni

Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechniki Lubelskiej
ul. Nadbystrzycka 38a, 29-618 Lublin
p.surdacki@pollub.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Pachowicza
pt. **„Ładowanie i sterowanie szybkich generatorów Marksa"**

Promotor: prof. dr hab. inż. Jacek Starzyński
Promotor pomocniczy: dr inż. Przemysław Sul

Podstawa formalna recenzji

Podstawą wykonania recenzji stanowią uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej Lubelskiej z dnia 20.09.2022 r. oraz pismo Przewodniczącego ww. Rady prof. dr hab. inż. Tomasza Stareckiego z dnia 10.10.2022.

Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa napisana jest w języku polskim. Składa się ze streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu treści, wykazu symboli, oznaczeń i skrótów oraz z 11 numerowanych rozdziałów, obejmujących wstęp, rozdziały merytoryczne, wnioski i wykaz bibliografii obejmującej 134 pozycje, w tym 30 źródeł internetowych. Ta zasadnicza część rozprawy liczy 161 stron. Dodatkową część rozprawy na 33 stronach stanowią dwa załączniki. Całość dość obszernej rozprawy obejmuje 194 strony.

W dalszej części recenzji odniosę się do kwestii wymienionych w zaleceniach Rady Naukowej dyscypliny „Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika" Politechniki Warszawskiej, składających się na ocenę spełniania przez rozprawę doktorską warunków określonych w art. 187 ust. 1-2 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrywane w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?

Rozprawa dotyczy ładowania i sterowania szybkich generatorów Marksa, które służą do generowania udarów wysokiego napięcia rzędu kilku MV o dużej powtarzalności. Generatory Marksa mogą być wykorzystane m. in. do badania zgodności izolacji urządzeń elektroenergetycznych z normami międzynarodowymi i krajowymi, jak też w wielu innych zastosowaniach, m. in. w przyspieszaniu cząstek elementarnych, wytwarzaniu silnego promieniowania rentgenowskiego i wysokoenergetycznych mikrofal, kontroli zanieczyszczeń

powietrza, oczyszczaniu ścieków, sterylizacji żywności, chirurgii oka, badaniach związanych z technologią laserową, jak też do symulowania jądrowych impulsów elektromagnetycznych oraz impulsów elektromagnetycznych o dużych amplitudach. Tematyka rozprawy jest zatem bardzo aktualna i znajduje liczne zastosowania użytkowe.

Układy generatorów Marksa charakteryzują się szeregiem zalet, takich jak prosta budowa, niskie koszty elementów, prosta regulacja napięcia oraz modularna konstrukcja. Gdy jednak konieczne jest wytworzenie wielu powtarzalnych impulsów z wysoką częstością przekraczająca 1 impuls na sekundę, pojawiają się liczne problemy związane z realizacją ładowania takiego generatora.

Podczas procesu ładowania generatora Marksa rezystory łączące kondensatory równoległe powinny mieć dużo większą rezystancję niż impedancja łuku elektrycznego iskierników, aby urządzenie to działało z odpowiednią wydajnością. Z kolei duża wartość rezystancji, zwiększając stałą czasową układu, nie pozwala na doładowanie kondensatorów w odpowiednio krótkim czasie. Dlatego też w takich zastosowaniach często zamiast rezystorów stosuje się cewki, charakteryzujące się niską impedancją w trakcie ładowania oraz wysoką impedancją w trakcie szybkich rozładowań.

W rozprawie podjęte zostały zagadnienia analizy, projektowania, modelowania i konstrukcji układu zasilającego, zapewniającego prawidłową pracę generatora Marksa, tzn. naładowanie kondensatora w każdym ze stopni generatora napięciem umożliwiającym zadziałanie iskiernika. Ponieważ duża liczba stopni generatora zmniejsza efektywność układu związaną ze stratami napięcia oraz zmniejsza szybkość jego działania wyrażoną liczbą impulsów w czasie, zasilacz powinien dostarczać jak największe napięcie. Dla uzyskania odpowiedniej wydajności zasilacza jego prąd wyjściowy o znacznej wartości powinien w krótkim czasie naładować kondensatory do wymaganego wysokiego napięcia. Zasilacz powinien także umożliwiać łatwą regulację napięcia wyjściowego, być wyposażony w ograniczenie prądowe oraz mieć niewielkie wymiary i ciężar.

Autor rozprawy podjął się opracowania metodyki projektowania i konstrukcji układów zasilacza wysokiego napięcia wysokiej częstotliwości zbudowanych z wykorzystaniem technik modulacji szerokości impulsu (PWM) lub rezonansowych. Układy takie stwarzają wiele problemów nie występujących w urządzeniach niskonapięciowych, wymagających zupełnie innego podejścia do projektowania, obejmującego wybór topologii układu, wyznaczenia parametrów transformatorów i ich wykonania oraz opracowania i implementacji algorytmów sterowania nie występujących w dostępnych na rynku typowych układach scalonych, które nie są przystosowane do pracy w tego typu aplikacjach.

Autor bardzo wyraźnie i jasno sformułował to zagadnienie badawcze, zarówno we wstępie, jak też odnosił się do niego w kolejnych rozdziałach.

Zaproponowana w rozprawie metodyka projektowania zasilaczy wysokiego napięcia i algorytmów ich sterowania przeznaczonych do szybkiego i powtarzalnego ładowania kondensatorów wysokiego napięcia w generatorach Marksa objęła identyfikację, analizę i rozwiązanie licznych problemów konstrukcyjnych tych układów. Opracowana metodyka była wspomagana komputerowymi badaniami symulacyjnymi, których wyniki posłużyły do porównania wpływu różnych metod sterowania tranzystorami oraz zbadania wpływu różnych topologii układów powielacza napięcia w części wysokonapięciowej na działanie zasilacza.

Zarówno zaproponowana metodyka projektowania, jak i liczne symulacje komputerowe zostały zweryfikowane testami zbudowanego przez Doktoranta prototypu zasilacza generatora Marksa.

Zaprezentowana w rozprawie tematyka mieści się w obszarze techniki wysokich napięć, wspomaganej projektowaniem transformatorów wysokiego napięcia wysokiej częstotliwości oraz ich symulacjami komputerowymi. Tematyka ta z kolei należy do rozszerzonej przez niedawną ustawę dyscypliny naukowej „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne".

Celem rozprawy było opracowanie metodologii projektowania układów zasilających i sterujących pracą generatora Marksa tak, aby umożliwić jego powtarzalną pracę i regulowane napięcie wyjściowe (wartość szczytową udaru) z możliwie dużą repetycją. Dodatkowym wymaganiem jest dopasowanie architektury zasilacza do szerokiego zakresu generatorów, wytwarzających zarówno impulsy w zakresach nanosekundowych jak i mikrosekundowych.

Tezę rozprawy Doktorant w sposób wyraźny sformułował następująco:

Zastosowanie topologii przedstawionej na rys. 3.1 w połączeniu z odpowiednim sposobem sterowania tranzystorów pozwala na skonstruowanie układu ładowania generatora Marksa generującego powtarzalne udary z zakresu 15/100 ns - 15/50 μs o wartości szczytowej przekraczającej 350 kV.

Należałoby tu jednak zwrócić uwagę na zamieszczony na schemacie we wspomnianym rysunku sześciostopniowy powielacz napięcia, podczas gdy w dalszej części pracy mowa jest o 10-stopniowym generatorze Marksa. Proszę Doktoranta o wyjaśnienie tej niezgodności.

W celu udowodnienia postawionej tezy, zamieszczonej w rozdziale 3, Autor rozprawy jasno sformułował cele szczegółowe i zadania, które zostały zrealizowane w kolejnych rozdziałach rozprawy. Jej zakres opisany został w podrozdziale 3.1 zatytułowanym w nietypowy sposób „Przewodnik po pracy".

Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle?

W rozdziale 2 rozprawy Doktorant omówił budowę i zasadę działania generatorów Marksa wraz z ich licznymi potencjalnymi zastosowaniami. Odwołując się do licznych źródeł literaturowych dokonał wnikliwego i krytycznego przeglądu rozwiązań, jakie mogą być stosowane do budowy zasilaczy generatorów Marksa, stosowanych w urządzeniach laboratoryjnych i przemysłowych, wraz ze wskazaniem ich podstawowych wad.

W rozdziale 4 Autor dokonał szczegółowego porównania różnego typu zasilaczy do wysokonapięciowych generatorów typu Marksa, począwszy od zasilaczy na częstotliwość sieciową, poprzez zasilacze z powielaczami napięcia, aż do zasilaczy z przetwornicami wysokiej częstotliwości.

W tej części, powołując się na źródła literaturowe z ostatnich kilku lat, Autor przedstawił istotne cechy wielu rozwiązań, wskazując na wady i zalety poszczególnych metod zasilania pod kątem zastosowania w konstrukcji wysokonapięciowego zasilacza generatora Marksa. Analizując liczne topologie układów ładowania wskazał, że w przypadku ładowania szybkich kondensatorów głównym kryterium doboru układów nie jest uzyskiwana moc ani efektywność

ładowania, lecz czas w jakim kondensatory stanowiące obciążenie zasilacza zostaną naładowane do zakładanego poziomu napięcia.

Należy podkreślić, że Autor zaprezentował w rozprawie bardzo duże rozeznanie w angielskojęzycznej światowej literaturze dotyczącej zasilaczy do wysokonapięciowych generatorów Marksa, właściwie lokując postawiony w rozprawie cel na tle aktualnego stanu wiedzy i istniejących zastosowań przemysłowych. Oparł się przy tym na rozległej literaturze głównie z ostatniego dziesięciolecia. Wykazał przy tym, że podjęta w rozprawie problematyka jest niezwykle aktualna i ważna oraz zidentyfikował zagadnienia, które do tej pory nie znalazły rozwiązania, a stanowią cel opiniowanej rozprawy.

W tym miejscu można wyrazić zdziwienie, że w wykazie literatury jest całkowity brak publikacji Autora rozprawy, który przecież od 2012 r. jest pracownikiem naukowo-badawczym Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej oraz od 2015 r. uczestniczy w projektach finansowanych przez NCBiR i ma niezwykle duże doświadczenie w badawczej pracy konstrukcyjno-technologicznej. W swym dorobku wykazuje zaledwie cztery publikacje, które nie znalazły odwołania w rozprawie. Również Doktorant nie odniósł się do monografii Promotora prof. Jacka Starzyńskiego pt. „Symulacje komputerowe w projektowaniu generatorów szybkich impulsów pola elektromagnetycznego", która byłaby w rozprawie jedynym polskojęzycznym źródłem dotyczącym projektowania generatorów wysokonapięciowych.

Godne uwagi jest jednak, że jedna z tych publikacji, której jedynym autorem jest Doktorant, została zamieszczona w czasopiśmie „Energies" w 2022 r., już po złożeniu rozprawy doktorskiej. Prezentuje ona nowatorską metodę quasi-rezonansową z czasem minimalnym załączenia tranzystorów opracowaną przez Autora rozprawy doktorskiej na potrzeby wysokonapięciowego zasilacza generatora Marksa. Zaproponowana metoda sterowania tranzystorami znacząco łagodzi problemy wywołane wysoką wartością pojemności pasożytniczych w uzwojeniu wtórnym transformatora wysokiego napięcia. Publikacja ta, podlegająca recenzjom uznanych zagranicznych autorytetów w tej tematyce, świadczy o aktualności prowadzonych badań, ich wysokim poziomie oraz istotnym wkładzie Autora w obszarze techniki wysokich napięć.

Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

W rozdziale 5 rozprawy Autor dokonał analizy zagadnień związanych z doborem parametrów transformatora wysokiego napięcia wysokiej częstotliwości, który jest kluczowym elementem zasilacza wysokiego napięcia. Przedstawił metody wyznaczania poszczególnych elementów transformatora zaczynając od doboru rdzenia, a następnie wyznaczając liczbę zwojów poszczególnych uzwojeń. Istotną częścią tego rozdziału jest opis problemów związanych z budową transformatorów wysokiego napięcia wysokich częstotliwości, które nie występują w przypadku transformatorów niskiego napięcia. Autor skupił się tu głównie na problemie pojemności pasożytniczych uzwojenia wtórnego, które są zjawiskiem niepożądanym, gdyż wpływają one niekorzystnie na jego wydajność, utrudniają sterowanie, mogą też prowadzić do powstawania rezonansów w obwodzie. Pojemności te znacznie utrudniają projektowanie zasilaczy wysokiego napięcia oraz stosowanie klasycznych sposobów sterowania wykorzystywanych w zasilaczach niskiego napięcia. Dlatego też słusznie uznał, że konieczne jest opracowanie nowej metodyki projektowania urządzeń tego typu, która

przynajmniej częściowo zmniejszy wpływ opisanych zjawisk i uprości proces opracowywania takich zasilaczy.

W rozdziale 6 rozprawy Autor podjął się opracowania metodyki projektowania i konstrukcji układów zasilacza wysokiego napięcia wysokiej częstotliwości zbudowanych z wykorzystaniem technik modulacji szerokości impulsu (PWM) lub rezonansowych. Układy takie stwarzają wiele problemów nie występujących w urządzeniach niskonapięciowych, wymagających zupełnie innego podejścia do projektowania obejmującego wybór topologii układu, wyznaczenia parametrów transformatorów i ich wykonania oraz opracowania i implementacji algorytmów sterowania nie występujących w dostępnych na rynku typowych układach scalonych, które nie są przystosowane do pracy w tego typu aplikacjach.

W rozdziale 7 rozprawy Autor przeprowadził badania symulacyjne obwodowe projektowanego zasilacza. Na bazie opracowanego modelu w programie LTSpice dokonał analizy układu w topologii „Full-Bridge", najkorzystniejszego ze względu na moc wyjściową zasilacza, efektywne wykorzystanie transformatora i możliwość sterowania niezależnie każdym z kluczy tranzystorowych. W zamierzeniu Autora projektowany zasilacz ma realizować algorytm pracy, który nie jest wykorzystywany w typowych zasilaczach SMPS (switched-mode power supply). Ponieważ nie istnieje na rynku gotowy układ scalony, który może być wykorzystany w prezentowanym obwodzie, Autor opracował własne rozwiązanie, dokonując uprzednio szczegółowej analizy różnych warunków pracy zasilacza. Szczególnie cenne są symulacje porównawcze zasilacza dla różnych jego trybów pracy: tryb „duty cycle control", w którym jednak nie uzyskano pożądanej szybkości działania, tryb „phase-shifted" z modulowanym przesunięciem fazowym sygnałów sterujących, dla którego wysoka wartość pojemności pasożytniczych w uzwojeniu wtórnym i indukcyjność rozproszenia transformatora powodują znaczne wartości prądu oscylacyjnego, jak też tryb z wydłużonym czasem otwarcia.

W powyższych trybach sterowania zasilacza uzyskano gorszą efektywność ładowania kondensatora przez transformator, straty energii w kluczach tranzystorowych i generację zaburzeń elektromagnetycznych oraz nie osiąganie maksymalnej zakładanej wartości indukcji magnetycznej powodujące mniejsze wykorzystanie rdzenia transformatora.

Powyższe niedogodności zostały rozwiązane przez Autora poprzez zaimplementowanie w układzie algorytmu tzw. „quasi-rezonansowego" trybu działania, podobnie jak cytowanych w literaturze układach przetwornic rezonansowych, który to układ nie zawiera obwodu rezonansowego. Aby zapewnić możliwości kontroli i regulacji oraz zmniejszyć moc maksymalną zasilacza, Autor ponadto opracował metodę zmodyfikowaną poprzez wprowadzenie minimalnego czasu, przez jaki będzie załączony tranzystor M1 w fazie (2) i M2 w fazie (4) z rys. 7.12 na str. 80. Wprowadzenie takiego ograniczania powoduje zarówno zmniejszenie wartości skutecznej prądu w uzwojeniu pierwotnym jak i prądu pobieranego ze źródła. Autor zestawił w tabeli 7.2 wszystkie przeanalizowane metody sterowania tranzystorami w układzie zasilacza, porównując podstawowe cechy poszczególnych metod. Porównując czas ładowania, możliwość regulacji i energię traconą na tranzystorach, Autor wybrał do dalszych badań i konstrukcji zasilacza specjalnie opracowaną przez siebie na potrzeby zasilacza „metodę quasi-rezonansową z minimalnym czasem załączenia tranzystorów".

Przeprowadzając symulacje dla opracowanej metody sterowania Doktorant udowodnił, że wady nietypowego rodzaju urządzeń, którymi są zasilacze wysokiego napięcia wysokiej

częstotliwości, w szczególności powodowane zastosowaniem transformatora o wysokiej wartości pojemności pasożytniczych w uzwojeniu wtórnym, mogą być w znacznym stopniu zminimalizowane poprzez odpowiednio dobraną metodę sterowania tranzystorami i algorytm sterowania. Wnioski te zostały poparte zostały opracowaniem w rozdziale 8 konstrukcji zasilacza wysokiego napięcia do szybkiego ładowania kondensatorów, jak i testami opracowanego zasilacza zamieszczonymi w rozdziale 9. Należy podkreślić, że konstrukcja zasilacza opisana została i uzasadniona bardzo szczegółowo, również w załączniku A zawierającym projekt obwodów drukowanych zasilacza wysokiego napięcia, świadcząc o dużym doświadczeniu konstruktorskim i technologicznym Doktoranta. O wysokim poziomie opanowania przez Autora rozprawy prowadzenia prac projektowo-konstrukcyjnych świadczy również cała rozprawa.

Zatem można stwierdzić, że Autor w kolejnych rozdziałach rozprawy rozwiązał postawione zagadnienie, bazując na uzasadnionych założeniach oraz używając do tego właściwej metodyki obejmującej zagadnienia projektowania, symulacji komputerowych oraz konstrukcji prototypu zasilacza i jego testów laboratoryjnych.

Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Na samodzielny i oryginalny dorobek Autora rozprawy składa się:

- wykonanie przeglądu rozwiązań stosowanych do budowy zasilaczy wysokiego napięcia do szybkiego ładowania kondensatorów wraz z analizą problemów związanych z transformatorami wysokiego napięcia wysokiej częstotliwości oraz ich wpływu na działanie badanych zasilaczy,
- opracowanie modelu symulacyjnego w programie LTSpice zasilacza wysokiego napięcia bardzo wiernie oddającego rzeczywiste urządzenie oraz wykonanie jego badań symulacyjnych, które udokumentowały wpływ pojemności pasożytniczych w uzwojeniu wtórnym transformatora wysokiego napięcia na działanie urządzenia tego typu,
- porównanie różnych sposobów sterowania tranzystorami i wpływu różnych topologii układów powielających na działanie zasilaczy wysokiego napięcia, jak też opracowanie quasi-rezonansowego algorytmu sterowania tranzystorami, który redukuje problemy wywołane znacznymi pojemnościami pasożytniczymi w uzwojeniu wtórnym transformatora wysokiego napięcia,
- opracowanie metodyki projektowania zasilaczy wysokiego napięcia do szybkiego ładowania kondensatorów, wykorzystującą quasi-rezonansowy algorytm sterowania tranzystorami,
- projekt i budowa zasilacza wysokiego napięcia do ładowania kondensatorów w generatorze Marksa z wykorzystaniem opracowanej metodyki projektowania,
- wykonanie badań laboratoryjnych zasilacza i porównanie ich z wynikami badań symulacyjnych.

Należy podkreślić, że wysokie walory opracowanej „metody quasi-rezonansowej z minimalnym czasem załączenia tranzystorów" zostały z powodzeniem zaprezentowane we wspomnianej już samodzielnej recenzowanej publikacji w wysoko punktowanym (140 pkt.) przez MNiSW czasopiśmie „Energies" w roku 2022, nr 15, 6902. https://doi.org/10.3390/en15196902, co jest niewątpliwym osiągnięciem Doktoranta i świadczy

o pozycji zaprezentowanej tematyki w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową.

Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonywującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Autor rozprawy bardzo szczegółowo opisał wielowariantowe rozwiązania poszczególnych problemów technicznych konstrukcji zasilaczy szybkich generatorów Marksa, a w szczególności ich najistotniejszego składnika, jakim jest transformator wysokiego napięcia o wysokiej częstotliwości. Rozważania są przedstawione w bardzo pogłębiony sposób, wskazujący na duże doświadczenie technologiczno-konstrukcyjne i kompetencje Doktoranta w zakresie projektowania zasilaczy wysokiego napięcia. Wielowątkowe rozważania projektowe i wielość rozważanych pobocznych wariantów i towarzyszących im wyników obliczeń z jednej strony zasługują na uznanie, z drugiej strony jednak spowodowały znaczną objętość rozprawy, co utrudnia czytelnikowi śledzenie głównego jej wątku.

Również rozprawa byłaby lepiej zorganizowana, gdyby główne rozdziały kończyły się formalnymi podsumowaniami i wnioskami. W takim przypadku końcowe wnioski rozprawy nie byłyby nadmiernie rozbudowane (20 wypunktowanych wniosków) i nie omawiałyby zbyt szczegółowych kwestii dotyczących tylko poszczególnych rozdziałów, a zatem miałyby bardziej syntetyczny charakter.

Niewłaściwe językowo wydaje się stosowanie w pracy zbyt szerokiego pojęcia „metodologia projektowania". Zgodnie z definicją pojęcie „metoda" oznacza sposób postępowania, pojęcie „metodyka" jest zbiorem zasad postępowania, czyli metod, natomiast „metodologia" jest nauką o badaniach naukowych. Stąd też sądzę, że pojęcie „metodyka projektowania" byłoby bardziej adekwatne w kontekście przedstawionym w rozprawie.

Metodykę projektowania zasilaczy wysokiego napięcia do szybkiego ładowania kondensatorów można by przedstawić w formie graficznej, jako wielowariantowy algorytm postępowania przy procesie projektowania. Stanowiłby on syntetyczne zestawienie opcjonalnych czynności przy projektowaniu zasilaczy, co ułatwiłoby czytelnikowi śledzenie głównego wątku rozprawy na tle wszystkich analizowanych możliwych rozwiązań.

Tytuł podrozdziału 6.4 „Algorytm sterowania" można by rozszerzyć do sformułowania „Algorytm sterowania tranzystorami".

Doktorant stosuje pojęcie „prąd o wartości RMS" opisując przebiegi czasowe prądu w uzwojeniu pierwotnym transformatora zasilacza. Skrót RMS od pojęcia Root Mean Square rozumie się w języku polskim jako wartość skuteczna przebiegu czasowego. Prosiłbym, aby Doktorant wyjaśnił, dlaczego stosuje takie określenie dla wartości chwilowej prądu (np. na rys. 7.41, rys. 8.14, 8.16). Niezręczne stylistycznie są także występujące sformułowania takie, jak np. „wartość chwilowa prądu płynąca w uzwojeniu..." (rys. 8.13), „wartość RMS prądu płynąca w uzwojeniu..." (rys. 8.14).

Do uchybień poprawności redakcyjnej należy zaliczyć bardzo niekompletny wykaz symboli, oznaczeń i skrótów (strona 8), który w rzeczywistości zawiera tylko skróty, natomiast liczne w pracy oznaczenia wielkości fizycznych i parametrów nie zostały uwzględnione w tym wykazie.

Znaczna objętość rozprawy zapewne wpłynęła na wystąpienie kilkudziesięciu drobnych usterek redakcyjnych i językowych w tekście, których jest zbyt dużo, aby je wymieniać w niniejszej recenzji, natomiast mogłyby one być wyeliminowane poprzez uprzednią korektę redakcyjną. Usterki te w żaden sposób nie obniżają jednak wysokiej merytorycznej wartości rozprawy.

Niektóre rysunki są zbyt małe (np. 5.4) i utrudniony jest ich odczyt. Na rys. 5.27c i w jego podpisie nie są precyzyjnie opisane przebiegi prądów w uzwojeniu wtórnym i płynącego przez pojemności pasożytnicze. Proszę o objaśnienie znaczenia barwnych obszarów na tym rysunku, jak też na przebiegach prądu w uzwojeniu pierwotnym transformatora (rys. 6.4 i 6.5) oraz napięć na diodach (rys. 7.32 i 7.33).

Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynieryjno-technicznych?

Autor na końcu rozdziału 9 stwierdza, że najlepszym dowodem poprawności opracowanej metodologii projektowania zasilacza jest fakt pomyślnego wykorzystania urządzenia w dwóch projektach badawczych NCBiR o znacznej wartości, realizowanych przez Wojskową Akademię Techniczną. Fakt ten świadczy o praktycznej przydatności efektów rozprawy w naukach inżynieryjno-technicznych w zakresie impulsowych dział elektromagnetycznych oraz metod i sposobów ochrony i obrony przed impulsami.

Uważam te zastosowania opracowanej w rozprawie metodyki projektowania zasilacza za bardzo cenne, jednak zasygnalizowany ciekawy wątek tego rodzaju zastosowań opracowanego zasilacza nie został niestety rozwinięty. Jeśli szczegóły tych aplikacji mających znaczenie militarne nie są zastrzeżone, to prosiłbym Doktoranta o krótkie ich zaprezentowanie podczas obrony.

Ponadto prosiłbym o zaprezentowanie możliwości i perspektyw dalszych badań układów ładowania i sterowania szybkich generatorów wysokonapięciowych, które mogą być w przyszłości rozwijane przez Autora rozprawy.

Podsumowanie

Wymienione w recenzji uwagi nie obniżają w żaden sposób wysokiej wartości merytorycznej przedłożonej do oceny rozprawy doktorskiej.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Pachowicza pt. „Ładowanie i sterowanie szybkich generatorów Marksa" **spełnia wymagania** określone w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z dnia 21.06.2016 r. poz. 882) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.