



prof. dr hab. inż. Zbigniew HANZELKA
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica
Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii
30-059 Kraków, al. Mickiewicza 30
tel.: (12) 617 28 78, fax: (12) 633 22 84, e-mail: hanzel@agh.edu.pl



Kraków, 14 luty 2019 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

wykonana na zlecenie prof. dr hab. inż. Pawła Sowy, Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej.

Autor: **mgr inż. Marek Szymczak**

Tytuł: **Analiza porównawcza możliwości zastosowania filtrów pasywnych i aktywnych do tłumienia zaburzeń przewodzonych**

1. Dane bibliograficzne rozprawy

Rozprawa zawiera 106 stron. Składa się z dziewięciu rozdziałów, dwóch załączników oraz spisu literatury obejmującego 85 pozycji.

2. Charakterystyka rozprawy

Współczesne układy energoelektroniczne w znaczącej liczbie rozwiązań gwarantują prawie sinusoidalny prąd wejściowy lub prąd o pożądanym kształcie pozwalający zredukować harmoniczne przyłączonych równolegle odbiorników nieliniowych. Te działania filtracyjne dotyczą prawie wyłącznie składowych w zakresie niższych częstotliwości do 2,5 kHz. Równocześnie te same układy stają się źródłem składowych w paśmie wyższych częstotliwości związanych z procesem łączenia elementów półprzewodnikowych. Dotyczy to w szczególności pasma tzw. supraharmonicznych (9-150 kHz) oraz składowych dużych i bardzo dużych częstotliwości. Zaburzeniom w tym pasmie poświęcona jest oceniana praca. Bez żadnej wątpliwości jest to zagadnienie ważne w obszarze współczesnej energoelektroniki i mimo kilku dekad badań istnieje tu nadal wiele pytań bez odpowiedzi, a wiele odpowiedzi jest niedostępnych w domenie publicznej stanowiąc chronioną wiedzę techniczną firm komercyjnych. To sprawia, że praktycznie każdy konstruktor układu energoelektronicznego zmierza się w dużym stopniu sam z koniecznością redukcji składowych łączeniowych, bardzo często opierając proponowane rozwiązania na doświadczeniu i wiedzy wynikającej z praktyki inżynierskiej. W pewnej części podobny charakter – tzn. prezentacji stanu wiedzy praktycznej – ma oceniana praca. Autor wybrał do rozważań głównie zaburzenia wspólne i przedstawił analizę możliwych sposobów ich redukcji.

Uwagi krytyczne

Tytuł pracy nie określa przedziału częstotliwości w którym rozpatrywane będą działania filtracyjne – czytelnik przystępuje do czytania nie wiedząc do końca czego będzie dotyczyć praca. Termin „zaburzenia przewodzone” jest pojęciowo bardzo obszerny. Jak Autor definiuje „zaburzenie przewodzone”? Z tekstu pracy widać wyraźnie, że w rozumieniu Autora są to zaburzenia w paśmie znacząco powyżej 2,5 kHz, a przecież te do 2,5 kHz także należą do kategorii zaburzeń przewodzonych¹. Komentarz ten dotyczy także rysunku 3.1.

¹ Zgodnie z normą PN-T-01030, zaburzenie przewodzone to „zaburzenie rozchodzące się wzdłuż przewodów elektrycznych”.

2. Dziedzina rozważań Autora ma bardzo długą i bogatą historię. Nie znajduje to zdaniem recenzenta w wystarczającym stopniu odzwierciedlenia w analizie literaturowej, została ona praktycznie ograniczona do przeglądu literatury dotyczącej filtrów aktywnych. Przykładowo brak w niej odwołania do fundamentalnych pozycji książkowych w dziedzinie dokładnie odpowiadającej tematyce rozważanej przez Autora. A jest ich wiele. Jako przykład niech posłużą dwie:

Tihanyi Laszlo: *Electromagnetic compatibility in power electronics*, IEEE Press, 1995

Costa F., Gautier C., Laboure E., Revol B.: *Electromagnetic compatibility in power electronics*, Wiley, 2014.

Podobnie brak wielu artykułów dotyczących rozważanego obszaru, które publikowane były w nieomal wszystkich częściach IEEE Transactions, od Power Electronics po Electromagnetic Compatibility.

Na str. 10 w rozdziale *Zakres rozprawy* Autor deklaruje – jako efekt swojej pracy - zdefiniowanie zaburzeń wspólnych CM i różnicowych DM. Nie ma takiej potrzeby, te definicje znajdują się w normach (np. PN-T-01030: Kompatybilność elektromagnetyczna – terminologia), w słowniku elektrotechnicznym IEC 50 (161) - International Electrotechnical Vocabulary, Chapter 161: Electromagnetic Compatibility, nie przywołanych w spisie literatury.

Warto było w pierwszej kolejności wymienić wszystkie sposoby dostępne konstruktorowi, by w falowniku zredukować zaburzenia wspólne, a dopiero w następnej kolejności przystąpić do instalacji filtrów – zarówno pasywnych jak i aktywnych.

3. Dopiero na stronie 13 czytelnik dowiaduje się, że badane będą zaburzenia generowane przez przekształtniki DC/AC do sieci DC. Autor bardzo często podkreśla znaczenie rozważanej tematyki dla pojazdów elektrycznych. Proszę o odpowiedź na pytanie o charakterze kolokwialnym - jakie są negatywne skutki obecności zaburzeń wspólnych w autonomicznej sieci pojazdu elektrycznego. Na stronie 9 Autor stwierdza: „Nie napotkano publikacji dotyczących porównania właściwości filtrów aktywnych w napędowych układach pojazdów elektrycznych”. Czym filtracja napędów pojazdów elektrycznych różni się od filtracji napędów w innych zastosowaniach?
4. Pierwsze pięć rozdziałów pracy to prezentacja istniejącego stanu wiedzy, związana z tematem pracy, ale bez dużej straty dla całości wywodu mogła być ona krótsza. Rozdział 6 rozpoczyna część oryginalnych rozważań Autora.
5. Przedstawiono w formie charakterystyk wyniki przeprowadzonych badań – symulacyjnych i eksperymentalnych. Jednakże stopień przetworzenia otrzymanych wyników jest zdaniem recenzenta niewystarczający. Brak miar liczbowych umożliwiających porównanie wpływu różnych konfiguracji na poziom tłumienia zaburzeń wspólnych. Autor przeprowadza jedynie wizualne porównanie otrzymanych charakterystyk. To zbyt mało, tym bardziej, że poziom wpływu poszczególnych elementów składowych proponowanych filtrów jest różny w różnych przedziałach częstotliwości.
6. W rozdziale 7 przedstawiono analizę wybranych dwóch struktur filtrów, bez wystarczającego uzasadnienia tego wyboru.
7. Autor deklaruwał przeprowadzenie porównawczej analizy ekonomicznej różnych rozwiązań. Jedynym elementem dotyczącym tego aspektu są ceny rdzeni dławików sprzężonych i ich porównanie z ceną wzmacniaczy. To zaledwie kilka zdań w pracy. Czytelnik może w tym zakresie odczuwać niedosyt, mógł bowiem oczekiwać podania miar liczbowych uzyskanych efektów tłumienia oraz całkowitego kosztu układu, który pozwalał taki skutek uzyskać. Brak tego elementu w pracy.
8. Str. 97, osiągnięcia Autora: osiągnięcie nr 1, porównanie materiałów ferrytowych i nanokrystalicznych – to wiedza książkowa.

Bardzo proszę, aby w trakcie obrony Doktorant odniósł się do wszystkich powyższych uwag oraz wskazał, w przypadku których z przeprowadzonych badań symulacyjnych/eksperymentalnych otrzymane wyniki zaskoczyły Autora, tzn. były inne niż oczekiwane.

Zalety pracy

1. Wybór tematu rozprawy – bardzo istotnego w aspekcie technicznym, komercyjnym i poznawczym. Ale równocześnie trudnego koncepcyjnie i inżyniersko. Autor podjął się rozwiązać problem, który w początkowych założeniach nie gwarantował sukcesu. Dotychczasowe próby prezentowane w nielicznych publikacjach nie były optymistyczne. Z tym większym uznaniem należy odnieść się do odwagi badawczej Doktoranta.
2. Staranna forma edytorska tekstu.
3. Praca ma charakter monograficzny. Jest cenną prezentacją wybranych aspektów stanu wiedzy w obszarze zdefiniowanym celami dysertacji. Wiedza ta jest przekazywana przez Autora, który zna praktyczne aspekty rozważanych zagadnień, co widać czytając tekst pracy. Równocześnie jest prezentowana w przystępny sposób, co nadaje dysertacji walor dydaktyczny.
4. Praca jest przykładem zastosowania poprawnej metody badawczej, rozumianej jako zbiór czynności niezbędnych do rozwiązywania problemu technicznego. W tym tańcuchu działań zawarto: (1) przedstawienie problematyki i tematu rozprawy w szerszej perspektywie, (2) prezentację stanu wiedzy, (3) rozważania teoretyczne, (4) badania symulacyjne, (5) badania laboratoryjne, (6) podsumowanie i wnioski końcowe.
5. Za cenny element pracy uważam przeprowadzone przez Doktoranta badania laboratoryjne. Wymagały one zbudowania stanowiska laboratoryjnego, zaprojektowania i wykonania wzmacniaczy dla przeprowadzenia eksperymentów z filtrami aktywnymi. To ważna część działań Autora i z pewnością znaczący etap edukacji w obszarze inżynierii elektrycznej.

Ocena ogólna i wniosek końcowy

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Marka Szymczaka stanowi opracowanie dotyczące ciekawego i aktualnego zagadnienia naukowo-technicznego i dowodzi zadawalającego opanowania przez Doktoranta dyscyplin naukowych, z którymi jest związana.

Przedłożona rozprawa spełnia wymagania stawiane przez Ustawę z 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (dz. U. nr 65) oraz rozporządzenie Ministra Edukacji Narodowej i Sportu z dnia 15 stycznia 2004 r. w sprawie szczegółowego trybu przeprowadzenia czynności w przewodzie doktorskim i habilitacyjnym. Wnioskuje o przystąpienie do kolejnych przewidzianych w/w Ustawie etapów procedury.

ZAŁĄCZNIK: Uwagi szczegółowe

Rozdział 1: Wstęp

Str. 7, trzeci akapit – „Budowa hybrydowych filtrów aktywnych...”, – na czym zatem polega „hybrydowość” filtru aktywnego? On jest hybrydowy, czy jest aktywny?

Str. 8, akapit pod rysunkiem:

Filtry EMI budowane są z elementów pasywnych, w tym dławików, niekoniecznie muszą to być dławiki sprzężone.

„... znalezienie optymalnej konfiguracji filtru.” – w sensie jakiego kryterium optymalizacji?

Cel pracy - „Celem pracy jest przeprowadzenie analizy porównawczej możliwości zastosowania filtrów pasywnych, aktywnych i hybrydowych ...” Odpowiedz jest prosta – taka możliwość istnieje

w każdym z wyróżnionych przypadków. Istotna jest natomiast efektywność pracy różnych struktur i jak rozumiem to Autor miał na myśli.

Pierwszy akapit od końca – czym się różni struktura od konstrukcji filtru? Czy to oznacza, że Autor będzie badał np. jedną strukturę w różnych technicznych wersjach jej wykonania?

Str. 9, ostatnie zdanie w pierwszym akapicie – niezręczne sformułowanie.

Str. 10, pierwsze zdanie – „Wykorzystywane w rozprawie metody badań obejmują analizę zapotrzebowania rynku na rezultaty będące konsekwencją przeprowadzonych w rozprawie badań ...” Pomijając nadmierną stylistyczną zawziętość tego zdania stwierdzam:

1. Zapotrzebowanie na takie wyniki, a jak Autor wcześniej stwierdził ich brak jest przyczyną podjęcia tematu pracy doktorskiej.
2. Takie analizy są od dawna wykonywane przez producentów filtrów EMI i postać ich oferty rynkowej stanowi odpowiedź na sformułowane pytanie.
3. Jak Autor zamierza badać zainteresowanie rynku rezultatami swoich badań?
4. Takich analiz nie ma w rozprawie.

Metodyka prowadzonych badań: „ustalenie motywacji” – niezręczne sformułowanie, podobnie jak „określenie zakresu motywacji”

Wyszczególnienia w rozdziale „metodyka prowadzonych badań” stanowią niepotrzebne powtórzenia treści rozdziału „zakres rozprawy”.

Rozdział 2: Analiza literatury

Str. 13, ostatnie zdanie w drugim akapicie: " W niniejszej rozprawie, ze względu na badania filtrów dla obwodów zasilanych prądem stałym, w których ten problem nie występuje, jego kwestia nie została szerzej rozwinięta." Dopiero w tym miejscu czytelnik dowiaduje się, że badania będą dotyczyć zaburzeń generowanych przez przekształtnik DC/AC do sieci DC.

Str. 14, trzeci akapit od końca - w technice napędów elektrycznych stosuje się wiele różnych metod redukcji zaburzeń wspólnych wytwarzanych w sprzęgu pomiędzy falownikiem i silnikiem. Autor opisał (mało czytelnie) tylko jeden z nich.

Użyty termin „wyjście fazowe” jest niezręczny.

Rozdział 3: Zaburzenia elektromagnetyczne

Str. 17, rys. 3.1 – zaburzenia niskiej częstotliwości nie są zaburzeniami przewodzonymi?

3.2.1. Zaburzenia niskiej częstotliwości – „... są to przede wszystkim zniekształcenia harmoniczne napięcia sieciowego (a interharmoniczne nie powodują odkształcenia napięcia?) oraz płynącego prądu pobieranego przez nieliniowe odbiorniki (pobierany prąd – niezręczne sformułowanie).

Str. 20, rys. 3.4. – szkoda, że Autor nie przedstawił charakterystyk częstotliwościowych sieci sztucznej.

Rozdział 4: Falownik jako źródło zaburzeń EMI

Rys. 4.1. "sterowanie zaworami" miało uzasadnienie w okresie stosowania w przemiennikach tyrystorów, obecnie są to wyłącznie w pełni przełączalne elementy półprzewodnikowe.

Co się kryje pod blokiem "zasilacz"? Co oznacza w tym kontekście stwierdzenie "... zastosowanie kondensatora ... do ... wygładzania prądu pobieranego ze źródła." (str. 24, drugi akapit)?

Str. 24, trzeci akapit - "... połączenie trzech półmostków ...". Rysunek przedstawia pełnym mostek trójfazowy.

Akapit pod rys. 4.2 - "Diody ... zabezpieczają przed odwrotną polaryzacją, spowodowaną przez indukcyjności występujące w całym układzie." Niezręczne sformułowanie, diody gwarantują zmianę kierunku prądu i nie dotyczy to tylko okresów hamowania prądnicowego silnika.

Str. 25, pierwszy akapit - sygnały sterujące tranzystorów mogą być wypracowywane z wykorzystaniem różnych algorytmów, który z nich jest zdaniem Autora "optymalny"?

str. 27, drugi akapit pod rysunkiem - "występujące prostokątne napięcie przemienne o znaczącej amplitudzie (do 1 kV)" Skąd ta wartość?

Str. 29 - co było źródłem zasilania dla falownika DC/AC? Czy szyny DC były odizolowane od przewodu PE?

Str. 30, akapit pod tabelą – wbrew temu co pisze Autor zmiany pojemności nie są małe, np. pojemność wyjściowa falownika to prawie 40%.

Rozdział 5: Filtry pasywne EMI

Str. 37, brak wyjaśnienia elementów zastępczych na rysunkach 5.6

Str. 40. Akapit pod rysunkiem 5.9, chodzi nie o stabilność wartości indukcyjności, lecz o stałość jej wartości w funkcji częstotliwości

Str. 40, jak mierzono wartości indukcyjności i impedancji przedstawione na rysunku? Przebieg charakterystyk impedancyjnych nie wykazuje wzmocnień rezonansowych, co przy praktycznym wykonaniu cewek i pasożytniczych pojemnościach budzi zdumienie, szczególnie, że rozważany jest bardzo duży przedział zmian częstotliwości.

Str. 41, sposoby wykonania dławików (nie tylko sprzężonych) pracujących w obwodach wysokoczęstotliwościowych (redukcja wartości elementów pasożytniczych) to wiedza inżynierska bardzo obszernie opisana w literaturze. Podstawowych zasad wykonania jest znacznie więcej niż przedstawił Doktorant. Dotyczą one także wykonania kondensatorów, a zostały między innymi opisane w książce *Electromagnetic compatibility in power electronics*, Laszlo Tihanyi, 1995. To jedynie przykład, podręczników dotyczących tej tematyki jest znacznie więcej.

Str. 44, rozdział 5.4, przywołano nieaktualna normę PN-EN 60384-14:2007, która w 2013 roku została zastąpiona normą PN-EN 60384-14:2013-10 - wersja angielska. Dodatkowo norma ta nie została wymieniona w spisie literatury.

Str. 44 i 45, w tym miejscu można było oczekiwać podstawowych informacji (lub ich przywołania za podręcznikami z kompatybilności elektromagnetycznej), na temat sposobu konstrukcji, także montażu i stosowania w obwodach wysokoczęstotliwościowych, które gwarantują minimalizację pasożytniczych indukcyjności i rezystancji kondensatora.

Str. 46, Podsumowanie. Zaczyna się stwierdzeniem, że W rozdziale „przeprowadzono kompleksowy przegląd oraz analizę pasywnych filtrów do tłumienia zaburzeń przewodzonych.” Do kompleksowości omówienia tego zagadnienia brakuje bardzo dużo.

Rozdział 6: Filtry aktywne EMI

Str. 47, automatyka wypracowała szereg od lat stosowanych terminów tj. zamknięty i otwarty (nie układ ze sprzężeniem w przód) układ regulacji, układ regulacji z ujemnym sprzężeniem zwrotnym (nie ujemna pętla sprzężenia zwrotnego), które warto stosować

Rys. 6.22 – czy nie wystarczyło odwołanie do rys. 6.2

Str. 61, drugi akapit – moduły są zawsze dodatnie

Rozdział 7: Realizacja praktyczna wybranych struktur filtrów aktywnych

Str. 66, pierwszy akapit, „... oraz na weryfikacji wcześniej przeprowadzonych badań symulacyjnych.”
Jakie badania symulacyjne ma Autor na myśli? Czy chodzi o wyznaczenie charakterystyk modułu tłumienności?

Czy wzmacniacze przedstawione na rys. 7.3 i 7.8 są dziełami Doktoranta?

Str. 68, po co badano konfigurację typu IV, skoro z analizy teoretycznej i interpretacji fizycznej działania tej struktury wynika, że będzie ona mało skuteczna przy przyjętej relacji wartości impedancji źródła i sieci?

Ostatnie zdanie – impedancja może być mniejsza, nie niższa, podobnie w podsumowaniu na stronie 73 – moduł jest większy nie wyższy.

Str. 70 – brak przywołania w tekście rysunku 7.9.

Rozdział 8: Badania eksperymentalne filtrów pasywnych i aktywnych

Str. 75, ostatnie zdanie, nieprawidłowa praca części aktywnej wynikała z niedopasowania jej mocy do poziomu występujących zaburzeń. Należało przeprojektować część aktywną układu.

Str. 80, ostatnie zdanie – ten wniosek nie wymagał badań, jest oczywisty.

Str. 81, rozdział 8.2.2. – badanie tłumienności zaburzeń po dodaniu kondensatorów od strony wyjścia falownika. Można się zgodzić z taką propozycją, ale powinna być ona elementem systematycznego programu badań. W tekście pojawia się ona bez wystarczająco przekonującego uzasadnienia. W późniejszych częściach pracy pojawiają się zdania wyjaśniające, że propozycja wynika z chęci badania pracy filtra w środowisku o większym poziomie zaburzeń.

Podobnie jak zwiększenie liczby rdzeni – wpływ wzrostu indukcyjności dławika sprzężonego był już badany w poprzednim rozdziale. Co nowego spodziewa się Autor po tym badaniu?

Str. 82, wniosek pod rysunkiem jest oczywisty

Str. 83, akapit pod rysunkiem – definicja stabilności filtra. Brak uzasadnienia dla przyjętej wartości rezystancji tłumiącej Rout.

Str. 93, pierwszy akapit, ostatnie zdanie – czy, aby na pewno najlepsze właściwości tłumiące uzyskuje się z wykorzystaniem filtrów hybrydowych – patrząc na rysunek 8.27 mam wątpliwości, czy dotyczy to całego rozważanego przedziału częstotliwości. Czy w paśmie powyżej 4-5 MHz nie są wystarczające – z technicznego i ekonomicznego punktu widzenia – filtry pasywne?

Ostatnie zdanie w przedostatnim akapicie – „Z przeprowadzonej analizy wynika, że za pomocą filtra hybrydowego można uzyskać lepszą redukcję zaburzeń z wykorzystaniem rdzeni ferrytowych o mniejszej przenikalności w porównaniu do rdzeni nanokrystalicznych” – dlaczego?

Ostatni akapit, pomijając niezdefiniowane pojęcie „stabilność filtra” trudno zgodzić się z tym stwierdzeniem. Każda sytuacja wymaga stosownego projektu części aktywnej odpowiadającej maksymalnym zaburzeniom, które mogą wystąpić w układzie. Tak więc jest możliwa praca filtra aktywnego, lecz powinien on być właściwie zaprojektowany.

