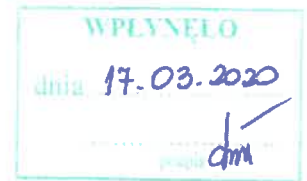


Gliwice, dn. 13.03.2020r.

Dr hab. inż. Marcin Kasprzak, prof. PŚ.  
Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny  
Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki  
ul.B.Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice



## Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Kawy

pt. „**Energoelektroniczne rezonansowe przekształtniki mocy DC-DC o przełączanych kondensatorach podwyższające napięcie**”

opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika (Akademia Górniczo-Hutnicza)

dr hab. inż. Ryszarda Sroka, prof. Uczelni

(pismo nr: L. Dz. WEAlIB-b/510-17-2/15 z dnia 10.01.2020 roku).

### 1. Wprowadzenie

Przedmiotem rozprawy są przekształtniki DC/DC podwyższające napięcie stałe, w szczególności takie, które działają na zasadzie przełączanych kondensatorów (SCC-*Switched Capacitor Converter*). Przekształtniki takie mają pewne cechy, które są korzystne w porównaniu do klasycznych przekształtników DC/DC z elementami magnetycznymi. Do korzystnych cech można zaliczyć możliwość gromadzenia energii w nowoczesnych kondensatorach o dużej (np. objętościowej) gęstości gromadzonej energii, wyższej niż w elementach magnetycznych. W przekształtnikach SCC występują również cewki indukcyjne, ale pełnią one rolę pomocniczą np. jako elementy obwodu rezonansowego. Korzystnym jest również to, że w wielopoziomowych SCC wszystkie elementy przekształtnika pracują przy napięciu porównywalnym z napięciem strony niskiej. Wadą SCC jest mocno ograniczona możliwość sterowania napięciem wyjściowym, bo tylko z wąskiego pasma wokół wartości dyskretnej zależnej od liczby poziomów przekształtnika. Ze względu na swoje zalety oraz możliwości aplikacyjne np. w instalacjach z panelami fotowoltaicznymi lub z ogniwami paliwowymi konieczne jest prowadzenie systematycznych badań takich nowych przekształtników.

Istotnym kierunkiem takich badań jest skonstruowanie układu o możliwie najwyższej sprawności energetycznej, co uzyskiwane jest przez zastosowanie nowoczesnych tranzystorów, podobwodów rezonansowych i wykorzystanie ich częściowo do realizacji miękkiego (możliwie bezstratnego) przełączania tranzystorów. Powyższa, istotna problematyka znalazła odzwierciedlenie w niniejszej rozprawie doktorskiej.

Autor rozprawy najpierw przeanalizował układ powielacza napięcia z przełączanymi kondensatorami SCVM (*Switched Capacitor Voltage Multiplier*) wykonany na bazie tyrystorów. Układ przeanalizowano teoretycznie, przeprowadzono badania symulacyjne oraz eksperymentalne. Celem opisanych badań było wykazanie przydatności łączników tyrystorowych do budowy układów o przełączanych kondensatorach, ponieważ układy takie wg autora są predysponowane do pracy przy dużych mocach, nawet kilkudziesięciu kW.

Główna tematyka pracy dotyczy czteropoziomowego rezonansowego przekształtnika z przełączanymi kondensatorami MRSCC (*Multilevel Resonant Switched Capacitor Converter*), który zbudowano na bazie tranzystorów SiC MOSFET oraz przeanalizowano wielowariantowo: teoretycznie, symulacyjnie i laboratoryjnie.

Przekształtniki rezonansowe są jednym z obszarów działań naukowo-badawczych prowadzonych od lat na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii

M.Kasprzak, recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Kawy pt. „Energoelektroniczne rezonansowe przekształtniki mocy ...”

Biomedycznej Akademii Górniczo-Hutniczej. Warto w tym kontekście podkreślić, że recenzowana praca jest więc kontynuacją tematyki przekształtników rezonansowych i swego rodzaju promocją przekształtników MRSCC, które wg mnie nie znalazły szerokiego zastosowania w rozwiązaniach komercyjnych. Przyczyną tego może być brak informacji o zaletach i wadach tych przekształtników, o celowości ich stosowania oraz brak odpowiedzi na pytanie, czy zastąpienie dotychczasowych urządzeń nowymi przyniesie wymierne efekty.

## 2. Strona formalna rozprawy

Rozprawa została zawarta w 5 rozdziałach, zawiera wykaz ważniejszych oznaczeń oraz streszczenie w językach polskim i angielskim. Rozdział 1 to wstęp w którym określono między innymi cele badawcze i aktualny stan wiedzy. Dwa kolejne rozdziały (nr 2 i 3) to obszernie, główne rozdziały merytoryczne w których kolejno opisano powielacz napięcia w topologii SCVM oraz przekształtnik wielopoziomowy o przełączanych kondensatorach MRSCC. Rozdział 4 to podsumowanie, wnioski oraz wykaz osiągnięć, które autor uznał za oryginalne i samodzielne. Rozdział 5 to bibliografia. Rozprawa jest obszerna i zawiera 181 stron, około 82 rysunków, 19 tabeli i 265 wzorów/zależności.

Ma ona istotne elementy rozprawy naukowej, a mianowicie:

- motywację którą autor pracy ujmuje jako:
  - „zbadanie możliwości zastosowanie tyrystorów SCR w układach o przełączanych kondensatorach dla rozszerzenie ich aplikacji o układy dużej mocy” oraz
  - „zastosowanie nowoczesnych łączników z materiału półprzewodnikowego o szerokim paśmie zabronionym WBG (*Wide Band Gap*) w celu uzyskania dużej częstotliwości pracy, dużej gęstości mocy przy dużej sprawności energetycznej.”
- cele badawcze które przedstawiono w rozdziale 1.1:
- obszernie wyniki własnych badań częściowo nowych, opracowanych w ramach rozprawy przekształtników SCVM i MRSCC z przełączanymi kondensatorami, które autor analizował teoretycznie i badał laboratoryjnie, oraz
- wnioski.

Praca zawiera wykaz literatury obejmujący 122 pozycji, w tym 13 pozycji współautorstwa doktoranta oraz 35 adresów stron internetowych (głównie kart katalogowych podzespołów i aparatury), ułożonych alfabetycznie. Wykaz literatury jest reprezentatywny dla tematu rozprawy, a recenzentowi nie jest znane opracowanie takie, jakie stanowi rozprawa.

Od strony formalnej nasuwają mi się zarówno uwagi krytyczne jak i pozytywne:

- wykaz akronimów i oznaczeń jest niepotrzebnie taki obszerny i uwzględnia prawie wszystkie indeksowania konkretnej wielkości, np.:  $I_{GR(k)Cmax}$ ,  $I_{GR(k)TDmax}$ , ... (x5). Ich znaczenie wynika zwykle z kontekstu / fragmentu pracy w którym go użyto i nie ma potrzeby go powielać.
- w pracy występuje duża liczba błędów edytorskich (literówek) i błędnych form wyrazów, nieprawidłowego użycia czcionki kursywa/prosta, wielkości pisanych czcionką *Arial* zamiast poprawnie *Times New Roman* (jak w spisie oznaczeń), jednostek pisanych różnymi stylami (kursywa/prosta, z odstępem po wartości lub bez).
- na podkreślenie z kolei zasługuje bardzo dobra edytorska strona rysunków, wykresów i zdjęć. Rysunki są czytelne, opisy wykonane czcionką odpowiedniej wielkości, dobrze oznaczone przebiegi czasowe, zarówno opisy osi jak i oznaczenia przebiegów oraz skali/podstawy czasu. Zdjęcia są wyraźne a oznaczenia elementów zgodne ze schematami.

### 3. Przedmiot pracy i cele badawcze

Recenzowana praca doktorska nie ma zwyczajowo sformułowanej tezy. Nie jest to konieczne, ponieważ podano cele badawcze, a na końcu pracy potwierdzono ich realizację.

Przedmiotem rozprawy są przekształtniki DC/DC podwyższające napięcie stałe, które działają na zasadzie przełączanych kondensatorów SCC (*Switched Capacitor Converter*).

- Pierwszym analizowanym i badanym układem jest powielacz napięcia z przełączanymi kondensatorami SCVM (*Switched Capacitor Voltage Multiplier*) wykonany na bazie tyrystorów. W wersji laboratoryjnej podwyższa napięcie 5-krotnie i jest zwymiarowany na moc 1 kW przy napięciu wejściowym 100 V i wyjściowym 500 V.
- Drugim i zarazem głównym przedmiotem badań jest czteropozomowy rezonansowy przekształtnik z przełączanymi kondensatorami MRSCC (*Multilevel Resonant Switched Capacitor Converter*), który zbudowano na bazie tranzystorów SiC MOSFET oraz przeanalizowano wielowariantowo: teoretycznie, symulacyjnie i laboratoryjnie. W wersji laboratoryjnej podwyższa napięcie 4-krotnie i jest zwymiarowany na moc 5 kW przy napięciu wejściowym 500 V i wyjściowym 2000 V.

Cele badawcze doktorant sformułował następująco:

- „Wykazanie specyficznych własności techniki przełączanych kondensatorów w przekształtnikach mocy i analiza własności wybranych energoelektronicznych rezonansowych przekształtników mocy DC-DC o przełączanych kondensatorach”.
- „Określenie możliwości zastosowania łączników tyrystorowych i tranzystorowych w układach o przełączanych kondensatorach”.
- „Analiza strat energii w obwodach mocy i układach sterowania w wybranych topologiach przekształtników DC-DC o kondensatorach przełączanych”.
- „Eksperymentalne badania wybranych złożonych topologii przekształtników DC-DC podwyższających napięcie o przełączanych kondensatorach”.

Autor nie podał wprost jak planował osiągnąć podane cele badawcze (metodyka, plan zadań badawczych). Natomiast po ostatecznej lekturze całej pracy oraz rozdz. 1.3 (struktura pracy) stwierdzam, że zastosował prawidłową metodykę i zrealizował następujących zadania badawcze, które w skrócie są następujące:

- sformułowanie założeń oraz opracowanie modeli matematycznych przekształtników,
- znalezienie zależności opisujących wybrane wielkości w obrębie przekształtnika ( $u, i, p$ ),
- weryfikacja eksperymentalna rozważań teoretycznych, obliczeń i symulacji numerycznych,
- opracowanie, dyskusja, analiza porównawcza oraz generalna konkluzja będąca wynikiem rozważań teoretycznych i badań eksperymentalnych przekształtników.

Uważam, że cel pracy oraz zadania badawcze zostały co prawda poprawnie sformułowane, to jednak są nieco ogólne i wymagały szerszego komentarza, ponieważ co np. oznacza:

- „Wykazanie specyficznych własności techniki przełączanych kondensatorów...” - jakie są te specyficzne własności ?,
- „Określenie możliwości zastosowania łączników...” - kiedy można a kiedy nie można stosować, co jest kryterium ?,
- „Eksperymentalne badania wybranych złożonych topologii...” - jakie konkretnie badania są istotne ?

## 4. Ogólna charakterystyka rozprawy

### Rozdz. 1 - Wstęp

Rozdział jest zwięzły, ma 9 stron i w początkowej części zawiera rozważania dotyczące przekształtników z przełączanymi kondensatorami, różnic i zalet układów z magnetycznymi i pojemnościowymi zasobnikami energii, częstotliwości przełączania i jej wpływu na gabaryty układu. Podano wady i zalety układów z przełączanymi kondensatorami oraz omówiono ewentualne zalety zastosowania tranzystorów z materiału półprzewodnikowego o szerokim paśmie zabronionym. W dalszej części rozdziału podano wcześniej omówione cele badawcze (rozd. 1.1) oraz omówiono stan wiedzy (rozd. 1.2) powołując się na odpowiednie pozycje literaturowe. Przegląd rozpoczęto od układów tzw. pomp ładunku (*Charge Pump*: Dickson, Leader, Fibonacci, ..), tj. układów bez obwodów rezonansowych. W kolejnych przykładach autor wskazał braki w literaturze i praktycznych rozwiązaniach układów rezonansowych. Ostatecznie autor rozszerzył pewne znane rozwiązania układu dwukierunkowego MRSCC na układ o wzmacnieniu 4, prowadząc najpierw badania ww. układu z napięciem strony wysokiej wynoszącym 1,2 kV. Ostatecznie w ramach niniejszej pracy bada układ MRSCC, o napięciu wyjściowym 2 kV, częstotliwości 270kHz, wzmacnieniu napięciowym równym 4, z tranzystorami SiC MOSFET. Badania tego układu stanowią zasadniczą część tej rozprawy doktorskiej i wg autora są jego samodzielnym wkładem w rozwój wiedzy.

Rozdział ten jest wystarczającym wprowadzeniem do tematyki pracy. Moją wątpliwość budzi jedynie arbitralne zastosowanie tranzystorów SiC MOSFET, bez analizy możliwości zastosowania np. GaN FET czy Si MOSFET. Ponadto nie wyjaśniono wyboru częstotliwości przełączania wynoszącej ok. 270 kHz.

### Rozdz. 2. Powielacz napięcia w topologii SCVM (*Switched Capacitor Voltage Multiplier*)

W rozdziale tym doktorant opisał i przeanalizował powielacz napięcia z przełączanymi kondensatorami wykonany na bazie tyrystorów. Badania tego układu są uzupełnieniem wiedzy nt. przydatności łączników tyrystorowych do budowy układów o przełączanych kondensatorach. Część prac badawczych dotyczących tego układu były prowadzone zespołowo, natomiast prace autora rozprawy dotyczyły weryfikacji eksperymentalnej, projektu, wykonania przekształtnika, przeprowadzenia pomiarów laboratoryjnych oraz interpretacji wyników. Pomimo tego, że idea układu nie jest pomysłem autora, to jego wkład uważam za znaczny, w szczególności w zakresie usystematyzowania wyników badań teoretycznych jak i laboratoryjnych.

Zastosowano czytelny szablon opisu: analiza działania w przedziałach czasowych z odwołaniem do schematów zastępczych, wyznaczenie wartości prądów szczytowych, tętnienia napięć na kondensatorach, obliczenia maksymalnej mocy przekształtnika, próba określenia całkowitych strat i sprawności przekształtnika.

Wykonano projekt przekształtnika o mocy 1 kW (5 kHz,  $k_u=5$ ,  $U_{we}=100$  V). Badania laboratoryjne poprzedzono symulacją komputerową w programie Matlab Simulink odpowiednio modyfikując model tyrystora. Uzyskano dobrą zgodność wyników symulacji i pomiarów laboratoryjnych.

W rozdziale często pojawia się pojęcie „czasu w którym następuje wyłączenie tyrystora” lub „potrzebnego na wyłączenie tyrystora”. Autor nazywa go różnie (np. zwłoka  $t_d$  na str.30) lub opisuje. Czas ten w technice tyrystorowej ma swoją nazwę: jest to *czas dysponowany* na wyłączenie tyrystora.

Do części tej nasuwa się kilka uwag, które zamieszczę w części „uwagi dyskusyjne”.

### **Rozdz. 3. Przekształtnik wielopoziomowy o przełączanych kondensatorach MRSCC** (*Multilevel Resonant Switched Capacitor Converter*).

Na początku rozdziału doktorant wyjaśnił stan aktualny tematyki dotyczący przekształtnika MRSCC oraz własne badania w tym zakresie. Autor rozszerzył pewne znane rozwiązania układu dwukierunkowego MRSCC na układ o wzmacnieniu 4, prowadząc badania układu o napięciu wyjściowym 2 kV, częstotliwości ok. 270kHz, wzmacnieniu napięciowym równym 4, z tranzystorami SiC MOSFET. W stosunku do aktualnego stanu wiedzy (układy MRSCC o wzmacnieniu 2-krotnym) w niniejszej pracy przykładowo zawarto gruntowną analizę matematyczną z przybliżeniem za pomocą podstawowej harmonicznej, dotyczącą takich zagadnień jak obciążenie prądowe elementów przekształtnika, sprawność energetyczna, efektywność napięciowa, straty energii, procedura doboru elementów.

Chociaż w literaturze można odnaleźć analizy matematyczne dotyczące przekształtnika MRSCC lub podobnych, to jednak ograniczają się one do podstawowych zależności opisujących obciążenie prądowe elementów. Przykładowo w rozdz. 3.5 zamieszczono analizę teoretyczną zjawisk przy pracy układu z odstrojeniem od częstotliwości rezonansowej gałęzi.

W rozdziale zawarto szereg analiz i interpretacji wyników, często złożonych i wymagających od czytelnika wysiłku w ich zrozumieniu. Cennymi są symulacje w oparciu o dwa różne modele łączników oraz wyniki praktyczne – projekt przekształtnika i jego badania laboratoryjne.

Z całej gamy zagadnień poruszanych w tym rozdziale, zwracam uwagę na możliwość zwiększenia sprawności układu poprzez zmniejszenie mocy strat na przeładowanie pojemności wyjściowej  $C_{OSS}$  (efektywnej) tranzystorów. Autor dobierając tranzystory (Tabela 3.3) nie podał dla nich wartości  $C_{OSS}$  - dałoby to wstępny pogląd na spodziewane straty i wybór tranzystora. Wykonał w zamian skrajny test, mierząc moc zasilania półmostka przełączanego z  $f=285$  kHz. Autor w rozdz. 3.5.4 analizował również „zjawiska zachodzące w interwale czasu martwego” jednak bez uwzględnienia  $C_{OSS}$  tranzystorów. Ze względu na złożoność procesu, względnie prawidłowe wyniki uzyskano stosując symulację Spice wykorzystując wbudowane modele tranzystorów oferowane przez producenta. Następnie dobre jakościowo przebiegi „w interwale czasu martwego” dały pomiary laboratoryjne, w szczególności układu zmodyfikowanego o dodatkowe dławiki wspomagające komutację. Przeprowadzone analizy wykazały, że wyższe sprawności uzyskuje się przy częstotliwości przełączania nieco wyższej od rezonansu ( $d_x \approx 1-1,1$ ). Według mnie wyniki takie są poprawne i były przewidywalne, jeśli skojarzymy przełączanie tranzystorów MRSCC z przełączaniem tranzystorów w falowniku rezonansowym klasy DE. W falowniku DE, tzw. komutację optymalną i przełączanie przy ZVS uzyskuje się przy częstotliwości nieco wyższej niż rezonansowa (analogia) oraz przy odpowiednim czasie martwym, w czasie którego odbywa się pełne przeładowanie pojemności  $C_{OSS}$ , bez ich dowiewania (samorozładowanie przez kanał tranzystora).

Do części tej nasuwa się kilka uwag, które zamieszczę w części „uwagi dyskusyjne”.

### **Rozdz. 4. Podsumowanie**

W rozdziale podsumowującym autor odniósł się kolejno do czterech celów badawczych wymienionych w rozdziale 1.1, wykazując kolejno, że zostały one zrealizowane. Jest to o tyle istotne, że zastępują one zwyczajowe wykazanie tezy pracy.

Realizację Celu 1 („Wykazanie specyficznych własności techniki przełączanych kondensatorów...”) opisano w 5-ciu punktach (a-f) wyszczególniając przeprowadzone analizy i ich wyniki, np.: analiza narażeń napięciowych tyrystorów, analiza efektywności napięciowej MRSCC, analiza zjawiska zanikania prądu gałęzi rezonansowych w interwale czasu martwego. Są to niewątpliwie ważne zrealizowane zadania. Nie mniej ostatecznie nie podano wprost, co to są „specyficzne własności techniki przełączanych kondensatorów...”.

Cel 2 („Określenie możliwości zastosowania łączników tyrystorowych i tranzystorowych...”) został zrealizowany, chociażby przez skuteczne zastosowanie tyrystorów i SiC MOSFET w badanych przekształtnikach. Jediną moją wątpliwość budzi brak dyskusji nad możliwością zastosowania tranzystorów GaN FET czy Si MOSFET.

Pozostałe dwa cele zostały zrealizowane bez zastrzeżeń, a na szczególną uwagę zasługują badania eksperymentalne przedmiotowych przekształtników.

## 5. Ocena rozprawy

Tematyka rozprawy jest ściśle wbudowana we współczesne badania prowadzone w energoelektronice, a zwłaszcza w obszarze zaawansowanych przekształtników DC/DC, np. we współczesnej energetyce źródeł odnawialnych. W ujęciu ogólnym, uznaje się, że rozprawa obejmuje przede wszystkim opis znaczących osiągnięć konstrukcyjnych dotyczących nowych przekształtników DC/DC podwyższających napięcie, z przełączanymi kondensatorami, które charakteryzują się sprawnością do ok. 95%. Rozprawa obejmuje rozwiązanie problemu naukowego w postaci opracowania metodologii i wyników badań wybranej klasy przekształtników, w tym przypadku z przełączanymi kondensatorami, rezonansowych, kilkupoziomowych. Ponadto, przedstawione rezultaty i wyniki badań mają bardzo istotne znaczenie przy realizacjach praktycznych omawianych przekształtników, np. w kontekście zastosowania w układach odnawialnych źródeł energii. W pracy doceniam to, że oba badane układy przeanalizowano metodycznie: analizowano teoretycznie pracę w poszczególnych przedziałach czasowych z odwołaniem do schematów zastępczych, wyznaczono analitycznie najważniejsze wartości prądów/napięć, opracowano modele komputerowe, zbudowano i przebadano model laboratoryjny, porównano wyniki pomiarowe z wynikami obliczeń modelu oraz przeprowadzono dyskusję wyników.

Do oryginalnych i najważniejszych rezultatów rozprawy zaliczam:

### **W zakresie tyrystorowego przekształtnika SCVM:**

- zaprojektowanie, wykonanie i uruchomienie przekształtnika SCVM,
- wykonanie pomiarów laboratoryjnych,
- wykonanie analizy i interpretacji wyników pomiarowych,
- rozszerzenie znanej metody doboru elementów LC przekształtnika SCVM o współczynniki znamionowego obciążenia względnego.

### **W zakresie tranzystorowego przekształtnika MRSCC:**

- wyznaczenie zależności opisujących obciążenie prądowe gałęzi rezonansowych w przekształtniku MRSCC na drodze analizy i przybliżenia pierwszą harmoniczną,
- wyprowadzenie zależności opisującej wpływ rezystancji elementów na efektywność napięciową układu MRSCC,
- Opracowanie zależności matematycznych i procedury doboru głównych elementów przekształtnika MRSCC, bazujących na analizie z przybliżeniem pierwszą harmoniczną,
- modyfikacja schematu MRSCC pozwalająca poprawić warunki przełączania tranzystorów i zwiększyć sprawność energetyczną układu,
- zagadnienia związane z odpornością podstawowego i zmodyfikowanego układu MRSCC na odstrojenie częstotliwości przełączania od częstotliwości rezonansowej,
- wykazanie wykonalności dwukierunkowego wysokonapięciowego układu MRSCC o czterech poziomach napięciowych.

**Podsumowując stwierdzam**, że doktorant działając w sposób metodyczny (analiza teoretyczna, symulacja komputerowa, eksperyment, dyskusja wyników):

- opisał jakościowo i ilościowo wybrane właściwości przekształtników SCVM i MRSCC,
- wykazał możliwość zastosowania tyrystorów i tranzystorów SiC MOSFET w przedmiotowych przekształtnikach,
- przeanalizował zagadnienia strat energii w obwodach mocy i układach sterowania oraz wykazał sprawność energetyczną przedmiotowych układów wynosząca ok. 95%,
- przeprowadził badania eksperymentalne przedmiotowych przekształtników,

**a przez to potwierdził zrealizowanie celu pracy. Ponadto, uznaje się, że podane w rozprawie wnioski końcowe są uzasadnione, rozprawa jest kompletna oraz zawiera opis istotnych osiągnięć konstrukcyjnych i nowe wyniki badań naukowych.**

### Ważniejsze uwagi dyskusyjne

#### Uwagi i pytania do doktoranta:

1. W rozdziale 2 dotyczącym układu tyrystorowego SCVM, pojawiają się stwierdzenia na temat potencjalnej możliwości zastosowania SCVM „do układów o dużych mocach rzędu setek kilowatów i więcej” (str.67, str.36). Proszę rozwinąć to stwierdzenie i podać potencjalne zastosowania takich układów o mocy „setek kilowatów i więcej”
2. W nawiązaniu do uwag nt. warunków wyłączenia tyrystora (str. 48, akapit na dole strony), proszę skomentować jak zachowa się układ, gdy nie wyłączy się jeden z tyrystorów? Czy układ podejmie poprawną pracę w kolejnym cyklu sterowania? Jakie to powoduje konsekwencje ?
3. W nawiązaniu do zastosowania tyrystorów RCT (numery parzyste) i treści akapitu pod tabelą 2.3/str.47. Jakie będą konsekwencje/utrudnienia w pracy układu SCVM jeśli zastosowane były by tyrystory SCR (szybkie, bez zintegrowanej diody równoległej).
4. Do wyznaczenia strat  $\Delta P_{C_{oss}}$  związanych z przeładowaniem pojemności  $C_{oss}$  (str.81-83) zaproponowano zależności całkowite (3.43-3.54), które są złożone i nie „zachęcają” do zastosowania w modelu strat. Autor rezygnuje z ich uwzględnienia (str.84) ze względu na złożone obliczenia. Ostatecznie jednak je uwzględnia wykonując pomiar (str.94) mocy pobieranej przez półmostek przełączany bez obciążenia (wyniki w tabeli 3.3). Twierdzę, że można je uwzględnić znacznie prostszą metodą obliczeniową, bo  $\Delta P_{C_{oss}} = f \cdot C_{ossEF} \cdot U^2$ , gdzie  $C_{ossEF}$  to pojemność tzw. efektywna (scałkowanie  $C_{oss}$ ), która nawet jest podana dla tranzystora SCT3030AL w karcie katalogowej i wynosi 230 pF (dla 300 V). Podana wyżej zależność wynika z dwóch „porcji” energii ( $1/2CU^2$ ) traconych w tranzystorze: rozładowanie własnej  $C_{oss}$  i ładowanie „sąsiedniej” – jak autor to poprawnie wyjaśnił na str.81. Z kolei zmierzona i wyznaczona przez autora całkowita moc  $\Delta P_{C_{oss}} = 87$  W (3.97) nie jest pomijalna przy sprawności, bo dla 5 kW stanowi 1,7 %. Proszę ustosunkować się do powyższej uwagi i uporządkować zagadnienie: uwzględnić  $\Delta P_{C_{oss}}$  czy nie uwzględniać i kiedy ?
5. Proszę o wyjaśnienie jakie były przesłanki do wyboru częstotliwości przełączania ok. 270 kHz ?
6. W odniesieniu do symulacji numerycznych autor stosuje pojęcia: ”symulacja fizykalna”, „program modelowania fizykalnego”, „wyniki symulacji fizykalnej”. Twierdzę, że nie jest to poprawne określenie metody i modelu symulacyjnego, szczególnie jeśli „fizykalna” oznacza to samo co „fizyczna” ? Proszę skomentować.
7. Czy dla zapewnienia pracy w rezonansie ( $d_x \approx 1$ ), np. w zmieniających się warunkach obciążenie układu MRSCC, celowa była by synchronizacja częstotliwości przełączania/zbocza np. z prądem gałęzi lub inną wielkością ? Czy jest to konieczne ?

8. Na str. 162 (podsumowanie MRSCC) autor pisze: „Uzyskana duża częstotliwość impulsowania przekształtnika laboratoryjnego przy zachowaniu dużej sprawności energetycznej i efektywności napięciowej podkreśla szczególnie korzystne właściwości badanej topologii”. Czy to jest prawdziwe? Twierdzę, że jest to raczej efekt zastosowania SiC MOSFET. Proszę skomentować w jakiej części jest to efekt „dobrej topologii” a w jakiej części zastosowania SiC MOSFET.

**Uwagi szczegółowe (w kolejności występowania w rozprawie):**

| Nr strony | Nr wiersza lub rysunku | Uwagi   |
|-----------|------------------------|---|
| 1         | w.13 od dołu           | MOSFET <i>SiC</i> - powinno być MOSFET SiC, GaN, i tak w całej pracy  |
| 1         | w.12 od dołu           | 260kHz – powinno być 260 kHz, dotyczy jednostek w całej pracy   |
| 15        | w.2 od góry            | $t_d$ – czas trwania... powinno być: czas dysponowany na wyłączenie   |
| 15        | w.9 od góry            | $U_{CF1}$ ... powinno być Times New Romana zamiast Arial  |
| 15        | w.4 od dołu            | $C_{C11}$ , ...- jak wyżej i 3 inne w spisie oznaczeń   |
| 43        | środek strony          | „gdy układ jest zasilony, ale nie impulsuje ...” – wg mnie niepoprawnie   |
| 57        | środek strony          | w momencie, (ok. 6 razy w całej pracy) - powinno być „chwili czasu” lub „chwili”  |
| 57        | w.4 od dołu            | zachodzi polaryzacja diody Dn i Dout – nie podano w jakim kierunku  |
| 73        | powyżej 3.7            | a następnie wyrażona w dziedzinie liczb zespolonych, jako wartość skuteczna: ???  |
| 80        |                        | zależność (125.2) ?   |
| 81        | powyżej 3.43           | Znaczna nieliniowość pojemności wyjściowej tranzystorów MOSFET jest główną przyczyną znacznych strat energii związanych z przeładowywaniem tych pojemności – nieliniowość nie jest przyczyną strat a znaczna pojemność  |
| 92        | w.5 od góry            | wymaganą liczbę zwoi - powinno być „zwojów”, również niżej  |
| 92        | w.9 od dołu            | dobór kondensatorów – powinno być kondensatorów   |
| 96        | w.15 od dołu           | postawie zależności (4.11) – nie ma takiej zależności   |
| 101       | rys. 3.9               | Na wykresie sprawności napięciowej... powinno być „efektywności” ?  |
| 103       | powyżej 3.106          | do tej opisanej zależnością (142.2) - nie ma zależności (142.2)   |
| 105       | poniżej 3.112          | Na rys. 3.14 i rys. 3.15 zamieszczono – powinno być 3.13 i 3.14   |
| 121       | w.3 od góry            | Z II prawa Kirchhoffa – wszystko czcionką prosta  |
| 124       | poniżej 3.152          | interwał czasu martwego przebiega w chwilach – interwał nie może przebiegać w chwilach  |
| 128       | podpis 3.27            | Wpływ czasu interwału martwego – raczej wpływ czasu martwego  |
| 141       | w.4 od dołu            | Filtracja umożliwiła usunięcie szumów – inna nazwa na „szumy”   |
| 141       | dolny akapit           | Cały akapit pisany czcionką o innym odstępie niż całej pracy  |
| 152       | 3.50, treść            | Dławiki $L_{SC}$ i $L_{CS}$ mają zamienione indeksy SC vs. CS   |
| 153       | środek strony          | Moc rozpraszana w rezystancjach elementów oraz w RC1, RC2, RC3 jest na tyle nieduża, że zastosowanie opisanej modyfikacji znacząco zwiększa sprawność przekształtnika - raczej mniejsza ?   |
|           | inne                   | sterownie vs. sterowanie, wpływ vs. wpływ, organicznie vs. ograniczenie, z względu vs. ze względu, zamieszono vs. zamieszczono, wstąpienie vs. wystąpienie, popędzających vs. poprzedzających, przerwaną vs. przerywaną, określną vs. określoną, przekszatałników vs. przekształtników, eneregetycznej vs. energetycznej, zburzeń vs. zaburzeń, zawiązane vs. związane, wstępują vs. występują, oraz ok. 10 inny o błędnych formach w stosunku do treści zdania |



## 6. Wnioski

- Autor rozprawy wykazał się szeroką wiedzą z zakresu elektrotechniki, energoelektroniki, elektroniki oraz bardzo dobrym przygotowaniem do pracy badawczej i bardzo wysokimi umiejętnościami projektowymi i konstrukcyjno-technologicznymi.
- Uzyskane w rozprawie wyniki są znaczące i mogą być bardzo przydatne w zastosowaniach praktycznych oraz mają dużą wartość poznawczą.
- Uwagi krytyczne przedstawione w recenzji nie podważają pozytywnej oceny końcowej recenzowanej rozprawy doktorskiej.

### WNIOSEK KOŃCOWY

Uważam, że rozprawa doktorska Pana magistra inżyniera Adama Kawy pt. „Energoelektroniczne rezonansowe przekształtniki mocy DC-DC o przełączanych kondensatorach podwyższające napięcie” stanowi samodzielne rozwiązanie ważnego i aktualnego zagadnienia naukowo-badawczego, zdecydowanie spełnia kryteria i wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim w obowiązującej ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 r. z późniejszymi zmianami. Stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony w dyscyplinie elektrotechnika.



Marcin Kasprzak