

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Pachowicza

**pt.: "ŁADOWANIE I STEROWANIE SZYBKICH
GENERATORÓW MARKSA"**

Recenzja rozprawy mgra inż. Krzysztofa Pachowicza została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki Politechniki Warszawskiej, pismo z dnia 10.10.2022 r.

1. Ocena wyboru tematyki i zakresu rozprawy

Rozprawa doktorska mgra inż. Krzysztofa Pachowicza pt.: „Ładowanie i sterowanie szybkich generatorów Marksa”, zawiera 161 stron, składa się z 9 rozdziałów, podsumowania, bibliografii oraz zawiera dwa załączniki. W załącznikach doktorant omówił i udokumentował budowę zasilacza oraz zamieścił programy komputerowe sterujące urządzeniem. Bibliografia zawiera 134 pozycje, w tym 102 anglojęzyczne, dwie w języku polskim i 30 odwołań do stron internetowych. Bibliografia nie zawiera publikacji, której autorem byłby Doktorant, mimo, że artykuł pt.: „Fast electronically triggered spark gap for HV applications” (Szreder Radosław, Sul Przemysław, Pachowicz Krzysztof, Przegląd Elektrotechniczny, 2019, vol. 95, nr 2, s.81-84) jest tematycznie powiązany z rozprawą doktorską. Doktorant jest współautorem jednego artykułu w Przeglądzie Elektrotechniki i jednego artykułu na konferencji („Impact of the selected FCG design parameters on the current gain”, Sul Przemysław, Starzyński Jacek, Pachowicz Krzysztof,

17th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE 2016), 2016, vol. I, s.1 - 4.). Wykaz symboli, oznaczeń i skrótów zawiera wyłącznie skróty, co istotnie utrudnia czytanie pracy. Rozprawa dotyczy dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika.

Problematyka podjęta przez Doktoranta dotycząca ładowania i sterowania szybkich generatorów Marksa jest ważna, szczególnie w wypadku wysokich wymagań dotyczących małych gabarytów, masy generatorów i dużej repetycji generowanych impulsów. W pracy przyjęto takie wymagania dla urządzenia, jednakże Doktorant nie podał z czego wynikają.

Zakres prac przeprowadzonych w rozprawie dotyczy badań symulacyjnych tranzystorowego zasilacza transformatora wysokiego napięcia, powielaczy napięcia oraz generatora Marksa. Po przeprowadzeniu wielu badań symulacyjnych i przeprowadzeniu analizy ich wyników, Autor zbudował i przeprowadził badania eksperymentalne sterowanego zasilacza wysokiego napięcia, powielacza i generatora Marksa. W opisie stanu wiedzy z tej tematyki brakuje informacji czy dostępne są na rynku małogabarytowe generatory wysokonapięciowe. Przyjęty przez Doktoranta w opiniowanej rozprawie doktorskiej zakres badań uważam za prawidłowy i uzasadniony. Opiniowana rozprawa ma charakter pracy naukowo-badawczej.

2. Treść i zakres rozprawy

Autor rozpoczął pracę od krótkiego wstępu przedstawiając problematykę związaną z budową zasilaczy dla małogabarytowych generatorów Marksa o dużej repetycji, wskazując na potrzebę opracowania metodologii projektowania efektywnych, tanich układów zasilających i sterujących pracą generatora Marksa. Układ zasilający według Autora powinien umożliwiać powtarzalną pracę i regulowane napięcie wyjściowe urządzenia. Dodatkowym wymaganiem, jaki postawił Doktorant było dopasowanie architektury zasilacza do szerokiego zakresu generatorów wytwarzających impulsy w zakresach nanosekundowych i mikrosekundowych.

Teza pracy powiązana jest z konkretną konfiguracją zasilacza, który poprzez odpowiednie sterowanie tranzystorami ma pozwolić na skonstruowanie generatora Marksa generującego powtarzalne impulsy z zakresu 15/100 ns i 15/50 μ s o wartości szczytowej 350 kV. Nie doczytałem się jednak w pracy, zarówno w części symulacyjnej jak i eksperymentalnej, czy takie zakresy zostały osiągnięte.

W rozdziale czwartym Doktorant opisał różnego typu zasilacze generatorów Marksa, w tym zasilacze z transformatorami częstotliwości sieciowej, zasilacze z powielaczami napięcia, zasilacze

z przetwornicami wysokiej częstotliwości beztransformatorowe i z transformatorami wysokiej częstotliwości.

W rozdziale piątym Autor omówił problematykę związaną z projektowaniem transformatorów wysokiego napięcia wysokiej częstotliwości. Autor podał, że „*istnieje co najmniej kilka metod obliczania maksymalnej mocy wyjściowej transformatora*”. Jednak nie wymienił jakie to metody, a wybrał metodę firmy Texas Instruments, zgodnie z którą stosuje się nierówność (5.1), błędnie opisywaną przez autora równaniem. Podobnie przy opisie wyznaczania liczby zwojów uzwojeń transformatora podał, że stosuje się kilka metod, które różnią się przyjmowaną podczas projektowania wartością maksymalnej indukcji magnetycznej w rdzeniu, jednak ponownie ich nie wymienił. Według Doktoranta dominują dwie metody, ale omówił tylko jedną. W podrozdziale 5.3 Autor omówił problematykę związaną z pojemnościami pasożytniczymi uzwojenia wtórnego. Na str.42 pokazany został rysunek z równoważnym elektrycznym obwodem transformatora, w którym uwzględniono nie indukcyjność rozproszenia, jak napisał Doktorant a dodatkową indukcyjność połączoną szeregowo z uzwojeniem pierwotnym transformatora. Wzór (5.5) opisujący częstotliwość rezonansową takiego obwodu jest wzorem bardzo ogólnym dotyczącym połączenia równoległego LC, przy czym autor podaje, że obie wielkości są funkcjami indukcyjności transformatora oraz pojemności pasożytniczych. Wzór jako taki wydaje się zbędny. Na rys.5.10 autor podał wykres zmierzonej impedancji transformatora wysokiego napięcia wysokiej częstotliwości. Na rys.5.11 i rys.5.12 pokazano zmierzone przebiegi napięcia i prądu uzwojenia pierwotnego transformatora w przypadku, gdy transformator ma małe i duże wartości pojemności pasożytniczych. Nie wiadomo jednak jakie ma parametry transformator i jak zmierzono pojemności pasożytnicze oraz jakie są różnice ich wartości. Na rys.5.13÷5.16 pokazano przebiegi napięcia pierwotnego i wtórnego w czasie dla częstotliwości mniejszych i częstotliwości większych od częstotliwości rezonansowej transformatora. Autor nie wyjaśnił, dlaczego amplituda napięcia pierwotnego wynosi około 200 mV, a wtórnego kilkanaście woltów. Następnie w pracy przedstawiono znany sposób obliczania indukcyjności uzwojenia pierwotnego i wtórnego transformatora oraz pokazano kilka wykresów zależności impedancji i kąta przesunięcia transformatora po stronie niskiego napięcia w funkcji częstotliwości obciążonego rezystancją o różnych wartościach. Jednak docelowo transformator ma być obciążony kondensatorami i elementami elektronicznymi, zatem powstaje pytanie czy wnioski wyciągnięte z tej analizy mają znaczenie. Następnie Autor przeprowadził symulacje pracy transformatora obciążonego kondensatorem poprzez mostek Graetza. Nie podał jednak wartości parametrów badanego układu. Na końcu podrozdziału 5.3.1 na str.58 Autor stawia wniosek, że częstotliwość rezonansowa transformatora powinna być „*jak najwyższa poprzez redukcję pojemności pasożytniczych oraz*

indukcyjności uzwojenia wtórnego, a zatem uzwojenie (w szczególności wtórne), powinno zawierać jak najmniejszą liczbę zwojów i dlatego przy projektowaniu transformatorów wysokiego napięcia wysokiej częstotliwości należy dobierać rdzenie o jak największym przekroju poprzecznym i jednocześnie o jak najmniejszej wartości współczynnika AL". Nie podano tu jednak żadnego kryterium czy też ograniczeń dla różnych wielkości projektowanego transformatora. W podrozdziale 5.3.2 Autor podał, że ważnym czynnikiem mającym wpływ na wydajność transformatora ma indukcyjność rozproszenia i współczynnik sprzężenia magnetycznego. Doktorant wykonał obliczenia wartości prądu uzwojenia pierwotnego i wtórnego zwartego transformatora przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym dla dwóch przyjętych rdzeni transformatora ze str.50. Zwarcie transformatora jest stanem awaryjnym, zatem analiza przeprowadzona w tym podrozdziale jest niezrozumiała, tym bardziej, że wnioski z tej analizy nie zostały wykorzystane w dalszej części pracy.

W rozdziale 6 Doktorant przedstawił metodologię projektowania zasilaczy wysokiego napięcia do szybkiego ładowania kondensatorów, i jak napisał jest to „*metoda unikatowa i dość nietypowa*”. Autor podał, że „*Przez fakt, że metoda nie była nigdy stosowana nie istnieją gotowe rozwiązania, jak chociażby scalone kontrolery*” i dalej „*Metodologia, jak i sam algorytm sterowania i pracy urządzenia, zostały opracowane na podstawie doświadczenia, jak i licznych badań symulacyjnych i obliczeń jakie wykonał autor*”. Trudno mi na podstawie pracy doktorskiej ocenić doświadczenie Autora, a nowa metoda mogłaby zostać opisana w prestiżowym czasopiśmie. Doktorant przyjął bez wyjaśnień założenia, że zasilacz będzie służył do ładowania 10.cio stopniowego generatora Marksa o pojemności 3.3 nF na stopień, maksymalne napięcie wyjściowe zasilacza ma wynieść 50 kV, a czas ładowania kondensatorów ma być nie większy niż 330 ms. Dla tak przyjętych założeń przyjął moc zasilacza o wartości 200 W, twierdząc, że jest to stosunkowo duża moc. Nie podał z czego wynika przyjęcie takiej mocy zasilacza. Rozdział dotyczący metodologii projektowania zasilaczy składa się z czterech podrozdziałów:

- Wybór topologii
- Dobór parametrów elementów składowych zasilacza
- Projekt transformatora
- Algorytm sterowania

W podrozdziale 6.1, który dotyczy wyboru topologii zasilacza, Autor wskazał jeden, konkretny zasilacz typu full-bridge z dwoma transformatorami i powielaczem. Podrozdział kończy się stwierdzeniem, że „*rozwiązanie wykorzystujące powielacze ma swoje ograniczenia dotyczące wydajności, przez co liczba stopni powielacza powinna być ograniczona do minimum*”. Nie wiadomo jednak jakie jest kryterium dotyczące minimalnej liczby stopni powielacza. Doktorant

nadużywa określeń typu „*należy wziąć pod uwagę bardzo dużo czynników, lub „parametry, związane z możliwościami technologicznymi wykonania pewnych elementów”*”.

W podrozdziale 6.2 Autor podał proste zależności dotyczące doboru napięcia i liczby kondensatorów powielacza napięciowego. Początkowo przyjęto cztery stopnie powielacza, ale w celu zapewnienia pracy zasilacza poniżej częstotliwości rezonansowej, jak stwierdził Doktorant przyjęto ostatecznie sześć stopni. Niestety żadnej reguły nie podał. Podrozdział 6.3 dotyczy projektu transformatora. W projekcie zasilacza przyjęto założenie, że będą zastosowane dwa transformatory o mocy 100 W. Na podstawie zależności (5.1) dobrano wartość iloczynu $W_a A_c$. Nie wiadomo jednak jaką przyjęto wartość maksymalnej zmiany indukcji magnetycznej. Doktorant podaje, że ważny jest dobór geometrii rdzenia, wskazując, że istotne są odpowiednie odstępstwa izolacyjne oraz szczególnie liczba zwojów uzwojenia wtórnego, ma krytyczny wpływ na działanie całego urządzenia. Po tych rozważaniach Autor przyjął konkretny rdzeń o oznaczeniu U57/28/15. Następnie wskazał, że liczba zwojów uzwojenia wtórnego powinna być wyznaczana ze względu na przekładnię napięciową (6.3). Jednak biorąc pod uwagę spadki napięć po stronie wtórnej, w tym napięć na diodach rzędu 50 V, przewymiarował liczbę zwojów o 50%. Następnie stwierdził, że w celu ograniczenia problemów z pojemnościami pasożytniczymi i ze współczynnikiem sprzężenia, czas trwania impulsu t_d powinien być krótki, ale to z kolei spowoduje zmniejszenie liczby zwojów uzwojenia pierwotnego i wtórnego. Dalej występuje zdanie „*jednak takie rozwiązanie powoduje szereg nowych problemów jakie trzeba rozwiązać, aby zapewnić poprawną pracę zasilacza*”. Rozwiązaniem problemu wg Autora w wypadku, gdy liczba zwojów jest niewielka i w małym stopniu wypełnia miejsce na rdzeniu należy wybór rdzenia o mniejszym przekroju poprzecznym. Wywód ten Doktorant kończy zdaniem „*Doświadczenie autora pokazuje, że liczba zwojów uzwojenia pierwotnego powinna być większa niż 5*” (str.67). Następnie przedstawił wyniki analizy prądu uzwojenia pierwotnego transformatora dla stanu jałowego bez i z pojemnościami pasożytniczymi o wartości 10 pF z mostkiem Graetza. Niestety nie ma informacji, jakie jest napięcie progowe diod w mostku oraz jakie wartości pojemności mają diody. Autor na podstawie analizy wyników symulacji rozważa problem zbyt dużych wartości prądu uzwojenia pierwotnego. Podrozdział kończy stwierdzeniem, że „*Aby rozwiązać tę niedogodność autor niniejszej pracy opracował specjalny system regulacji pracy zasilacza*”.

W podrozdział 6.4 dotyczy algorytmu sterowania zasilaczem. Jednak w podrozdziale tym, który zajmuje niecałą jedną stronę mowa jest tylko o tym, że regulacja polega na zmianie czasu martwego pomiędzy impulsami sterującymi tranzystorami, co oznacza, że zasilacz będzie pracował z różną częstotliwością.

Rozdział siódmy dotyczy badań symulacyjnych zasilacza wysokonapięciowego. W podrozdziale 7.1 przedstawiono schemat zasilacza, transformatora z powielaczem i z zastępczą pojemnością generatora Marksa. W podrozdziale 7.2 przedstawiono wyniki symulacyjne układu dla różnych metod sterowania tranzystorami: duty cycle control, phase-shifted oraz metoda łącząca cechy duty cycle control i phase-shifted (DCCPS) i metoda quasi-rezonansowa (QR). Na wykresach przedstawiających przebiegi chwilowe prądów i napięć wielkości powinny być oznaczone małymi literami. W prezentowanych wynikach symulacji pojawiają się na schemacie nowe indukcyjności po stronie pierwotnej i wtórnej transformatora, brakuje powielacza i występuje rezystancja obciążenia, która w pierwotnym schemacie nie występuje. Autor podaje, że w metodzie DCCPS prąd płynie w obwodzie o większej rezystancji w porównaniu z obwodem z dwoma załączonymi tranzystorami w metodzie phase-shifted. Nie wyjaśnia jednak z czego wynika większa rezystancja obwodu. Na rys.7.13 podano przebieg napięcia ładowania kondensatora zastępczego, który został naładowany w założonym czasie 300 ms. Doktorant przedstawił wady trzech pierwszych metod, które polegają wg Autora na zbyt dużych wartościach prądów zasilacza, po czym dokonuje analizy pracy układu z zastosowaniem metody QR. Zastosowanie tej metody pozwoliło zmniejszyć wartości RMS prądu uzwojenia pierwotnego transformatora i akumulatora, szczególnie w trybie pracy zasilacza z „czasem minimalnym”. Nie podano jednak w jaki sposób dobrano minimalny czas pracy tranzystora M1.

W podrozdziale 7.3 Doktorant ocenił wpływ układów powielających napięcie na pracę zasilacza. W przeprowadzono symulacje z powielaczami napięcia typu: full_wave, kaskada Villarda, podwajaczem napięcia oraz zbadano układ bez powielacza i bez pojemności pasożytniczych. Jednak dla każdego powielacza Autor przyjął inną liczbę zwojów uzwojenia wtórnego transformatora. I tak w wypadku podwajacza napięcia zwiększono liczbę zwojów uzwojenia wtórnego z 2000 do 3000, a dla układu bez powielacza do 6000. Jednocześnie Doktorant w symulacjach tych zrezygnował z metody QR, opisanej wcześniej i jak się wydaje wybranej jako najkorzystniejszej metody oraz przeprowadził dalsze badania symulacyjne korzystając z metody phase-shifted. Autor napisał „Ze względu na to, że każdy z układów powielających pracuje inaczej nie możliwe było wykorzystanie quasi-rezonansowej metody sterowania tranzystorami przy jednoczesnym zapewnieniu zbliżonych warunków pracy”. Nie jest jasne, dlaczego metoda QR nie mogła być zastosowana w analizie porównawczej, a zmiana liczby zwojów dla każdego rodzaju powielacza tak. W badaniach symulacyjnych Doktorant skupił się na wartościach prądu RMS uzwojenia pierwotnego transformatora oraz na czasie ładowania kondensatora zastępczego. Analizowanie układu bez powielacza, pomijając pojemności pasożytnicze nie ma uzasadnienia, tym bardziej, że Doktorant wielokrotnie zwracał w pracy uwagę na problemy związane

z występowaniem pojemności pasożytniczych. Ostatecznie w wyniku przeprowadzonej analizy porównawczej jako najkorzystniejsze rozwiązanie wybrany został powielacz Full-Wave.

Wyniki analizy wpływu rezystancji tranzystorów na wydajność zasilacza przedstawione w podrozdziale 7.4.1 są oczywiste. Zasilacz, w którym miałyby być zastosowane tranzystory o rezystancji dren-źródło większej ponad 20-krotnie musi mieć dużo gorszą wydajność.

W podrozdziale 7.4.2. Doktorant przeprowadził analizę wpływu pojemności kondensatorów powielacza na wydajność zasilacza. Przy czym analiza ta dotyczyła wpływu tych pojemności na wartość napięcia na zastępczym kondensatorze w czasie 300 ms. Przeprowadzono symulacje dla czterech wartości pojemności 10 pF, 100 pF, 1 nF i 10 nF powielacza. Zaskakujący wydaje się wynik symulacji dla pojemności 10 pF, dla której wartość napięcia na zastępczym kondensatorze jest najmniejsze w czasie 300ms. Największa wartość napięcia występuje dla pojemności 100 pF, a dla większych pojemności napięcie to spada. Rozważając wybór wartości pojemności 100 pF i 1 nF, Autor wprowadził nowe kryterium, a mianowicie wartość napięcia na nieziemionym końcu jednego z transformatorów i ostatecznie dokonał wyboru pojemności 1 nF, uznając, że napięcie to jest przez dłuższy czas większe dla pojemności 100 pF w porównaniu z pojemnością 1 nF. Wynika to z mniejszych stałych czasowych w układzie w przypadku kondensatorów o mniejszych pojemnościach. Według mnie brakuje w analizie jasnych kryteriów doboru pojemności kondensatorów powielacza.

W podrozdziale 7.5 Doktorant omówił możliwość zwiększenia stopni powielacza w celu zwiększenia napięcia na kondensatorze zastępczym. Wynik przeprowadzonej analizy, w której stwierdzono, że można otrzymać większe napięcie na kondensatorze, ale kosztem dłuższego czasu ładowania jest oczywisty.

W podrozdziale 7.6 pt: „*Wyniki badań symulacyjnych – parametry do doboru elementów rzeczywistych*” Doktorant przeprowadził analizę dotyczącą doboru „*drutu*” do wykonania uzwojenia wtórnego transformatora oraz doboru diod w powielaczu. Ostatecznie nie podał zasad doboru tych elementów.

W podrozdziale 7.7 Autor przeprowadził symulacje zasilacza z generatorem Marksa z zastosowaniem czterech kombinacji elementów współpracujących z kondensatorami generatora: rezystorów, rezystorów z diodami, cewek oraz wszystkich trzech tych elementów jednocześnie. W wypadku generatora z rezystorami przeprowadzono symulacje z rezystorami o wartościach 1 k Ω , 10 k Ω , 100 k Ω , 1 M Ω i 10 M Ω . W wyniku przeprowadzonych symulacji dobrano rezystory o wartości 10k Ω z wyżej przytoczonego czteroelementowego zbioru. Rezystory te zapewniają ładowanie wszystkich kondensatorów generatora Marksa praktycznie w tym samym czasie (rys.7.47). Dalej Doktorant podnosi problem strat energii w rezystorach po każdym zadziałaniu

iskiernika, jednak nie podaje jakiego poziomu są to straty. Następnie przeprowadził badania generatora Marksa z diodami i rezystorami o wartości 100 k Ω . Nie podał jednak parametrów zastosowanych diod. Wynik symulacji dla wybranego przypadku okazał się prawidłowy, ale Autor zasygnalizował problemy doboru diod oraz strat energii w diodach, nie podając ponownie jakie rzędu są to straty. Następnie przeprowadził symulacje z zastosowaniem cewek o indukcyjnościach 1 mH. Wyniki symulacji okazały się pozytywne, ale nie ma wyjaśnienia, dlaczego wybrano taką wartość indukcyjności. Na koniec Doktorant zastosował w generatorze Marksa wszystkie elementy, czyli diody rezystory, diody i cewki. Typu diod nie podano, a wartości rezystancji i indukcyjności przyjęto odpowiednio 1 k Ω i 10 μ H, bez wyjaśnienia w jaki sposób dobrano te wartości.

W rozdziale 8 przedstawiono opis konstrukcji zasilacza wysokiego napięcia. Opis wykonania transformatora wydaje się zbyt szczegółowy. Średnice zastosowanych przewodów podano w mm². W podrozdziale 8.2 przedstawiono wyniki pomiarów parametrów wykonanego transformatora. Nie podano jednak jaką zastosowano aparaturę pomiarową. Zmierzoną wartość indukcyjności uzwojenia pierwotnego podano w μ F (str.121). Współczynnik AL ma jednostkę nH, a nie nH/zwój². W podrozdziale 8.3 przedstawiono badania symulacyjne z wykorzystaniem modelu wykonanego transformatora. Doktorant stwierdził, że wykonany transformator ma dużą wartość współczynnika sprzężenia (0.9933), co powoduje bardzo duży prąd w uzwojeniu pierwotnym. Autor nie podał dla jakiego schematu zasilacza wykonał obliczenia symulacyjne dla parametrów rzeczywistego transformatora. Zgodnie z rys.8.13 wartości chwilowe prądu w uzwojeniu wtórnym jednego z transformatorów są rzędu aż 200 A, a wartość RMS 25 A, przy wartości prądu uzwojenia pierwotnego rzędu 12 A. Autor napisał, że wartości prądu uzwojenia pierwotnego mogą negatywnie wpływać na źródło, czyli akumulator. Nie podjął jednak krytycznej analizy otrzymanych wyników obliczeń symulacyjnych, tym bardziej, że we wcześniejszych badaniach symulacyjnych tak skrajnie różnych wyników nie otrzymał. Dalej podał, że sztucznie zwiększono indukcyjność rozproszenia poprzez włączenie cewki o indukcyjności 10 μ H szeregowo z uzwojeniem pierwotnym transformatorów oraz wprowadził ogranicznik wartości prądu „szczytowego” oraz funkcję miękkiego startu. Dzięki tym zabiegom wartości RMS prądu w uzwojeniu wtórnym wyniosły około 6 A. Wyniki tych symulacji są skrajnie różne w sensie ilościowym w porównaniu z wynikami symulacji opisanymi w rozdziale 7 na rys.7.41, gdzie wartości RMS prądu uzwojenia wtórnego są rzędu 30 mA.

W rozdziale 9 Doktorant opisał badania i testy zasilacza wysokiego napięcia. W zasilaczu ostatecznie zastosował algorytm sterowania tranzystorami quasi-rezonansowy. Przetestowano i stwierdzono poprawność działania algorytmu sterowania i pracy ogranicznika wartości szczytowej prądu i kontroli napięcia wyjściowego. Maksymalna wartość prądu uzwojenia pierwotnego

wyniosła około 20 A. Autor zbadał poprawność procesu ładowania generatora do napięcia 50 kV, pracę sterowania iskiernikiem oraz zaprezentował szereg testów generowania udarów wysokiego napięcia. Jak widać Doktorant osiągnął zakładany czas generowania impulsów, tj. 3 impulsy na sekundę.

W rozdziale 10 Autor zamieścił wnioski. Niewątpliwie Doktorantowi udało się zaprojektować zasilacz wysokonapięciowy, przeprowadzić badania symulacyjne, zbudować i przeprowadzić badania eksperymentalne zasilacza z generatorem Marksa. Mam jednak wątpliwości czy opracowana metodologia projektowania zasilaczy wysokonapięciowych jest łatwa do wykorzystania przez innych projektantów. W mojej ocenie Autor przedstawił sposób postępowania przy projektowaniu zasilacza wysokonapięciowego, w wielu miejscach o dużej złożoności. Oczekuję, że Doktorant przedstawi na obronie klarowny opis opracowanej przez siebie metodologii projektowania zasilacza. Postawione wnioski w większości są słuszne. We wniosku nr 3 Doktorant podał, że *„nie można całkowicie wyeliminować tego zjawiska, a problemy z tym związane należy rozwiązać w inny sposób”*. Nie podał jednak w jaki sposób. We wniosku nr 9 Autor napisał, że *„przy doborze zastosowanych przewodów uwagę również trzeba zwrócić na prądy wynikające z przeladowywania pojemności pasożytniczych”*. Jak wynika z pracy na dobór przewodów wpływa wiele czynników, które można było wymienić. We wniosku nr 13 Autor podał, że *„na jego uzwojeniu wtórnym napięcie nie narasta w sposób przewidywalny, a wysoka wartość utrzymuje się znacznie dłużej niż w przypadku zastosowania w powielaczu kondensatorów o większej pojemności”*. Z czego wynika, że przebieg jest nieprzewidywalny Autor nie wyjaśnił. We wniosku nr 14 Doktorant napisał, że *„prawie cała energia dostarczana do transformatora, a jaka może być zgromadzona w indukcyjności rozproszenia czy indukcyjności pomocniczej, jest przekazywana do obciążenia”*. Czy to oznacza, że w wypadku idealnego transformatora nie byłoby możliwe przekazywanie energii do obciążenia ?

W podsumowaniu Autor wymienił własne osiągnięcia. Przeprowadzenie przeglądu literatury nie należy uznać za osiągnięcie. Osiągnięciem według mnie jest niewątpliwie zaprojektowanie, wykonanie kompletnego zasilacza z generatorem Marksa oraz przeprowadzenie badań symulacyjnych i eksperymentalnych, które potwierdziły osiągnięcie napięcia na kondensatorach generatora Marksa w czasie 300 ms i wygenerowanie trzech udarów na sekundę.

3. Uwagi krytyczne

Zastrzeżenia natury ogólnej budzą następujące aspekty rozprawy dotyczące:

Rozdział 1

1. Wstęp jest bardzo krótki, aczkolwiek w dalszej części pracy analiza stanu wiedzy przedstawiona została aż na 50 stronach. Dlaczego założono, że zasilacz powinien mieć regulację napięcia, ograniczenie prądowe i kompaktowe wymiary oraz małą masę?

Rozdział 3

2. Autor nie wyjaśnił z czego wynikają przyjęte w pracy wymagania dotyczące zasilacza np. dopasowanie architektury zasilacza do szerokiego zakresu generatorów, wytwarzających impulsy nanosekundowe i mikrosekundowe. Czy istnieją na rynku generatory spełniające postawione przez doktoranta wymagania ?
3. Teza rozprawy dotyczy konkretnego układu. Na schemacie pokazano, że wysokie napięcie jest podane wprost do kontrolera – w jaki sposób mierzone było napięcie ?

Rozdział 4.2

4. Autor nie wyjaśnia jakie występują problemy ze sterowaniem i kontrolą zasilacza z powielaczem napięcia.

Podrozdział 4.3.1.

5. Autor często używa określeń „*pewne problemy*” czy np. „*aby osiągnąć zakładane napięcie wyjściowe liczba stopni może być znaczna, co będzie negatywnie wpływało na wydajność urządzenia i szybkość działania*” nie wyjaśniając, dlaczego liczba stopni ma taki znaczący wpływ.

Rozdział 5.

6. Doktorant napisał, że transformator wysokiego napięcia wysokiej częstotliwości musi „*spełniać szereg wymogów, z których niektóre wychodzą na jaw dopiero w trakcie wykonywania tego elementu*” – nie wiadomo jakich wymogów i dlaczego pojawiają się one w trakcie wykonywania elementu.

Podrozdział 5.1.

7. Brak jest skali na osi natężenia pola magnetycznego (rys.5.1). W podrozdziale tym Doktorant opisał wady i zalety rdzeni transformatora zbudowanych z sześciu różnych materiałów i podał, że dokonał wyboru najczęściej stosowanego rdzenia ferromagnetycznego. We wzorze (5.1) podano współczynnik K_t zależny od topologii układu bez przytoczenia stosownej literatury. Jednocześnie nie jest jasne w jaki sposób przyjmuje się wartości pola powierzchni okna i efektywnego pola powierzchni przekroju rdzenia (patrz wzór 5.1). Autor rozważał kwestię strat w rdzeniu przy pracy

transformatora przy wysokich częstotliwościach i ostatecznie przyjął, że nie należy brać strat pod uwagę ze względu na przyjęty maksymalny czas cyklu pracy urządzenia wynoszący 10 s, czego w celach pracy nie podał. Na str.36 podano założenie, że gęstość prądu w uzwojeniach wynosi nie więcej niż 420A/mm². Proszę odnieść się do tej wartości.

Podrozdział 5.2

8. Na str.38 autor nie podał literatury podając wartości minimalnego i maksymalnego napięcia. Autor podał również, że w transformatorach wysokiego napięcia wysokich częstotliwości *„przyjmowane są dość niskie wartości indukcji magnetycznej maksymalnej, znacznie niższe niż wartości indukcji nasycenia. Ma to na celu nie tylko redukcję strat mocy w rdzeniu, ale też zabezpieczenie przed nasyceniem i zwiększeniem bezawaryjnej pracy.”* Jakie są wartości *„dość niskich wartości indukcji”*.

Podrozdział 5.3.1

9. Doktorant podaje, że w przypadku dużej liczby zwojów wartości pojemności pasożytniczych znacząco rosną. Nie podał jednak zmian ilościowych. Dlaczego pojemności powodują odkształcenia prądów w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym (str.41) ?
10. Na rys.5.13-5.16 doktorant przedstawił zarejestrowane napięcia na uzwojeniu pierwotnym i wtórnym dla różnych wartości częstotliwości. Dlaczego napięcie na uzwojeniu wtórnym transformatora wynosi maksymalnie kilkadziesiąt V.

Rozdział 6

11. Czy podobny system regulacji pracy zasilacza był już wcześniej stosowany (str.71) ?

Rozdział 7

12. Z czego wynika przyjęcie 10 stopniowego generatora Marksa oraz przyjęcie wartości pojemności kondensatorów 3.3 nF (str.101) ? Jaką wartość indukcyjności mają zastosowane kondensatory ?
13. Na rys.7.10 pokazano przebieg oscylacyjny prądu w uzwojeniu pierwotnym transformatora w trybie pracy zasilacza typu phase-shifted w przypadku *„wysokiej wartości pojemności pasożytniczej”*. Oscylacje te są duże, czego nie widać na rys.7.8. Proszę wyjaśnić z czego wynika różnica w przebiegu prądu.
14. W przedostatnim zdaniu na str.80 Autor napisał: *„Powoduje to zamknięcie się prądu w obwodzie pierwotnym przez jeden otwarty tranzystor po stronie wysokiej”*. Proszę o wyjaśnienie tego zdania.

15. Autor podał na str.81, że wartość RMS prądu płynącego w uzwojeniu pierwotnym jednego transformatora wynosi około 11 A (rys.7.14), natomiast prąd źródłowy nie przekracza 5 A (rys.7.15). Proszę o wyjaśnienie tej kwestii (Tab.7.2) oraz wyjaśnienie w jaki sposób obliczono wartość RMS prądu.
16. Proszę wyjaśnić, dlaczego napięcie na kondensatorze zastępczym (str.82) zwiększa swoją wartość tylko w pierwszym półokresie prądu w uzwojeniu pierwotnym transformatora (rys.7.1).
17. Proszę wyjaśnić zjawisko pochłaniania energii na przeładowanie kondensatora (str.92).
18. Jaka jest optymalna wartość pojemności powielacza Full-Wave (rys.7.31) w sensie maksymalnej wartości napięcia na kondensatorze zastępczym podczas ładowania w czasie 300 ms ?
19. Na rys.8.10 pokazano zależność rezystancji uzwojenia pierwotnego od częstotliwości. Proszę wyjaśnić charakter tej zależności. Jaką zastosowano aparaturę pomiarową.

Rozdział 9

20. Na zarejestrowanych wykresach generowanych impulsów wysokiego napięcia (rys.9.15-9.21) maksymalna wartość napięcia wynosi 50 kV. Jeżeli zastosowano dziesięcio-stopniowy generator Marksa z kondensatorami ładowanymi do napięcia 50 kV każdy (rys.7.54), to dlaczego impulsy napięciowe generatora mają tę samą wartość ?
21. Na rys.9.16-9.21 przedstawiono liczbę generowanych udarów wysokiego napięcia, która spełnia przyjęte założenie (3 impulsy na sekundę). W jaki sposób obciążony był generator Marksa ?

4. Ocena poziomu wydawniczego i redakcyjnego rozprawy

Układ treści rozprawy można uznać za właściwy. Praca zawiera mnóstwo błędów językowych, których część zamieszczono w uwagach szczegółowych.

5. Uwagi szczegółowe

W symbolu str.Xⁿ_m, X-oznacza numer strony, n-numer wiersza od góry strony, m-numer wiersza z dołu strony. Tekst napisany czcionką *italic* jest tekstem z rozprawy.

Str.9 ¹⁵	<i>impedancja</i> – impedancją	Str.65 ¹	<i>wybrane</i> – wybrany
Str.13 ²	<i>ilość</i> – liczba	Str.65 ⁵	<i>w którym ma</i> – w którym
Str.14 ¹¹	<i>wplywu</i> – wpływ	Str.66 ¹³	<i>konieczność</i> – konieczności
Str.15 ¹	<i>związanie</i> – związane	Str.67 ³	<i>wiązanie</i> – związane
Str.17 ¹⁰	<i>programach</i> – programów	Str.67 ⁴	<i>sprężenia</i> – sprzężenia
Str.18 ³	<i>przy pomocy</i> – za pomocą	Str.67 ¹³	<i>problemem</i> – problemem jest
Str.19 ²	<i>z diod</i> – diod	Str.67 ²	<i>maja</i> – mają
Str.21 ¹⁰	<i>w momocie</i> – w momencie	Str.69 ⁹	<i>spółczynniku</i> – współczynniku
Str.24 ²	<i>działanie</i> – działania	Str.69 ⁷	<i>transformator</i> – transformatora
Str.24 ¹¹	<i>pądu</i> – prądu	Str.69 ¹	<i>zakładania</i> – zakładana
Str.25 ¹	<i>flyback dość</i> – flyback jest dość	Str.70 ⁵	<i>większy</i> – większe
Str.29 ⁴	<i>znacznie</i> – znaczne	Str.70 ¹	<i>zwiększanie</i> – zwiększania
Str.30 ¹⁴	<i>równie</i> – również	Str.71 ⁸	<i>wartość prądu płynącą</i> – wartość prądu płynącego
Str.32 ³	<i>wchodzą</i> – wychodzą	Str.73 ²	<i>liczba</i> – liczbę
Str.32 ⁷	<i>miedzy</i> – między	Str.74 ¹⁵	<i>sprężenia</i> – sprzężenia
Str.35 ³	<i>wykorzystuje się rdzenie</i> – wykorzystuje się rdzenie	Str.77 ²	<i>obciążania</i> – obciążenia
Str.37 ¹³	<i>zwiększą</i> – zwiększa	Str.80 ⁴	<i>wyłączanie</i> – wyłączane
Str.40 ⁵	<i>miedzy</i> – między	Str.80 ¹	<i>rezystancje</i> – rezystancję
Str.40 ⁷	<i>przy pomocy</i> – za pomocą	Str.81 ⁷	<i>mniejsza</i> – mniejszą
Str.40 ¹⁰	<i>napięcie</i> – napięcia	Str.84 ³	<i>pądu</i> – prądu
Str.40 ⁶	<i>wartość</i> – wartości	Str.88 ¹¹	<i>skupiły</i> – skupiały
Str.40 ⁷	<i>ilość</i> – liczba	Str.88 ⁶	<i>napięcie</i> – napięcia
Str.41 ³	<i>pojemność między warstwowe</i> – pojemności międzywarstwowe	Str.89 ⁶	<i>taka</i> – taką
Str.41 ¹¹	<i>związany</i> – związanych	Str.90 ⁴	<i>powielaczami</i> – powielaczy
Str.44 ³	<i>niska</i> – niską	Str.92 ⁵	<i>mniszy</i> – mniejszy
Str.40 ⁴	<i>sekcje</i> – sekcje	Str.92 ⁶	<i>podawaczami</i> – powielaczami
Str.48 ³	<i>wartość</i> – wartości	Str.93 ³	<i>napięcie</i> – napięcia
Str.48 ⁴	<i>transformator</i> – transformatora	Str.94 ⁵	<i>obciążenia</i> – obciążenie
Str.49 ¹¹	<i>indukcyjność</i> – indukcyjności	Str.94 ¹¹	<i>urządzeniach</i> – urządzenia
Str.55 ⁸	<i>obciążenie</i> – obciążenia	Str.94 ¹⁵	<i>pojemność</i> – pojemności
Str.56 ⁸	<i>połączoną</i> – połączona	Str.94 ⁸	<i>ilości</i> – liczby
Str.58 ¹	<i>większa</i> – większy	Str.95 ⁴	<i>podwójcze</i> – podwójczaje
Str.58 ⁴	<i>znaczenie</i> – znaczne	Str.95 ⁵	<i>tylu</i> – typu
Str.58 ¹¹	<i>najmniejsza</i> – najmniejszą	Str.97 ¹⁰	<i>pobrana</i> – pobraną
Str.58 ⁵	<i>indukcyjność</i> – indukcyjności	Str.97 ⁸	<i>związana</i> – związane
Str.61 ¹	<i>ładowanie</i> – ładowania	Str.97 ⁸	<i>większa</i> – większą
Str.61 ⁸	<i>organicznie</i> – ograniczenie	Str.98 ⁹	<i>na przy</i> – przy
Str.62 ⁶	<i>napiccia</i> – napięcia	Str.102 ²	<i>szybkości</i> – szybkość
Str.64 ⁶	<i>krytycznych</i> – krytyczny	Str.102 ⁴	<i>stopienie</i> – stopnie
Str.110 ¹	<i>zużycia</i> – użycia	Str.105 ⁷	<i>znacznie</i> – znaczne
Str.110 ⁴	<i>wysokie</i> – wysokiego	Str.137 ³	<i>napięcie</i> – napięcia
Str.110 ¹⁵	<i>działa</i> – działał	Str.138 ⁹	<i>nieosiągnięte</i> – nie osiągnię
Str.114 ¹	<i>uznojenie</i> – uzwojenie	Str.144 ⁴	<i>zastosowania</i> – zastosowanie
Str.114 ²	<i>uznojenie</i> – uzwojenie	Str.145 ¹⁶	<i>zimmniejszych</i> – zmniejszy
Str.114 ⁹	<i>przy pomocy</i> – za pomocą	Str.145 ¹	<i>przepływające</i> – przepływających
Str.114 ⁶	<i>nawinięcie</i> – nawinięcia	Str.147 ²	<i>zastosowanie</i> – zastosowania
Str.128 ⁵	<i>włączany</i> – załączany	Str.148 ¹⁰	<i>prezentowanych</i> – prezentowanym
Str.128 ⁷	<i>włączeniu</i> – załączeniu	Str.148 ¹⁵	<i>uznojeniem</i> – uzwojeniem
Str.135 ¹	<i>przy pomocy</i> – za pomocą	Str.148 ¹⁷	<i>uznojeniem</i> – uzwojeniem
		Str.148 ⁶	<i>ładowanie</i> – ładowania

6. Ocena rozprawy doktorskiej

Wybór tematyki rozprawy i jej zakres są właściwe. Tematyka rozprawy jest aktualna na tle obecnego stanu wiedzy. Autor rozprawy wykazał się wiedzą teoretyczną i praktyczną w zakresie dyscypliny naukowej, której dotyczy rozprawa. Jednakże praca zawiera wiele niejasnych sformułowań, zaprezentowana metodologia projektowania zasilacza wyróżnia się dużą złożonością, a końcowe wyniki badań eksperymentalnych wymagają wyjaśnień. Opiniujący oczekuje od Doktoranta ustosunkowania się do zawartych w recenzji uwag krytycznych.

7. Wniosek końcowy

Mimo moich licznych uwag krytycznych zamieszczonych w niniejszej rozprawie, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Krzysztofa Pachowicza pt.: "Ładowanie i sterowanie szybkich generatorów Marksa" spełnia minimalne wymagania stawiane w art.13. ust.1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki" (Dz. U. z dnia 21.06.2016 r. poz.882) pracom na stopień doktora nauk technicznych i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika.

.....