

dr hab. inż. Krzysztof Pacholski, prof. n.
Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej
Politechnika Łódzka
ul. Stefanowskiego 18/22
90-924 Łódź

Łódź. 01.09.2015r.



RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
DLA RADY WYDZIAŁU ELEKTROTECHNIKI,
AUTOMATYKI, INFORMATYKI i INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ
AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZNEJ
im. STANISŁAWA STASZICA w KRAKOWIE

Recenzję opracowano na zlecenie Pana Dziekana dr hab. inż. Antoniego Cieśli, prof. n.
(pismo z dn. 02.07.2015 r.)

Tytuł rozpraw: **Metoda analizy parametrów metrologicznych obwodów wejściowych
w pomiarowej aparaturze elektroenergetycznej.**

Autor rozprawy: **mgr inż. Jakub Rzeszutko**

Promotor: **dr hab. inż. Andrzej Bień, prof. n.**

1. Dane bibliograficzne rozprawy

Treść ocenianej pracy zawarta jest na 105 stronach i podzielono na 7 rozdziałów oraz bibliografię obejmującą 85 pozycji. Po spisie treści umieszczono wykaz oznaczeń, symboli i skrótów.

2. Ocena tematu rozprawy

Problem monitorowania energii elektrycznej dostarczanej do odbiorców przemysłowych oraz indywidualnych jest bardzo istotny dla współczesnej elektroenergetyki. W celu uzyskania odpowiednich informacji realizowane są pomiary napięć i prądów w liniach przesyłowych. Wyniki tych pomiarów wykorzystywane są do oceny jakości przesyłanej energii elektrycznej, do celów rozliczeniowych oraz przez zabezpieczenia elektroenergetyczne.

Dokładność współczesnych przyrządów i systemów pomiarów wykorzystywanych do pomiaru wielkości elektrycznych uzależniona jest właściwości metrologicznych

kondycjonerów wejściowych. Kondycjonery te są nie tylko separatorami galwanicznym ale i również dopasowują poziom sygnałów mierzonych do zakresu pomiarowego układów elektronicznych występujących na wejściu niskonapięciowej części przyrządu lub systemu. W elektroenergetyce jako kondycjonery wejściowe wykorzystywane są przekładniki napięciowe i prądowe.

Do czasu, gdy odbiorniki energii dołączone do sieci elektroenergetycznej nie generowały harmonicznych o dużym udziale do opisu właściwości metrologicznych przekładników wystarczał opis statyczny. Obecnie większość odbiorników to przekształtniki energoelektroniczne wprowadzające silne deformacje prądu i napięcia linii zasilających. Ze względu na odkształcenie przebiegów prądowych i napięciowych dobór przekładników przeznaczonych do współpracy z aparaturą pomiarową wykorzystywaną obecnie w elektroenergetyce wymaga znajomości nie tylko błędów statycznych ale i również przebiegu charakterystyk częstotliwościowych: amplitudowej i fazowej. Wyznaczenie takich charakterystyk dla przekładników niskiego napięcia (nie przekraczającego 1 kV) nie nastęcza większego problemu. Charakterystyki częstotliwościowe takich przekładników wyznaczyć można za pomocą stabilnego źródła napięcia sinusoidalnego o regulowanej częstotliwości w zakresie od 50 Hz do 10 kHz. Zastosowanie takiego sposobu w celu wyznaczenia charakterystyk częstotliwościowych przekładników średniego i wysokiego napięcia jest niemożliwe. Dlatego Autor ocenianej rozprawy doktorskiej podjął prace, których efektem jest opracowanie metody pośredniego wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych układów wejściowych na podstawie transmitancji widmowej badanego kondycjonera w przedziale częstotliwości obejmującym pasma przetwarzania tego układu. Do estymacji transmitancji widmowej wykorzystał widmowe gęstości mocy sygnałów wejściowego i wyjściowego badanego urządzenia, gdy w sygnale wejściowym występuje zaburzenie wprowadzające do widma tego sygnału harmoniczne, interharmoniczne oraz subharmoniczne o częstotliwościach należących do interesującego nas pasma. Taki sposób badania właściwości dynamicznych układów wejściowych elektroenergetycznej aparatury pomiarowej może być stosowany w miejscu eksploatacji tej aparatury bez konieczności budowy drogiego stanowiska badawczego.

Mając na uwadze wymienione fakty uważam, że temat rozprawy jest dobrany właściwie i na duże znaczenie praktyczne i naukowe. Na początku pracy Autor nie sformułował jej tezy, co można potraktować jako mankament ocenianej rozprawy. Brak tezy częściowo wynika z charakteru pracy i jego uzupełnieniem jest bardzo obszerny opis celu pracy przedstawiony w rozdziale 1.2.

3. Ocena merytoryczna pracy

W recenzji opis poszczególnych rozdziałów rozprawy ograniczono do podkreślenia zalet i wad oraz zwrócono uwagę na zagadnienia, które mają zdaniem recenzenta charakter dyskusyjny.

W rozdziale 2 rozprawy przedstawiono opis sygnałów napięciowych i prądowych występujących w sieciach elektroenergetycznych. W opisie tym, oprócz wpływu harmoniczných i interharmoniczných na przebiegi napięcia sieci przedstawiono również wyniki badań symulacyjnych wpływu wahań i zapadów, przepięć oraz wahań częstotliwości na widmo tego sygnału. **Do wyjaśnienia wpływu wymienionych czynników na widmo napięcia sieci elektroenergetycznej wykorzystano jedynie wyniki badań symulacyjnych, brak jest przykładów analizy widmowej przebiegów rzeczywistych.**

Podano rozdział 2 zawiera zależności na wyznaczniki (wskaźniki) zawartości zaburzeń harmoniczných i interharmoniczných.

Kolejny rozdział 3 dotyczy problemu pomiaru parametrów jakości energii elektrycznej w polskim systemie elektroenergetycznym. W rozdziale tym Autor rozprawy uzasadnia celowość ciągłego monitorowania parametrów jakości energii elektrycznej przekazywanej odbiorcom za pośrednictwem systemu elektroenergetycznego. Powołuje się przy tym między innymi na Rozporządzenie Ministra Gospodarki z 4 maja 2007 w sprawie szczególnych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Na zakończenie rozdziału opisuje nowoczesny system elektroenergetyczny tzw. Smart Grid, w którym wyniki ciągłego monitorowania parametrów jakości energii wykorzystywane są do sterowania pracą systemu. **Mankamentem rozdziału jest brak zakończenia zawierającego uzasadnienie konieczności stosowania w systemach elektroenergetycznych systemów pomiarowych z szerokopasmowymi kondycjonerami wejściowymi.**

Rozdział 4 dotyczy właściwości układów wejściowych do pomiaru jakości energii elektrycznej. Na wstępie tego rozdziału Autor przedstawia mankamenty układów wejściowych produkowanych aktualnie przyrządów przeznaczonych do pomiarów parametrów określających jakość energii elektrycznej oraz podaje schemat blokowy układu wejściowego typowego elektroenergetycznego przyrządu pomiarowego. W układzie tym do wejściowego separatora galwanicznego dołączony jest kondycjoner sygnału do wyjścia, którego dołączony jest przetwornik analogowo-cyfrowy.

W podrozdziale 4.1 opisano właściwości układów kondycjonerów sygnałów napięciowych z separacją galwaniczną. Podrozdział ten zawiera opisany konwencjonalnych przekładników napięciowych, przekładników pojemnościowych i transreaktorowych, rezystancyjnych i pojemnościowych dzielników napięcia oraz układów wykorzystujących zjawisko modulacji światła. **Wszystkie wymienione układy, oprócz dzielników rezystancyjnych i pojemnościowych, oddzielają galwanicznie źródło sygnału mierzonego od obciążenia tych układów. W związku z tym fragment rozdziału dotyczący dzielników powinien być przeniesiony do następnego podrozdziału dotyczącego kondycjonerów sygnału.**

Następne dwa podrozdziały dotyczą odpowiednio kondycjonerów sygnałów i układów filtrujących. W podrozdziale 4.2 omówiono wpływ właściwości układów wzmacniających wykorzystujących wzmacniacze operacyjne, w tym wzmacniacze izolacyjne, na funkcjonowanie układów wejściowych. Uwzględniono przy tym nieprawidłowości oraz stany awaryjne kondycjonerów. Kolejny podrozdział 4.3 dotyczy właściwości filtra antyaliasingowego, który w aparaturze pomiarowej przeznaczonej do wyznaczania parametrów charakteryzujących jakość energii elektrycznej, jest integralną częścią układu wejściowego.

Właściwości poszczególnych bloków układu wejściowego autor pracy przedstawił w sposób opisowy wykorzystując między innymi amplitudowe charakterystyki częstotliwościowe tych bloków. Nie podał przy tym zależności na błędy amplitudowy i fazowy opisywanych układów.

Ze względu na treść rozdziału 4 powinien mieć tytuł: „Właściwości układów wejściowych aparatury do wyznaczania parametrów jakości energii elektrycznej”.

Z tytułu rozdziału 5 wynika, że rozdział ten dotyczy metody oceny właściwości metrologicznych układów wejściowych, które opisano w rozdziale 4. Na wstępie rozdziału 5 wskazano na czynniki, które należy brać pod uwagę przy doborze struktury i właściwości tych układów. Następnie w podrozdziałach 5.1 i 5.2 przedstawiono schematy blokowe układów pomiarowych przeznaczonych do wyznaczania (estymacji) transmitancji widmowej części analogowej układów wejściowych za pomocą widmowych gęstości mocy sygnałów wejściowego i wyjściowego tych układów. W każdym z tych układów występują dwa tory: badany i referencyjny. Pierwszy tor jest badanym układem wejściowym. Tor referencyjny przeznaczony jest do wyznaczania wartości chwilowych sygnału wejściowego układu badanego. Na wejściu tego toru występuje dzielnik rezystancyjny, za którym znajduje się filtr

antyaliasingowy. Do wejść obu torów dołączony jest sygnał, którego źródłem odpowiednio do poziomu tego sygnału może być: generator napięcia o zmiennej częstotliwości, sygnał wysokonapięciowy o stałej amplitudzie i częstotliwości oraz człon zaburzający wprowadzający wyższe harmoniczne lub odkształcony sygnał wysokonapięciowy. Sygnały wyjściowe obu torów badanego i referencyjnego przekazywane są do rejestratora cyfrowego, w którym zamieniane są w postać cyfrową. Na podstawie cyfrowej postaci obu tych sygnałów za pomocą odpowiedniego algorytmu numerycznego wyznaczone są składowe: amplitudowa i fazowa transmitancji widmowej badanego układu wejściowego. Opis matematyczny algorytmu za pomocą którego wyznaczono obie składowe transmitancji przedstawiono w podrozdziale 5.3. Podrozdział ten, oprócz matematycznego uzasadnienia metody wyznaczania transmitancji widmowej badanego układu, zawiera opis akwizycji danych, sposób wyznaczania parametrów sygnałów wyjściowych rejestratora cyfrowego, opis filtracji cyfrowej tych sygnałów oraz opis matematyczny algorytmu za pomocą którego wyznaczane są składowe transmitancji widmowej. Do wyznaczenia transmitancji widmowej niezbędne jest wyznaczenie wartości funkcji widmowej gęstości mocy sygnału wejściowego oraz funkcji widmowej gęstości wzajemnej sygnałów wejściowego i wyjściowego badanego układu. Do wyznaczania wartości tych funkcji algorytm opracowany przez Autora rozprawy wykorzystuje DFT odpowiednich funkcji autokorelacji.

Oprogramowanie niezbędne do akwizycji danych pomiarowych, ich filtracji oraz do wyznaczania składowych transmitancji widmowej badanego układu wejściowego Autor pracy opracował w środowisku MatLab.

W podrozdziałach 5.1 i 5.2 przedstawiono układy pomiarowe, których tor referencyjny tworzy szeregowo połączenie rezystancyjnego dzielnika napięcia oraz filtru antyaliasingowego. Przy opisie tych układów pomiarowych brak jest wytycznych dotyczących doboru właściwości częstotliwościowych tego dzielnika w stosunku do właściwości częstotliwościowych badanego układu wejściowego.

Rozdział 6 dotyczy badań modelowych oraz eksperymentów laboratoryjnych. W pierwszym etapie badań wyznaczono dwa układy kondycjonerów sygnałów różniące się członem filtrującym. W jednym układzie członem tym jest filtr scalony z przełączanymi pojemnościami typu MAX 291 a drugi kondycjoner wyposażony jest w filtr analogowy typu max 274. Filtry obu kondycjonerów zaprojektowano tak, aby 3 dB częstotliwość graniczna pasma przetwarzania miała wartość zbliżoną do 10 kHz. **Oba kondycjonery badano w układzie pomiarowym z torem referencyjnym zawierającym dzielnik rezystancyjny.**

Przy opisie układu pomiarowego nie przedstawiono właściwości częstotliwościowych tego dzielnika oraz jego dokładności.

W trakcie badania obu kondycjonerów na ich wejście podawany był przemienny sygnał prostokątny o wartości skutecznej 230 V i częstotliwości 1 kHz. Szerokie widmo częstotliwościowe tego sygnału pozwoliło na wyznaczenie przebiegu charakterystyk: amplitudowej i fazowej obu badanych układów w paśmie częstotliwości obejmującym ich pasmo przetwarzania, za pomocą algorytmu numerycznego opracowanego przez Autora pracy. Z przebiegu charakterystyk częstotliwościowych obu kondycjonerów wynika, że układem bardziej przydatnym do wyznaczania parametrów jakości energii elektrycznej jest układ zawierający filtru analogowego.

W następnym etapie za pomocą układu pomiarowego z dzielnikiem rezystancyjnym w torze referencyjnym zbadano jednofazowego indukcyjny przekładnik napięcia o przekładni $\frac{15 \text{ kV}}{\sqrt{3}} / \frac{100 \text{ V}}{\sqrt{3}}$. Z informacji podanych przez autora pracy wynika, że dzielnik rezystancyjny zastosowany w układzie pomiarowym charakteryzował się dokładnością 1% w paśmie częstotliwości do 1 MHz. **Nie padano przy tym budowy i technologii wykonania tego dzielnika oraz metody oceny jego dokładności w tak szerokim paśmie częstotliwości.**

Do badania przekładnika wykorzystano specjalnie wygenerowany sygnał o dużej zawartości harmonicznych, ineter oraz subharmonicznych. Częstotliwościowa charakterystyka amplitudowa badanego przekładnika, uzyskana za pomocą metody opracowanej przez Autora rozprawy, dokumentuje nieprzydatność przekładnika do układów pomiarowych pracujących z sygnałami o przebiegu zbliżonym do sinusoidalnego częstotliwości oraz częstotliwości 50 Hz.

W ostatnim etapie badań w opracowanym przez autora układzie pomiarowym wyznaczono przebieg charakterystyk częstotliwościowych amplitudowej i fazowej dla układu wejściowego składającego się z transformatora o przekładni 230 V:12 V oraz filtru aktywnego typu Butterwortha rzędu 8 o częstotliwości granicznej 10 Hz. W tym przypadku sygnałem wejściowym układu pomiarowego było odkształcone napięcie sieci energetycznej dostarczającej energię elektryczną do huty im Tadeusza Sędzimir. Ze względu na mały udział wyższych harmonicznych w napięciu wejściowym układu pomiarowego uzyskano wyniki nie pozwalające na jednoznaczną estymację przebiegu charakterystyk częstotliwościowych badanego układu.

Ostatnim 7 rozdziałem jest podsumowanie, w którym autor zwięźle opisuje opracowaną i zaprezentowaną w pracy metodę wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych układów wejściowych przeznaczonych dla elektroenergetycznej aparatury pomiarowej. Ponadto podaje swoje główne osiągnięcia oraz kierunki dalszej swojej działalności.

4. Uwagi szczegółowe (wybrane)

1. Numery zależności przedstawianych w pracy powinny być w nawiasach, np. (2.1)
2. Str. 18, zal. 2.1 - Parametr x_n jest stosunkiem wartości skutecznej n -tej do wartości skutecznej harmonicznej podstawowej.
3. Str. 18, zal. 2.2 – W liczniku zależności zamiast oznaczenia $X_{(n)}$ powinno być umieszczone oznaczenie X_n .
4. Str. 23, zal. 2.7 – Nie podano zakresu wartości współczynników k_N .
5. Str. 27. pierwszy akapit pod rys. 2.11 – Opis przyczyn zapadów napięcia jest mało precyzyjny.
6. Str. 28, zal. 2.9 – Wielkości występujące w tej zależności są opisane nieprawidłowo.
7. Str. 29, 5 w. od góry – Jaka jest różnica pomiędzy doraźnym i ciągłym pomiarem jakości energii elektrycznej?
8. Str. 36, 1 w. od dołu – Czym się różni filtracja od odcinania składowej stałej?
9. Str. 37, 1 akapit podrozdziału 4.1 – Opis układów separacji galwanicznej jest bardzo nie zrozumiały.
10. Str. 43 – Brak odwołania w tekście poprzedzającym rys. 4.8 i 4.9 do tych rysunków.
11. Str. 44 – Brak odwołania w tekście poprzedzającym tabelę 4.1 do tej tabeli.
12. Str. 48, 2 akapit od góry, 4 w. od dołu – Nie LEDów tylko diod LED.
13. Str. 48, 2 akapit od dołu – Jaka jest różnica pomiędzy kiepskim i słabszym parametrem?
14. Str. 51, 2 akapit od góry – Jak zdefiniowana jest najwyższa składowa częstotliwość mierzonego sygnału?
15. Str. 51, 3 akapit od góry – Czy filtry ograniczają sygnał, czy jego widmo?
16. Str. 64 – Jaka jest definicja transmitancji operatorowej?
17. Str. 77 – Przed tabelą 5.2 brak odpowiedniego opisu.
18. Str. Str. 78 – W tekście poprzedzającym rys. 5.15 i 5.16 brak odwołania do tych rysunków.
19. Istnieją pozycje literatury nieprawidłowo opisane lub nieopisane.

5. Uwagi ogólne i krytyczne

Za podstawowe osiągnięcia pracy uważam:

1. Opracowanie metody wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych: amplitudowej i fazowej analogowych układów wejściowych elektroenergetycznej aparatury pomiarowej przy użyciu widmowych gęstości mocy sygnałów wejściowego i wyjściowego tych układów.
2. Opracowanie i wykonanie systemu pomiarowego oraz opracowanie oprogramowania w środowisku MatLab za pomocą, którego wyznaczać można przebieg charakterystyk częstotliwościowych ww. układów.
3. Weryfikacja empiryczna potwierdzająca przydatność opracowanej metody do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych układów wejściowych elektroenergetycznej aparatury pomiarowej.

Uwagi dotyczące rozprawy wyróżniono przy ocenie jej tematu, w ocenie merytorycznej oraz w rozdziale 4 recenzji. Dlatego proszę Doktoranta o ustosunkowanie się do tych uwag w trakcie obrony pracy.

6. Wartość merytoryczna wyników rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska jest prawidłowym i rzetelnym rozwiązaniem zadania naukowo – badawczego. Rozprawa zawiera etapy niezbędne do przeprowadzenia takiego zadania: sformułowanie problemu, opis zjawisk związanych z tematyką rozprawy i ich odzwierciedlenie w literaturze, rozwiązanie zadania badawczego, w końcu badania modelowe i empiryczne weryfikujące opracowaną przez Autora metodę wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych analogowych układów wejściowych przeznaczonych dla elektroenergetycznych przyrządów i systemów pomiarowych. Całość stanowi cenny wkład w bardzo aktualną dziedzinę nauki i techniki. Praca nie wymaga zmian ani uzupełnień.

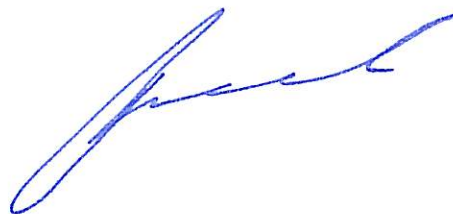
7. Wniosek końcowy

Uwagi ogólne i szczegółowe (niektóre dyskusyjne) nie zmieniają pozytywnej opinii na temat recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Jakuba Rzeszutko stanowi poprawne opracowanie dotyczące ciekawego i aktualnego zagadnienia naukowo-technicznego dowodząc zadowalającego opanowania przez doktoranta dyscyplin naukowych, z którymi jest związana.

Biorąc powyższe stwierdzenia pod uwagę uważam, że praca mgr inż. pt. Jakuba Rzeszutko „Metoda analizy parametrów metrologicznych obwodów wejściowych w pomiarowej aparaturze elektroenergetycznej” spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę o stopniach i tytule naukowym z 14 marca 2003 roku.

Stawiam wniosek o dopuszczenie przedstawionej rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized initial 'J' followed by a series of connected loops and a final horizontal stroke.

