

Lublin, 31.10.2023 r.

Dr hab. inż. Paweł Surdacki,
prof. uczelni

Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechniki Lubelskiej
ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin
p.surdacki@pollub.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Strząbały pt. „Analiza wzajemnych oddziaływań systemu elektroenergetycznego i odbiorników nieliniowych”

Promotor: prof. dr hab. inż. Mirosław Wciślik
Promotor pomocniczy: dr inż. Michał Łaskawski

Podstawa formalna recenzji

Podstawę wykonania recenzji stanowią uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach z dnia 17.05.2023 r. oraz pismo Dyrektora Naukowego ww. Rady dr hab. inż. Pawła Sitka, prof. PŚk, z dnia 29.05.2023 r. Przewód doktorski mgr. inż. Pawła Strząbały jest przeprowadzany przez Radę zgodnie z tzw. „dotychczasowymi przepisami”.

Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa napisana jest w języku polskim. Składa się ze spisu treści, wykazu symboli, indeksów i stosowanych skrótów oraz z 7 numerowanych rozdziałów obejmujących wstęp, rozdziały merytoryczne i podsumowanie, a także bibliografię obejmującą 102 pozycje, w przeważającej większości w języku angielskim, w tym 39 pozycji w języku polskim, 8 źródeł internetowych i 6 norm i rozporządzeń. Całość dość obszernej rozprawy obejmuje 181 stron.

Zagadnienie naukowe i badawcze rozpatrywane w rozprawie

Doktorant podjął w rozprawie niezwykle istotne zagadnienie współpracy systemu elektroenergetycznego i współczesnych odbiorników energii elektrycznej w celu zapewnienia wymaganych parametrów jakości oraz niezawodności dostaw tej energii. Współpraca ta powinna być realizowana w połączeniu z minimalizacją kosztów dostarczania energii elektrycznej, co jednak staje się obecnie zadaniem coraz trudniejszym wobec rosnącej wielkości obciążeń nieliniowych. Obciążenia takie w wyniku interakcji z systemem elektroenergetycznym obniżają współczynnik mocy oraz pogarszają efektywność przesyłania energii elektrycznej. Odbiornikami o nieliniowych charakterystykach napięciowo-prądowych powodujących obniżenie jakości energii elektrycznej są zazwyczaj urządzenia energoelektroniczne zawierające elementy półprzewodnikowe. Urządzenia te generują dużą ilość niepożądanych składowych harmonicznych zarówno w liniach jedno jak i wielofazowych. Urządzeniami tymi są zarówno małe zasilacze komputerów stacjonarnych i przenośnych jak i odbiorniki dużej mocy, takie jak maszyny wyciągowe i piece łukowe. Negatywne zjawiska spowodowane przez jednego z odbiorców energii może mieć wpływ na innych, np. propagacja

wyższych harmonicznych prądu może powodować odkształcenia napięć w lokalnej sieci zasilającej, do której przyłączone są inne odbiorniki.

Zatem za jakość energii elektrycznej odpowiedzialny jest nie tylko jej dostawca, ale również producent urządzeń odbiorczych, które powinny spełniać odpowiednie normy dotyczące warunków technicznych tych urządzeń. Ponieważ, jak przytacza Doktorant, interakcje obciążeń nieliniowych z systemem energetycznym stanowią największy, równy ok. 29% odsetek wszystkich problemów jakości energii elektrycznej w Europie, dlatego dokładna analiza tych interakcji podjęta i zrealizowana w rozprawie wydaje się być niezwykle istotna i uzasadniona.

Cel i teza rozprawy

Celem rozprawy doktorskiej jest analiza wzajemnych oddziaływań systemu elektroenergetycznego i odbiornika nieliniowego pod kątem monitorowania i pomiaru parametrów systemu zasilania oraz opracowania zasad zmniejszania interakcji systemu zasilania i obciążenia nieliniowego.

Tezę rozprawy doktorant sformułował następująco: opracowanie i analiza modelu obwodu z obciążeniem nieliniowym umożliwi analizę i interpretację zjawisk konwersji mocy w wyniku oddziaływań obciążenia nieliniowego i systemu elektroenergetycznego oraz opracowanie zasad zmniejszania negatywnych zjawisk oddziaływań systemu i odbiorników nieliniowych.

Aby zrealizować jasno sformułowany cel i tezę rozprawy, Doktorant postawił w niej następujące zadania badawcze:

- 1) analiza wybranych modeli obciążeń nieliniowych,
- 2) opracowanie matematycznego modelu obwodu prądu przemiennego z obciążeniem nieliniowym,
- 3) badania symulacyjne oddziaływań w obwodzie AC z obciążeniem nieliniowym,
- 4) analiza zjawisk przepływu mocy w obwodzie AC dla przyjętego modelu obciążenia nieliniowego,
- 5) badania symulacyjne metod ograniczania oddziaływania obciążenia nieliniowego i systemu zasilania,
- 6) badania eksperymentalne oraz opracowanie metody identyfikacji parametrów zastępczych systemu zasilania.

Wymienione zagadnienia badawcze zostały przez Autora bardzo wyraźnie i jasno sformułowane zarówno we wstępie, jak też zostały konsekwentnie rozwinięte i zrealizowane w kolejnych rozdziałach rozprawy.

Analiza źródeł literaturowych i aktualnego stanu wiedzy

W rozdziale 1 Doktorant zamieścił obszernie wprowadzenie w problematykę efektywności systemu energetycznego pod kątem niezawodnej dostawy energii elektrycznej oraz oszczędności kosztów jego użytkowania. Scharakteryzował budowę modelu systemu elektroenergetycznego, skupiając się na oddziaływaniach tego systemu z coraz częściej występującymi obciążeniami nieliniowymi. Poruszył przy tym problematykę zgodności elektromagnetycznej i współpracy dostawcy i odbiorcy energii elektrycznej. Wśród problemów dotyczących jakości zasilania wyróżnił problemy związane z występowaniem wyższych harmonicznych, zapadami napięcia, przepięciami, przebiegami przejściowymi oraz całkowitym brakiem zasilania. Zwrócił również szczególną uwagę na negatywne skutki interakcji obciążeń nieliniowych z systemem elektroenergetycznym, związane z powstawaniem i propagacją wyższych harmonicznych prądu, powodujących odkształcenia napięć w lokalnej sieci zasilającej, do której przyłączone są inne odbiorniki.

Odwołując się do licznych aktualnych źródeł literaturowych, przeważnie z ostatniego dziesięciolecia, zarówno w czasopiśmie i monografiach zagranicznych jak i polskich, dokonał wnikliwego i krytycznego przeglądu zagadnień przyłączania odbiorników nieliniowych do systemu elektroenergetycznego. Jednocześnie odniósł się do aktualnych polskich przepisów, norm, ustaw i rozporządzeń, jak też do zaleceń dotyczących dopuszczalnych limitów zniekształceń harmonicznym dla różnych poziomów napięć zasilających, rekomendowanych przez Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE.

W rozdziale wstępnym rozprawy zawarł również definicje współczynników zawartości harmonicznym prądu THDI i napięcia THDU umożliwiające ocenę kształtu przebiegów odkształconych. Współczynniki te, jak też współczynnik mocy dla pierwszych harmonicznym DPF, są analizowane w kolejnych rozdziałach rozprawy

Należy podkreślić, że Doktorant odniósł się w rozprawie również do swoich pięciu współautorskich publikacji, w których rozwiązane zostały wybrane szczegółowe zagadnienia modelowania jednofazowych obwodów nieliniowych z prostownikami mostkowymi oraz trójfazowych pieców łukowych, jak też interakcji tych odbiorników z siecią elektroenergetyczną. Jak wynika z życiorysu naukowego Doktoranta, jest on współautorem 15 publikacji (w tym 10 w języku angielskim i 5 w języku polskim). Wszystkie te publikacje koncentrują się wokół szczegółowych zagadnień poruszanych w rozprawie doktorskiej.

Godnym uwagi jest opublikowanie przez niego 6 artykułów w „Przeglądzie Elektrotechnicznym” oraz w wysoko punktowanym (za 140 pkt.) przez MNiSW czasopiśmie „Energies” w bieżącym 2023 roku.

Publikacja ta, podlegająca recenzjom uznanych zagranicznych autorytetów w tej tematyce, świadczy o aktualności prowadzonych badań, ich wysokim poziomie oraz istotnym wkładzie Autora w tematykę interakcji systemu elektroenergetycznego z odbiornikami nieliniowymi.

Reasumując, można stwierdzić, że Autor zaprezentował w rozprawie duże rozeznanie we współczesnej angielskojęzycznej literaturze światowej, poprawnie umieszczając na jej tle i opisując swój wkład w podjętą tematykę rozprawy doktorskiej.

Ocena merytoryczna rozprawy

W rozdziale drugim rozprawy Autor dokonał analizy wybranych modeli obciążeń nieliniowych. Założył przy tym, aby scharakteryzowane były one użytecznością i prostotą, przy jednoczesnym wskazaniu istotnych zmiennych wpływających na ich charakterystyki.

Punktem wyjścia rozważań jest opisany w rozdziale 2.1 model obwodu systemu elektroenergetycznego z dwupołwkowym prostownikiem mostkowym, którego podstawowym trybem działania jest praca z przerwami w przewodzeniu prądu (ang. Discontinuous Conduction Mode). W celu ograniczenia wyższych harmonicznym prądu, zaproponowano dołączenie w nim dodatkowej szeregowej indukcyjności. Posługując się systemem MATLAB-Simulink i pakietem SimPowerSystem, Autor wyznaczył przebiegi napięć i prądu w obwodzie oraz współczynnik zawartości harmonicznym prądu THDI dla dwóch wartości dodatkowej indukcyjności 15 mH i 300 mH włączonej po stronie źródła zasilania, jak też dla dodatkowej indukcyjności 300 mH w obwodzie wyjściowym. W tym ostatnim przypadku zaobserwowano trzykrotny wzrost współczynnika THD prądu w stosunku do przypadku indukcyjności włączonej po stronie zasilania.

W tym miejscu przydatne byłoby **zaprezentowanie przez Autora algorytmu obliczania tego współczynnika stosowanego w wykorzystywanym systemie komputerowym i oceny jego poprawności**, a nie ograniczanie się tylko do porównania wygenerowanych wartości współczynnika THD.

Autor przekonuje, że w wielu pracach poświęconych analizie pracy prostownika dwupołwkowego modele matematyczne nie uwzględniają indukcyjności w obwodzie

zasilania, pozwalają więc otrzymać rozwiązanie przybliżone, gdy system zasilania jest sztywny.

W podrozdziale 2.2 przytoczono wybrane literaturowe modele obwodu z prostownikiem mostkowym, posługując się aproksymacją odkształconego prądu w obwodzie szeregiem Fouriera oraz różnymi schematami zastępczymi. Autor wykazuje niedostatki opisanych modeli, równocześnie wskazując na korzystne sformułowanie modelu matematycznego w postaci równań ze zmiennymi bezwymiarowymi, w których odniesieniem jest prąd zwarciovowy obwodu. W modelu tym jednak pominięto analizę wyższych harmonicznnych oraz szeregową rezystancję obwodu zasilania, które to niedostatki Doktorant sugeruje wyeliminować w sformułowanym przez siebie modelu. Ponadto wyraża spostrzeżenie, że model ten może być stosowany również do analizy obwodu z łukiem elektrycznym.

W tym celu proponuje wykorzystanie opisu obciążenia nieliniowego funkcją $\text{sign}(I(t))$ prądu, wykorzystaną wcześniej w publikacjach opisujących łuk elektryczny, w postaci równania (2.11). W opisie tego równania sformułowano 4 parametry bezwymiarowe modelu, jednak **nie objaśniono znaczenia parametru U_a występującego w samym równaniu**. Prosiłbym o uzupełnienie tego objaśnienia podczas obrony.

Stosując rozwinięcie w szeregi Fouriera, Autor opisuje odkształcone przebiegi napięcia i prądu w stanie ustalonym odpowiednio równaniami (2.6) i (2.13), na podstawie których wyznacza amplitudę pierwszej harmonicznnej prądu, jego wartość średnią (wyprostowaną dwupołówkowo) oraz rezystancję i indukcyjność szeregowego schematu zastępczego odbiornika nieliniowego, uzależnionych od wprowadzonego wcześniej współczynnika nieliniowości W . **Proszę Doktoranta o uzasadnienie równania (2.19) określającego ten współczynnik oraz wyjaśnienie wpływu parametru r występującego w równaniach (2.20) – (2.27) na wartość graniczną amplitudy napięcia u_a dla której obowiązują zaprezentowane wzory analityczne.**

Przedstawiony model opisany funkcją $\text{sign}(I(t))$, uwzględniający wpływ szeregowej rezystancji zastępczej na charakterystyki obwodu, stanowi podstawę w dalszych badaniach oddziaływań prostowników dwupołówkowych na system elektroenergetyczny, zrealizowanych przez Doktoranta w kolejnych rozdziałach rozprawy.

W rozdziale 3 rozprawy Autor opracował model komputerowy obwodu, który umożliwił ocenę interakcji pomiędzy obciążeniem nieliniowym a systemem energetycznym. Do matematycznego opisu tego modelu w równaniach (3.1) – (3.3) wykorzystał funkcję signum prądu zaproponowaną wcześniej do modelowania łuku elektrycznego. W celu zmniejszenia liczby zmiennych z 8 do 5 i uproszczenia dalszej analizy, Autor zapisuje powyższe równania w postaci bezwymiarowej, przyjmując jako zmienne odniesienia amplitudę napięcia zasilania E_s , reaktancję tego obwodu ωL oraz prąd zwarciovowy obwodu I_m , wprowadzając też skalowanie czasu $\tau = \omega t$. W dalszej części rozprawy analizowany jest stan ustalony przy zasilaniu sinusoidalny, określany jako stan quasi-statyczny.

Na podstawie bezwymiarowych równań Autor sformułował model matematyczny, zawarty w obszernym podrozdziale 3.2, w postaci schematu operacyjnego w środowisku MatLab-Simulink, składającego się z sumatorów, bloków wzmacnienia, integratorów oraz funkcji nasycenia „Saturation” reprezentującej obciążenie nieliniowe zamiast funkcji signum z powodu jej nieciągłości powodującej zawieszanie się symulacji. W tym miejscu zamieszczone zostało ciekawe porównanie wpływu przejścia od algorytmu całkowania stałokrokowego do całkowania zmiennokrokowego na chwilowy przebieg prądu w chwilach przejścia przez wartość zerową. W związku z występowaniem nieciągłości prądu zastosowano układ obserwacji napięcia mierzonego na obciążeniu nieliniowym, który został uwzględniony w zmodyfikowanym schemacie operacyjnym na rys. 3.6. Schemat ten umożliwił uzyskanie m. in. przebiegu napięcia obserwowanego na obciążeniu nieliniowym $u(\tau)$ o kształcie podobnym do impulsu prostokątnego bipolarnego oraz napięcia wyjściowego $u_c(\tau)$ o kształcie tętnień.

Rodzinę charakterystyk napięciowo-prądowych obciążenia nieliniowego w zależności od wartości względnej stałej czasowej r_{LC} w zakresie od 0,01 do 30 przedstawiono na rys. 3.8, obserwując w niektórych podzakresach tej stałej niejednoznaczność w postaci histerezy, a w innych zakresach podobieństwo do liniowego obciążenia rezystancyjnego. Histerezę tę oraz tętnienia napięcia wyjściowego można zmniejszyć poprzez odpowiedni dobór parametrów r_L i c . Rozważania te zilustrowane zostały na charakterystykach napięciowo-prądowych (rys. 5.9 i 5.10) oraz na przestrzennych wykresach zależności wartości średniej napięcia u_{av} , prądu i_{av} , mocy czynnej p_{av} na wyjściu prostownika w funkcji parametrów r_L i r_{LC} obwodu. Zilustrowano również współczynnik tętnień k_p w napięciu wyjściowym, będącego wskaźnikiem jakości filtracji harmoniczných, w zależności od tych parametrów. **Wspominając na str. 54 i 55 o zalecanych w literaturze wartościach tego współczynnika w zależności od przeznaczenia układu prostowniczego, Autor nie odniósł się do wartości uzyskanych w analizowanym przez siebie układzie. Proszę Doktoranta o wyjaśnienie tej kwestii.**

Analizując podpisy pod wykresami przedstawionymi na rysunkach od 3.7 do 3.24 można zauważyć **błędne sformułowanie jednego z parametrów tych wykresów**, jakim jest stała czasowa r_{LC} będąca iloczynem parametrów względnych r_L oraz c . Na wykresach tych zamieszczono ten parametr jako r_{LC} , w którym indeksem dolnym symbolu r jest LC. Jest to zapewne błąd edycyjny, jednak powtórzony wielokrotnie powoduje pewną dezinformację w prawidłowym odczytaniu analizowanych wykresów.

W rozdziale 3.3 Autor przytacza praktyczne podejście dotyczące wyznaczania harmoniczných napięcia zgodne z normą IEEE, nie wymagające stosowania dyskretnej transformaty Fouriera. Procedurę tę, prostszą w realizacji i wymagającą mniejszej mocy obliczeniowej, zastosował w obliczeniach bezwymiarowych wartości harmoniczných prądów i napięć w rozważanym modelu obwodu. Otrzymane wyniki wykorzystał z kolei do wyznaczenia współczynników zawartości wyższych harmoniczných THD prądu i napięcia, zdefiniowanych we wstępie rozprawy. Wszystkie obliczenia w funkcji bezwymiarowego parametru r_L i stałej czasowej $r_L \cdot c$ wykonał dla przyjętych ustalonych wartości parametrów bezwymiarowych $r = 1$ i $u_d = 0,01$. Obliczenia pierwszej harmoniczných napięcia i prądu prostownika przedstawił na rysunkach 3.15 i 3.17, sumę wyższych harmoniczných napięcia i prądu - na rys. 3.16 i 3.18 oraz współczynnik zniekształceń harmoniczných prądu i napięcia - na rys. odpowiednio 3.19 i 3.20. Analizując szczegółowo otrzymane charakterystyki, Autor wywnioskował, że w celu spełnienia wymagań normy IEEE 519-2014, zamieszczonych w tabeli 1.2, określających dopuszczalne limity zniekształceń prądów, należałoby projektować układy prostownikowe wraz z elementami obwodu zasilania tak, aby parametr bezwymiarowy r_L miał możliwie najniższą wartość, co pozwoli na mniejszą propagację wyższych harmoniczných do systemu zasilania. Również istotnym wnioskiem jest, że obliczone wielkości obwodu i wskaźniki jakości energii elektrycznej zależą w dużym stopniu od parametru bezwymiarowego r_L , natomiast wpływ stałej czasowej $r_L \cdot c$ jest istotnie mniejszy.

W kolejnym rozdziale 3.4 zatytułowanym „Schematy zastępcze obciążenia nieliniowego” Autor w rzeczywistości **analizuje wybrane parametry schematu zastępczego układu, nie przedstawiając wspomnianych schematów**, dlatego wydaje się, że tytuł ten powinien brzmieć „Parametry schematu zastępczego obciążenia nieliniowego”. W rozdziale tym Autor przedstawił charakterystyki kąta przesunięcia fazowego harmoniczných podstawowej, rezystancji i całkowitej indukcyjności zastępczej oraz współczynnik mocy obwodu dla pierwszych harmoniczných w funkcji bezwymiarowych parametrów r_L i $r_L \cdot c$ dla ustalonych wartości parametrów $r = 1$ i $u_d = 0,01$.

W dyskusji do rys. 3.21 na str. 62-63 Autor stwierdza, że wartość kąta przesunięcia fazowego osiąga największa wartość dla $r_L = 1,27$ oraz dla dużych stałych czasowych $r_L \cdot c$ jest zasadniczo funkcją rezystancji r_L . **Czy dla małych wartości stałych czasowych parametr ten nie jest funkcją rezystancji? Proszę o wyjaśnienie.**

W następnym rozdziale 3.5 Autor przeprowadza w systemie MatLab/Simulink eksperyment symulacyjny rozkładu mocy czynnej i biernej w obwodzie z prostownikiem mostkowym i obciążeniem RC, korzystając przy tym ze schematu operacyjnego sformułowanego na rys. 3.2, zawierającego układ obserwacji napięcia mierzonego na obciążeniu nieliniowym i zmiennokrokowego algorytmu całkowania numerycznego ode23tb. W tekście rozprawy Autor deklaruje przeprowadzenie rozkładu mocy dla trzech wartości rezystancji obciążenia oraz ustalonej wartości m. in. stałej czasowej $r_L \cdot c = 100$, jednak w tabeli 3.1 zawierającej wyniki obliczeń podawana jest wartość tego parametru jako 30. W dyskusji tych wyników obliczeń Autor stwierdza, że moc bierna wyższych harmonicznych obciążenia nieliniowego ma znak ujemny, podobnie jak moc źródła zasilania, co jednak nie znajduje potwierdzenia w tabeli 3.1, chyba żeby stwierdzenie to dotyczyło całkowitej mocy biernej. Ponadto stwierdzenie, że wzrost rezystancji obciążenia r_L powoduje znaczący wzrost całkowitej mocy biernej indukcyjności obwodu również nie wydaje się wynikać z wartości zawartych w tabeli 3.1 rozkładu mocy w obwodzie. **Proszę o wyjaśnienie i doprecyzowanie tych kwestii.**

Z danych prezentowanych w Tabeli 3.1 i wykresów przedstawionych na rysunkach m.in. 3.26 i 4.15 wynika ważna obserwacja praktyczna. Dla przyjętej definicji mocy biernej, dla obciążenia obwodu opisanego funkcją *signum* całkowita moc bierna analizowanej nieliniowości ma wartość bliską zero. Oznacza to, że moc bierna harmonicznej podstawowej jest równa ujemnej mocy biernej wyższych harmonicznych. Nieliniowość jest źródłem wyższych harmonicznych i moc bierna tych harmonicznych jest przenoszona do indukcyjności L obwodu. Stąd wynika, że moc bierna indukcyjności L wyznaczana dla wszystkich harmonicznych jest równa całkowitej mocy biernej obwodu i jest równa mocy biernej obwodu obliczanej dla harmonicznej podstawowej. Analogiczne zjawisko obserwowane jest dla mocy czynnej. Stąd wynika, że sumy kwadratów mocy biernej i mocy czynnej obliczane dla harmonicznej podstawowej i wszystkich harmonicznych są równe. Te zjawiska są ważne dla rozliczenia kosztów energii, gdyż przenoszenie mocy biernej wyższych harmonicznych prostownika do indukcyjności obwodu zasilania wskazuje na to, że za wzrost mocy biernej w obwodzie systemu elektroenergetycznego ponosi odbiorca energii elektrycznej.

Z kolei w tabeli 3.2 zamieszczono analogiczne wyniki obliczeń dla układu nie zawierającego obserwacji napięcia mierzonego na obciążeniu nieliniowym. Porównanie z wynikami otrzymanymi dla poprzedniego układu z obserwacją napięcia na odbiorniku nieliniowym nasunęło Autorowi interesujący wniosek, że ponieważ moc bierna wyższych harmonicznych tego obciążenia stanowi tylko część tej mocy indukcyjności obwodu, to odbiorca energii elektrycznej ponosi odpowiedzialność tylko za częściowy wzrost mocy biernej wyższych harmonicznych na indukcyjności obwodu. Zjawisko to zostało zaobserwowane zarówno dla pracy przerywanej jak i ciągłej prostownika.

Wyniki obliczeń mocy biernej całkowitej oraz składających się na nią mocy pierwszej i wyższych harmonicznych w zależności od parametrów r_L i $r_L \cdot c$ zostały zilustrowane na rysunkach odpowiednio 3.25 i 2.26. Autor nie określił jednak wyraźnie, którego wariantu modelu dotyczą te wyniki. **Proszę Doktoranta o doprecyzowanie tej kwestii.**

W rozdziale 4 rozprawy Autor podjął badania symulacyjne modelu obwodu AC z prostownikiem mostkowym o stałym napięciu wyjściowym. Na podstawie rozważań w rozdziale 3, założył, że dla względnej stałej czasowej $r_L \cdot c > 10$ charakterystyki prostownika mostkowego są jednoznaczne i napięcie prostownika można opisać funkcją *signum* prądu. Stwierdził, że opisane wcześniej zależności obowiązują w zakresie parametru $0 < u_a \leq 0,537$ i opisują pracę bezprzerwowego przepływu prądu, jednak nie wskazał miejsca jego wystąpienia i wspomnianego zakresu w rozdziale 3. Objasnienie znaczenia tego parametru zamieścił dopiero w opisie (4.2) parametrów równania (4.1). **Proszę Doktoranta o doprecyzowanie kwestii wspomnianego zakresu tego parametru.**

Bazując na wspomnianym bezwymiarowym równaniu różniczkowym (4.1) obwodu i zdefiniowaniu napięcia obserwowanego na zaciskach zasilania prostownika z wykorzystaniem funkcji *signum* prądu, Autor opracował na rys. 4.1 schemat operacyjny obwodu w systemie MatLab/Simulink, na podstawie którego przeprowadził eksperyment symulacyjny. Zwiększając bezwymiarowe napięcie u_o na wejściu prostownika kolejno od wartości 0,45 do 0,8 uzyskał chwilowe przebiegi napięć i prądów przedstawione na rysunkach 4.2, 4.3 i 4.4. Dla wartości $u_a = 0,537$ zaobserwował przejście prostownika z pracy ciągłej do pracy z przerwami w przewodzeniu prądu. Powyższą wartość graniczną wyznaczył Autor także w sposób analityczny, potwierdzając prawidłowość symulacji komputerowej. Dodatkowo zaobserwował, że zwiększanie względnej rezystancji obwodu r powoduje zmniejszanie wartości granicznej u_{ag} . Również w sposób analityczny wyznaczył parametry kątowe γ oraz β zdefiniowane na rys. 4.4. Ten ostatni parametr został wyznaczony również dokładniej poprzez symulację komputerową, której wyniki zamieszczono na rys. 4.5. Ponadto z otrzymanego wykresu uzyskano wartość napięcia $u_{ap} = 0,724$ dla charakterystycznego punktu pracy, dla którego prąd obwodu maleje do zera, a napięcie źródła zasilania zmienia znak. Przeprowadzone badania symulacyjne umożliwiły określenie trybów pracy ciągłej lub przerywanej obciążenia nieliniowego w zależności od wartości napięcia u_a oraz wykazały zgodność z wzorami wyznaczonymi analitycznie.

W rozdziale 4.2 Autor wyznaczył charakterystyki obwodu w funkcji napięcia u_a i parametru r , harmonicznej podstawowej oraz sumy wyższych harmonicznych napięcia obciążenia (rys. 4.7) oraz prądu (rys. 4.8), a także współczynnika zawartości wyższych harmonicznych prądu THD_I (rys. 4.9), napięcia THD_U (rys. 4.10), kąta przesunięcia fazowego na odbiorniku nieliniowym, współczynnika nieliniowości W_r indukcyjności zastępczej obwodu oraz współczynnika mocy $\cos(\varphi)$. Należy z uznaniem podkreślić, że Autor zamieścił bardzo wnikliwą dyskusję uzyskanych charakterystyk, uzasadniając ją zależnościami analitycznymi.

W celu weryfikacji charakterystyk otrzymanych w badaniach symulacyjnych Autor przeprowadził badania eksperymentalne modelowanego obwodu z prostownikiem mostkowym i indukcyjnością (rys. 4.17), wykorzystując do tego celu zbudowane przez siebie stanowisko pomiarowe. W wyniku przeprowadzonej identyfikacji, stosując obserwator napięcia na obciążeniu i funkcję *signum*, wyznaczono charakterystyki indukcyjności w funkcji prądu oraz charakterystyki w funkcji rezystancji obciążenia prostownika R_L : pierwszej harmonicznej napięcia obciążenia nieliniowego i prądu oraz sumę wyższych harmonicznych napięcia skutecznego i prądu, współczynniki THD napięcia zasilania i prądu, moc czynną obwodu, indukcyjność zastępczą, współczynnik mocy obwodu oraz moc bierną pierwszej i wyższych harmonicznych. Otrzymane podczas badań eksperymentalnych charakterystyki potwierdzają opisane wielkościami bezwymiarowymi zjawiska analizowane podczas symulacji za pomocą modelu matematycznego. Zatem należy uznać poprawność opracowanego modelu obciążenia nieliniowego.

W rozdziale 5 Autor dokonuje analizy skuteczności pasywnych filtrów wyższych harmonicznych oraz ich wpływu na pracę systemu. Wprowadzenie tych filtrów i utworzenie tzw. „pułapki rezonansowej” zostało zaproponowane przez Autora w celu ograniczenia oddziaływań odkształcenia napięcia pomiędzy odbiornikiem nieliniowym a impedancją systemu zasilania. Na podstawie schematów zastępczych układów z jednym, z dwoma filtrami LC oraz filtrem szerokopasmowym LC i LLC oraz ich transmitancji, wyznaczone zostały charakterystyki częstotliwościowe tłumienia trzeciej i piątej harmonicznej prądu w zależności od indukcyjności systemu zasilania L_s oraz rezystancji filtra R_f . Autor dokonał analizy porównawczej zaproponowanych przez siebie rozwiązań poszukiwania najkorzystniejszych parametrów filtrów z metodami proponowanymi w literaturze. Uwzględnienie indukcyjności układu zasilania jest ważne dla rozptyłu mocy wyższych harmonicznych, których źródłem jest odbiornik nieliniowy. Indukcyjność ta ma duże znaczenie, ponieważ do niej przekazywana jest

moc bierna wyższych harmoniczych, powstająca w wyniku konwersji mocy biernej pierwszej harmonicznej w nieliniowości odbiornika.

W następnych podrozdziałach rozważany jest model jednofazowy obwodu prądu przemiennego, który modeluje typowy układ systemu elektroenergetycznego zawierający filtr wyższych harmoniczych oraz odbiornik nieliniowy. Pierwszy z nich dotyczy obwodu z obciążeniem nieliniowym i rezonansowym układem LC, drugi zaś – obwodu z szerokopasmowym filtrem wyższych harmoniczych. Dla schematów obu modeli sformułowano obwodowe równania różniczkowe, wprowadzając zmienne bezwymiarowe w celu zmniejszenia liczby parametrów oraz symulacyjne schematy operacyjne w systemie Matlab/Simulink. Wyniki obliczeń zaprezentował Autor w postaci zależnych od bezwymiarowej indukcyjności sieci x_s i pojemności filtra c_f (uznanych jako zmienne istotne) przy stałej amplitudzie napięcia u_a i bezwymiarowej indukcyjności $x_f=0$, przestrzennych wykresów pierwszej harmonicznej mocy biernej i czynnej źródła zasilania $q_{src\ h1}$ i $p_{src\ h1}$, współczynnika mocy DPF_{src} , współczynników zniekształceń harmoniczych prądu i napięcia THD_{is} i THD_{us} . Analizując wykresy 5.12 i 5.16 (i inne) Autor wnioskuje, że wzrastające odkształcenia napięć i prądów w obwodzie przenoszone są na źródło zasilania, przy czym wielkość tych odkształceń ulega zmniejszeniu, gdy parametry r_s , r_o i r_f mają większe wartości. **Prosiłbym o uzasadnienie i doprecyzowanie podczas obrony tych zjawisk i wpływu dodatkowych parametrów.**

Na rys. 5.17, 5.18, 5.21 i 5.22 Autor zamieścił również interesująco zinterpretowane przebiegi bezwymiarowych prądów i napięć w obwodzie, jednak zamieścił **lakoniczne i niepełne podpisy pod tymi rysunkami** „Przebiegi obwodu ...” dla określonych parametrów.

Interesujące jest również tabelaryczne porównanie współczynników zawartości harmoniczych THD prądów i napięć i współczynników mocy DPF w poszczególnych częściach obwodu (tabele 5.1-5.4) dla różnych wartości amplitudy napięcia u_a powodujących zmiany trybów pracy z ciągłego na przerywany.

Podobną analizę, jak dla układu z rezonansowym układem LC, przeprowadził Autor również dla obwodu z szerokopasmowym filtrem wyższych harmoniczych. Stosując w równaniach zmienne bezwymiarowe oraz tzw. „zmienne istotne modelu”, zredukował liczbę zmiennych stanu z 12 do 5. W celu analizy skuteczności działania filtra szerokopasmowego przeprowadził w systemie Matlab/Simulink eksperyment symulacyjny dla trybu pracy ciągłej oraz przerywanej uzyskanych poprzez zadanie odpowiednich wartości amplitudy napięcia u_a . W celu doboru parametrów takiego filtra, dla którego dąży się do uzyskania jak najmniejszego współczynnika zawartości harmoniczych prądu THD_i i jednocześnie poprawy współczynnika mocy obwodu DPF_{src} , Autor skonstruował funkcję celu, którą wykorzystał w algorytmie genetycznym do wyznaczenia bezwymiarowej indukcyjności x_{fs} i pojemności c_f filtra szerokopasmowego. Dla analizy skuteczności działania filtra szerokopasmowego Autor zestawiał tabelarycznie współczynniki zawartości harmoniczych THD prądów i napięć oraz współczynniki mocy w charakterystycznych punktach obwodu przed dołączeniem i po dołączeniu filtra.

Na podstawie opracowanego bezwymiarowego modelu matematycznego obwodu z obciążeniem nieliniowym i szerokopasmowym filtrem wyższych harmoniczych, dzięki znacznemu zmniejszeniu zmiennych wejściowych, Autor przeprowadził analizę zasad zmniejszania wzajemnych oddziaływań systemu elektroenergetycznego i obciążenia nieliniowego. Przyjęty model obciążenia nieliniowego ma znaczenie praktyczne, gdyż funkcja $sign(I)$ jest stosowana w modelu łuku elektrycznego oraz analizie prostowników, które bardzo często występują w zastosowaniach technicznych. Model matematyczny obwodu może stanowić odniesienie do dalszych analiz oraz testowania metod projektowania i skuteczności działania filtrów wyższych harmoniczych.

Autor wykazał w rozprawie, że stosowanie filtra szerokopasmowego wyższych harmoniczych skutecznie ogranicza oddziaływania obciążenia nieliniowego na system

elektroenergetyczny, omijając przy tym problemy, które mogą wystąpić dla filtrów rezonansowych LC.

Bardzo wartościowa jest przeprowadzona w rozprawie weryfikacja wyników uzyskanych w analizach symulacyjnych poprzez badania eksperymentalne obwodu z dwupołkowym prostownikiem mostkowym zasilanym przez szeregowy dławik oraz z szerokopasmowym filtrem wyższych harmonicznymi. Autor przedstawił chwilowe przebiegi napięć i prądu dla obu układów oraz wyznaczył współczynniki zawartości harmonicznymi THD prądów i napięć, jak też współczynnik mocy. Wyznaczone wartości współczynników spełniają wymagania normy IEEE, świadczą zatem o skuteczności działania zastosowanego filtra szerokopasmowego LLC. Analizując wartości skuteczne prądów i napięć w obwodzie Autor wykazuje, że dzięki zastosowaniu tego filtra tylko nieznaczna część wyższych harmonicznymi prądu płynie do systemu elektroenergetycznego. Zestawione w tabelach wyniki obliczeń mocy potwierdzają również występowanie zjawiska konwersji mocy biernej przedstawione w tabeli 3.1 rozdziału 3.

Zwieńczeniem rozprawy, wynikającym z eksperymentalnej weryfikacji uzyskanych wyników, jest opracowanie w rozdziale 6.3 metody identyfikacji parametrów systemu zasilania. Zmienność impedancji wyjściowej systemu w różnych punktach przyłączeniowych powoduje, że zmniejsza się przydatność wskaźników jakości energii, takich jak współczynnik zawartości harmonicznymi prądu THDi oraz napięcia THDu. Podczas projektowania filtrów wyższych harmonicznymi wymagana jest m. in. informacja o impedancji zastępczej. Autor skonstruował układ pomiarowy przedstawiony na rys. 6.7, który różni się od klasycznego podejścia wykorzystującego metodę sztucznego zwarcia. Wykorzystując programowalne źródło napięcia, szeregową indukcyjność L_s oraz rezystancję R_s . Parametry zastępcze systemu zasilania określone są na podstawie pomiarów napięcia sieci U_s i prądu I . Równanie obwodu uwzględniające widmo częstotliwościowe napięcia i prądu Autor sformułował w postaci macierzowej, z którego za pomocą metody najmniejszych kwadratów wyznaczył parametry napięcia sinusoidalnego źródła zasilania $E_{h1} \cos(\psi_1)$, $E_{h1} \sin(\psi_1)$ oraz parametry R_s i L_s . Wyniki identyfikacji parametrów systemu zasilania dla testowanych wartości impedancji sieci zestawiał w tabeli 6.6. Obliczone wartości błędów względnych mieszczą się w tolerancji parametrów zastosowanych dławików.

Godne podkreślenia jest, że zaproponowana przez Autora bezinwazyjna metoda pomiaru parametrów zastępczych systemu zasilania wyróżnia się prostotą i praktycznością realizacji na tle metod opisanych w literaturze. Do określenia tych parametrów wystarczy jednoczesny pomiar prądu w obwodzie oraz napięcia na zaciskach zasilających prostownik w punkcie przyłączeniowym, bez konieczności odłączania urządzenia w trakcie pomiaru.

Reasumując, na samodzielny i oryginalny dorobek Autora rozprawy składa się poprawnie postawione zagadnienie bazujące na uzasadnionych założeniach oraz jego metodyczne rozwiązanie obejmujące analizę wybranych modeli obciążeń nieliniowych, opracowanie modelu matematycznego obwodu prądu przemiennego z obciążeniem nieliniowym oraz zweryfikowane eksperymentalnie badania symulacyjne oddziaływań i przepływu mocy w tym obwodzie i metod ograniczania tych oddziaływań.

Ponieważ Autor wspomina w rozprawie, że opracowany model ma również zastosowanie w analizie obwodu trójfazowego pieca łukowego, **proszę Doktoranta o uzasadnienie tego stwierdzenia.**

Ocena redakcyjna rozprawy

Struktura rozprawy jest poprawna i czytelnie prezentuje w kolejnych rozdziałach postawiony problem, w tym jego tło, przyjęte założenia i wykonane badania, aby w finale doprowadzić do udowodnienia tezy. Użyta terminologia jest poprawna i zgodna z nomenklaturą. Podział treści na rozdziały odpowiada przedstawianym zagadnieniom.

Treści rozprawy nie budzą wątpliwości, a sama redakcja jest zasadniczo poprawna, zawiera jednak pewne uchybienia i niezręczności redakcyjne, językowe i stylistyczne zestawione poniżej:

- niekompletny wykaz symboli (str. 6-8), m. in. nie zamieszczono stosowanych w rozprawie zmiennych bezwymiarowych,
- zamiast sformułowań: np. „w równaniu (2.1), w równaniu (2.2)”, Autor pisze wielokrotnie w całej rozprawie skrótowo, np. „w (2.1), w (2.2)”,
- konsekwentnie stosuje w opisach wartości liczbowych kropkę dziesiętną zamiast przecinka, stosowanego powszechnie w polskiej literaturze jako separator części dziesiętnych,
- nie oddziela spacją wartości liczbowych od jednostek,
- Str. 26, ostatni wiersz: niezręczne sformułowanie „Prostownik mostkowy wytwarza wartość bezwzględną napięcia...”,
- Str. 27, podpis pod rys. 2.2: „z indukcyjnością na stronie zasilania” – powinno być „po stronie zasilania”,
- Str. 28, 8 wiersz od góry: niezręczne sformułowanie „Prąd na wyjściu prostownika jest wartością bezwzględną prądu obwodu zasilania.”,
- Str. 32, 8 i 9 wiersz od góry: zamiast „dotyczy pracy obwodu dla czasu ładowania” – powinno być „dotyczy pracy obwodu dla przedziału czasu ładowania”
- Str. 35, 5 wiersz od góry: „przy pomocy skryptu autora” – powinno być „za pomocą skryptu autora”
- Str. 41, poniżej równania (3.1): „z prostownika mostkowego wypływa wartość bezwzględna prądu zasilania $|I(t)|$,
- Str. 41, następne zdanie: zamiast „Wykorzystując model (3.1)” powinno być „Wykorzystując model opisany równaniem (3.1)”,
- Str. 41, kolejne zdanie: zamiast „Z (3.2) i (3.3) wynika” powinno być: „Z równań (3.2) i (3.3) wynika”. Autor wielokrotnie w całej rozprawie stosuje tę niezręczność stylistyczną, m.in. ma str. 46 (pierwsze zdanie),
- Str. 43, ostatnie zdanie: „metody stało-krokowe, zmiennie-krokowe” powinno być „metody stałokrokowe, zmiennokrokowe”
- Str. 57, 2 akapit: powinno być „na rysunku 3.15” zamiast „na rysunkach 3.15”
- Str. 59, podpis pod rys. 3.18: zamiast „Suma prądów wyższych harmonicznych” powinno być „Suma wyższych harmonicznych prądu”
- Str. 66, w pierwszym zdaniu jest dwukrotnie w różnych miejscach słowo „występuje”,
- Str. 78, 4 wiersz od dołu: „napięcie $u_a = 0,5370$ jest to charakterystyczny punkt pracy”, właściwiej byłoby „wartość napięcia $u_a = 0,5370$ wyznacza charakterystyczny punkt pracy”,
- Str. 82, ostatni wiersz: „Podstawiając do (4.14)” nie podano, co podstawia się do równania (4.14),
- Str. 88, 6 wiersz: „minimalnej wartości równej ok. 0,25” – powinno być raczej bez słowa równej, jeśli jest około tej wartości,
- Str. 93, pierwszy akapit: dwukrotnie występuje słowo „oznacza”,
- Str. 98, rys. 4.19: „napięcie skuteczne sumy wyższych harmonicznych” powinno być „suma wyższych harmonicznych napięcia skutecznego”,
- Str. 105, ostatni akapit: w jednym zdaniu dwukrotnie występuje zwrot „za pomocą”,
- Str. 107, usterka literowa w tytule rozdziału 5: zamiast „na prace systemu” powinno być „na pracę systemu”.
- Str. 109, akapit 2: zamiast „oporności” powinno być „rezystancji”,
- Str. 115 w zdaniu „Niewielkie zmiany częstotliwości zasilania oraz odchylenia wartości elementów niż te przyjęte w założeniach projektowych”, zamiast „niż te...” powinno być: „w stosunku do tych przyjętych w założeniach projektowych”,
- Str. 117, akapit 2, po słowach „W konstrukcję szerokopasmowego...” brakuje słowa „filtra”,
- Str. 122, akapit 2: zamiast ilości parametrów” powinno być „liczby parametrów”,

- Str. 124, wiersz 5: zamiast „dedykowany do rozwiązywania równań różniczkowych” powinno być „przeznaczony do rozwiązywania równań różniczkowych”,
- Str. 124, akapit 3: zamiast „Ze względu, że analiza” powinno być „Ze względu na to, że analiza” oraz zamiast „Stosowano definicje” powinno być „Stosowane definicje”,
- Str. 128, wiersz 4, dwukrotne wystąpienie słowa „wartości” w jednym zdaniu,
- Str. 130, wiersz 2 od dołu: zwrot „po włączeniu indukcyjności” występuje w dwóch kolejnych zdaniach,
- Str. 150, przedostatni akapit: w jednym zdaniu trzykrotnie występuje słowo „model”,
- Str 169, drugi akapit: zamiast amplitudy napięcia $E_{h1 sk}$ powinno być wartości skutecznej napięcia $E_{h1 sk}$.
- Str. 171, 3 akapit, ostatnie zdanie: trzykrotne powtórzenie słowa „model”.

Znaczna objętość rozprawy zapewne wpłynęła na wystąpienie w tekście tych drobnych usterek redakcyjnych i niezręczności językowych, które mogłyby być wyeliminowane poprzez uprzednią korektę redakcyjną. Usterki te w żaden sposób nie obniżają jednak wysokiej merytorycznej wartości rozprawy.

Podsumowanie i wniosek końcowy

1. Oceniając zawartość przedstawionej rozprawy doktorskiej stwierdzam, że Doktorant w sposób jednoznaczny sformułował oryginalny problem badawczy, który następnie rozwiązał przy użyciu metod naukowych.
2. Postawione cele rozprawy były konsekwentnie zrealizowane i zostały osiągnięte oczekiwane wyniki o charakterze naukowym jak i praktycznym. Całość rozprawy potwierdza sformułowaną we wstępie tezę.
3. Doktorant wykazał się odpowiednim opanowaniem wiedzy teoretycznej i umiejętnościami prowadzenia badań naukowych w zakresie Elektrotechniki mieszczącej się w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.
4. Wymienione w recenzji uwagi nie obniżają w żaden sposób wysokiej i wyróżniającej wartości merytorycznej przedłożonej do oceny rozprawy doktorskiej.
5. Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Strząbały pt. „Analiza wzajemnych oddziaływań systemu elektroenergetycznego i odbiorników nieliniowych” **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.**

Wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej

Nawiązując do Uchwały Nr 94/21 Senatu Politechniki Świętokrzyskiej z dnia 28 kwietnia 2021 r. w sprawie zasad wyróżniania rozpraw doktorskich przez rady naukowe dyscyplin, **w przypadku pozytywnego wyniku obrony, składam formalny wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Strząbały pt. „Analiza wzajemnych oddziaływań systemu elektroenergetycznego i odbiorników nieliniowych”.**

Przedstawione w rozprawie badania mają **duże znaczenie praktyczne**. Prezentowane rozwiązanie równania w stanie ustalonym obwodu prądu przemiennego z obciążeniem nieliniowym stanowi odniesienie do badań obwodów fizycznych i symulatorów. Szczególnie cenne jest zastosowanie tej analizy do identyfikacji parametrów systemu zasilania. W rozprawie zaproponowano również praktyczną metodę pomiaru parametrów systemu zasilania. Ponadto dokonano ważnej obserwacji i analizy zjawisk przenoszenia mocy biernej wyższych harmonicznych, które są istotne dla praktycznego rozliczania kosztów energii.

