



Politechnika Łódzka

Instytut Elektroenergetyki



dr hab. Irena Wasiak, prof. nadzw.

Łódź, 25.02.2016

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Chmielowca
p.t. „ Warunki techniczne przyłączenia odbiorników energii elektrycznej będących
źródłem zaburzeń elektromagnetycznych – Analiza wybranych przypadków ”**

- opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki
i Inżynierii biomedycznej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie z dnia 29.03.2016

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana praca mieści się w ogólnej tematyce oceny jakości energii elektrycznej dostarczanej odbiorcom. Badania w tym zakresie prowadzone są od wielu lat, tym niemniej można wskazać zagadnienia, które dotychczas nie znalazły satysfakcjonującego rozwiązania. Należą do nich aspekty praktyczne pomiaru parametrów jakościowych. Wiarygodny pomiar parametrów jakości napięcia zasilającego umożliwia właściwą ocenę wpływu odbiornika lub źródła zaburzającego na sieć elektroenergetyczną. Ocena taka jest wymagana przez operatora sieci do wydania warunków przyłączenia dużych odbiorników lub źródeł energii, a także do określenia odpowiedzialności podmiotów za przekroczenie parametrów jakościowych. Uważam, że podjęta przez doktoranta tematyka jest aktualna i ma istotne znaczenie praktyczne.

Tytuł rozprawy może sugerować, że przedmiotem pracy jest analiza konkretnych, wybranych przypadków przyłączenia odbiorników, podczas gdy w istocie są nim wybrane problemy związane z oceną skutków przyłączenia. Praca dotyczy bowiem trzech specjalistycznych zagadnień szczegółowych mieszczących się w tematyce oceny jakości energii elektrycznej:

- 1) certyfikacji mierników do pomiaru parametrów jakości energii elektrycznej,
- 2) metody pomiaru wskaźników migotania światła uwzględniającej inne niż tradycyjna żarówka rodzaje źródeł światła,
- 3) metod lokalizacji źródeł wahań napięcia w sieci elektroenergetycznej.

Wybór tych zagadnień Autor przekonująco uzasadnił istnieniem niejednoznaczności obowiązujących procedur certyfikacyjnych, potrzebą weryfikacji stosowanych algorytmów pomiarowych oraz dostosowaniem ich do zmieniających się rodzajów odbiorników i warunków pracy sieci. Uważam, że cel pracy został postawiony jasno i jednoznacznie określa zakres pracy.



Rozprawa doktorska obejmuje 138 stron, została logicznie zredagowana w 5 rozdziałach i 9 załącznikach z wykorzystaniem 60 pozycji literatury. Rozdział 1 stanowi wprowadzenie do dalszej części pracy. Podano w nim uzasadnienie podjęcia tematu, cel i tezy rozprawy oraz metodykę prowadzonych badań. Kolejne trzy rozdziały stanowią zasadniczą treść rozprawy, a każdy z nich jest poświęcony jednemu z podjętych zagadnień. Autor szczegółowo prezentuje wyniki przeprowadzonych badań, przedstawia ich analizę i zamieszcza odpowiedni materiał ilustracyjny. Rozprawa została podsumowana w rozdziale 5 wnioskami i propozycją dalszych badań.

2. Ocena wartości naukowej rozprawy

Autor sformułował tezy pracy w odniesieniu do każdego z podjętych zagadnień. Teza I mówi, że możliwe jest wykazanie, iż stosowana obecnie procedura certyfikacji mierników do pomiaru parametrów jakościowych nie wyklucza z rynku urządzeń dokonujących pomiaru w sposób nieprawidłowy. Wykazaniu słuszności tej tezy poświęcony jest rozdział 3 pracy. Przedstawiono w nim szczegółowe wyniki testów przeprowadzonych dla grupy 13 dostępnych na rynku analizatorów klasy A, w zakresie pomiaru wartości skutecznej napięcia, wahań, zapadów, odkształcenia oraz asymetrii napięcia. Program testów oraz kryteria oceny zostały zaproponowane przez Autora z uwzględnieniem analizy zapisów norm dotyczących pomiarów parametrów jakościowych: PN-EN 61000-4-30, PN-EN 61000-4-15, PN-EN 61000-4-7, IEC 62586-1.

Zakres badań przeprowadzonych przez Doktoranta jest obszerny. Zamieszczony w pracy opis testów i uzyskanych w nich wyników jest zwięzły, ale klarowny. Badania wykazały, że niektóre przyrządy nie gwarantują poprawnego pomiaru pomimo posiadania certyfikatu klasy A. Doktorant podjął próbę interpretacji i wyjaśnienia zauważonych rozbieżności. W moim przekonaniu analiza wyników jest rzetelna, co przy uwzględnieniu zakresu przeprowadzonych badań potwierdza słuszność postawionej tezy I.

Część prezentowanych w pracy wyników pochodzi z eksperymentu pomiarowego, który został przeprowadzony w ramach Pikniku Jakości Energii Elektrycznej w dniu 23.10.2014 r. na terenie AGH w Krakowie. Celem eksperymentu było porównanie działania przyrządów różnych producentów, spełniających wymagania klasy A, w tych samych warunkach pomiarowych. Sprawdzenie poprawności pomiarów i porównanie badanych analizatorów umożliwiło analizę czy i w jakim stopniu sposób interpretacji zapisów obowiązujących norm wpływa na poprawność weryfikacji zgodności przyrządu z wymaganiami klasy A. Eksperyment pomiarowy został zaprojektowany bardzo starannie i przeprowadzony z zachowaniem właściwej dla tego typu działań uwagi i staranności przez grupę specjalistów z AGH. Udział Doktoranta w tych badaniach został jest znaczący (50%) i został jednoznacznie potwierdzony.

Teza II pracy wskazuje na możliwość modyfikacji algorytmu pomiaru wskaźnika migotania światła w sposób umożliwiający uwzględnienie emisji migotania dla źródeł innych niż żarówka oraz możliwość wyznaczenia wskaźnika do ilościowej oceny efektu migotania danego źródła na podstawie pomiaru strumienia świetlnego. Analizie tego zagadnienia temu poświęcony jest rozdział 4 pracy. W pierwszej części tego rozdziału Autor zaprezentował wyniki badań własnych określających wpływ wahań napięcia na pracę różnych rodzajów źródeł światła. Badania zostały przeprowadzone w specjalnie skonstruowanym do tego celu układzie pomiarowym, a poziom migotania światła oceniano na podstawie analizy Fouriera sygnału

proporcjonalnego do strumienia świetlnego źródła, uzyskanego na wyjściu fotodetektora. Określono stopień przenoszenia wahań napięcia przez różne źródła przy modulacji sinusoidalnej i prostokątnej napięcia zasilającego. W dalszej części pracy przedstawiony został laboratoryjny model miernika migotania (model IEC) wykonany przez Doktoranta w środowisku LabVIEW według algorytmu zdefiniowanego w normie PN-EN61000-4-15:2011 dla żarówki 60 W. Poprawność działania miernika została zweryfikowana na podstawie badań testujących.

Dla wykazania słuszności tezy II Autor dokonał modyfikacji modelu IEC w sposób umożliwiający wyznaczanie wskaźnika migotania na podstawie pomiaru strumienia świetlnego żarowych źródeł światła. Istotą tej modyfikacji była identyfikacja transmitancji filtru odpowiadającego reakcji oko-mózg (filtr E-B) na podstawie określonej pomiarowo charakterystyki filtru opisującego reakcję żarówki na zmiany napięcia zasilającego (filtr INC). Wyznaczenie współczynników transmitancji filtru E-B umożliwiło utworzenie modeli miernika migotania uwzględniających inne niż żarówka źródła światła, tj. lampy LED oraz świetłówki kompaktowe CFL. W tym celu wyznaczono na drodze pomiarowej charakterystyki amplitudowe filtrów obu typów lamp, wyznaczono ich transmitancję i dokonano oceny stabilności. Porównanie charakterystyk filtrów pozwoliło na ocenę w jakim stopniu tradycyjna żarówka jest mniej odporna na wahania napięcia niż inne rozważane źródła.

W rezultacie przeprowadzonych rozważań Autor zaproponował procedurę wyznaczania wskaźnika migotania światła dla danego źródła światła na podstawie identyfikacji transmitancji operatorowej tego źródła oraz transmitancji filtru E-B z uwzględnieniem sumy wskazań wskaźnika P_{st} dla przyjętej amplitudy prostokątnej i częstotliwości w zakresie od 1 do 39 Hz. Wskaźnik ten może służyć jako dodatkowe kryterium porównania źródeł pod kątem odporności na wahania napięcia. W ten sposób została potwierdzona słuszność tezy II.

Teza III rozprawy stwierdza, iż możliwe jest opracowanie algorytmu lokalizacji źródeł wahań napięcia zasilającego do implementacji w analizatorach jakości energii elektrycznej. Wykazaniu słuszności tej tezy poświęcony jest rozdział 5 pracy. Przedstawione w nim zostały 4 jednopunktowe metody lokalizacji źródeł zaburzenia: metoda korelacji wskaźnika P_{st} i mocy biernej, metoda charakterystyki napięciowo-prądowej, metoda mocy interharmonicznych oraz mocy i energii wahań. Skuteczność działania tych metod została pokazana w dalszej części pracy, która zawiera wyniki badań symulacyjnych i pomiarowych. Do badań symulacyjnych Autor zbudował symulator sieci elektroenergetycznych przy wykorzystaniu programu Matlab//Simulink. Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone w środowisku LabView.

Algorytmy lokalizacji źródeł zaburzeń zostały także przetestowane przez Autora w układzie rzeczywistym skonfigurowanym w laboratorium TECNALIA-LAB „Centre for Development and Demonstration of DER technologies” w Hiszpanii, w ramach międzynarodowego projektu DERri. Projekt DERri dotyczył stworzenia międzynarodowej infrastruktury badawczej w zakresie badań generacji rozproszonej. Jednym z celów projektu było udostępnienie tej infrastruktury dla osób i instytucji niebędących członkami konsorcjum na zasadzie konkursu. Szczegółowe zasady udostępniania zostały ściśle zdefiniowane w ramach projektu. Uzyskanie dostępu do badań wymagało od aplikanta przygotowania wniosku z opisem i szczegółowym uzasadnieniem celowości badań. Wnioski były oceniane przez międzynarodową grupę recenzentów powołanych w ramach konsorcjum projektu DERri. Należy stwierdzić, że wniosek przygotowany przez Doktoranta, stanowiący załącznik do pracy, uzyskał bardzo wysoką ocenę.

Zasadniczym efektem tej części pracy jest weryfikacja skuteczności rozpatrywanych metod lokalizacji zaburzenia, a zatem słuszność tezy III została wykazana.

W moim przekonaniu prezentowane w pracy badania zostały zrealizowane na wysokim poziomie merytorycznym. Na szczególne podkreślenie zasługuje właściwa metodyka prowadzenia badań, obejmująca kolejno analizę problemu, badania modelowe, symulacyjne i eksperymentalne. Praca jest źródłem cennych informacji na temat analizatorów jakości energii elektrycznej oraz metod oceny wahań napięcia. Wyniki uzyskane przez doktoranta mają duże znaczenie praktyczne, w szczególności mogą stanowić wytyczne dla producentów i dostawców analizatorów jakości energii elektrycznej odnośnie do kierunku rozwoju tych urządzeń, jak również mogą być wykorzystane w pracach komitetów normalizacyjnych.

Praca jest napisana w sposób zwięzły, ale w większości dostatecznie jasny. Redakcja pracy jest staranna, choć zdarzają się drobne usterki językowe i formalne. Zamieszczony w pracy materiał pochodzący z badań własnych Autora jest oryginalny i interesujący z naukowego i praktycznego punktu widzenia. Za najbardziej wartościowe elementy pracy uważam:

- analizę przyczyn błędów dużej grupy dostępnych na rynku analizatorów jakości energii elektrycznej,
- opracowanie metodyki pomiaru wskaźnika migotania dla dowolnego źródła światła oraz modyfikację algorytmu pomiarowego dla źródeł LED i świetlówek kompaktowych
- weryfikację metod lokalizacji źródeł wahań napięcia.

3. Uwagi i pytania szczegółowe dotyczące treści pracy

1. Autor stwierdza, że jedną z przyczyn nieprawidłowych wskazań analizatorów jakości jest brak jednoznacznej procedury certyfikacyjnej (teza I). Czy wprowadzenie normy IEC 62586-1 w roku 2013 nie zmieniło tej sytuacji? Jeśli tak, to w jakim zakresie?
2. Algorytm pomiaru wskaźnika migotania światła uwzględniający emisję migotania z różnych źródeł jest niewątpliwie przydatny do oceny samych źródeł oraz rzeczywistego poziomu zaburzenia, szczególnie w przypadku, gdy obserwowany poziom migotania przekracza dopuszczalną granicę. Niewątpliwie zastąpienie żarówek źródłami LED i CFL pozwala na zwiększenie poziomu wahań napięcia bez spowodowania przekroczenia dopuszczalnej wartości wskaźnika migotania. Autor stwierdza, że „... uzasadnione wydaje się zwiększenie poziomów dopuszczalnych wahań napięcia w sieciach dystrybucyjnych przy spełnieniu warunku dostatecznego udziału technologii LED i CFL w całkowitym zbiorze odbiorników oświetleniowych przyłączonych do sieci elektroenergetycznej”. Pojawia się pytanie, jakie poziomy dopuszczalne wahań napięcia Autor ma na myśli i w jaki sposób można je wyznaczyć?
3. Coraz częściej zaburzenia elektromagnetyczne wprowadzane są do sieci przez źródła energii. Czy Autor mógłby odpowiedzieć na pytanie jaka będzie skuteczność metod lokalizacji wahań napięcia w tym przypadku?
4. Interesująca byłaby opinia Autora na temat możliwości detekcji migotania światła z wykorzystaniem innych niż FFT technik przetwarzania sygnałów, np. transformaty falkowej
5. Str. 71: Autor odnosi się do wyników $P_{st} \approx 17$ dla IEC $P_{st} \approx 9,5$ dla LED i $P_{st} \approx 11$ dla CFL stwierdzając, że „...redukcje te dotyczą wyłącznie wahań o modulacji prostokątnej”, podczas gdy wymienione wartości znajdują się na rys. 3.32 oraz w tabeli 3.8

pokazujących wyniki dla modulacji interharmonicznej. Jakiej zatem modulacji dotyczą omawiane wartości?

6. Str. 77: Co jest przyczyną tak niskiej wartości skutecznej napięcia prezentowanej na rysunku 4.3, znacznie odbiegającej od wartości znamionowej napięcia?
7. Str. 90: Co jest źródłem asymetrii widzianej na rys. 4.33?
8. Str. 96: Dlaczego weryfikacji poddano tylko dwie z czterech prezentowanych metod lokalizacji źródeł wahań napięcia? Która z analizowanych metod ma zdaniem Autora największy potencjał implementacji w analizatorach jakości?
9. Str. 98: Parametry sieci podane w Tab. 4.9 nie są typowe dla sieci niskiego napięcia, w której występuje zwykle przewaga rezystancji nad reaktancją indukcyjną. Jaki był powód przyjęcia takich parametrów?
10. Str. 104: Jaka jest zależność pomiędzy charakterem impedancji sieci, a skutecznością działania metod lokalizacji zaburzenia, o której wspomina Autor na str. 104 rozprawy?

W pracy zauważyłam drobne usterki edytorskie, które wymieniłam w załączniku do recenzji.

4. Wniosek końcowy

Przedstawione powyżej uwagi mają charakter dyskusyjny i porządkujący i nie kwestionują zasadniczych wyników rozprawy oraz oryginalnych osiągnięć Doktoranta, które oceniam wysoko. Doktorant zrealizował bardzo obszerne badania w zakresie specjalistycznych zagadnień dotyczących oceny jakości dostawy energii elektrycznej, przy wykorzystaniu właściwych i komplementarnych metod badawczych. Uzyskane wyniki mają duże walory poznawcze i aplikacyjne. Sposób opracowania tematów i prezentacji wyników świadczy o dojrzałości naukowej Autora, który wykazał się nie tylko bardzo dobrą znajomością podjętych w pracy zagadnień; ale także ciekawością i pasją badacza. Na podkreślenie zasługuje bardzo duża liczba publikacji z udziałem Autora (29), wśród których znajdują się artykuły w czasopiśmie branżowych (Przegląd Elektrotechniczny, Wiadomości Elektrotechniczne i inne), ale także referaty prezentowane na uznanych i recenzowanych konferencjach międzynarodowych, takich jak: IEEE PES General Meeting, International Conference on Harmonics and Quality of Power, czy też International Conference on Power Quality and Utilization. Wiedzę i umiejętności Doktoranta z pewnością rozszerzył jego udział w 6 szkoleniach międzynarodowych odbytych w ramach KIC InnoEnergy PhD School.

W moim przekonaniu oryginalność i skala przeprowadzonych badań, a także duże znaczenie aplikacyjne uzyskanych wyników oraz aktywność badawcza i publikacyjna Doktoranta zasługują na wyróżnienie.

W nawiązaniu do ustawy z dnia 14.03.2003 roku o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym w sprawie warunków i trybu przeprowadzania przewodów doktorskich (Dziennik Ustaw nr 65 poz. 595 wraz z późniejszymi zmianami) uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Chmielowca całkowicie spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Inna Wasz

Załącznik

Uwagi edytorskie

1. Str. 45: Na rys. 2.17 błędnie oznaczono amplitudę zapadu
2. Str. 56: rys. 3.4; opis osi pionowej na dwóch rysunkach jest identyczny, nie zaznaczono jakiego sygnału dotyczą prezentowane zmiany amplitudy
3. Str. 65, Etap 1: określenie „natężenie strumienia świetlnego” jest nieprawidłowe
4. Str. 76: Rys. 4.1 mylnie sugeruje, że punkty A i B są połączone bezpośrednio
5. Str. 77 i dalsze, rys. 4.4. i dalsze: Sformułowanie „przebiegi chwilowe” odnosi się zwykle do wartości chwilowych napięcia lub prądu, natomiast Autor stosuje to określenie do zmian wartości skutecznych prądu i napięcia. Wprowadza to pewne niejasności w opisie algorytmów. Podobnie podpisy pod rysunkami 4.5, 4.6, nie są dostatecznie czytelne. Jednocześnie brak jest konsekwencji w oznaczeniach, bo słowo „przebieg” używane jest zarówno do wartości chwilowych (rys. 4.5) , jak i skutecznych (rys.4.11).
6. Str. 84: Podpis pod rys. 4.15 jest błędny, rysunek dotyczy bowiem wartości chwilowych, a nie skutecznych
7. Str. 107 - 108: Opisy bibliograficzne niektórych pozycji literatury są niepełne, np. pozycja 2, 8, 20, 26,27
8. Str. 119: W nagłówku tabeli C.5 powinna być skuteczność świetlna Ψ zamiast czasu $T_{90\%}$
9. Str. 122: We wzorze E.1 zamieniona została kolejności mnożenia macierzy impedancji Z_{3ph} przez macierze przekształcenia S i S^{-1}
10. Str. 123: Macierz oznaczona we wzorze (E.1) jako Z_{3ph} jest macierzą impedancji własnych i wzajemnych, a nie tylko własnych jak napisano. Autor nie wyjaśnia co oznaczają elementy tej macierzy, a zastosowane oznaczenia są niezgodne z powszechnie stosowaną konwencją i przez to nieczytelne, biorąc pod uwagę, że w pracy przyjęto oznaczenie faz L1, L2, L3.
11. Str. 123: Brak konsekwencji w oznaczeniu składowych symetrycznych. Impedancje składowych symetrycznych w równaniu E.2 oznaczane są indeksami dolnymi, podczas gdy składowe symetryczne napięć we wcześniejszych równaniach 2.6-2.11 oznaczane były za pomocą indeksów górnych.