

Przemysław Otomański

Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny

Załącznik nr 2

Autoreferat

Poznań, 2015

AUTOREFERAT*

1. Imię i Nazwisko: **Przemysław Otomański**
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ ~~artystyczne~~ – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- **dyplom magistra inżyniera:** Politechnika Poznańska, Wydział Elektryczny, specjalność: Automatyka i metrologia elektryczna, 27.05.1985 r. Praca magisterska pt. „Zasilacz programowany do zasilania żarowych źródeł światła”; Promotor: dr inż. Anna Cysewska-Lukowska.

- **stopień doktora nauk technicznych** w zakresie Elektrotechniki, nadany uchwałą Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej z dnia 29.10.1996 r. Rozprawa doktorska pt. „Właściwości metrologiczne diody laserowej jako przetwornika sygnału w torze pomiarowym”. Promotor: dr hab. inż. Danuta Turzeniecka – prof. nadzw.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych

Podstawowe miejsce pracy: Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań

Historia zatrudnienia:

01.06.1985 – mianowanie na stanowisko asystenta stażysty,
17.09.1986 – mianowanie na stanowisko asystenta,
01.10.1988 – mianowanie na stanowisko starszego asystenta,
01.10.1990 – mianowanie, przekształcenie na mocy prawa, na stanowisko asystenta,
01.10.1995 – mianowanie na stanowisko wykładowcy
01.03.1997 – mianowanie na stanowisko adiunkta.

4. Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

*przygotowano w oparciu o wzór Centralnej Komisji do Spraw Stopni i Tytułów



a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego,

Jednotematyczny cykl publikacji o wspólnym tytule:

Wybrane aspekty metrologiczne oceny ilości i jakości energii elektrycznej

b) (autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa),

- [H1] **Otomański P.**, Wiczyński G., 2005, *Przegląd wielkości stosowanych w badaniach jakości energii elektrycznej*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, nr 223, Seria Elektrotechnika, z. 28, str. 95–106, – udział własny 50%*.
- [H2] **Otomański P.**, Wiczyński G., 2006, *Podstawowe problemy oceny jakości energii elektrycznej – komentarz do aktualnego stanu prawnego*, Prace Komisji Metrologii PAN w Katowicach, Seria Konferencje, nr 11, str. 397–406, – udział własny 50%*.
- [H3] Otomański P., 2006, *Metrologiczne aspekty oceny jakości energii elektrycznej*, Prace Komisji Metrologii PAN w Katowicach, Seria Konferencje, nr 11, str. 391–396.
- [H4] Otomański P., 2006, *Problemy wiarygodności oceny parametrów technicznych w badaniu jakości energii elektrycznej*, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 82, nr 7/8, str. 142–144.
- [H5] Otomański P., 2006, *Wykorzystanie przyrządów pomiarowych do wyznaczania wskaźników jakości energii elektrycznej*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, nr 233, Seria Elektrotechnika, z. 29, str. 205–212.
- [H6] **Otomański P.**, Wiczyński G., 2007, *Badania analizatorów jakości energii elektrycznej*, Proceedings of XII Conference Computer Applications in Electrical Engineering, pp. 319–320, – udział własny 50%*.
- [H7] Otomański P., 2007, *The applications of the Power Quality analyser to determine of parameters describing electric power quality*, Proceedings of 6th International Conference on Measurement – MEASUREMENT 2007, pp. 288–291, (publikacja indeksowana w bazie Web of Science).
- [H8] **Otomański P.**, Wiczyński G., 2007, *Charakterystyka porównawcza układów pomiarowo-rejestrujących wykorzystywanych do oceny jakości energii elektrycznej*, Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 53, nr 9 bis, str. 649–652 – udział własny 50%*.
- [H9] **Otomański P.**, Wiczyński G., 2007, *Analiza widmowa napięć w sieci elektroenergetycznej w ujęciu normatywnym*, Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 53, nr 9 bis, str. 665–668, – udział własny 50%*.
- [H10] Otomański P., 2007, *Wykorzystanie szeregu Fouriera do określenia dokładności pomiaru zawartości harmonicznych*, Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 53, nr 12, str. 88–90.
- [H11] Otomański P., 2008, *Wpływ wartości skutecznej sygnału wymuszającego na błąd pomiaru harmonicznych*, Proceedings of XIII Conference Computer Applications in Electrical Engineering, pp. 253–254.
- [H12] **Otomański P.**, Zazula P., 2008, *Charakterystyka metrologiczna stanowiska pomiarowego do badań liczników energii elektrycznej prądu stałego w zakresie do 4 kV*, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 84, nr 12, str. 315–317, – udział własny 65%*, (publikacja indeksowana w bazie Web of Science).
- [H13] **Otomański P.**, Wiczyński G., 2011, *The usage of voltage and current fluctuation for localization of disturbing loads supplied from power grid*, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 87, nr 1, str. 107–111, – udział własny 50%*, (publikacja indeksowana w bazie Web of Science).
- [H14] Otomański P., 2012, *Wykorzystanie zmienności napięcia w diagnostyce stanu sieci elektroenergetycznej*, Przegląd Elektrotechniczny, vol. 88, nr 10b, str. 35–38, (publikacja indeksowana w bazie Web of Science).
- [H15] **Otomański P.**, Zazula P., 2012, *Stanowisko pomiarowe do oceny właściwości metrologicznych liczników energii elektrycznej prądu stałego*, Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 58, nr 9, str. 764–766, – udział własny 65%*.
- [H16] **Otomański P.**, Zazula P., 2013, *The reliability evaluation of measuring system designed to calibrate direct current Watt-hour meter*, Proceedings of 9th International Conference on Measurement – MEASUREMENT 2013, pp. 215–218, – udział własny 65%*.
- [H17] **Otomański P.**, Zazula P., 2013, *The experimental verification of metrological properties of direct current Watt-hour meter*, Journal of Physics: Conference Series, vol. 459, 6 pages, doi:10.1088/1742-6596/459/1/012058, – udział własny 65%*, (publikacja indeksowana w bazie Web of Science).
- [H18] **Otomański P.**, Zazula P., 2014, *Stanowisko pomiarowe do oceny właściwości metrologicznych analizatora jakości energii elektrycznej*, Pomiary Automatyka Kontrola, vol. 60, nr 8, str. 552–555, – udział własny 65%*.

* Oświadczenia Współautorów o ich udziałach w powstaniu publikacji wspólnych zamieszczono w załączniku nr 5 do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

4.1 Wprowadzenie – uzasadnienie podjętej tematyki

Energia elektryczna, wykorzystywana zgodnie z potrzebami użytkownika, jest towarem handlowym, który podlega zarówno ocenie ilościowej, jak i jakościowej. Ocena jakości energii elektrycznej jest złożonym zadaniem pomiarowym, wymagającym wykorzystania systemu o odpowiednich właściwościach metrologicznych. Jakość energii elektrycznej (ang. Power quality) można opisywać różnymi miarami. Dobór miar jest uzależniony od celu ich wykorzystania, możliwości implementacyjnych i zgodności z obowiązującym prawem. Odpowiedni dobór miar ma na celu ilościowe określenie wpływu jakości energii elektrycznej na stan zasilanych odbiorników energii elektrycznej. Określenie takiego wpływu, na tyle dokładnie na ile to możliwe, wymaga wykorzystania różnorodnych wielkości. Miary jakości napięcia można podzielić na następujące 3 grupy: do obowiązkowego stosowania, normatywną i uzupełniającą. Zestawy takich miar wyszczególnione są w normach, przepisach krajowych i umowach handlowych zawieranych pomiędzy dostawcą i odbiorcą energii elektrycznej. Obecnie obowiązującym dokumentem regulującym warunki rozliczeń pomiędzy dostawcą a odbiorcą energii elektrycznej jest Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 roku „W sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego”, zwane w dalszej części Rozporządzeniem [1]. Najszerszy zestaw miar zawiera norma PN-EN 50160 „Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych” [2]. Miary wymienione w tym dokumencie są doprecyzowane w innych normach. Wśród nich można wymienić: PN-EN 61000-4-7 „Metody badań i pomiarów – Ogólny przewodnik dotyczący pomiarów harmonicznych i interharmonicznych oraz stosowanych do tego celu przyrządów pomiarowych dla sieci zasilających i przyłączonych do nich urządzeń.” [3], PN-EN 61000-4-15 „Metody badań i pomiarów. Miernik migotania światła. Specyfikacja funkcjonalna i projektowa.” [4], oraz PN-EN-61000-4-30 „Metody badań i pomiarów. Metody pomiaru jakości energii” [5]. W ostatniej z tych Norm określono, że pod pojęciem jakości energii elektrycznej rozumieć należy: „Charakterystyki energii elektrycznej w danym punkcie systemu elektroenergetycznego, oceniane na podstawie zbioru parametrów referencyjnych.” W dokumencie [5] zawarto uwagę, że parametry te w pewnych przypadkach mogą dotyczyć kompatybilności pomiędzy dostawą energii elektrycznej w sieci zasilającej i odbiornikami przyłączonymi do tej sieci.

Jak już wspomniano, w celu oceny jakości energii elektrycznej należy dokonać pomiaru wartości różnorodnych wielkości. Pomiar oraz rejestracja parametrów, służących do oceny jakości energii elektrycznej, jest wykonywana z wykorzystaniem przyrządów pomiarowych zwanych analizatorami jakości energii elektrycznej. W dalszej części pracy zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych, przeprowadzonych z wykorzystaniem określonych sygnałów testowych, dla wybranych analizatorów jakości energii elektrycznej. Uzyskane wyniki pozwalają na ocenę zgodności z wymaganiami technicznymi, określonymi w dokumentach normatywnych.

Poza oceną jakościową, istotnym problemem jest pomiar ilości energii elektrycznej. Ocena parametrów metrologicznych urządzeń służących do rozliczeń pomiędzy podmiotami gospodarczymi jest złożonym problemem pomiarowym. W praktyce często przyjmuje się, że odpowiednią formą takiej oceny jest wzorcowanie urządzeń. Uzyskane w wyniku wzorcowania wartości, powiązane z niepewnością ich wyznaczenia, powinny być określone w konkretnych punktach pomiarowych, zgodnych z odpowiednimi normami i innymi dokumentami uzupełniającymi.

W odróżnieniu od problematyki pomiaru energii elektrycznej prądu przemiennego, która jest od wielu lat dobrze znana i opisana w wielu publikacjach, zagadnienia związane z pomiarem energii prądu stałego są relatywnie słabo rozpoznane.

Od kilku lat istnieje zapotrzebowanie na sprawdzanie liczników energii elektrycznej prądu stałego, które mają zastosowanie w sieci trakcyjnej kolejowej. Krajowa sieć trakcyjna zasilana jest

napięciem stałym 3,3 kV. Na potrzeby legalizacji tego typu przyrządów pomiarowych zaprojektowano i wykonano, unikatowe w skali kraju, stanowisko pomiarowe, umożliwiające generację napięć stałych, o odpowiednio dużej dokładności, w zakresie do 4 kV. W dalszej części pracy zaprezentowano szczegółowo budowę tego stanowiska, określono jego parametry metrologiczne oraz wyniki pomiarów uzyskanych w trakcie procesu wzorcowania reprezentatywnej populacji liczników energii elektrycznej prądu stałego.

4.2 Parametry techniczne opisujące jakość energii elektrycznej

Jakość energii elektrycznej można opisywać różnymi miarami. Dobór miar jest uzależniony od celu ich wykorzystania, możliwości implementacyjnych i zgodności z obowiązującym prawem.

W pracach [H1 – H4] przedstawiono przegląd wielkości stosowanych w badaniach jakości energii elektrycznej.

W obecnie obowiązującym Rozporządzeniu podzielono odbiorców na sześć grup przyłączeniowych. W przypadku grup od I do V, przydział do określonej grupy przyłączeniowej ma wpływ na dopuszczalne wartości odpowiednich parametrów, określających jakość energii. Dla szóstej grupy przyłączeniowej, parametry jakościowe energii elektrycznej określa umowa o świadczeniu usług przesyłania lub dystrybucji albo umowa kompleksowa.

Energia elektryczna, wykorzystywana zgodnie z potrzebami użytkownika, jest towarem, który podlega ocenie jakościowej. Dlatego konieczne jest określenie:

- wielkości określających jakość energii elektrycznej,
- dopuszczalnych zakresów zmienności wartości tych wielkości.

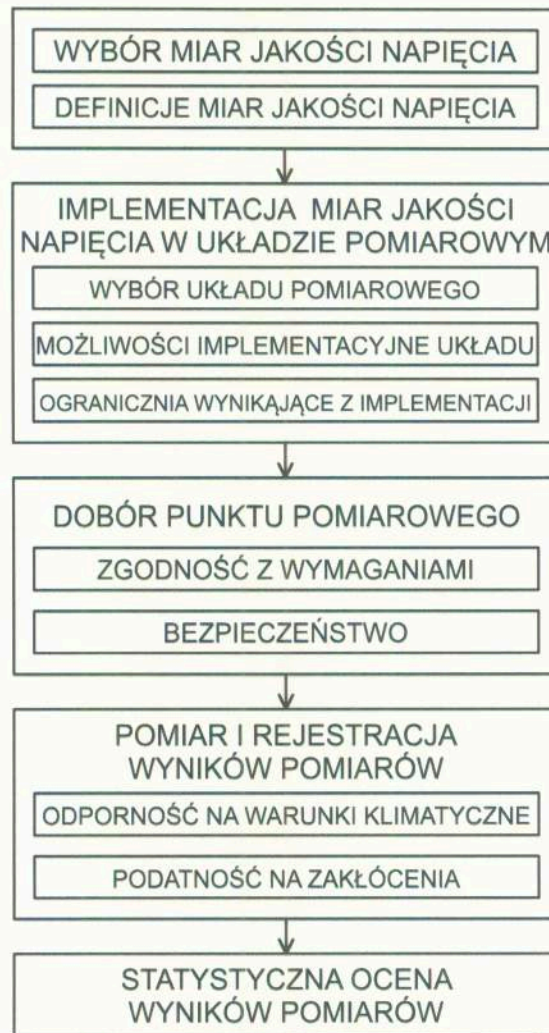
Na potrzeby takiej oceny w Rozporządzeniu [1] wyszczególniono, określone metodami statystycznymi, dopuszczalne wartości poszczególnych wielkości. Analiza przeprowadzana jest na danych pomiarowych zarejestrowanych w przeciągu jednego tygodnia. Ze względu na dużą ilość zgromadzonych danych, do ich obróbki wykorzystuje się specjalizowane oprogramowanie komputerowe. Program taki umożliwia, poza rejestracją, statystyczną obróbkę uzyskanych wyników pomiarów oraz wspomaga w podjęciu decyzji o zweryfikowaniu określonego parametru jako zgodnego bądź nie z wartościami określonymi w dokumencie [1].

Aby ocena jakości energii elektrycznej była wiarygodna, konieczna jest rzetelna znajomość wielkości podlegających pomiarom, zrozumienie stosowanych technik statystycznych oraz przeprowadzenie analizy niedokładności wyników pomiarów.

4.3 Ocena jakości energii elektrycznej

Przystępując do oceny jakości energii elektrycznej należy określić metodę postępowania, która pozwoli na jej rzetelną ocenę. Pomocnym może się okazać algorytm, określający poszczególne etapy tej oceny. **W pracy [H2] zaprezentowano schemat przykładowego algorytmu, który przedstawiono na rys. 4.1. Algorytm taki pozwala na uporządkowanie procesu oceny jakości energii elektrycznej.**

Dokonując oceny jakości energii elektrycznej należy na wstępie określić i zdefiniować, które z wielkości określających jakość energii będą podlegały pomiarom. Wybór i definicje miar jakości powinny być skojarzone z potrzebami diagnostycznymi, możliwościami implementacyjnymi i przydatnością w praktycznym wykorzystaniu. Wybór miar powinien być zgodny z obowiązującym prawem a także uzupełniony o inne miary wspomagające, lub wręcz umożliwiające, realizację zadań diagnostycznych.



Rys. 4.1 Etapy oceny jakości energii elektrycznej [H2]

4.3.1 Wybór i definicje miar jakości napięcia

Przystępując do oceny jakości energii elektrycznej należy określić i zdefiniować wielkości, które będą podlegały pomiarom. Zgodnie z dokumentem [1] do oceny jakości energii elektrycznej niezbędny jest pomiar:

- częstotliwości f napięcia,
- wartości skutecznej napięcia U ,
- wskaźnika krótkookresowego migotania światła P_{st} ,
- ilorazu składowych symetrycznych kolejności zgodnej U_1 i przeciwnej U_2 ,
- wartości skutecznej wybranych harmonicznych napięcia U_h ,
- współczynnika odkształcenia harmonicznymi napięcia zasilającego THD,
- mocy czynnej P ,
- współczynnika mocy $\text{tg } \varphi$.

Wyniki pomiarów powyższych wielkości podlegają dwustopniowej obróbce statystycznej opisaney w Rozporządzeniu. **Istotnym mankamentem tego zestawu wielkości, których szczegółowy opis został zaprezentowany w publikacjach [H1 – H2], jest stosunkowo niewielka przydatność w identyfikacji źródeł obniżenia jakości energii.**

4.3.2 Implementacja miar jakości napięcia w układzie pomiarowym

Implementacja miar jakości w układzie pomiarowym powinna, wykorzystując określone środki techniczne, dokładnie odwzorowywać treść definicji. Jednocześnie powinna rozwiązywać wszelkie

problemy wynikające z niejednoznaczności specyfikacji pomiarów. Uwarunkowania implementacyjne mogą wpływać na wyniki pomiarów i tym samym ocenę jakości energii elektrycznej. Można wyróżnić następujące fazy implementacji:

- dobór układu pomiarowego,
- określenie możliwości zastosowania wybranego układu pomiarowego,
- wyznaczenie ograniczeń dla wybranego układu pomiarowego.

Wybór układu pomiarowego jest zadaniem skomplikowanym, wymagającym rozpoznania możliwości sprzętowych i programowych. Najlepiej byłoby wykorzystać układ o odpowiednich właściwościach metrologicznych, zdolny do przetwarzania dużego strumienia danych. Jednak jest to zazwyczaj sprzeczne z istotną przesłanką wyboru – ceną. Trudno szczegółowo wyspecyfikować przesłanki wyboru. Do typowych należą m. in.: liczba i rodzaj sygnałów wejściowych, struktura analogowych układów przetwarzania sygnałów, dostępne możliwości obliczeniowe.

Wybrany układ musi charakteryzować się wymaganymi możliwościami implementacyjnymi przy akceptowalnych ograniczeniach. Ograniczenia wynikają z właściwości fizycznych układu pomiarowego (części analogowych i cyfrowych) oraz z niejednoznaczności definicji. Typowym problemem implementacyjnym jest wyznaczenie wartości współczynnika mocy $tg \varphi$, wymagające pomiaru m.in. składowej biernej mocy lub energii.

4.3.3 Dobór punktu pomiarowego

Dobór punktu pomiarowego uzależniony jest od celu oceny jakości. Najczęstszymi celami są weryfikacja jakości w relacji dostawca – odbiorca energii elektrycznej lub identyfikacja źródła obniżenia jakości. Wybór punktów w trakcie identyfikacji zdeterminowany jest zastosowaną metodą pomiaru. Można sformułować dwie ważne przesłanki doboru punktu pomiarowego:

- zgodność z wymaganiami wynikającymi z celu pomiaru,
- zapewnienia bezpieczeństwa obsłudze układu pomiarowego i osób przebywających w jego pobliżu.

Praktyka wskazuje, że w trakcie identyfikacji postulowane punkty pomiarowe położone są często w trudno dostępnych miejscach takich jak np. rozgałęzienie linii napowietrznej. W przypadkach weryfikacji wymagane jest przeprowadzenie badań w miejscu dostawy i odbioru energii, określonym w umowie handlowej. Często tym miejscem są bezpieczniki główne zabudowywane w złączach i przyłączach. Utrudnieniem w wykorzystaniu takich punktów pomiarowych jest brak wystarczającego miejsca na zabudowę układu pomiarowego lub niewystarczające zabezpieczenie przed wpływem czynników atmosferycznych. W przypadkach niemożliwości zarejestrowania wyników pomiarów w wymaganych punktach poszukuje się innego miejsca. Wyniki zarejestrowane przed wymaganym punktem nie uwzględniają zjawisk zachodzących na odcinku rzeczywisty punkt pomiarowy – punkt wymagany. Wyniki zarejestrowane za wymaganym punktem zawierają udział stanu sieci odbiorcy. Niewłaściwa lokalizacja może podważyć przydatność wyników pomiarów do ostatecznego wnioskowania. Istotną przesłanką w doborze punktu pomiarowego jest zapewnienie bezpieczeństwa operatorowi układu pomiarowego podczas montażu i demontażu oraz osób przebywających w pobliżu układu pomiarowego. Bezpieczeństwo i ochrona przed kradzieżą wymuszają zabudowę układu pomiarowego (zazwyczaj o znacznej wartości) w miejscach odpornych na działanie wandalii.

4.3.4 Pomiar i rejestracja wyników pomiarów

Pomiar i rejestracja wyników pomiarów wykonywana jest z wykorzystaniem układu pomiarowo-rozliczeniowego zabudowanego w pobliżu punktu pomiarowego. Ten etap oceny wymaga stosowania układów przystosowanych do warunków klimatycznych, panujących w miejscu pomiaru, i odpornych na zakłócenia (łącznie z zakłóceniami w mierzonym napięciu). Na tym etapie wartości poszczególnych wielkości podlegają wstępnej obróbce statystycznej w następujący sposób:

- uśrednianie przez okres 10 sekund: częstotliwość f ,
- uśrednianie przez okres 10 minut: wartość skuteczna napięcia U , iloraz składowych kolejności przeciwnej U_2 i zgodnej U_1 , wartości skuteczne harmonicznych napięcia U_h ,
- dyskryminacja wartości maksymalnej współczynnika THD_U mierzonej przez okres 10 minut,

- obliczanie wartości wskaźnika krótkookresowego migotania światła P_{st} na podstawie parametrów estymaty funkcji skumulowanego prawdopodobieństwa CPF mierzonego przez 10 minut, zgodnie z normatywną zależnością zawartą w dokumencie [4].

Rejestracji podlegają wyniki wstępnej analizy statystycznej. Realizacja oceny zgodnie z dokumentem [1] wymaga co najmniej tygodniowego okresu gromadzenia danych. Rejestracji podlegają ponadto wielkości umożliwiające wyznaczenie współczynnika mocy $tg \varphi$ oraz określenie pobranej mocy (w dokumencie [1] brakuje specyfikacji tych wielkości).

4.3.5 Statystyczna ocena wyników pomiarów

Rozporządzenie wymaga dwuetapowego procesu obróbki statystycznej. Etap pierwszy poprzedza rejestrację w układzie pomiarowo-rozliczeniowym. Drugi etap wykonywany jest na zarejestrowanych w ciągu tygodnia danych i polega na jednej z operacji statystycznej:

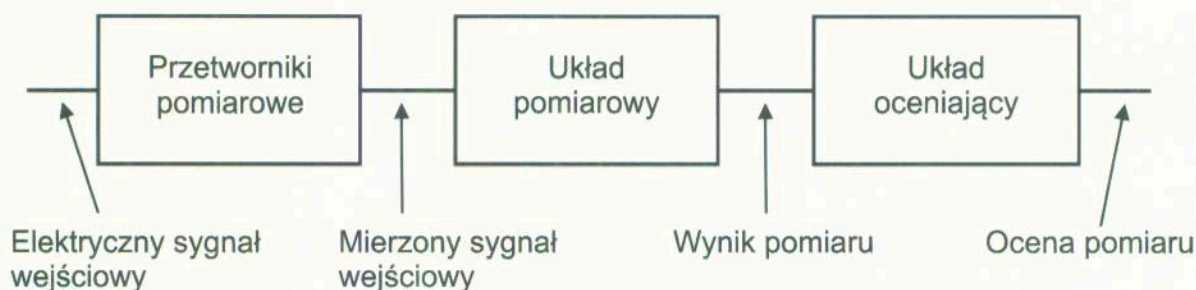
- sprawdzanie, czy 99,5% wartości średnich częstotliwości f mierzonych przez 10 sekund zawiera się w przedziale od 49,5 Hz do 50,5 Hz,
- sprawdzanie, czy 100% wartości średnich częstotliwości f mierzonych przez 10 sekund zawiera się w przedziale od 47 Hz do 52 Hz,
- sprawdzanie, czy 95% wartości średnich (wartości skutecznych napięcia U , wskaźnika długookresowego migotania światła P_{lt} , ilorazu składowej przeciwnej U_2 i zgodnej U_1 , określonych harmonicznych U_h) mierzonych przez 10 minut zawiera się w zadanym przedziale,
- sprawdzanie, czy uzyskana maksymalna wartość współczynnika THD_U jest mniejsza od zadanej wartości.

Stwierdzenie, że 95% wyników pomiarów zawiera się w zadanym przedziale wartości oznacza, że 5% wyników jest poza tym przedziałem (co w ujęciu tygodniowym odpowiada przedziałowi czasu 8,4 godziny). Jedynie współczynnik odkształcenia napięcia THD_U podlega dyskryminacji ze względu na wartość maksymalną. Wspomniany dokument pomija czy analizę statystyczną należy przeprowadzić w przekroju trójfazowym czy oddzielnie dla każdej fazy. Dlatego możliwe jest sprzeczne wnioskowanie dla tego samego zbioru zarejestrowanych wyników pomiarów polegające na stwierdzeniu zgodności z Rozporządzeniem w przekroju trójfazowym, przy jednoczesnym zakwestionowaniu w jednej lub dwóch fazach. Z tego samego dokumentu wynika, że warunkiem zachowania jakości określonej powyższym wnioskowaniem jest spełnienie dwóch warunków: odbiorca nie pobrał mocy większej od mocy umownej oraz nie przekroczył zadanej wartości współczynnika mocy $tg \varphi$.

W pracach [H2] i [H3] zwrócono uwagę na szereg rozbieżności i wątpliwości interpretacyjnych występujących w dokumentach normatywnych. Ich wyjaśnienie pozwala na uniknięcie niejednoznaczności przy posługiwaniu się określonymi definicjami i wartościami parametrów, które określają jakość energii elektrycznej w poszczególnych grupach przyłączeniowych. Występujące w normach niektóre sformułowania są niespójne z ogólnie przyjętą i używaną terminologią, na skutek czego mogą występować trudności interpretacyjne.

4.4. Analizatory jakości energii elektrycznej

Do oceny jakości energii elektrycznej wykorzystuje się przyrządy pomiarowe nazywane analizatorami jakości energii elektrycznej. Mierzone wielkości elektryczne mogą być dostępne bezpośrednio, jak to ma miejsce w systemach niskiego napięcia, lub mogą być dostępne pośrednio za pomocą przetworników pomiarowych. Przykładowy tor pomiarowy przedstawiono na rysunku 4.2.



Rys. 4.2 Tor pomiarowy do oceny jakości energii elektrycznej [5]

Zgodnie z dokumentem [5], przyrządy pomiarowe przeznaczone do oceny jakości energii elektrycznej podzielono na trzy klasy pomiarowe – klasa pomiarowa A, S i B.

„Klasa pomiarowa A jest stosowana w przypadku konieczności przeprowadzenia dokładnych pomiarów, np. do celów kontraktowych, gdy może być wymagane rozstrzygnięcie sporów, weryfikacji zgodności z postanowieniami norm, itp. Dowolne pomiary parametru przeprowadzone za pomocą dwóch różnych przyrządów, spełniających wymagania klasy A i mierzących te same sygnały, powinny dać zbieżne wyniki mieszczące się w określonym przedziale niepewności. W celu zagwarantowania zbieżności wyników pomiarów, wymaga się, aby dla przyrządu klasy A, dla każdego mierzonego parametru, charakterystyka pasma częstotliwości próbkowania była wystarczająca dla podanej niepewności pomiaru” [5].

O przynależności przyrządu pomiarowego do klasy A decyduje spełnienie określonych warunków zawartych w dokumentach [3-5] dotyczących zakresu zmienności wartości parametrów. Poniżej przedstawiono wybrane przykłady:

- podstawowym czasem pomiaru wartości określonego parametru jest przedział 10 okresów dla częstotliwości 50 Hz,
- niepewność czasu zegarowego nie powinna przekraczać ± 20 ms dla częstotliwości 50 Hz,
- niepewność pomiaru częstotliwości w przedziale zmian wielkości wpływających na wynik pomiaru nie powinna przekraczać $\pm 0,01$ Hz,
- niepewność pomiaru napięcia zasilającego w przedziale zmian wielkości wpływających nie powinna przekraczać $\pm 0,1\%$ wartości U_{din} , gdzie U_{din} jest wartością napięcia wyznaczoną na podstawie deklarowanego napięcia zasilającego,
- niepewność pomiaru przy ocenie wzrostu napięcia nie powinna przekraczać $\pm 0,2\%$ U_{din} .

Klasa pomiarowa S jest używana na potrzeby zastosowań statystycznych, takich jak analizy lub oceny jakości energii, także z ograniczoną liczbą parametrów. Mimo, że stosowane są takie same czasy pomiarów jak w przypadku klasy A, wymagania dotyczące przetwarzania danych w klasie S mniejsze.

Klasa pomiarowa B została określona w celu umożliwienia stosowania wielu istniejących przyrządów o przestarzałej konstrukcji.

4.4.1 Badania eksperymentalne

a) Badania analizatorów jakości energii elektrycznej

Pomiar oraz rejestracja parametrów służących do oceny jakości energii elektrycznej jest wykonywana z wykorzystaniem przyrządów pomiarowych zwanych analizatorami jakości energii elektrycznej. Obecnie jest produkowana szeroka gama przyrządów do pomiaru jakości energii elektrycznej, zakwalifikowanych odpowiednio do klasy pomiarowej A lub S.

Przy ocenie jakości energii elektrycznej wykorzystuje się zestaw wielkości normatywnych i uzupełniających. Wśród zestawu tych wielkości znajdują się miary zawartości harmonicznych w napięciu. Składową harmoniczną nazywa się każdą składową o częstotliwości będącej całkowitą krotnością częstotliwości podstawowej. Harmoniczne mogą być scharakteryzowane:

- indywidualnie, poprzez ich względną amplitudę u_h porównywaną do napięcia składowej podstawowej U_1 , gdzie h jest rzędem harmonicznej,
- łącznie, poprzez współczynnik odkształcenia harmonicznymi napięcia zasilającego THD,

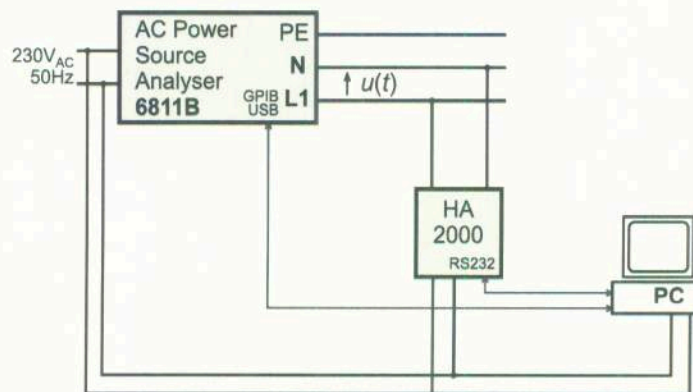
obliczonym zgodnie z zależnością (4.1):

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (u_h)^2}. \quad (4.1)$$

Współcześnie na rynku są dostępne mniej lub bardziej złożone przyrządy pomiarowe przeznaczone do oceny jakości energii elektrycznej. Poniżej przedstawiono wyniki badań wybranych analizatorów, które autor przeprowadził na zaprojektowanych stanowiskach pomiarowych.

Przedmiotem publikacji [H10] i [H11] jest analiza zagadnień dotyczących pomiaru harmonicznych z wykorzystaniem prostego analizatora, dla wybranych rodzajów sygnałów testowych. Do badań wykorzystano rozwinięcie w szereg Fouriera wybranych funkcji okresowych oraz przebiegu złożonego ze składowej o częstotliwości podstawowej i jednej lub dwóch składowych harmonicznych wyższego rzędu dla różnych wartości amplitudy. **W pracy [H11] przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych na stanowisku pomiarowym przedstawionym na rysunku 4.3, składającym się ze źródła sygnałów testowych napięcia $u(t)$ oraz badanego analizatora.** W omawianym układzie jako źródło napięcia wykorzystano generator 6811B firmy Agilent [6] sterowany programem AC-Source GUI [7]. Przyjęta konfiguracja układu pomiarowego umożliwiała bezpośrednie zadawanie napięcia $u(t)$. Zarejestrowane wyniki pomiarów porównywano z wartościami zadanymi – nastawami generatora 6811B.

Do generacji wymuszeń testowych wykorzystano możliwości generacji sygnałów za pomocą wspomnianego generatora. Zadawanie kształtu przebiegu czasowego napięcia $u(t)$ w tym generatorze polega na przygotowaniu 1024-elementowej tablicy unormowanych wartości opisujących przebieg czasowy wartości chwilowych, np. z wykorzystaniem programu Excel, a następnie ich przesłaniu do generatora. Zawartość przygotowanej tablicy odpowiada przebiegowi czasowemu za jeden okres. Umożliwia to zarówno generację wyższych harmonicznych, jak i interharmonicznych. Program AC-Source GUI umożliwia zadawanie sekwencyjnej zmiany kształtu przebiegu czasowego oraz jego wartości skutecznej.



Rys. 4.3 Schemat stanowiska pomiarowego do badania analizatora harmonicznych [H11]

Celem przeprowadzonych badań było wyznaczenie zależności błędu pomiaru danej harmonicznej δ od wartości skutecznej sygnału testowego podanego na wejście badanego analizatora. Wartości tych błędów wyznaczono zgodnie z zależnością (4.2):

$$\delta = \frac{U_p - U_o}{U_o}, \quad (4.2)$$

gdzie U_p oznacza wartość skuteczną harmonicznej uzyskaną z pomiarów a U_o wartość skuteczną sygnału odniesienia, nastawioną na generatorze.

Na rysunku 4.4 przedstawiono przykładowe wartości błędów względnych badanego analizatora dla wybranego sygnału testowego - okresowej funkcji prostokątnej, której rozwinięcie w szereg Fouriera dane jest zależnością (4.3):

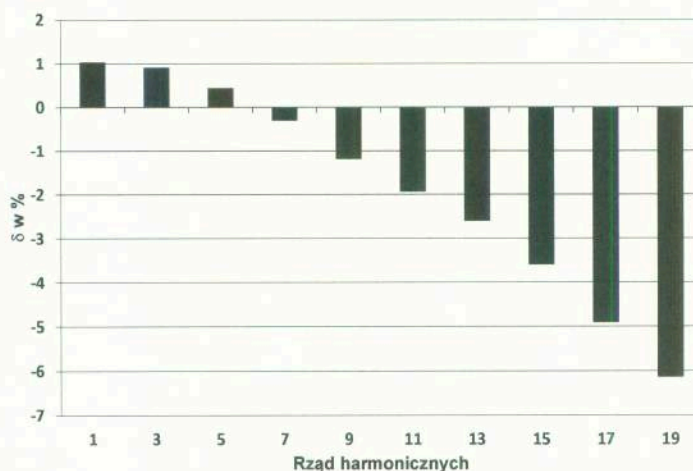
$$u(t) = \frac{4 \cdot U_m}{\pi} \left(\sin \omega_0 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_0 t + \dots \right), \quad (4.3)$$

gdzie U_m oznacza amplitudę sygnału.

W pracy [H10] przedstawiono uzyskane wartości błędów względnych δ , dla funkcji testujących o kształcie prostokąta i trójkąta, przy czym jako źródło sygnału testowego wykorzystano kalibrator 5500A firmy Fluke. We wzorze na wartość błędu δ jako wartość odniesienia U_o przyjęto wartość skuteczną napięcia wyznaczoną z rozwinięcia funkcji testowej w szereg Fouriera.

Wszystkie przeprowadzone pomiary przeprowadzono dziesięciokrotnie w celu oceny powtarzalności wyników pomiarów.

Analizując uzyskane wartości błędów można zaobserwować istotny wpływ wyboru funkcji testującej na wartości i rozkład uzyskanych błędów względnych. Wartości tych błędów wzrastają wraz ze wzrostem rzędu harmonicznym. Jest to związane z coraz mniejszą wartością skuteczną napięcia dla wyższych harmonicznym, jak również z rozdzielczością samego analizatora. Dla wyższych harmonicznym zmiana wartości skutecznej napięcia o 0,01 V skutkuje przyrostem błędu o kilka procent. Jest to szczególnie istotne dla sygnału wymuszającego o kształcie trójkąta, ponieważ wartości skuteczne napięcia maleją wraz z kwadratem rzędu harmonicznym.



Rys. 4.4 Wartości błędów względnych δ dla prostokątnego sygnału testowego

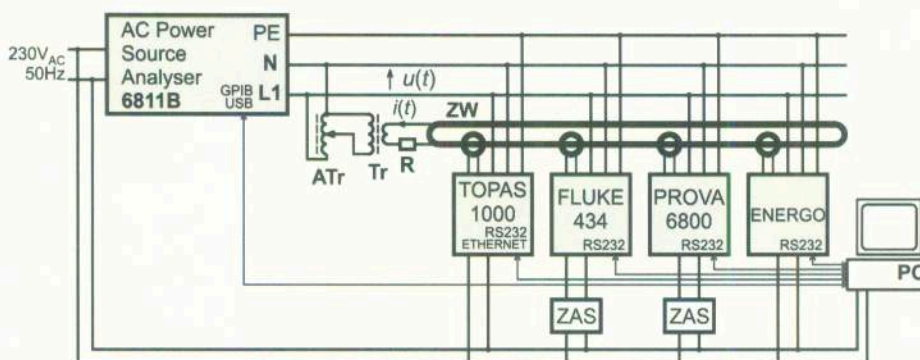
Harmoniczne mogą być oceniane łącznie, za pomocą współczynnika odkształcenia harmonicznymi napięcia zasilającego THD. Wartość THD może być odczytana z wyświetlacza badanego analizatora. Analizator jest wyposażony w oprogramowanie umożliwiające szczegółową analizę zarejestrowanych wyników pomiarów, pod nazwą Harmona-Link II. W programie tym, obok wielu parametrów, wyznaczana jest również wartość współczynnika THD. Dla konkretnego pomiaru można więc uzyskać dwie wartości THD, z wyświetlacza i z programu Harmona-Link II. Obydwie wartości tego współczynnika mogą się istotnie różnić, co wykazano podczas badań, ponieważ wartość wyświetlana na ekranie analizatora jest wyznaczana na podstawie 19 harmonicznym, natomiast wartość z oprogramowania na podstawie analizy 31 harmonicznym.

W pracach [H6] i [H8] przedstawiono wyniki badań porównawczych wybranych analizatorów jakości energii elektrycznej. Ponieważ badane analizatory są złożonymi przyrządami pomiarowymi, celowe są badania porównawcze weryfikujące zgodność działania tych mierników ze specyfikacją normatywną (w odniesieniu do miar normatywnych) lub ze specyfikacją producenta (w odniesieniu do miar uzupełniających). Normatywny okres rejestracji analizatorów jakości energii elektrycznej wynosi 10 minut. Badania są więc czasochłonne i istotny jest właściwy dobór sygnałów testowych.

W niektórych publikacjach występują opisy badań wyłącznie wybranych wielkości, stąd celowość przeprowadzonych badań porównawczych. Trójfazowy układ generacji sygnałów testowych do oceny analizy widmowej przedstawiono w pracy [8]. W pracach [9,10]

zaprezentowano układy do pomiarów wskaźników migotania światła oraz opisano normatywne i dodatkowe sygnały testowe. W pracy [11] zamieszczono porównanie uzyskanych wyników pomiaru wskaźników migotania światła, w których jako sygnał testowy wykorzystano napięcie w obwodzie zasilania pieca łukowego. Z kolei w pracy [12] zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych i przemysłowych (zasilanie pieca łukowego) grupy analizatorów, za pomocą których dokonano pomiaru współczynnika THD. Praca [13] omawia badania laboratoryjne pomiarów zakłóceń napięcia, natomiast w pracy [14] skoncentrowano się na pomiarze wielkości normatywnych. W publikacji [15] przedstawiono układ pomiarowy i procedurę kalibracji dla przyrządów cyfrowych, przeznaczonych do oceny jakości energii elektrycznej.

Dokonując badań porównawczych analizatorów, porównano wybrane cechy tych przyrządów, określające ich właściwości eksploatacyjne. Pomiary przeprowadzono na stanowisku pomiarowym, przedstawionym na rysunku 4.5, z wykorzystaniem przykładowych sygnałów testowych [H8].



Rys. 4.5 Schemat układu pomiarowego do badania analizatorów jakości energii elektrycznej [H8]

Porównania układów pomiarowo-rejestrujących przeznaczonych do oceny jakości energii elektrycznej można dokonać na kilku płaszczyznach, tzn. różne mogą być kryteria podziału. Przykładowo, analizatory jakości energii elektrycznej można podzielić według:

- wielkości podlegających pomiarom i rejestracji, właściwości metrologicznych, zgodności z zaleceniami normatywnymi i potrzebami diagnostycznymi,
- wymiarów geometrycznych,
- odporności na warunki klimatyczne,
- wizualizacji mierzonych parametrów w trybie on-line oraz sposobu komunikacji z komputerem,
- właściwości komputerowego oprogramowania wspomagającego pracę analizatora,
- sposobu zasilania: bezpośrednie lub pośrednie (zasilacz zewnętrzny), zakres zmienności napięcia zasilającego.

Na stanowisku pomiarowym przedstawionym na rys. 4.5 przeprowadzono badania: częstotliwości, wartości skutecznej napięcia, współczynnika THD napięcia oraz wskaźnika P_{st} . W omawianym układzie jako źródło napięcia wykorzystano generator 6811B. Obwód prądu testowego $i(t)$ zbudowano z kaskady autotransformatora ATr i transformatora Tr o przekładni 220V/12V, obciążonego szeregowo połączonymi rezystorem R i zwojnicą ZW. Zwojnica ZW jest 50 zwojową cewką powietrzną o średnicy umożliwiającej wpięcie przekładników cęgowych badanych układów pomiarowo-rejestrujących. Dzięki zastosowaniu zwojownicy zwiększono wartość prądu mierzonego przez przekładniki cęgowe. Zarejestrowane wyniki pomiarów poddano porównaniu z wartościami zadanymi, nastawami generatora 6811B, oraz z wynikami rejestracji pozostałymi analizatorami.

Do generacji wymuszeń testowych wykorzystano, opisane wcześniej, możliwości generatora 6811B. Sygnał napięciowy $U(t)$ skonstruowano poprzez zadawanie wartości następujących wielkości: czasu trwania stanu, wartości skutecznej składowej zmiennej, szybkości zmiany wartości skutecznej składowej zmiennej ze stanu poprzedniego do bieżącego, częstotliwości i szybkości jej zmiany ze stanu poprzedniego do bieżącego, składowej stałej, oraz fazy początkowej. W przypadku

wykorzystywania sygnałów modulowanych istnieje możliwość modulacji amplitudy AM i częstotliwości FM przebiegiem harmonicznym. Wówczas definiuje się częstotliwość sygnału modulującego, głębokość modulacji AM lub dewiację częstotliwości FM, przy czym zmiana wartości tych wielkości może być liniowa lub logarytmiczna [7]. W trakcie badań wykorzystano sygnały testowe, przeznaczone do oceny działania badanych analizatorów w celu pomiaru następujących wielkości: częstotliwości f , wartości skutecznej napięcia U , współczynnika THD oraz wskaźnika P_{st} . Ze względu na jednofazowość układu testowego nie zbadano pomiaru składowych symetrycznych kolejności zgodnej i przeciwnej. Zgodnie z dokumentem [1] analizie podlegają wyniki rejestrowane przez 10 minut, z wyjątkiem częstotliwości rejestrowanej przez 10 sekund. Z tego względu niezbędne jest generowanie sygnałów testowych umożliwiających rejestrację wyników pomiarów za pomocą analizatorów w stanie ustalonym. Taki sposób postępowania skutkuje jednakże wydłużeniem czasu badań, ponieważ dany sygnał testowy musi pozostawać w stanie ustalonym przez kilkadziesiąt minut. Celem przeprowadzonych badań było zgromadzenie danych umożliwiających ocenę zgodności działania badanych analizatorów z wymaganiami normatywnymi oraz dokonania porównania pomiędzy badanymi urządzeniami. Ponieważ celem przeprowadzonych pomiarów jest wykrycie ewentualnych niezgodności z wymaganiami normatywnymi lub różnic pomiędzy analizatorami, kolejne sekwencje sygnałów testowych podlegały modyfikacjom.

Na rysunkach 4.6- 4.10 zaprezentowano wyniki pomiarów zarejestrowanych jednym z badanych analizatorów [H8]. Wykresy te przedstawiono w orientacji pionowej, jeden wykres pod drugim, w celu łatwiejszej analizy korelacji czasowej pomiędzy analizowanymi wielkościami. Rysunek 4.6 przedstawia przebieg czasowy wartości skutecznych napięcia $U(t)$. Kolejne wartości skuteczne napięcia składają się z czterech lub pięciu okresów o skokowo narastających wartościach współczynnika odkształcenia THD. Odkształcenia napięcia generowano wyłącznie za pomocą zestawu harmonicznym, bez interharmonicznym. Literami A, B i C oznaczono fragmenty pomiarów wykonanych dla częstotliwości f różnych od 50 Hz. Wielokrotny pomiar dla tej samej wartości skutecznej napięcia U pozwolił na ocenę rozrzutu wyników pomiarów. Na rysunku 4.10 przedstawiono wartości względnych odchyłek standardowych wyników pomiarów napięć przedstawionych na rysunku 4.6. Analizując uzyskany rozrzut wyników pomiarów można postawić tezę, że jest on praktycznie pomijalnie mały. Zmienność częstotliwości f przedstawia rysunek 4.8. Fragment A o czasie trwania 1 godziny i fragment B o czasie trwania 4 godzin to częstotliwość $f = 51$ Hz, natomiast 4-godzinny fragment C to częstotliwość $f = 49$ Hz.

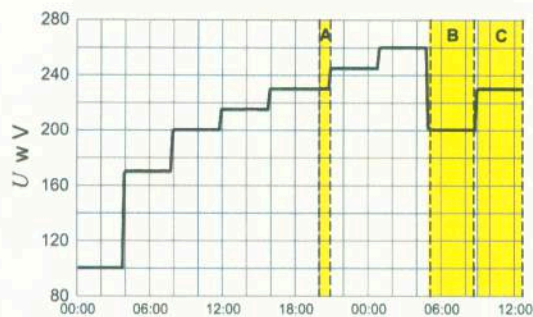
Przebieg czasowy z rysunku 4.7 przedstawia zmienność współczynnika THD zgodną z wymuszeniem testowym. Najbardziej złożony w analizie okazał się przebieg czasowy wskaźnika P_{st} zamieszczony na rysunku 4.9. Z teoretycznego punktu widzenia wynik pomiaru powinien wynosić zero (brak modulacji napięcia wejściowego). Jednakże w układach rzeczywistych wartość tego wskaźnika wynosi 0,01 lub więcej [16]. Na rysunku 4.9 występują „szpilki” wynikające ze zmiany wymuszenia. W celu poprawienia czytelności usunięto „szpilki” spowodowane zmianą wartości skutecznej, natomiast pozostawiono „szpilki” wywołane zmianą odkształcenia napięcia, przy stałej wartości skutecznej.

Obserwacja przebiegu czasowego P_{st} pozwala na następujące stwierdzenia:

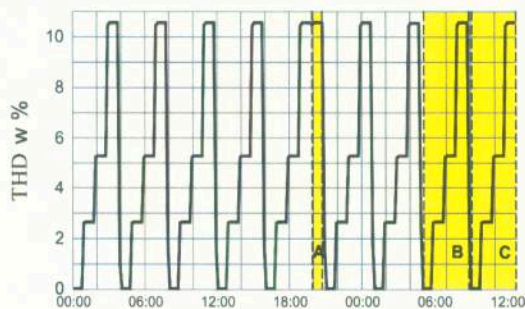
- występuje wpływ wartości skutecznej napięcia U na wynik pomiaru wskaźnika P_{st} dla $U < 170$ V,
- występuje wpływ wartości częstotliwości f na wynik pomiaru wskaźnika P_{st} – fragmenty A, B i C,
- dla $f = 49$ Hz (fragment C) wystąpił wpływ wartości współczynnika THD na wynik pomiaru wskaźnika P_{st} .

Istotne jest, że zgodnie z zapisami zawartymi w dokumencie [4] dopuszczalna wartość bezwzględnego błędu pomiaru wskaźnika $\Delta P_{st} = 0,05$. Tym samym wykryta zależność wyniku pomiaru wskaźnika P_{st} jest pomijalnie mała.

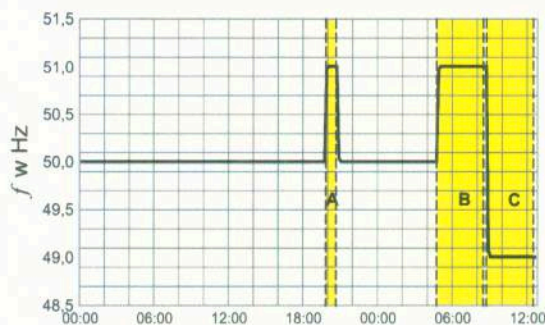
Wykorzystane w pomiarach zdeterminowane sygnały testowe umożliwiły ocenę zgodności działania analizatorów z wymogami normatywnymi, wykrywanie ewentualnych rozbieżności pomiędzy nimi oraz ocenę rozrzutu wyników pomiarów.



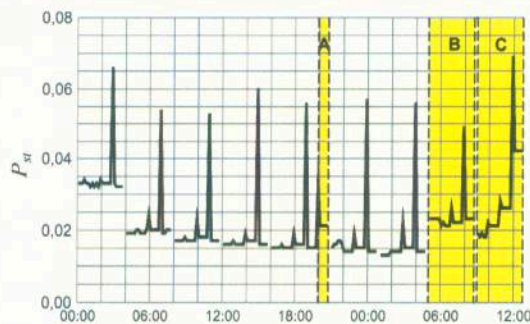
Rys. 4.6 Przebieg czasowy zarejestrowanych wartości skutecznych napięcia $U(t)$



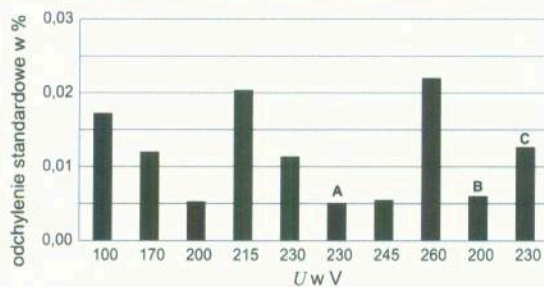
Rys. 4.7 Przebieg czasowy zarejestrowanych wartości współczynnika THD



Rys. 4.8 Przebieg czasowy zarejestrowanych wartości częstotliwości f



Rys. 4.9 Przebieg czasowy zarejestrowanych wartości wskaźnika P_{st}



Rys. 4.10 Rozrzut wyników pomiarów wartości skutecznej napięcia U

Kolejnym etapem badań był pomiar zawartości harmonicznych w napięciu, zgodnie z zaleceniami normatywnymi, z wykorzystaniem wybranych sygnałów testowych z zawartością interharmonicznych. **W pracy [H9] przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dotyczących analizy widmowej napięcia w sieci elektroenergetycznej.**

Jak już wspomniano, zawartość harmonicznych w napięciu może być określona widmem amplitudowym (czyli wartością poszczególnych harmonicznych) lub współczynnikiem odkształcenia THD. Specyfikacja normatywna obydwu wielkości, zawarta między innymi w dokumentach [1-3] oraz [5], określa warunki pomiaru bardziej rozbudowane niż określone w literaturze z podstaw elektrotechniki i teorii sygnałów np. [28], [29]. Na wiarygodność pomiaru zawartości harmonicznych w istotnym stopniu może wpływać implementacja sprzętowa toru sygnałowego (części analogowej i cyfrowej). Z tego względu celowe są badania porównawcze umożliwiające weryfikację prawidłowości pomiaru odkształcenia napięcia.

Dokument [3] określa pomiar harmonicznych i interharmonicznych w układzie przedstawionym na rysunku 4.11.

Częstotliwość graniczna filtru antyaliasingowego musi zapewniać niezniekształcenie harmonicznych podlegających dalszej analizie. Częstotliwość próbkowania powinna uwzględniać częstotliwość graniczną tego filtru. Wymagane jest prostokątne, zsynchronizowane ze zboczem napięcia, okno pomiarowe dla dyskretnej transformaty Fouriera DFT o czasie $T_w = 10/f$. Okno Hanninga powinno być używane tylko w przypadku „zgubienia” synchronizacji. Czas okna pomiarowego T_w narzuca najniższą częstotliwość wyniku obliczeń DFT oraz rozdzielczość częstotliwości Δf daną zależnością 4.4:

$$\Delta f = \frac{1}{T_w} = 5 \text{ Hz.} \quad (4.4)$$



Rys. 4.11 Ogólna struktura układu pomiarowego [H9]

Czas trwania okna pomiarowego T_w wpływa na wartość DFT. Niewłaściwie dobrany czas okna pomiarowego skutkować może trudno porównywalnymi wynikami. Wygładzanie – filtracja dolnoprzepustowa odbywa się z wykorzystaniem filtru dolnoprzepustowego pierwszego rzędu o stałej czasowej równej 1,5 s. Ocena zgodności z wymaganiami polega na porównaniu z obowiązującymi wartościami granicznymi. Wartości te, dla poszczególnych harmonicznych jak również współczynnika THD, są zawarte w dokumencie [1].

W procesie pomiaru harmonicznycy i interharmonicznycy, zgodnie z dokumentem [3], wyznacza się eksperymentalnie szereg współczynników charakteryzujących zniekształcenia badanych przebiegów harmonicznycy:

- składowa C_k – k -ty elementarny wynik DFT o częstotliwości f_k będącej całkowitą wielokrotnością rozdzielczości częstotliwości $f_k = k \cdot \Delta f$,
- wartość skuteczna harmonicznej h -tego rzędu określana jest na podstawie zależności 4.5:

$$G_h = C_{k=10h}, \quad (4.5)$$

- wartość skuteczna k -tej interharmonicznej określana jest na podstawie zależności 4.6:

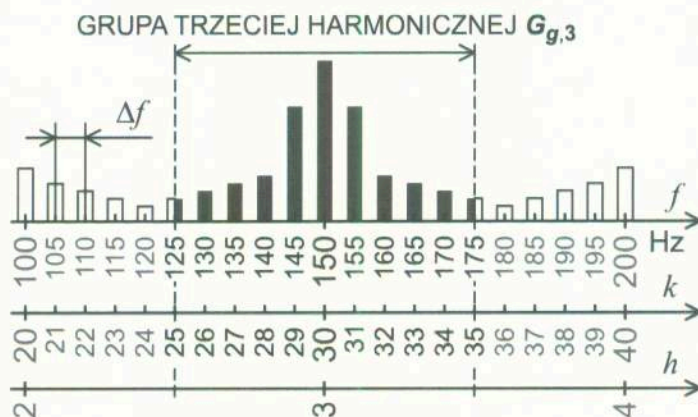
$$G_{i,k} = C_{k=10h+i}, \quad (4.6)$$

gdzie $i \neq 0$.

Dokument [3] podaje znormalizowaną metodę wyznaczania wartości skutecznej grupy i podgrupy harmonicznej oraz wartości skutecznej grupy interharmonicznej i wartości skutecznej środkowej grupy interharmonicznej. Grupa harmonicznej h -tego rzędu określana jest na podstawie zależności składającej się z h -tej harmonicznej i pięciu sąsiednich interharmonicznycy, zgodnie z zależnością 4.7:

$$G_{g,h}^2 = \frac{C_{k=10h-5}^2}{2} + \sum_{i=-4}^4 C_{k=10h+i}^2 + \frac{C_{k=10h+5}^2}{2}. \quad (4.7)$$

Na rysunku 4.12 przedstawiono graficzną interpretację grupy harmonicznej dla $h = 3$.

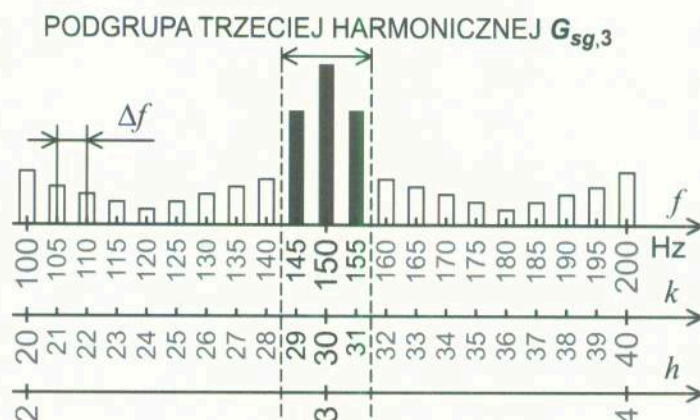


Rys. 4.12 Graficzna interpretacja grupy harmonicznej dla $h = 3$

Podgrupa harmonicznej h -tego rzędu określona jest na podstawie zależności składającej się z h -tej harmonicznej i najbliższych sąsiednich interharmonicznycy, zgodnie z zależnością 4.8:

$$G_{sg,h}^2 = \sum_{i=-1}^1 C_{k=10h+i}^2. \quad (4.8)$$

Na rysunku 4.13 przedstawiono graficzną interpretację podgrupy harmonicznej dla $h = 3$.



Rys. 4.13 Graficzna interpretacja podgrupy harmoniczej dla $h = 3$

Współczynnik odkształcenia harmonicznymi THDS, wyznaczony z wykorzystaniem podgrupowania, dany jest zależnością 4.9:

$$THDS = \sqrt{\sum_{h=2}^H \left(\frac{G_{sg,h}}{G_{sg,1}} \right)^2}, \quad (4.9)$$

gdzie: H oznacza liczbę składników sumowania, przy czym najczęściej przyjmuje się 40.

Opis harmonicznymi w systemach elektroenergetycznych, proces ich powstawania oraz skutki ich występowania można znaleźć m. in. w pracy [17].

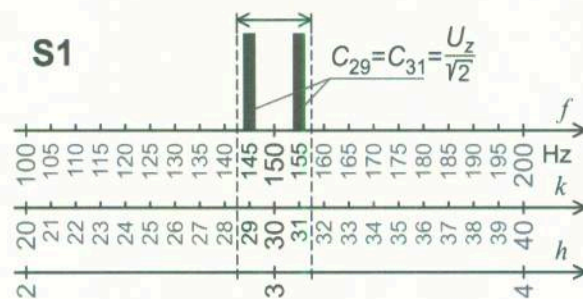
Do badania toru analizy widmowej analizatora jakości energii elektrycznej wykorzystano metodologię oceny grupowania i podgrupowania harmonicznymi. Prawdopodobność grupowania i podgrupowania harmonicznymi można ocenić odpowiednio składając harmoniczne i interharmoniczne. W tabeli 4.1 zestawiono przykładowe sygnały testowe S0, S1, S2, S5, S6 dla trzeciej harmoniczej [H9].

Tabela 4.1 Zestawienie przykładowych sygnałów testowych dla $h = 3$

Składowa	S0	S1	S2	S5	S6
C_{24}	0	0	0	0	$U_z/\sqrt{2}$
C_{25}	0	0	0	U_z	0
C_{28}	0	0	$U_z/\sqrt{2}$	0	0
C_{29}	0	$U_z/\sqrt{2}$	0	0	0
C_{30}	U_z	0	0	0	0
C_{31}	0	$U_z/\sqrt{2}$	0	0	0
C_{32}	0	0	$U_z/\sqrt{2}$	0	0
C_{35}	0	0	0	U_z	0
C_{36}	0	0	0	0	$U_z/\sqrt{2}$
G_3	U_z	0	0	0	0
$G_{sg,3}$	U_z	U_z	0	0	0
$G_{g,3}$	U_z	U_z	U_z	U_z	0

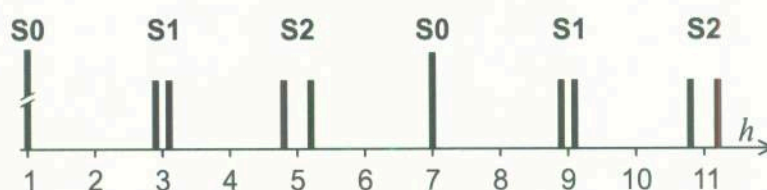
Dobrano takie wartości skuteczne składowych C_k , aby wartość skuteczna harmoniczej, grupy i podgrupy harmoniczej wynosiła U_z . Ocena grupowania i podgrupowania polega na porównaniu wyników pomiarów z wartościami „teoretycznymi” z tabeli 4.1. Jeżeli w dokumentacji analizatora jakości brak opisu pomiaru harmonicznymi i współczynnika THD, na podstawie sygnałów testowych można zidentyfikować czy stosowane jest grupowanie czy podgrupowanie.

Na rysunku 4.14 przedstawiono przykładowy sygnał testowy S1 dla trzeciej harmoniczej.



Rys. 4.14 Sygnał testowy S1 dla $k = 29$ i $k = 31$

Badania przeprowadzono w układzie pomiarowym zaprezentowanym na rysunku 4.5. Oceny pomiaru harmonicznego napięcia dokonano z wykorzystaniem następujących sygnałów: S0 dla $h = 1$ i $h = 7$, S1 dla $h = 3$ i $h = 9$ oraz S2 dla $h = 5$ i $h = 11$. Na rysunku 4.15 przedstawiono wypadkowe widmo amplitudowe sygnału testowego [H9].



Rys. 4.15 Wypadkowe widmo amplitudowe sygnału testowego

W tabeli 4.2 zestawiono przewidywane wyniki pomiarów harmonicznego w zależności od algorytmu pomiaru. Wartość skuteczną harmonicznego h -tego rzędu G_h , grupę harmoniczną $G_{g,h}$ i podgrupę harmoniczną $G_{sg,h}$ wyrażono względnie w odniesieniu do wartości skutecznej pierwszej harmonicznego G_1 .

Tabela 4.2 Zestawienie wartości „teoretycznych” i wyników pomiarów harmonicznego [H9]

Rząd harmonicznego h	1	3	5	7	9	11
G_h – wartość skuteczna w %	100	0	0	5	0	0
$G_{g,h}$ – grupa harmonicznego w %	100	5	5	5	5	5
$G_{sg,h}$ – podgrupa harmonicznego w %	100	5	0	5	5	0
Wynik pomiaru A1 w %	100,0	1,0	0,3	4,9	0,9	0,3
Wynik pomiaru A2 w %	100,0	5,0	5,0	4,9	4,8	4,8

Ze względu na wyniki oceny analizatory jakości energii elektrycznej renomowanych firm oznaczono umownie jako A1 i A2. W dwóch ostatnich wierszach zamieszczono wyniki pomiarów zarejestrowanych z wykorzystaniem badanych analizatorów. Różnica pomiędzy wynikami pomiarów analizatorem A1 i wartościami „teoretycznymi” wskazuje na brak zgodności z dokumentem [3]. Wykryta różnica spowodowana jest niezgodnością czasu okna pomiarowego T_{wA1} badanego analizatora z aktualnymi wymaganiami normatywnymi, $T_{wA1} = 320 \text{ ms} \neq 200 \text{ ms}$. Ocena pomiaru harmonicznego tego analizatora wymagałaby zmiany rozdzielczości częstotliwościowej $\Delta f = 50/16 = 3 \frac{1}{8} \text{ Hz}$ sygnałów testowych. W wyniku zmiany wartości rozdzielczości Δf uległaby zmianie liczba interharmonicznego pomiędzy sąsiednimi harmonicznymi z 9 do 15. Na podstawie wyników pomiarów, zestawionych w tabeli 4.2, nie stwierdzono wykorzystania algorytmów grupowania i podgrupowania, jak również zgodności wartości skutecznych harmonicznego dla analizatora A1. Porównanie wyników pomiarów analizatorem A2 i wartości teoretycznych grup harmonicznego sugeruje zastosowanie algorytmu grupowania.

b) Wykorzystanie analizatorów jakości energii elektrycznej w diagnostyce stanu sieci elektroenergetycznej

Dokonując oceny jakości energii elektrycznej w danym punkcie sieci elektroenergetycznej analizuje się wartości zarejestrowanych parametrów z wykorzystaniem analizatorów jakości energii elektrycznej. Wybór i definicje miar jakości powinny być skojarzone z potrzebami diagnostycznymi, możliwościami implementacyjnymi oraz przydatnością w praktycznym wykorzystaniu, o czym mowa jest między innymi w [18]. Zgodnie z dokumentem [1], w celu oceny jakości energii elektrycznej, wyniki pomiarów powinny być gromadzone za okres jednego tygodnia. Jednakże w celu poszukiwania przyczyn zakłóceń w sieci elektroenergetycznej lub określenia odbiorników niespokojnych, czas pomiaru i rejestracji może być krótszy i dostosowany do potrzeb diagnostycznych. Integralną częścią analizatorów jakości jest komputerowe oprogramowanie wspomagające, pozwalające na wyznaczenie wartości, które podlegają pomiarom. Oprogramowanie to pomaga ponadto w ocenie czy wartość zmierzonego parametru jest zawarta w dopuszczalnych granicach określonych w dokumencie [1].

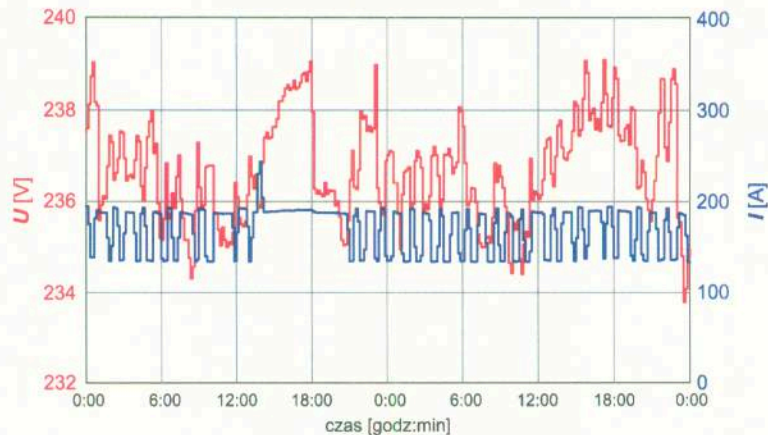
W praktyce dokonuje się pomiarów zmienności napięć i prądów, ponieważ wymaga tego ocena jakości energii elektrycznej, zgodnie z dokumentem [1], w celu wykrywania uciążliwych odbiorników energii elektrycznej, jak również w celu diagnostyki stanu linii zasilających sieci elektroenergetycznej. Pomiar i ocena zmienności napięcia w sieci elektroenergetycznej jest złożonym problemem pomiarowym. Do najczęściej stosowanych miar zmienności należy zaliczyć: wskaźnik krótkookresowego migotania światła P_{st} , wskaźniki wahań napięcia, wartości maksymalne i minimalne napięcie, oraz wskaźnik ΔV_{10} .

Wskaźnik P_{st} i jego pomiar specyfikuje dokument [4]. Do pomiaru wartości tego wskaźnika służy miernik migotania światła o potocznej nazwie flickermetr. Struktura toru sygnałowego flickermetru odwzorowuje kaskadę: źródło światła – oko – mózg. Wartość wyznaczonego wskaźnika P_{st} opisuje uciążliwość migotania światła wywołanego zmiennością napięcia w określonych warunkach pomiarowych. Wartość ta zależy od częstotliwości, amplitudy i kształtu obwiedni napięcia. Przy stałej częstotliwości i kształcie obwiedni wartość wskaźnika P_{st} jest w przybliżeniu liniowo zależna od amplitudy obwiedni. Rozwinięcie tego zagadnienia można znaleźć w pracach [19-20].

Wskaźniki wahań napięcia, amplituda i częstość wahań napięcia są miarami zmian wartości skutecznej napięcia [21-22]. Do pewnej wartości granicznej częstotliwości amplituda i częstość wahań bezpośrednio opisują amplitudę i częstotliwość obwiedni napięcia. Ocena uciążliwości migotania światła, określona na podstawie tych parametrów, jest bardziej złożona niż w przypadku wskaźnika P_{st} . Natomiast możliwa jest jej ocena dla różnych sytuacji pomiarowych, np. wybranych źródeł światła. Wskaźnik ΔV_{10} jest miarą uciążliwości wahań stosowaną w krajach Dalekiego Wschodu. Szczegółowy opis tego wskaźnika można znaleźć, między innymi, w pracy [23].

W publikacjach [H5] i [H7] zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych na rzeczywistych obiektach, z wykorzystaniem wybranego analizatora jakości energii elektrycznej. Analiza uzyskanych wyników może być pomocna, między innymi, dla ustalenia uciążliwego odbiorcy lub urządzeń powodujących zniekształcenia sygnału w sieci energetycznej.

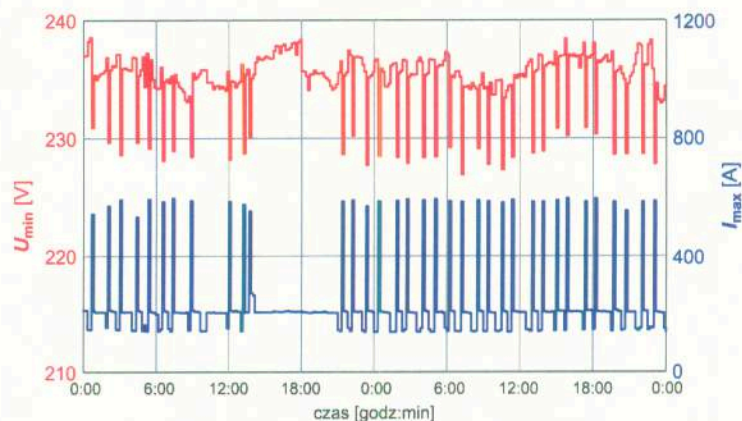
Na rysunku 4.16 zaprezentowano czasowe przebiegi wartości skutecznych napięcia U i prądu fazowego I , które zostały zarejestrowane w wybranym punkcie sieci elektroenergetycznej.



Rys. 4.16 Przebiegi czasowe wartości skutecznych napięcia U oraz prądu I

Dane przedstawione na rysunku 4.16 obrazują uśrednione wartości skuteczne napięć i prądów w przedziale 10-minutowym. Z tak skonstruowanego wykresu nie można uzyskać szczegółowych informacji na temat zmienności tych wartości w przedziale uśredniania. Sposób prezentacji danych pomiarowych przedstawionych na rysunku 4.16 nie jest optymalny. Trudno na jego podstawie określić związek pomiędzy zmiennością napięcia i prądu. Ze względu na szerokie możliwości pomiarowe zastosowanego analizatora, często w praktyce pomiarowej wykorzystuje się wartości maksymalne U_{\max} i minimalne U_{\min} wartości skutecznej napięcia, oraz wartości maksymalne I_{\max} i minimalne I_{\min} wartości skutecznej prądu. Wartości te podlegają pomiarom i rejestracji w zastosowanym analizatorze jakości energii elektrycznej i w wielu przypadkach stanowią efektywną diagnostycznie i łatwą w użyciu miarę określania występowania odbiorników niespokojnych.

Na rysunku 4.17 przedstawiono przebiegi czasowe minimalnej wartości napięcia oraz maksymalnej wartości prądu.



Rys. 4.17 Przebiegi czasowe minimalnej wartości napięcia U_{\min} oraz maksymalnej wartości prądu I_{\max}

Obserwując przedstawione na rysunku 4.17 dane pomiarowe można stwierdzić, że zawierają one więcej informacji diagnostycznych. Analizując ten wykres można zauważyć korelację czasową pomiędzy przetężeniem prądu oraz zaniżeniem napięcia. W praktyce taki sposób wnioskowania często umożliwia zidentyfikowanie odbiorników, które mogą być przyczyną występowania zaobserwowanych zaburzeń.

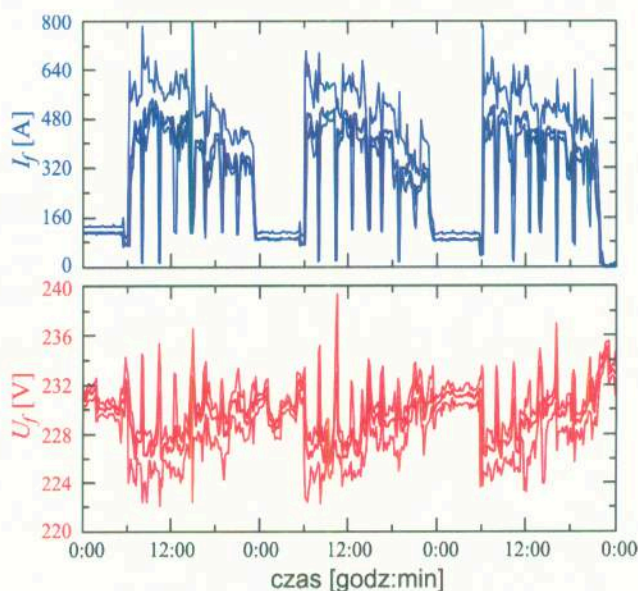
Jak już wspomniano, w praktyce pomiarowej wykorzystuje się wartości maksymalne U_{\max} i minimalne U_{\min} wartości skutecznych napięcia, które opisują zmiany za pomocą największej i najmniejszej wartości w okresie dyskryminacji. W przypadkach oddziaływania jednego dominującego odbiornika jest to efektywna diagnostycznie i łatwa w użyciu miara. Podobnie pożyteczne z diagnostycznego punktu widzenia są wartości maksymalna I_{\max} i minimalna I_{\min}

wartości skutecznej prądu. Wartości te podlegają pomiarom i rejestracji w większości analizatorów jakości energii elektrycznej. Bardzo często analiza zarejestrowanych danych przez obserwatora bazuje na jego wiedzy i doświadczeniu. W praktyce pomiarowej stosowane są również inne miary, np. określa się przebiegi czasowe różnic napięć ($U_{\max} - U_{\min}$) i prądów ($I_{\max} - I_{\min}$).

W pracach [H13-H14] zaprezentowano wykorzystanie omówionych powyżej miar, dla zarejestrowanych wartości zmian napięć i prądów, w poszukiwaniu odbiorników niespokojnych w sieci elektroenergetycznej. Pod pojęciem odbiornika niespokojnego należy rozumieć odbiornik elektryczny charakteryzujący się powtarzającymi się nagłymi zmianami obciążenia [21]. Poszukiwanie odbiornika niespokojnego w sieci elektroenergetycznej przedstawiono z wykorzystaniem wyników pomiarów zarejestrowanych w wybranych punktach obwodu niskiego napięcia.

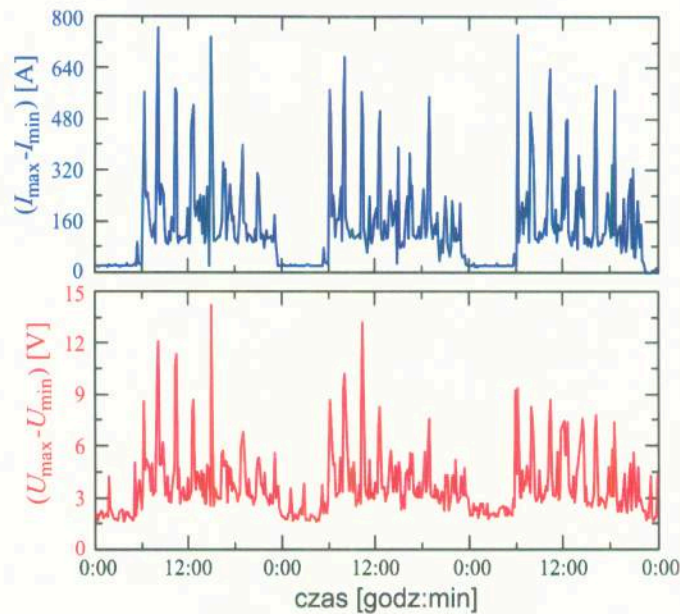
Uwzględniając możliwości pomiarowe wykorzystanego analizatora do analizy zarejestrowanych wyników pomiarów, określono przebiegi czasowe i wzajemne zależności następujących wielkości: wskaźnika P_{st} oraz różnic wartości maksymalnych i minimalnych napięć i prądów, wyznaczone w okresach 10-minutowych. W celu normatywnej i prawnej oceny jakości energii elektrycznej badania należy przeprowadzić w czasie co najmniej 1 tygodnia. Jeżeli natomiast badania mają na celu np. poszukiwanie odbiornika niespokojnego, czas pomiaru i rejestracji może być krótszy i dostosowany do potrzeb diagnostycznych. Mając na względzie czytelność przedstawionych danych, na przebiegach czasowych wyniki pomiarów przedstawiono w skróconych przedziałach czasu. Ze względu na stwierdzoną symetrię fazową zamieszczono wykresy dla jednej, wybranej fazy.

Na rysunku 4.18 przedstawiono przebiegi czasowe wartości maksymalnych, średnich i minimalnych prądu fazowego I_f oraz napięcia U_f .



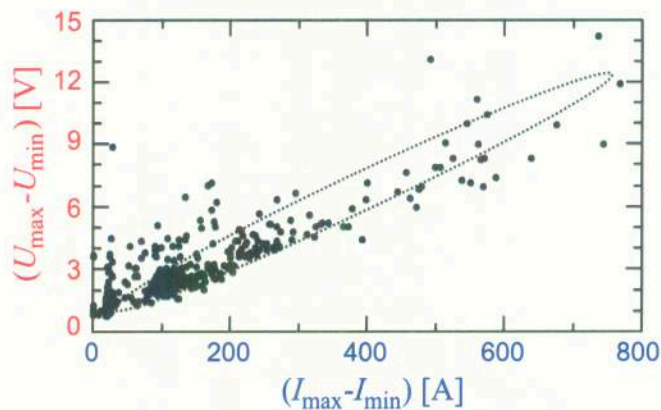
Rys. 4.18 Przebiegi czasowe wartości maksymalnych, średnich i minimalnych napięcia U_f i prądu fazowego I_f

Sposób prezentacji danych pomiarowych przedstawionych na rysunku 4.18 nie jest optymalny. Ze względu na małą czytelność trudno określić związek pomiędzy zmiennością napięcia i prądu. Łatwiejsze w analizie są przebiegi czasowe różnic napięć ($U_{\max} - U_{\min}$) i prądów ($I_{\max} - I_{\min}$). Na rysunku 4.19 zamieszczono przebiegi czasowe różnic napięcia i prądu dla danych pomiarowych z rysunku 4.18.



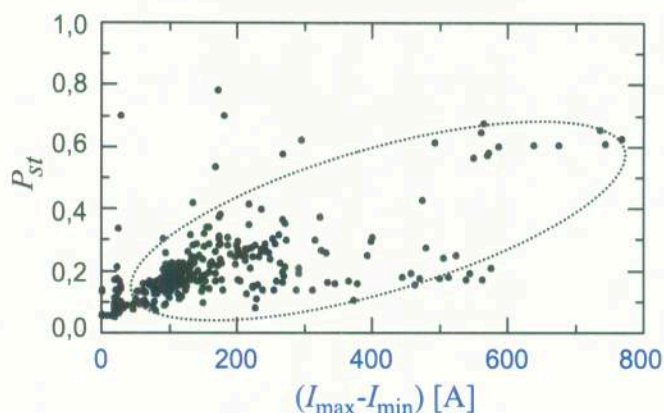
Rys. 4.19 Przebiegi czasowe różnic napięcia ($U_{\max}-U_{\min}$) i prądu fazowego ($I_{\max}-I_{\min}$)

Porównanie przebiegów czasowych różnic napięcia i prądu wskazuje na ich podobieństwo. Zmniejszeniu zmienności prądu towarzyszy zmniejszenie zmienności napięcia. Analogiczna sytuacja występuje w przypadku wzrostu zmienności prądu, któremu towarzyszy wzrost zmienności napięcia. Związek pomiędzy zmiennością napięcia i prądu można ocenić na podstawie charakterystyki ($U_{\max}-U_{\min}$) = $f(I_{\max}-I_{\min})$. Na rysunku 4.20 przedstawiono taką charakterystykę dla zarejestrowanych wartości napięcia i prądu badanego odbiornika.



Rys. 4.20 Zależność ($U_{\max}-U_{\min}$) = $f(I_{\max}-I_{\min})$ badanego odbiornika

Charakterystyka z rysunku 4.20 wskazuje na występowanie korelacji pomiędzy zmiennością różnic napięcia i prądu. Dlatego też, z dużym prawdopodobieństwem, można wnioskować, że odbiornik którego prąd zarejestrowano, jest źródłem wahań napięcia. Oznacza to, że poszukiwanie niespokojnego odbiornika zakończyło się jego wytypowaniem. Dopełnieniem zależności z rysunku 4.20 jest, przedstawiona na rysunku 4.21, charakterystyka $P_{st} = f(I_{\max}-I_{\min})$.



Rys. 4.21 Zależność $P_{st} = f(I_{\max} - I_{\min})$ badanego odbiornika

Przedstawione na rysunkach 4.20 i 4.21 punkty pomiarowe wskazują na istnienie zależności funkcyjnej pomiędzy tymi zmiennymi. Korelacja pomiędzy wskaźnikiem P_{st} a różnicą prądów ($I_{\max} - I_{\min}$) z rysunku 4.21 jest mniejsza od korelacji pomiędzy wartościami różnic napięcia i prądu z rysunku 4.20. Może to być spowodowane tym, że wskaźnik P_{st} zależy nie tylko od amplitudy, ale również od częstotliwości i kształtu obwiedni napięcia. Ponieważ wartość wskaźnika P_{st} nie przekracza 0,8, wytypowany odbiornik nie jest odbiornikiem uciążliwym.

Dokonując pomiarów w sieci elektroenergetycznej, dla różnorodnych odbiorników, nie zawsze można sformułować tak jednoznaczne wnioski. Dla kolejnego rozpatrywanego odbiornika rozłożenie punktów pomiarowych, na charakterystykach ($U_{\max} - U_{\min}$) = $f(I_{\max} - I_{\min})$ i $P_{st} = f(I_{\max} - I_{\min})$, czyli analogicznych jak na rysunkach 4.20 i 4.21, nie pozwala na jednoznaczne potwierdzenie lub wykluczenie występowania związku pomiędzy zmiennością napięcia i prądu. Zgromadzone wyniki pomiarów nie pozwalają jednoznacznie wytypować odbiornika niespokojnego. **Dla innych analizowanych przypadków stwierdzono, że badane odbiorniki nie są dominującymi źródłami zmienności napięcia. Szczegółowe rozważania zawarto w publikacji [H13].**

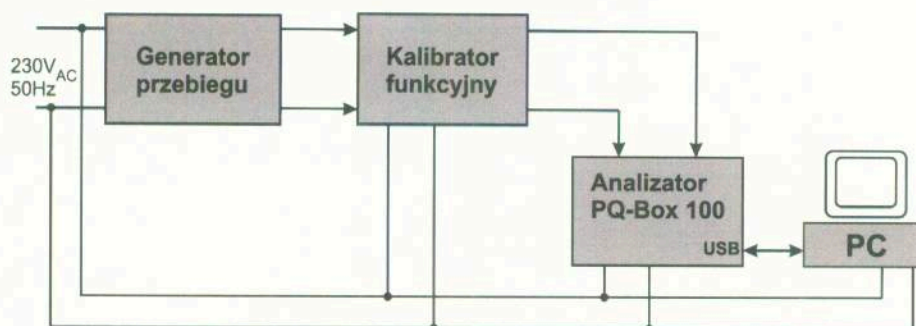
Wartości maksymalne i minimalne napięć i prądów są dostępne w wynikach pomiarów większości analizatorów jakości energii elektrycznej. Jednakże są one zazwyczaj pomijane w procesie poszukiwania odbiorników niespokojnych. Na podstawie analizy przykładowych wyników pomiarów wykazano ich przydatność w diagnostyce stanu sieci elektroenergetycznej. W połączeniu ze wskaźnikiem P_{st} wartości maksymalne i minimalne napięć i prądów są pożytecznym narzędziem diagnostycznym.

c) Ocena właściwości metrologicznych analizatorów jakości energii elektrycznej

Zarejestrowane, z wykorzystaniem analizatorów jakości energii elektrycznej, wyniki pomiarów umożliwiają diagnostykę stanu sieci elektroenergetycznej, m.in. poprzez wykrywanie odbiorników niespokojnych.

Bardzo istotną kwestią jest ocena niedokładności wyników pomiarów uzyskanych przy wykorzystaniu badanego analizatora. Końcowy wynik pomiaru jest kompletny tylko wówczas, kiedy zawiera zarówno wartość wielkości mierzonej, jak i niepewność wyniku pomiaru związaną z tą wartością. Przyjmuje się, zgodnie z dokumentem [24], że niepewność pomiaru jest to nieujemny parametr charakteryzujący rozproszenie wartości wielkości przyporządkowany do menzurandu, obliczony na podstawie uzyskanej informacji.

W pracy [H18] zaprezentowano stanowisko pomiarowe do oceny właściwości metrologicznych analizatora jakości energii elektrycznej. Badania wybranego analizatora PQ-Box 100 przeprowadzono na skonstruowanym stanowisku pomiarowym, które przedstawiono na rysunku 4.22.



Rys. 4.22 Schemat stanowiska pomiarowego do badań analizatora jakości energii elektrycznej PQ-Box 100 [H18]

W przedstawionym na rysunku 4.22 stanowisku pomiarowym, generator przebiegu służy do zadawania określonego kształtu przebiegu i steruje pracą kalibratora funkcyjnego. Kalibrator generuje sygnał, o kształcie zadanym z generatora, o określonych wartościach skutecznych. Wykorzystany w pomiarach generator przebiegu został wywzorcowany w Głównym Urzędzie Miar, gdzie zweryfikowano jego dokładność.

Podana w świadectwie wzorcowania wartość granicznego błędu odtwarzania częstotliwości, łącznie z niepewnością jego wyznaczenia, dla przebiegu trójkątnego wynosi $(198 \pm 68) \cdot 10^{-6}$ Hz. Kalibrator funkcyjny generuje sygnał napięciowy o zadanym z generatora funkcyjnego kształcie. Wartość błędu granicznego dla rozpatrywanych wartości sygnału wynosi $\Delta = (0,042\% W_w + 0,0005\% W_z)$, gdzie W_w oznacza wartość wskazaną, natomiast W_z oznacza wartość zakresu pomiarowego. Tak wygenerowany sygnał jest następnie podawany na badany analizator. Ze względu na czasochłonność przeprowadzanych badań poddano weryfikacji wybrane wielkości: wartość skuteczną napięcia oraz rozkład składowych harmoniczných.

Połączenie analizatora z komputerem klasy PC, poprzez interfejs USB 2.0, umożliwia przesłanie uzyskanych danych pomiarowych. Dołączone do analizatora oprogramowanie umożliwia szczegółową analizę zarejestrowanych wyników pomiarów, ich obróbkę statystyczną jak również wizualizację w postaci wykresów. Stanowisko pomiarowe zbudowano w Pracowni Pomiarów Wielkości Elektrycznych Okręgowego Urzędu Miar w Poznaniu.

Jedną z funkcji testowych był sygnał okresowy $u(t)$, który można przedstawić w postaci trygonometrycznego szeregu Fouriera, zgodnie z ogólnie znanymi zależnościami. Reprezentacja sygnału $u(t)$, w rozwinięciu funkcji w szereg Fouriera, odwołuje się do nieskończonej dużej ilości składników. W praktyce jest to niemożliwe. Dlatego wykorzystuje się skończoną liczbę składników. W praktyce pomiarowej układów elektroenergetycznych wykorzystuje się zazwyczaj pierwsze kilkadziesiąt składników. W rozpatrywanym przypadku pomiary ograniczono do harmoniczných 50-tego rzędu.

Wszystkie pomiary przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych, dla wartości temperatury otoczenia zawartej w przedziale $(22,5-23,8)$ °C, oraz wilgotności względnej w przedziale $(37,3-46,7)\%$. Pomiary wykonano dla napięć we wszystkich trzech fazach, jednakże ze względu na powtarzalność wyników, zaprezentowano wyniki dla wybranej fazy L_1 .

We wszystkich pomiarach błędy pomiaru wyznaczono jako różnicę pomiędzy wynikiem pomiaru a wartością wielkości odniesienia.

Do oceny dokładności pomiaru wartości skutecznej napięcia oraz zawartości harmoniczných wybranym analizatorem jakości energii elektrycznej wykorzystano różne sygnały testowe.

Badane analizatory jakości energii elektrycznej wzorcuje się dwuetapowo.

Pierwszy etap polega na wzorcowaniu miernika sygnałem odkształconym o określonej wartości skutecznej. Drugi etap polega na wzorcowaniu miernika sygnałem sinusoidalnym o tej samej wartości skutecznej co sygnał odkształcony. W trakcie badań wykorzystano dwa rodzaje przebiegów odkształconych:

- a) przebieg o kształcie trójkątnym, którego rozwinięcie w szereg Fouriera przedstawiono zależnością (4.10):

$$u(t) = \frac{8U_m}{\pi^2} \left(\sin \omega_0 t - \frac{1}{3^2} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5^2} \sin 5\omega_0 t - \dots \right) \quad (4.10)$$

gdzie: U_m oznacza amplitudę sygnału, $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$, T – okres sygnału testowego,

- b) przebieg złożony z sumy dwóch sygnałów: harmonicznego podstawowego oraz wybranej wyższej harmonicznej.

Wzorcowanie miernika sygnałem sinusoidalnym, dla którego wartość oczekiwana zawartości harmonicznym wynosi zero, miało na celu sprawdzenie tzw. „zera” analizatora.

Dla przebiegu odkształconego złożonego z sumy dwóch sygnałów, harmonicznego podstawowego oraz wybranej wyższej harmonicznej, harmoniczna podstawowa miała wartość skuteczną równą 230 V, natomiast wyższe harmoniczne wartość 18,4 V, co stanowi 8% wartości harmonicznego podstawowego. Wartość skuteczna takiego sygnału testowego wynosiła 230,7 V.

W tabeli 4.3 zaprezentowano przykładowe wyniki badań dla sygnału testowego, odkształconego jedną składową harmoniczną. Podobnie jak w przypadku pozostałych sygnałów wymuszających, ze względu na powtarzalność wyników przedstawione wyniki odnoszą się do fazy L_1 analizatora.

W tabeli 4.4 przedstawiono zestawienie wyników pomiarów badanego analizatora dla wymuszenia sygnałem sinusoidalnym dla fazy L_1 .

W tabeli 4.5 zestawiono uzyskane przykładowe wyniki pomiarów, procentowej zawartości poszczególnych, nieparzystych harmonicznym w trójkątnym sygnale wymuszającym. Obliczona, z wyrażenia (4.10), wartość współczynnika odkształcenia wynosi $THD = 12,114\%$. Pomiar przedstawiono dla wybranej fazy L_1 .

Wszystkie pomiary były wielokrotnie powtarzane, minimum 10-krotnie, celem określenia występowania rozrzutu wyników pomiarów oraz wyeliminowania ewentualnych błędów nadmiernych.

Tabela 4.3 Zestawienie wyników pomiarów dla sygnału z jedną składową harmoniczną

Rząd harmonicznego	Pomiar THD			
	Sygnał odkształcony jedną składową harmoniczną			
	Wynik pomiaru	Wartość wielkości odniesienia	Błąd pomiaru	Niepewność pomiaru
	%	%	%	%
2	7,99	8,00	-0,01	0,19
3	7,99	8,00	-0,01	
4	7,99	8,00	-0,01	
5	7,99	8,00	-0,01	

Tabela 4.4 Zestawienie wyników pomiarów dla sygnału sinusoidalnego

Pomiar napięcia przemiennego dla $f = 50$ Hz			
Wynik pomiaru	Wartość wielkości odniesienia	Błąd pomiaru	Niepewność pomiaru
V	V	V	V
229,97	230,00	-0,03	0,15
399,91	400,00	-0,09	0,21

Tabela 4.5 Zestawienie wyników pomiarów dla trójkątnej funkcji testującej

Rząd harmonicznej	Procentowa zawartość poszczególnych harmonicznych w sygnale odkształconym o THD = 12,114 %			
	Wynik pomiaru	Wartość wielkości odniesienia	Błąd pomiaru	Niepewność pomiaru
	%	%	%	%
3	11,124	11,110	0,014	0,014
5	3,997	4,000	-0,003	
7	2,083	2,041	0,042	
9	1,232	1,235	-0,003	
11	0,842	0,827	0,015	
13	0,602	0,592	0,010	
15	0,471	0,444	0,027	
17	0,345	0,346	-0,001	
19	0,290	0,277	0,013	
21	0,237	0,227	0,010	
23	0,208	0,189	0,019	
25	0,164	0,160	0,004	
27	0,154	0,137	0,017	
29	0,134	0,119	0,015	
31	0,127	0,104	0,023	
33	0,092	0,092	0,000	
35	0,089	0,082	0,007	
37	0,079	0,073	0,006	
39	0,081	0,066	0,015	
41	0,065	0,060	0,005	
43	0,064	0,054	0,010	
45	0,058	0,049	0,009	
47	0,060	0,045	0,015	
49	0,046	0,042	0,004	

Aby wyznaczyć wartość niepewności wyniku pomiaru, należy prawidłowo określić równanie pomiaru, które uwzględnia wszystkie czynniki mające wpływ na końcowy wynik pomiaru [H18].

W przypadku wzorcowania analizatora sygnałem odkształconym, o określonej wartości skutecznej, równanie na błąd pomiaru $\Delta_{THD\ odk}$ przyjmuje postać daną zależnością (4.11):

$$\Delta_{THD\ odk} = W_{zmTHD\ odk} - W_{odnTHD\ odk} + \delta\Delta_r\ odk - \delta D\ odk \quad (4.11)$$

gdzie:

- $W_{zmTHD\ odk}$ – wartość wielkości zmierzona przez badany analizator,
- $W_{odnTHD\ odk}$ – wartość odniesienia dla określonego sygnału,
- $\delta\Delta_r\ odk$ – wartość związana z rozdzielczością wskazań przyrządu pomiarowego w trakcie pomiaru sygnału odkształconego,
- $\delta D\ odk$ – wartość związana z błędem granicznym wzorca odniesienia w trakcie pomiaru sygnału odkształconego.

Dla wzorcowania analizatora sygnałem sinusoidalnym, o tej samej wartości skutecznej co sygnał odkształcony, równanie na błąd pomiaru $\Delta_{THD\ sin}$ przyjmuje postać daną zależnością (4.12):

$$\Delta_{THD\ sin} = W_{zmTHD\ sin} - W_{odnTHD\ sin} + \delta\Delta_r\ sin - \delta D\ sin \quad (4.12)$$

gdzie:

- $W_{zmTHD\ sin}$ – wartość wielkości zmierzona przez badany analizator,

- $W_{odnTHD\ sin} = 0$ – wartość odniesienia,
- $\delta\Delta_r\ sin$ – wartość związana z rozdzielczością wskazań przyrządu pomiarowego w trakcie pomiaru sygnału sinusoidalnego,
- δD_{sin} – wartość związana z błędem granicznym wzorca odniesienia w trakcie pomiaru sygnału sinusoidalnego.

Jak już wspomniano, w końcowym zapisie wyniku pomiaru powinna się znaleźć zarówno wartość wielkości mierzonej, jak również niepewność wyniku pomiaru związana z tą wartością. Zazwyczaj niepewność pomiaru obejmuje wiele składników. Wartości niektórych z nich mogą być wyznaczone metodą typu A wyznaczania niepewności pomiaru, która polega na wyznaczaniu wartości składowej niepewności pomiaru za pomocą statystycznej analizy wartości wielkości zmierzonych otrzymanych w zdefiniowanych warunkach pomiaru. Inne składniki, których wartości mogą być wyznaczone metodą typu B wyznaczania niepewności wyniku pomiaru, mogą być scharakteryzowane za pomocą odchylenia standardowego, wyznaczonego na podstawie funkcji gęstości prawdopodobieństwa opartej na doświadczeniu lub innej informacji. Szczegółowy opis wyznaczania niepewności, metodą typu A lub B, można znaleźć w dokumencie [25].

Złożona niepewność standardowa pomiaru $u_c(\Delta_{THD\ odk})$ wyznaczenia błędu pomiaru analizatora dla sygnałów odkształconych dana jest zależnością (4.13):

$$u_c^2(\Delta_{THD\ odk}) = c_1^2 \cdot u^2(W_{zmTHD\ odk} - W_{odnTHD\ odk}) + c_2^2 u^2(\delta\Delta_r\ odk) + c_3^2 u^2(W_{zmTHD\ sin} - W_{odnTHD\ sin}) + c_4^2 u^2(\delta\Delta_r\ sin) + c_5^2 u^2(\delta D) \quad (4.13)$$

gdzie: $c_1 - c_5$ oznaczają współczynniki wrażliwości, natomiast δD oznacza wartość związaną z błędem granicznym wzorca odniesienia, która jest wyznaczona jako suma geometryczna wartości δD_{odk} i δD_{sin} .

Wartości współczynników wrażliwości wyznaczono jako pochodne cząstkowe funkcji pomiaru $\Delta_{THD\ odk}$ względem poszczególnych zmiennych danych równaniem (4.13). Po przeprowadzeniu obliczeń otrzymujemy wyrażenie na wartość niepewności złożonej u_c :

$$u_c^2(\Delta_{THD\ odk}) = u^2(W_{zmTHD\ odk} - W_{odnTHD\ odk}) + u^2(\delta\Delta_r\ odk) + u^2(W_{zmTHD\ sin} - W_{odnTHD\ sin}) + u^2(\delta\Delta_r\ sin) + u^2(\delta D). \quad (4.14)$$

Przy szacowaniu niepewności pomiaru badanego analizatora należy uwzględnić następujące czynniki:

- a) niepewność standardową pomiaru różnicy wyniku pomiaru i wartości wielkości odniesienia dla sygnału odkształconego $W_{zmTHD\ odk} - W_{odnTHD\ odk}$,
- b) niepewność standardową pomiaru związaną z rozdzielczością wskazań analizatora w trakcie pomiaru sygnału odkształconego $\delta\Delta_r\ odk$,
- c) niepewność standardową pomiaru różnicy wyniku pomiaru i wartości wielkości odniesienia dla sygnału sinusoidalnego $W_{zmTHD\ sin} - W_{odnTHD\ sin} = W_{zmTHD\ sin}$,

Ponieważ wartość oczekiwana $W_{odnTHD\ sin}$ wynosi zero, dokonuje się randomizacji na zmienną losową e_{THD} z niepewnością pomiaru $u(e_{THD})$. Niepewność standardowa pomiaru, przy założeniu rozkładu normalnego, zgodnie z prawem propagacji niepewności, dana jest zależnością (4.15):

$$u(e_{THD}) = \sqrt{(W_{zmTHD\ sin})^2 + u^2(W_{zmTHD\ sin})}. \quad (4.15)$$

Tak wyznaczona niepewność związana jest z niestabilnością wskazań badanego analizatora dla sygnału sinusoidalnego. Złożona niepewność standardowa pomiaru Δ_{THD} sygnału odkształconego wyraża się zależnością (4.16):

$$u_c^2(\Delta_{THD\ odk}) = u^2(W_{zmTHD\ odk} - W_{odnTHD\ odk}) + u^2(\delta\Delta_r\ odk) + u^2(e_{THD}) + u^2(\delta\Delta_r\ sin) + u^2(\delta D). \quad (4.16)$$

- d) niepewność standardową pomiaru związaną z rozdzielczością wskazań analizatora w trakcie pomiaru sygnału sinusoidalnego $\delta\Delta_r \sin$,
- e) niepewność standardową związaną z błędem granicznym wzorca odniesienia δD .

Niepewności standardowe związane z rozdzielczością wskazań analizatora, przy założeniu rozkładu prostokątnego, można wyznaczyć ze wzoru (4.17):

$$u(\delta\Delta_r) = \frac{\Delta_r}{2\sqrt{3}} \quad (4.17)$$

gdzie Δ_r określa rozdzielczość badanego analizatora.

Wszystkie wymienione powyżej składowe niepewności rozszerzonej zostały wyznaczone i uwzględnione w końcowym budżecie niepewności. Niepewność rozszerzona wyniku pomiaru została wyznaczona zgodnie z zaleceniami zawartymi w dokumencie [26]. Jej wartość wyznaczono na podstawie prawa propagacji niepewności, przy czym w analizie uwzględniono rozrzut wyników pomiarów, rozdzielczość badanego analizatora, jak również niedokładności kalibratora oraz generatora przebiegu.

Podane wartości niepewności stanowią niepewność rozszerzoną przy założonym poziomie ufności równym $\approx 95\%$ i współczynniku rozszerzenia $k = 2$. W opracowanym budżecie niepewności uwzględniono wszystkie zidentyfikowane niepewności składowe oszacowane metodą typu A i B, również te, których wartość oszacowano jako zero. Taka informacja oznacza, że określony składnik niepewności był analizowany, a przyjęcie jego zerowej wartości jest uzasadnione warunkami pomiaru [27].

W tabeli 4.6 przedstawiono przykładowy budżet niepewności dla przebiegu złożonego z sumy dwóch sygnałów: harmonicznej podstawowej oraz wybranej wyższej harmonicznej [H18].

Tabela 4.6 Budżet niepewności dla sygnału z wybraną wyższą harmoniczną

Symbol wielkości	Estymata wielkości	Niepewność standardowa $u(x_i)$		Rozkład prawdopodob.	Współczynnik wrażliwości c_i		Udział w niepewności złożonej	
$W_{zm} - W_{odn}$	-0,01	0,00019	V	Normalny	1	V	0,00019	V
e_{THD}	0	0,08960	V	Normalny	1	V	0,08960	V
$\delta\Delta_r \text{ odk}$	0	0,00029	V	Prostokątny	1	V	0,00029	V
$\delta\Delta_r \sin$	0	0,00029	V	Prostokątny	1	V	0,00029	V
δD	0	0,06731	V	Prostokątny	-1	V	-0,06731	V
Δ_{THD}	-0,01	-		-	-		0,11207	V

Uwzględnienie wszystkich składowych w budżecie niepewności pozwoliło na określenie, które niepewności składowe mają największy udział w niepewności złożonej, a zatem wskazanie kierunków doskonalenia pomiaru, które będą prowadzić do istotnego zmniejszenia niepewności złożonej.

Celem zapewnienia spójności pomiarowej wyniki wzorcowania zostały odniesione do wzorców odniesienia Głównego Urzędu Miar (GUM):

- jednostki miary napięcia elektrycznego poprzez zastosowanie kalibratorów,
- państwowego wzorca jednostek miar czasu i częstotliwości utrzymywanego w GUM poprzez zastosowanie generatora częstotliwości.

Na przedstawionym na rysunku 4.22 stanowisku pomiarowym, przeznaczonym do badań układu pomiarowo-rozliczeniowego, przeprowadzono szereg badań wartości skutecznej napięcia oraz współczynnika odkształcenia THD z wykorzystaniem wybranych sygnałów testowych. Przeprowadzona analiza metrologiczna uzyskanych wyników pomiarów pozwoliła na sformułowanie wniosków końcowych. Wyznaczone wartości niepewności pomiarów dla przykładowych sygnałów testowych analizatora PQ-Box 100 są mniejsze niż wartości niepewności deklarowane przez producenta, określone w dokumencie [5].

4.5 Pomiary ilości energii elektrycznej

Poza oceną jakości energii elektrycznej, o której była mowa w rozdziale 4.4, istotnym problemem metrologicznym jest pomiar ilości energii elektrycznej, w szczególności prądu stałego. Liczniki energii elektrycznej prądu stałego są od szeregu lat wykorzystywane w polskiej sieci trakcji kolejowej. Na potrzeby legalizacji tego typu przyrządów pomiarowych zaprojektowano i wykonano, unikatowe w skali kraju, stanowisko pomiarowe, umożliwiające generację napięć stałych, o odpowiednio dużej dokładności, w zakresie do 4 kV. Stanowisko to zbudowano w Pracowni Pomiarów Wielkości Elektrycznych Okręgowego Urzędu Miar w Poznaniu. W dalszej części pracy zaprezentowano szczegółowo budowę tego stanowiska, określono jego parametry metrologiczne oraz wyniki pomiarów uzyskanych w trakcie procesu kalibracji licznej populacji liczników energii elektrycznej prądu stałego w warunkach laboratorium akredytowanego.

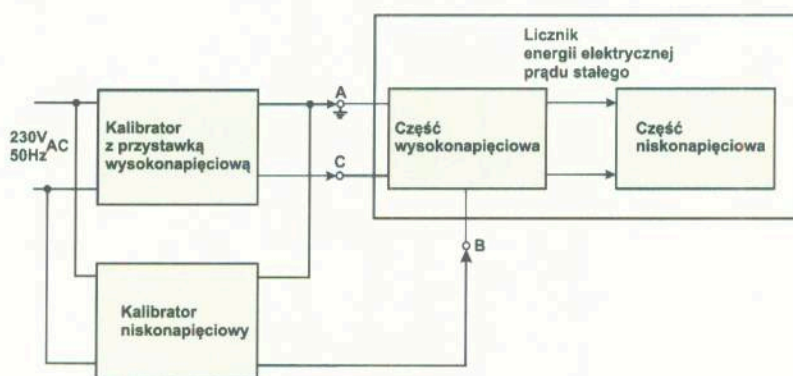
W publikacjach [H12] oraz [H15 - H17] przedstawiono charakterystykę metrologiczną stanowiska pomiarowego do badań liczników energii elektrycznej prądu stałego oraz wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych na reprezentatywnej populacji liczników.

Ocena parametrów metrologicznych urządzeń służących do rozliczeń pomiędzy podmiotami gospodarczymi jest złożonym problemem pomiarowym. W praktyce często przyjmuje się, że odpowiednią formą takiej oceny jest wzorcowanie. Uzyskane w wyniku wzorcowania wartości, powiązane z niepewnością ich wyznaczenia, powinny być określone w konkretnych punktach pomiarowych. Punkty te powinny być zgodne z odpowiednimi normami i innymi dokumentami uzupełniającymi.

4.5.1 Stanowisko pomiarowe

Konstrukcja badanych liczników energii elektrycznej prądu stałego, opisana między innymi w pracy [H12], wymusiła przygotowanie stanowiska pomiarowego, które umożliwi wzorcowanie licznika przy zasilaniu napięciem stałym w zakresie od 0 V do 4 kV oraz sygnałem z bocznika prądowego odpowiadającego przepływowi prądu o wartościach od kilkudziesięciu do ponad tysiąca amperów. Wartości napięć zasilających wymusiły odpowiednią konfigurację aparatury na tym stanowisku, która gwarantuje zarówno właściwą separację galwaniczną poszczególnych podzespołów stanowiska, jak również jego bezpieczną obsługę.

Na rysunku 4.23 przedstawiono schemat opracowanego stanowiska pomiarowego do badań liczników energii elektrycznej prądu stałego [H12].



Rys. 4.23 Schemat stanowiska pomiarowego do badań liczników energii elektrycznej prądu stałego

Opracowane stanowisko pomiarowe składa się z dwóch wielofunkcyjnych kalibratorów oraz skonstruowanej na potrzeby tego stanowiska specjalizowanej przystawki wysokonapięciowej umożliwiającej generację napięć stałych w żądanym zakresie do 4 kV, z odpowiednią precyzją.

Sygnał pomiędzy zaciskami A i B odpowiada, w układzie rzeczywistym, spadkowi napięcia na zewnętrznym boczniku pomiarowym, natomiast sygnał pomiędzy zaciskami A i C jest napięciem odpowiadającym w rzeczywistości wysokiemu napięciu w trakcji elektrycznej. W opracowanym

układzie pomiarowym napięcie U_{AB} osiąga niewielkie wartości, dzięki czemu zminimalizowano koszty izolacji pomiędzy wewnętrznymi blokami układu pomiarowego. Zacisk C znajduje się na wysokim potencjale ujemnym - 4 kV. Dzięki odpowiedniej konfiguracji i izolacji tego zacisku zagwarantowano bezpieczną obsługę całego stanowiska pomiarowego.

Kalibrator razem z przystawką wysokonapięciową pracuje przy niskich wartościach prądu obciążenia licznikiem rzędu 10 mA. Drugi z kalibratorów odpowiada za generację sygnału proporcjonalnego do spadku napięcia na boczniku pomiarowym. Pracuje on przy wartościach napięć wyjściowych do 200 mV. Odpowiada to w rzeczywistości przepływowi przez bocznik pomiarowy prądu o wartościach rzędu tysiąca i więcej amperów.

Opracowany układ gwarantuje odpowiednie parametry metrologiczne, minimalny pobór energii z sieci zasilającej, co jest istotne z punktu widzenia kosztów przeprowadzanych badań, jak również właściwą separację podzespołów.

Wyznaczona względna wartość niepewności rozszerzonej tej części stanowiska pomiarowego wynosi 0,06% i jest określona w aktualnym świadectwie wzorcowania.

W pierwotnej wersji tego stanowiska, opisaney w pracy [H12], pomiaru czasu dokonywano stoperem mechanicznym. Charakterystykę metrologiczną stopera w postaci wzoru na bezwzględny błąd pomiaru czasu $\Delta\tau$, wyrażonego w sekundach, przedstawia zależność (4.18)

$$\Delta\tau = \left[\left(\frac{\Delta_d \pm U_d}{86400} \right) \cdot \tau + (\Delta_k \pm U_k) \right], \quad (4.18)$$

gdzie: Δ_d oznacza błąd długoterminowy, U_d niepewność rozszerzoną błędów długoterminowych, Δ_k błąd krótkoterminowy, U_k niepewność rozszerzoną błędów krótkoterminowych, natomiast τ mierzony przedział czasu w sekundach. Dla konkretnego stopera mechanicznego zależność (4.18) przyjmuje postać:

$$\Delta\tau = \left[\left(\frac{-2,5 \pm 1,7}{86400} \right) \cdot \tau + 0,11 \right]. \quad (4.19)$$

Błąd długoterminowy dla stopera tego typu związany jest głównie z naciągami sprężyny, natomiast błąd krótkoterminowy ma związek przede wszystkim z czasem reakcji osoby przeprowadzającej pomiary. Przy pomiarze czasu rzędu 10 minut tym stoperem uzyskano wartość niepewności rozszerzonej na poziomie 0,11 s.

Do obecnej wersji stanowiska pomiarowego, opisanego w pracy [H15], wprowadzono istotne modyfikacje, które pozwoliły na znaczne zmniejszenie niedokładności pomiaru energii. Wprowadzone zmiany pozwoliły na wyeliminowanie błędów związanych z czasem reakcji osoby przeprowadzającej pomiary. Wysokie napięcie, uzyskiwane z kalibratora z przystawką wysokonapięciową, jest podłączane przez cały czas trwania pomiarów do badanego licznika. W trakcie normalnej pracy licznika w sieci trakcyjnej kolejowej prąd obciążenia mierzony jest przez licznik pośrednio, poprzez spadek napięcia na zewnętrznym boczniku. Na stanowisku pomiarowym symulacja prądu obciążenia mierzonego przez licznik realizowana jest przez kalibrator niskonapięciowy, którego sygnał wyjściowy symuluje spadek napięcia z bocznika. Kalibrator ten jest wyposażony w precyzyjny generator interwału czasu (GIC) o zakresie nastaw (1–85) min. Generuje on sygnał przez ściśle określony interwał czasu, standardowo jest to 15 minut. Konstrukcja tego kalibratora umożliwia generację impulsu o możliwie największej stromości narastania, co jest równoznaczne z jak najkrótszym czasem załączenia i wyłączenia tego impulsu.

Kalibrator łącznie z GIC wywzorcowano w celu wyznaczenia niedokładności pomiaru czasu i napięcia. Badania kalibratora, w części pracującej jako GIC, przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych przy temperaturze otoczenia (23,0–24,3) °C. Wyniki wzorcowania zostały odniesione do państwowego wzorca jednostek miar czasu i częstotliwości przez zastosowanie, jako przyrządu kontrolnego, częstościomierza-czasomierza cyfrowego typu Agilent 53132A, synchronizowanego częstotliwością wzorcową z państwowego wzorca jednostek miar czasu i częstotliwości. Niepewność pomiaru została wyznaczona zgodnie z zaleceniami zawartymi w dokumencie [26].

Błąd odtwarzania interwału czasu $\Delta\tau$ przez GIC w zakresie (1–15) minut określony jest zależnością (4.20)

$$\Delta\tau = 5,18 \text{ ms} - y \cdot \tau_n \pm 0,02 \text{ ms}, \quad (4.20)$$

gdzie τ_n jest wartością nominalną interwału czasu nastawioną na GIC, a wartość parametru y wyznaczona podczas wzorcowania wyniosła $(-5,8 \pm 0,1) \cdot 10^{-5}$ s/s. Błąd odtwarzania wyznaczono jako różnicę pomiędzy wartością umownie prawdziwą odtwarzanej wielkości a jej wartością nominalną.

W tabeli 4.7 przedstawiono wyniki wzorcowania GIC kalibratora niskonapięciowego wraz z wyznaczonymi wartościami błędu odtwarzania i niepewności wyniku pomiaru dla interwału czasowego równego 15 minut [H15].

Tabela 4.7 Wyniki wzorcowania GIC kalibratora niskonapięciowego

Zakres 5100 s			
Wartość nastawiona	Wartość poprawna	Błąd odtwarzania $\Delta\tau$	Niepewność pomiaru U
s	s	s	s
900	900,0574	0,0574	0,0021

W tabeli 4.8 przedstawiono wyniki wzorcowania kalibratora niskonapięciowego dla szerokiego spektrum napięć [H15]. Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych przy temperaturze otoczenia (21,9-23,0) °C. Wyniki wzorcowania zostały odniesione do państwowego wzorca jednostki miary napięcia elektrycznego stałego przez zastosowanie multimetru cyfrowego. Niepewność pomiaru została wyznaczona zgodnie z zaleceniami zawartymi w dokumencie [26].

Tabela 4.8 Wyniki wzorcowania kalibratora niskonapięciowego

Zakres 2500000 μV			
Wartość wskazana W_w	Wartość poprawna W_p	Błąd wskazania Δ	Niepewność pomiaru U
μV	μV	μV	μV
-3000	-3003,1	3,1	0,6
-5000	-5001,6	1,5	0,6
-6000	-6002,3	2,3	0,6
-10000	-10002,2	2,2	0,6
-15000	-15002,2	2,2	0,7
-25000	-25000,7	0,7	0,7
-30000	-30001,6	1,6	0,7
-48000	-48002,2	2,2	0,8
-50000	-50001,2	1,2	0,8
-60000	-60001,8	1,8	0,8
-80000	-80000,9	0,9	1,0
-90000	-90000,0	0,0	1,1
-100000	-99998,0	-2,0	1,1
-150000	-149996,8	-3,2	1,5

Błąd wskazania Δ ma postać $\Delta = W_w - W_p$, gdzie wartość wskazana W_w jest nastawą wskazaną na kalibratorze, natomiast wartość poprawną W_p odczytano z multimetru wzorcowego. Obydwa kalibratory pracują z wewnętrzną pętlą sprzężenia zwrotnego, dzięki czemu sygnały wyjściowe z obydwóch urządzeń są wystarczająco stabilne w czasie. **Dzięki opisanym modyfikacjom wartość niepewności rozszerzonej pomiaru, w porównaniu z metodą pomiaru stoperem mechanicznym, jest ponad pięćdziesięciokrotnie mniejsza.**

4.5.2 Badania eksperymentalne

Na stanowisku pomiarowym, przedstawionym na rysunku 4.23, przeprowadzono wzorcowanie liczników energii elektrycznej prądu stałego LE 3000plus. W trakcie tego procesu porównywano wskazania badanego licznika z nastawami na przyrządach kontrolnych. Odczyty były dokonywane z wyświetlacza licznika z rozdzielczością 0,1 kWh. Ponieważ rejestracja energii pobranej i oddanej do sieci, w przypadku liczników zamontowanych w elektrowozach, odbywa się standardowo w okresach 15-minutowych, celowe i zasadne jest, aby czas pomiaru parametrów licznika wynosił również 15 minut.

W celu weryfikacji stanowiska pomiarowego odnośnie do powtarzalności wyników pomiarów, przeprowadzono badania tego samego egzemplarza licznika przez kilka osób. Celem badań było określenie czy uzyskane wyniki pomiarów są powtarzalne, czy różnią się istotnie, tzn. weryfikowano hipotezę zerową $H_0: \mu_1 = \mu_2$ wobec hipotezy alternatywnej $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$, gdzie μ_1 i μ_2 oznaczają wartości oczekiwane dwóch populacji o liczebnościach odpowiednio n_1 i n_2 . W zależności od informacji o tych populacjach stosuje się określony typ testu. Ponieważ każda z osób powtarzała pomiary wielokrotnie zastosowano statystykę t , która ma rozkład Studenta o liczbie stopni swobody $m = n_1 + n_2 - 1$ danej zależnością (4.21)

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{n_1 \cdot S_1^2 + n_2 \cdot S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}, \quad (4.21)$$

gdzie: wartości średnie \bar{x}_1 i \bar{x}_2 określone są według znanych zależności dla populacji o liczebnościach odpowiednio n_1 i n_2 , natomiast wariancje S^2 wyznacza się z zależności (4.22)

$$S_1^2 = \frac{1}{n_1} \cdot \sum_{i=1}^{n_1} (x_i - \bar{x}_1)^2, \quad S_2^2 = \frac{1}{n_2} \cdot \sum_{i=1}^{n_2} (x_i - \bar{x}_2)^2. \quad (4.22)$$

Z tablic rozkładu Studenta odczytuje się wartości krytyczne $t_{\alpha m}$ dla założonego poziomu istotności α i liczby stopni swobody $m = n_1 + n_2 - 1$. Obliczoną na podstawie wyników z próby wartość statystyki, daną zależnością (4.21), porównuje się z wartością krytyczną badając, czy znalazła się w obszarze krytycznym czy nie. Podjęta w związku z tym decyzja o odrzuceniu hipotezy zerowej H_0 , albo braku podstaw do jej odrzucenia, jest równoznaczna z tym, że różnicę między średnimi z prób uznaje się za istotną lub nieistotną.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że wartości statystyk t znalazły się w przedziale (0,04-0,042). Wartość krytyczna, odczytana z tablic rozkładu Studenta, dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$ jest równa $t_{\alpha m} = 2,101$. Wobec tego stwierdzono, że w każdym przypadku uzyskane wyniki nie różnią się istotnie, czyli można stwierdzić, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej. Powyższy fakt świadczy o dobrej powtarzalności wyników pomiarów.

W pracach [H16] i [H17] zaprezentowano wyniki pomiarów przeprowadzonych na reprezentatywnej partii 90 liczników energii elektrycznej prądu stałego klasy 0,5 oraz 1. Dla każdego licznika przeprowadzone badanie polegało na pomiarach wielokrotnych, które były niezbędne do określenia rozrzutu uzyskanych wyników, ewentualnie do eliminacji błędów nadmiernych. Dla całej populacji liczników przeprowadzono badania, które obejmowały pomiary napięcia, prądu oraz energii pobranej i oddanej do sieci energetycznej. Wielokrotne powtarzanie pomiarów powodowało, że przeprowadzane badania były bardzo czasochłonne. Pozwoliło to jednak na wykonanie obiektywnych i wiarygodnych pomiarów, które pozwoliły na sformułowanie jednoznacznych konkluzji.

a) Pomiary napięcia

Badania przeprowadzono na stanowisku pomiarowym przedstawionym na rysunku 4.23, dla napięcia nominalnego $U_n = 3300$ V, jak również dla napięć różniących się od napięcia nominalnego o $\pm 10\%$. Pomiary przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych przy temperaturze otoczenia (22,5-22,9) °C, oraz wilgotności względnej (41,1-45,3)%. Dla każdego z napięć pomiary powtarzano wielokrotnie. Przykładowe wyniki badań uzyskane w trakcie pomiarów przedstawiono w Tabeli 4.9.

Tabela 4.9 Wyniki wzorcowania licznika LE 3000plus przy pomiarach napięcia

$U_n = 3300$ V								
Punkt kontrolny $U = 2970$ V			Punkt kontrolny $U = 3300$ V			Punkt kontrolny $U = 3630$ V		
W_w	W_p	Δ	W_w	W_p	Δ	W_w	W_p	Δ
V	V	V	V	V	V	V	V	V
2970	-2971,00	-1,00	3300	-3300,80	-0,80	3630	-3630,80	-0,80
2970	-2971,20	-1,20	3300	-3301,00	-1,00	3630	-3631,00	-1,00
2970	-2971,00	-1,00	3300	-3300,60	-0,60	3630	-3630,60	-0,60
2970	-2971,20	-1,20	3300	-3301,00	-1,00	3630	-3631,00	-1,00
2970	-2971,00	-1,00	3300	-3300,60	-0,60	3630	-3630,80	-0,80
2970	-2971,20	-1,20	3300	-3301,00	-1,00	3630	-3630,80	-0,80
2970	-2971,00	-1,00	3300	-3300,60	-0,60	3630	-3630,60	-0,60
2970	-2971,20	-1,20	3300	-3301,00	-1,00	3630	-3630,80	-0,80
2970	-2971,00	-1,00	3300	-3300,60	-0,60	3630	-3630,60	-0,60
2970	-2971,20	-1,20	3300	-3300,80	-0,80	3630	-3630,80	-0,80

Wartości poprawne W_p przy pomiarze napięcia zapisano zgodnie z zastosowaną nastawą na aparaturze kontrolnej. Ponieważ zgodnie ze schematem układu pomiarowego, przedstawionym na rysunku 4.23, układ pracuje z tzw. „odwroconą masą”, dlatego błąd wskazania Δ przyjmuje postać zgodną z zależnością (4.23)

$$\Delta = W_w - (-W_p), \quad (4.23)$$

gdzie W_w jest wartością wskazaną przez badany licznik.

b) Pomiary prądu

W analogiczny sposób przeprowadzono badania rzeczony licznika w zakresie zmian prądu. Pomiary przeprowadzono w siedmiu punktach kontrolnych dla następujących wartości prądu: 50 A, 100 A, 250 A, 500 A, 800 A, 1000 A oraz 1500 A, przy czym wartość prądu nominalnego dla tego licznika wynosiła $I_n = 1000$ A.

Pomiary przeprowadzono w laboratorium przy takich samych wartościach zmienności temperatury i wilgotności względnej jak w przypadku pomiarów napięć. Przykładowe wyniki badań uzyskane w trakcie przeprowadzonych pomiarów, dla trzech wybranych punktów kontrolnych, przedstawiono w tabeli 4.10.

Analogicznie jak w przypadku pomiarów napięcia, wartość błędu wskazania Δ wyznaczono zgodnie z zależnością (4.23).

Tabela 4.10 Wyniki wzorcowania licznika LE 3000plus przy pomiarach prądu

$I_n = 1000 \text{ A}$								
Punkt kontrolny $I = 50 \text{ A}$			Punkt kontrolny $I = 1000 \text{ A}$			Punkt kontrolny $I = 1500 \text{ A}$		
W_w	W_p	Δ	W_w	W_p	Δ	W_w	W_p	Δ
A	A	A	A	A	A	A	A	A
49,9	-50,0	-0,1	999,4	-1000,0	-0,6	1498,9	-1500,0	-1,1
49,9	-50,0	-0,1	999,5	-1000,0	-0,5	1498,8	-1500,0	-1,2
49,9	-50,0	-0,1	999,4	-1000,0	-0,6	1498,9	-1500,0	-1,1
49,9	-50,0	-0,1	999,4	-1000,0	-0,6	1498,9	-1500,0	-1,1
49,9	-50,0	-0,1	999,5	-1000,0	-0,5	1498,9	-1500,0	-1,1
49,8	-50,0	-0,2	999,4	-1000,0	-0,6	1498,8	-1500,0	-1,2
49,9	-50,0	-0,1	999,4	-1000,0	-0,6	1498,9	-1500,0	-1,1
49,8	-50,0	-0,2	999,5	-1000,0	-0,5	1498,9	-1500,0	-1,1
49,9	-50,0	-0,1	999,4	-1000,0	-0,6	1498,9	-1500,0	-1,1
50,0	-50,0	0,0	999,5	-1000,0	-0,5	1498,8	-1500,0	-1,2

Badanymi licznikami dokonano rejestracji zużycia energii w trakcie normalnej pracy elektrowozu. W wyniku zarejestrowanych wyników stwierdzono, że dla 20% czasu pracy elektrowóz pracował przy obciążeniu niewielkimi prądami, osiagającymi wartość kilkunastu procent wartości prądu znamionowego. Pozwala to na sformułowanie wniosku, że słuszne i celowe jest przeprowadzenie wzorcowania liczników energii elektrycznej prądu stałego w szerokim zakresie zmian prądu.

c) Pomiary energii

Badania energii pobranej E_p oraz oddanej E_o badanego licznika LE 3000plus przeprowadzono w punktach kontrolnych, dla określonych wartości prądu i napięcia, w czasie $t = 0,25 \text{ h}$. Uzyskane wyniki badań dla energii pobranej E_p oraz oddanej E_o zaprezentowano odpowiednio w tabelach 4.11 i 4.12.

Tabela 4.11 Wyniki wzorcowania licznika LE 3000plus przy pomiarach energii pobranej

Pomiar energii pobranej $U = 3300 \text{ V}, I = 1000 \text{ A}, t = 0,25 \text{ h}, E = 825 \text{ kWh}$								
U			I			E_p		
W_w	W_p	Δ	W_w	W_p	Δ	W_w	W_p	Δ
V	V	V	A	A	A	kWh	kWh	kWh
3300,0	-3300,6	-0,6	-999,4	-1000,0	0,6	824,5	825,33	-0,83
3300,0	-3300,6	-0,6	-999,4	-1000,0	0,6	824,5	825,33	-0,83
3300,0	-3300,6	-0,6	-999,5	-1000,0	0,5	825,0	825,33	-0,33

Tabela 4.12 Wyniki wzorcowania licznika LE 3000plus przy pomiarach energii oddanej

Pomiar energii oddanej $U = 3600 \text{ V}, I = 1000 \text{ A}, t = 0,25 \text{ h}, E = 900 \text{ kWh}$								
U			I			E_p		
W_w	W_p	Δ	W_w	W_p	Δ	W_w	W_p	Δ
V	V	V	A	A	A	kWh	kWh	kWh
3600,0	-3601,0	-1,0	-999,0	-1000,0	1,0	-899,0	900,49	1,49
3600,0	-3600,8	-0,8	-999,1	-1000,0	0,9	-898,9	900,49	1,59
3600,0	-3600,8	-0,8	-999,0	-1000,0	1,0	-899,0	900,49	1,49

Wartości błędów Δ dla energii pobranej i oddanej wyznaczono zgodnie z równaniem (4.23).

d) Budżet niepewności

Końcowy wynik pomiaru jest kompletny tylko wówczas, kiedy zawiera zarówno wartość wielkości mierzonej, jak i niepewność wyniku pomiaru związaną z tą wartością. Zestawienie wszystkich zidentyfikowanych składowych niepewności standardowych oszacowanych metodą typu A i B nazywa się budżetem niepewności. Celem jego tworzenia jest dostarczenie dowodu, że niepewność złożona wyniku pomiaru została oszacowana rzeczowo i wnikliwie w sposób dający się zweryfikować. Prawidłowo skonstruowany budżet umożliwia dostarczenie dowodu, że analizowano wszystkie składniki niepewności, także te, których udział w niepewności złożonej okazał się nieistotny. Oznacza to, że nie odrzucono żadnego składnika arbitralnie, na podstawie subiektywnych przekonań lub tradycyjnego sposobu postępowania.

Dla wyników pomiarów, zestawionych w tabelach 4.9 - 4.12 opracowano budżety niepewności zgodnie z opisanymi uprzednio regułami.

W tabeli 4.13 przedstawiono budżet niepewności przy pomiarze napięcia dla punktu kontrolnego $U = 3300$ V.

Tabela 4.13 Budżet niepewności licznika LE 3000plus dla oceny wybranego pomiaru napięcia

Symbol wielkości	Estymata wielkości	Niepewność standardowa $u(x_i)$	Rozkład prawdopodob.	Współczynnik wrażliwości c_i	Udział w niepewności złożonej
$U_w - U_p$	-1,1	$3,33 \cdot 10^{-2}$	Normalny	1	$3,33 \cdot 10^{-2}$
$\Delta\delta_U$	$2,13 \cdot 10^{-2}$	$2,00 \cdot 10^{-2}$	Normalny	-1	$2,00 \cdot 10^{-2}$
$\delta\Delta_{rU}$	0	$2,89 \cdot 10^{-1}$	Prostokątny	1	$2,89 \cdot 10^{-1}$
Δ_U	-1,313	-	-	-	$2,91 \cdot 10^{-1}$

Wielkości wpływające na wartość niepewności złożonej oznaczają odpowiednio:

$U_w - U_p$ – różnicę wartości wskazanej i poprawnej,

$\Delta\delta_U$ – błąd przyrządu kontrolnego pobrany z aktualnego świadectwa wzorcowania kalibratora z przystawką wysokonapięciową,

$\delta\Delta_{rU}$ – wartość związaną z rozdzielczością licznika wzorcowanego,

Δ_U – wartość wyznaczoną zgodnie z zależnością $(U_w - U_p) - \Delta\delta_U + \delta\Delta_{rU}$.

W tabeli 4.14 przedstawiono wyznaczone wartości niepewności rozszerzonej U dla wyników pomiaru napięcia zawartych w tabeli 4.9.

Tabela 4.14 Wyniki wzorcowania pomiaru napięcia dla wartości nominalnej $U_n = 3300$ V.

Pomiar napięcia $U_n = 3300$ V			
Wartość wskazana U_w	Wartość poprawna U_p	Błąd wskazania Δ_U	Niepewność pomiaru U
V	V	V	V
2970	-2971,31	-1,31	0,6
3300	-3301,34	-1,34	0,6
3630	-3631,72	-1,72	0,6

Dla pomiarów prądu, zawartych w tabeli 4.10 opracowano budżet niepewności w sposób analogiczny jak dla pomiarów napięcia. Wyniki uzyskane dla wszystkich punktów kontrolnych zestawiono w tabeli 4.15.

Tabela 4.15 Wyniki wzorcowania pomiaru prądu dla wartości nominalnej $I_n = 1000$ A.

Pomiar prądu $I_n = 1000$ A			
Wartość wskazana I_w	Wartość poprawna I_p	Błąd wskazania Δ_I	Niepewność pomiaru U
A	A	A	A
49,9	-50,0	-0,1	0,09
99,8	-100,0	-0,2	0,09
249,7	-250,0	-0,3	0,11
499,8	-500,0	-0,2	0,11
799,5	-800,0	-0,5	0,12
999,4	-1000,0	-0,6	0,12
1498,9	-1500,0	-1,1	0,14

W przypadku tworzenia budżetu niepewności dla energii pobranej i oddanej do sieci elektroenergetycznej należy rozważyć większą liczbę czynników. Dlatego też w celu wyznaczenia niepewności standardowej złożonej u_c należy wyznaczyć wartości pochodnych cząstkowych względem napięcia, prądu oraz czasu, które określają wartości współczynników wrażliwości c_i . W tabeli 4.16 przedstawiono przykładowy budżet niepewności dla pomiaru energii pobranej, dla punktu kontrolnego $E = 825$ kWh.

Tabela 4.16 Budżet niepewności dla wybranej wartości pomiaru energii pobranej

Symbol wielkości	Estymata wielkości	Niepewność standardowa $u(x_i)$		Rozkład prawdopodob.	Współczynnik wrażliwości c_i		Udział w niepewności złożonej	
$E_w - E_p$	824,7	$1,67 \cdot 10^{-1}$	kWh	Normalny	1	kWh	$1,67 \cdot 10^{-1}$	kWh
$\Delta\delta_{rE}$	0	$2,89 \cdot 10^{-2}$	kWh	Prostokątny	1	kWh	$2,89 \cdot 10^{-2}$	kWh
$u(U)$	0	$2,92 \cdot 10^{-1}$	V	Normalny	0,250	kAh	$7,30 \cdot 10^{-2}$	kWh
$u(I)$	0	$6,64 \cdot 10^{-2}$	A	Normalny	0,825	kVh	$5,48 \cdot 10^{-2}$	kWh
$u(t)$	0	$3,19 \cdot 10^{-7}$	h	Normalny	3298,13	kVA	$1,05 \cdot 10^{-3}$	kWh
$E_{w\text{sr}}$	824,7	-		-	-		$1,92 \cdot 10^{-1}$	kWh

Wielkości wpływające na wartość niepewności złożonej oznaczają odpowiednio:

$E_w - E_p$ – różnicę wartości energii wskazanej i zadanej,

$\Delta\delta_{rE}$ – wartość wynikającą z rozdzielczości licznika wzorcowanego,

$u(U)$, $u(I)$, $u(t)$ – niepewności związane z pomiarami napięcia, prądu oraz czasu.

W tabeli 4.17 przedstawiono wyznaczone wartości niepewności rozszerzonej U dla wyników pomiarów energii pobranej, zawartej w tabeli 4.11, natomiast tabela 4.18 zawiera budżet niepewności dla wyników pomiarów dla energii oddanej z tabeli 4.12.

Tabela 4.17 Wyniki wzorcowania energii pobranej dla czasu $t = 0,25$ h

Pomiar energii pobranej przy $U_n = 3300$ V, $I_n = 1000$ A, $t = 0,25$ h			
Wartość wskazana E_w	Wartość poprawna E_p	Błąd wskazania Δ_E	Niepewność pomiaru U
kWh	kWh	kWh	kWh
824,7	825,33	-0,63	0,54

Tabela 4.18 Wyniki wzorcowania energii oddanej dla czasu $t = 0,25$ h

Pomiar energii oddanej przy $U_n = 3600$ V, $I_n = 1000$ A, $t = 0,25$ h			
Wartość wskazana E_w	Wartość poprawna E_p	Błąd wskazania Δ_E	Niepewność pomiaru U
kWh	kWh	kWh	kWh
-899,0	-900,49	1,49	0,22

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań, zawartych w tabelach 4.14, 4.15, 4.17 oraz 4.18 opracowano świadectwa wzorcowania. Wyniki zawarte w tych dokumentach zostały odniesione do państwowego wzorca jednostki miary napięcia i prądu utrzymywanego w National Physical Laboratory NPL oraz do państwowego wzorca jednostek miar czasu i częstotliwości utrzymywanych w Głównym Urzędzie Miar poprzez zastosowanie dwóch wielofunkcyjnych kalibratorów i przystawki wysokonapięciowej. Niepewność pomiaru wyznaczono zgodnie z zaleceniami zawartymi w dokumencie [26].

W rozdziale 4.5, dotyczącym pomiaru ilości energii elektrycznej, zaprezentowano złożoną tematykę badań liczników energii elektrycznej prądu stałego na napięcie 4 kV. Zaprezentowano skonstruowane stanowisko pomiarowe, złożone z dwóch wielofunkcyjnych kalibratorów oraz przystawki wysokonapięciowej umożliwiającej generację napięć o odpowiednio wysokiej precyzji.

Opisano wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych na licznej i reprezentatywnej partii ponad 90 egzemplarzy liczników LE 3000plus w warunkach laboratorium akredytowanego. Przebadanie takiej populacji liczników pozwoliło na przeprowadzenie analizy metrologicznej i sformułowanie obiektywnych konkluzji. Przy doborze punktów pomiarowych badanego licznika na stanowisku pomiarowym kierowano się wnioskami wynikającymi z badań liczników umieszczonych w warunkach rzeczywistych na elektrowozach, podczas ich normalnej eksploatacji.

Modyfikacja stanowiska pomiarowego, w porównaniu z wersją opisaną w pracy [H12], pozwoliła na znaczące zmniejszenie wartości niepewności wyników pomiarów, które przedstawiono w zamieszczonym budżecie niepewności.

4.6 Bibliografia

- [1] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 roku „W sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego”.
- [2] PN-EN 50160 „Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych”.
- [3] PN-EN 61000-4-7 „Metody badań i pomiarów. Ogólny przewodnik dotyczący pomiarów harmonicznnych i interharmonicznnych oraz przyrządów pomiarowych dla sieci zasilających i przyłączonych do nich urządzeń” styczeń 2011.
- [4] PN-EN 61000-4-15 „Metody badań i pomiarów. Miernik migotania światła. Specyfikacja funkcjonalna i projektowa” kwiecień 2005.
- [5] PN-EN-61000-4-30 „Metody badań i pomiarów. Metody pomiaru jakości energii” wrzesień 2011.
- [6] User's guide AC power solutions Agilent Models 6811B, 6812B, and 6813B, Agilent, 2000.
- [7] Agilent Technologies AC source/Power Analyzer Graphical User Interface for Windows 95-98, 2000 and Windows NT 4.0, Quick Start Guide, Agilent, 2006.
- [8] Arseneau R., Filipski P.: A Calibration system for evaluating the performance of harmonic power analyzers, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 3, pp. 1177–1182, 1995.
- [9] Gallo D., Landi C., Langella R., Testa A.: Implementation of a test system for advanced calibration and performance analysis of flickermeters, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 53, no. 4, pp. 1078–1085, 2004.
- [10] Piekarczyk M., Szlosek M., Hanzelka Z., Bień A., Stankiewicz A., Hartman M.: Comparative test of flickermeters, 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Rio de Janeiro, 6-9 October 2002, pp. 220–227, 2002.

- [11] Szlosek M., Piekarz M., Hanzelka Z., Bień A., Piątek K., Łoziak W., Pietrucha R., Hashad M., Wolski L., Olczykowski Z., Smajek L.: Comparative tests of flickermeters, CIRED 17th International Conference on Electricity Distribution, Barcelona, 12-15 May 2003.
- [12] Brasil D.O.C et al.: Considerations on power quality measurement instrumentation, International Conference Electrical Power Quality and Utilisation, pp. 297–301, 2003.
- [13] Jewell W.: Power quality laboratory testing, IEEE Power Engineering Review, pp. 13–15, 2002.
- [14] Brasil D.O.C et al.: Assessing the accuracy of power quality instrumentation, 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, pp. 696–699, 2004.
- [15] Ferrero A., Lazzaroni M., Salicone S.: A calibration procedure for a digital instrument for electric power quality measurement, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 51, no. 4, pp. 716–722, 2002.
- [16] Majchrzak J., Wiczyński G.: Symulacyjna weryfikacja modelu toru sygnałowego flickermetru, PAK, nr 10, s. 124–129, 2006.
- [17] Kuśmierk Z.: Harmoniczne w systemach elektroenergetycznych, Przegląd Elektrotechniczny, nr 6, s. 8–19, 2006.
- [18] Melhorn C.J., McGranaghan M. F.: Interpretation and analysis of power quality measurements, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, no 6, pp. 1363–1370, 1995.
- [19] Wiczyński G.: Simple model of flickermeter signal chain for deformed modulating signals, IEEE Transactions on Power Delivery, 23(4), 1743–1748, 2008.
- [20] Gutierrez J.J., Ruiz de Gauna S.: Linearity of the IEC flickermeter regarding amplitude variations of rectangular fluctuations, IEEE Transactions on Power Delivery, 22(1), pp. 729–731, 2007.
- [21] Kowalski Z.: Jakość energii elektrycznej, Monografie Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2007.
- [22] Wiczyński G.: Analysis of voltage fluctuations in power networks, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 57(11), pp. 2655–2664, 2008.
- [23] Chen M.T.: Digital algorithms for measurement of voltage flicker, IEE Proc.-Generation, Transmission and Distribution, 144(2), pp. 175–180, 1997.
- [24] International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM), 2008 JCGM 100:2008.
- [25] Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement, 2008 JCGM 100:2008.
- [26] EA-4/02 M:2013 Evaluation of the uncertainty of measurement in calibration, European cooperation for Accreditation, 2013.
- [27] Skubis T.: Podstawy metrologicznej interpretacji wyników pomiarów, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2004.
- [28] Szabatin J.: Podstawy teorii sygnałów, WKŁ, Warszawa, 2007.
- [29] Bolkowski S.: Teoria obwodów elektrycznych, WNT, Warszawa, 2012.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych).

Moje pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze (niezwiązane bezpośrednio z przedłożonym do oceny jednotematycznym cyklem publikacji) związane są z dwoma kierunkami badań, których wyniki dotyczą publikacji zestawionych w załączniku [6]:

5.1. Prace związane z określeniem właściwości metrologicznych diody laserowej jako przetwornika sygnału w torze pomiarowym [2 – 19, 24],

5.2 Zagadnienia związane z oceną wartości współczynnika rozszerzenia przy wyznaczaniu niepewności rozszerzonej wyniku pomiaru [34 – 36, 38 – 42, 44, 46 – 49, 54, 55, 57, 60, 62, 63, 65].

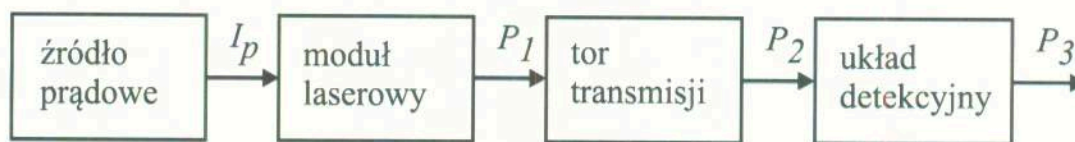
Poniżej zamieszczono krótką charakterystykę osiągnięć naukowo-badawczych, w której odnośniki do literatury dotyczą pozycji własnych autora (załącznik 6 wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego).

Ad. 5.1 Dioda laserowa jako przetwornik sygnału elektrycznego na optyczny pracuje w torze pomiarowym i stanowi jeden z elementów tego toru, który jest integralnie połączony z pozostałymi elementami. Zagadnieniem podstawowym z punktu widzenia celu pomiaru jest określenie właściwości metrologicznych układu pomiarowego i wiarygodności danych uzyskiwanych za jego pomocą. Z metrologicznego punktu widzenia interesujące są te parametry diody laserowej, które mogą decydować o wiarygodności przetwarzania toru pomiarowego

Prowadzone prace miały na celu modelowanie właściwości metrologicznych lasera półprzewodnikowego w oparciu o równanie przetwarzania określonego wycinka toru pomiarowego typu otwarte łącze optyczne. Prowadzone w tym zakresie badania miały charakter prac analitycznych i eksperymentalnych. Badania eksperymentalne pozwoliły na wyznaczenie wielu charakterystyk, które umożliwiają wyznaczenie szeregu parametrów lasera półprzewodnikowego, m.in. takich jak: wartość natężenia prądu progowego czy kątów rozbieżności wiązki promieniowania w płaszczyznach prostopadłej i równoległej do złącza diody laserowej.

Prace o charakterze analitycznym umożliwiły weryfikację uzyskanych wyników w trakcie przeprowadzonych badań. Uzyskano szereg zależności, które w sposób analityczny umożliwiają ocenę wpływu wybranych wielkości, przede wszystkim temperatury, na zmianę właściwości eksploatacyjnych lasera półprzewodnikowego.

Dioda laserowa jako źródło spójnej wiązki promieniowania optycznego znalazła szerokie zastosowanie w układach pomiarowych. W torze pomiarowym dioda ta stanowi element, którego parametry mogą decydować o wiarygodności przetwarzania. W przedstawionym na rysunku 5.1 schemacie blokowym, dioda laserowa stanowi jeden z bloków, który jest integralnie połączony z pozostałymi elementami tego toru.



Rys. 5.1 Schemat blokowy toru przetwarzania

Źródło prądowe służy do wytworzenia sygnału prądowego powodującego inicjację akcji laserowej. Musi ono spełnić wymagania odnośnie stałości długozasowej oraz niezmienności od temperatury prądu wyjściowego I_p . Moduł laserowy wykonany w postaci głowicy zawiera: diodę laserową, moduł termoelektryczny Peltiera, czujniki temperatury służące do kontroli temperatury pracy lasera oraz układ kolimacyjny służący do skupienia emitowanej wiązki. Tor transmisji jest ogniwnem łączącym źródło sygnału optycznego z detektorem. Układ detekcyjny służy do przetworzenia sygnału optycznego pochodzącego z diody laserowej na proporcjonalny do promieniowania sygnał elektryczny.

W celu dokonania analizy metrologicznej układu przedstawionego na rys. 5.1 założono, że badanie przedstawionego toru przetwarzania przeprowadzone będzie w oparciu o matematyczny model statycznego równania przetwarzania, które wiąże ze sobą parametry poszczególnych bloków funkcjonalnych.

Jeżeli przyjmiemy, że wielkością wejściową jest prąd ze źródła prądowego I_p , a wielkością wyjściową moc na wyjściu układu detekcyjnego P_3 , to statyczne równanie przetwarzania przyjmie postać daną równaniem (5.1)

$$P_3 = f(I_p). \quad (5.1)$$

Określenie funkcji wiążącej te wielkości związane jest z koniecznością wyprowadzenia zależności opisujących przemianę energii elektrycznej w promienistą. Wychodząc z zależności obowiązujących dla idealnego złącza p-n, ograniczając się do rozpatrzenia prądu dyfuzyjnego I_N i dokonując szeregu przekształceń otrzymujemy zależność na statyczne równanie przetwarzania dane równaniem (5.2):

$$P_3 = k_1 \cdot k_2 \frac{\eta_d E_g I_N S}{e} \exp(e I_p R_s / 2 k_B T_j), \quad (5.2)$$

gdzie: k_1 – współczynnik, który obrazuje straty na rozpraszanie podczas transmisji oraz uwzględnia skończoną wartość kąta pomiarowego układu detekcyjnego, k_2 – współczynnik który obrazuje błąd przetwarzania sygnału optycznego na elektryczny wnoszony przez detektor promieniowania, η_d – różniczkowa zewnętrzna sprawność kwantowa, E_g – szerokość przerwy energetycznej, S – pole powierzchni wnętrza rezonatora, e – ładunek elementarny, R_s – rezystancja wewnętrzna lasera, k_B – stała Boltzmana, T_j – temperatura złącza.

Zależność (5.2) stanowi matematyczny model przetwarzania badanego toru przetwarzania uzyskany na drodze analitycznej.

Przy założeniu, że parametry e , k_B , R_s są stałe dla danej diody laserowej, to parametrami zmiennymi, podatnymi na czynniki wpływające, przede wszystkim na temperaturę są: k_1 , k_2 , η_d , E_g , I_N oraz S . Biorąc to pod uwagę, można zastąpić równanie przetwarzania (5.2) równaniem o postaci

$$P_3 = A(T) \exp(BI_p/T_j), \quad (5.3)$$

gdzie:

$$A(T) = k_1 \cdot k_2 \frac{\eta_d E_g I_N S}{e} \quad (5.4)$$

$$B = e \cdot R_s / 2k_B. \quad (5.5)$$

W celu weryfikacji tak określonego modelu matematycznego statycznego równania przetwarzania przeprowadzono badania stabilności prądu I_p zasilającego diodę laserową, wpływu temperatury na charakterystykę przetwarzania badanego toru pomiarowego oraz rozbieżności wiązki promieniowania lasera półprzewodnikowego.

Uzyskane wyniki badań pozwalają na sformułowanie wniosku, że wykorzystane w eksperymencie źródło prądowe spełnia postawione założenia odnośnie stałości wartości natężenia prądu I_p zarówno co do stabilności długoczasowej, jak również w przypadku zmian rezystancji obciążenia.

Kolejny etap badań był związany z określeniem wpływu temperatury złącza T_j na przesunięcie charakterystyki przetwarzania oraz na moc wyjściową toru przetwarzania P_3 . Analizując uzyskane wyniki pomiarów można sformułować wniosek o silnym wpływie temperatury na pracę lasera półprzewodnikowego. Obniżenie temperatury powoduje znaczny wzrost wyemitowanej mocy promienistej P_3 przy tej samej wartości natężenia prądu I_p . Ponadto można zaobserwować przesunięcie charakterystyki przetwarzania, co związane jest ze zmianą wartości prądu progowego. Z tego faktu wynika możliwość zaniku akcji laserowej w przypadku wzrostu temperatury złącza T_j powyżej wartości granicznej. Istotnym, z poznawczego punktu widzenia, było wykazanie liniowej zależności mocy wyjściowej toru przetwarzania P_3 w funkcji temperatury złącza T_j , pomimo nieliniowej postaci równania przetwarzania tego toru. Rozwinięcie omawianych zagadnień znajduje się, między innymi, w publikacjach [2, 3, 5, 7, 8, 13, 14, 18] – załącznik [6].

W obszarze zagadnień związanych z rozbieżnością wiązki laserowej problematyka badań dotyczyła wyznaczenia wartości kątów rozbieżności w płaszczyznach prostopadłej i równoległej do diody laserowej oraz optymalizacją równania, które wiąże ze sobą moc P_3 ze zmianą położenia lasera półprzewodnikowego w dowolnym kierunku [4, 9, 10, 11, 12, 15] – załącznik [6]. Ze względu na znaczące wartości kątów rozbieżności wiązki laserowej przeprowadzono pomiary, które pozwoliły na doświadczalne wyznaczenie wartości kątów rozbieżności w obydwóch płaszczyznach. Uzyskane rezultaty pozwoliły na wyznaczenie wartości kątów rozbieżności w obydwóch płaszczyznach które wynosiły odpowiednio 38° w kierunku prostopadłym oraz 11° w kierunku równoległym do złącza lasera. W celu pełnego opisu zagadnienia rozbieżności wiązki laserowej przeprowadzono analizę błędu wyznaczania kąta rozbieżności w dowolnej płaszczyźnie względem złącza diody laserowej. Uwzględniając wszystkie czynniki mające wpływ na rozbieżność wiązki, uzyskano wartości granicznego błędu pomiaru kąta rozbieżności $0,2^\circ$ dla kierunku prostopadłego oraz $0,1^\circ$ dla kierunku równoległego. Z uwagi na istotność problemu dokonano analitycznego opisu wpływu rozbieżności wiązki promieniowania laserowego na moc wyjściową toru przetwarzania z wykorzystaniem zależności matematycznej wiążącej moc P_3 ze zmianami położenia lasera

względem detektora o określonej płaszczyźnie.

W ramach badań związanych z rozbieżnością wiązki laserowej dokonano również oceny wpływu układu kolimacyjnego na rozbieżność wiązki promieniowania laserowego. Wykazano, że zastosowanie stosunkowo prostych układów kolimacyjnych pozwoliło na kilkunastokrotne zmniejszenie kąta rozbieżności wiązki promieniowania laserowego w wybranej płaszczyźnie.

Na podstawie wyników przeprowadzonych pomiarów opracowano kilka modeli sygnałowo przetworzeniowych diody laserowej. Każdy z przedstawionych modeli prezentuje nieco inne podejście do rozpatrywanego zagadnienia uwzględniając różny formalizm matematyczny.

Dla stworzonych modeli sygnałowo przetworzeniowych wyznaczono wartość błędu ε , który jest miarą obrazującą maksymalne odchylenie pomiędzy charakterystyką uzyskaną na drodze doświadczalnej a charakterystyką otrzymaną z wykorzystaniem obliczeń analitycznych.

Uzupełnieniem opisanych powyżej prac, dotyczących właściwości metrologicznych diody laserowej, jest opis wybranych własności dynamicznych diody laserowej jako elementu toru pomiarowego. W badaniach ograniczono się do oceny wpływu na dynamikę lasera częstotliwości prądu sterującego jego pracą oraz wartości amplitudy składowej stałej tego prądu. W wyniku przeprowadzonych pomiarów stwierdzono istnienie liniowej zależności pomiędzy czasem opóźnienia t_0 impulsu promieniowania laserowego w funkcji amplitudy składowej stałej prądu sterującego pracą diody laserowej [6, 16, 17, 19, 24] załącznik [6].

Ad. 5.2 Celem pomiaru zawsze jest ocena nieznannej, prawdziwej wartości wielkości mierzonej oraz ocena niepewności rozszerzonej U . Ocena niepewności rozszerzonej wyniku pomiaru jest zawsze oceną przybliżoną. Celowe wydaje się, aby eksperymentator, który podejmuje decyzję o wyborze metody oceny niepewności rozszerzonej miał świadomość skutków określonego wyboru metody z punktu widzenia jej dokładności. Podstawą do przeprowadzenia oceny dokładności stosowanych przybliżonych metod oceny niepewności rozszerzonej jest założenie o konieczności ustalenia metody, którą można uznać za metodę dokładną.

Przyjęto merytorycznie słuszną koncepcję, że metoda oceny niepewności rozszerzonej, którą można uznać za metodę dokładną, bazuje na znajomości splotu rozkładów składowych. Jest to metoda, która nie budzi merytorycznych zastrzeżeń, a ponadto jest to metoda ogólnie dostępna w sensie możliwości obliczeń szukanych splotów rozkładów.

Znane są wyniki prac, które dotyczą analizy dokładności przybliżonych metod oceny niepewności rozszerzonej dla prostego pomiaru bezpośredniego, kiedy występują jedynie dwie składowe niepewności standardowe.

Przeprowadzone badania związane były z wyznaczeniem wartości niepewności rozszerzonej dla przypadku pomiarów pośrednich, które charakteryzują się większą liczbą niepewności standardowych. Jest to równoznaczne z tym, że ocena, którą można uznać za ocenę dokładną, bazuje na znajomości splotu wielu rozkładów składowych.

Wiadomo, że niepewność rozszerzona jest parametrem pozwalającym na wyznaczenie granic przedziału ufności obejmującego nieznaną wartość prawdziwą z określonym prawdopodobieństwem. W rozpatrywanym przypadku niepewność rozszerzoną U wyznaczamy ze wzoru (5.6):

$$U = k(\alpha) \cdot u_c, \quad (5.6)$$

gdzie: $k(\alpha)$ jest współczynnikiem rozszerzenia odpowiadającym zmiennej standaryzowanej danego rozkładu, u_c jest złożoną niepewnością standardową dla wielkości mierzonej pośrednio. Wartość niepewności złożonej, przy założeniu że zmienne pomiarowe są niezależne, wyznacza się na podstawie prawa propagacji niepewności. Przy wyznaczaniu wartości tej niepewności uwzględnia się zarówno niepewności standardowe typu A, obliczone na podstawie zaobserwowanego rozrzutu wyników serii pomiarów, jak również niepewności standardowe typu B równe odchyleniu standardowemu przyjętego rozkładu błędów aparaturowych.

Kluczowym w ocenie wartości niepewności rozszerzonej jest sposób wyznaczenia wartości współczynnika rozszerzenia $k(\alpha)$.

W pracach [34-36, 38-42, 44, 46-49, 54, 55, 57, 60, 62, 63, 65], załącznik [6], przedstawiono metodykę wyznaczania wartości współczynników rozszerzenia dla różnych sytuacji pomiarowych. Przykładowo, sytuacja pomiarowa, dla której wykorzystuje się splot dwóch rozkładów Studenta

i dwóch rozkładów jednostajnych jest przykładem pomiaru pośredniego, wykonywanego za pomocą dwóch przyrządów pomiarowych, które przy powtarzaniu pomiarów wykazują rozrzut wyników, a liczba pomiarów jest mała ($n < 30$). Rozpatrywane są zatem cztery niepewności standardowe: dwie niepewności standardowe typu B, odpowiadające odchyleniu standardowemu rozkładu jednostajnego, oraz dwie niepewności standardowe typu A, odpowiadające odchyleniu standardowemu rozkładu Studenta. Na podstawie opracowanego opisu analitycznego współczynników rozszerzenia dla badanych splotów można wyodrębnić wszystkie parametry, których funkcją są te współczynniki. Można wykazać [36], że współczynnik rozszerzenia dla splotu nazywany współczynnikiem $k_{SSJ}(\alpha)$ jest funkcją 6 zmiennych: prawdopodobieństwa $p = 1 - \alpha$, liczby stopni swobody m_1 i m_2 pierwszego i drugiego rozkładu Studenta oraz stosunku niepewności standardowych η_J, η_S, η , gdzie:

- η_J jest stosunkiem niepewności standardowych typu B, $\eta_J = \frac{u_{B_1}}{u_{B_2}}$
 - η_S jest stosunkiem niepewności standardowych typu A, $\eta_S = \frac{u_{A_1}}{u_{A_2}}$
 - η jest stosunkiem złożonych niepewności standardowych typu A do typu B
- $$\eta = \frac{\sqrt{u_{A_1}^2 + u_{A_2}^2}}{\sqrt{u_{B_1}^2 + u_{B_2}^2}}$$

Do obliczeń wykorzystano program napisanych w środowisku Matlab, wykorzystujący procedurę całkowania metodą Simpsona. Wyznaczona w taki sposób wartość współczynnika $k_{SSJ}(\alpha)$ była uznana jako wartość dokładna.

Uzyskane rezultaty pozwoliły na wyznaczenie wartości współczynników rozszerzenia dla wielu sytuacji pomiarowych, różnych wartości prawdopodobieństwa p , dla kilku wybranych liczby stopni swobody m_1 i m_2 , oraz stosunków niepewności standardowych η_J i η_S .

Obliczanie dokładnej wartości współczynnika rozszerzenia, dla założonego prawdopodobieństwa, jest w przypadku pomiarów pośrednich zagadnieniem trudnym, ponieważ wymaga znajomości funkcji rozkładu gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej modelującej wynik pomiaru. Jest ona splotem rozkładów składowych zmiennych losowych modelujących wielkości wejściowe. Obliczanie splotów jest trudne i czasochłonne, dlatego stosuje się powszechnie i zaleca metody przybliżone.

W rezultacie przeprowadzonych obliczeń wyznaczono wartości współczynników rozszerzenia dla kilku, wybranych przybliżonych metod oceny niepewności rozszerzonej. Do najbardziej rozpowszechnionych przybliżonych metody oceny współczynnika rozszerzenia zaliczyć należy:

- a) Metodę narzuconych wartości,
- b) Metodę efektywnej liczby stopni swobody,
- c) Metodę sumy geometrycznej

Ad a) Metoda ta zaleca, aby współczynnik rozszerzenia przyjmował wartości $k(\alpha) = 2$ dla prawdopodobieństwa $p \cong 95\%$ i $k(\alpha) \cong 3$ dla prawdopodobieństwa $p = 99\%$. Można założyć, że jest to równoznaczne z przyjęciem założenia o zbieżności nieznanego splotu rozkładów składowych do rozkładu normalnego. Metoda ta zakłada, że wystarczająca jest przybliżona znajomość poziomu ufności. W rzeczywistości wartości współczynników rozszerzenia powinny wynosić, dla przyjętych poziomów ufności, odpowiednio: $k(\alpha) = 1,960$ i $k(\alpha) = 2,576$.

Ad b) Metoda efektywnej liczby stopni swobody zalecana jest dla małych prób i bazuje na formule Welch-Satterthwaite'a zgodnie z którą, jeżeli złożona niepewność standardowa jest pierwiastkiem z sumy dwóch lub więcej wariancji ocenionych na podstawie wyników mało licznych prób o nieznanym odchyleniu standardowym, nieznaną rozkład szukaną zmienną standaryzowaną może być przybliżony rozkładem Studenta dla efektywnej liczby stopni swobody ν_{eff} . W przypadku tej metody współczynnikowi rozszerzenia $k_{\nu_{eff}}(\alpha)$ przypisuje się wartości odczytane z tablic rozkładu Studenta dla obliczonej wartości ν_{eff} . Wartość liczby efektywnej liczby stopni swobody

v_{eff} można wyznaczyć z ogólnej formuły Welcha-Satterthwaite'a

$$v_{eff} = \frac{u_{c_y}^4}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^4 \cdot \frac{u_{x_i}^4}{v_i}}, \quad (5.7)$$

gdzie: u_{c_y} – złożona niepewność standardowa wielkości wyjściowej,

u_{x_i} – niepewności standardowe wielkości wejściowych, $i = 1, 2, \dots, N$,

v_i – liczba stopni swobody dla serii pomiarowej wielkości wejściowej x_i .

Przedstawione przybliżone metody oceny współczynnika rozszerzenia są zalecane przez międzynarodowy dokument „Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement”.

Ad c) Metoda sumy algebraicznej stosowana jest często w praktyce pomiarowej. Zgodnie z tą metodą ocenia się niepewność rozszerzoną jako sumę geometryczną składowych niepewności rozszerzonych:

$$U = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2}. \quad (5.8)$$

Wyniki przeprowadzonych badań pozwoliły na sformułowanie opisów analitycznych splotów najczęściej używanych rozkładów prawdopodobieństwa, które wiążą wartości współczynników rozszerzenia z parametrami charakterystycznymi dla określonego splotu rozkładów. Wyznaczono wartości tych współczynników, które przyjęto za wartości dokładne.

Opisano wybrane, najczęściej stosowane przybliżone metody oceny niepewności rozszerzonej. Dla wszystkich wymienionych, przybliżonych metod oceny współczynnika rozszerzenia określono kryteria oceny ich dokładności na podstawie znajomości metod, które można uznać za metody dokładne i przeprowadzono analizę ich dokładności.

6. Podsumowanie działalności naukowej

Jestem autorem lub współautorem 125 publikacji zamieszczonych w czasopismach lub materiałach konferencyjnych (krajowych i międzynarodowych), a także 37 prac naukowych niepublikowanych. Baza Web of Science (WoS – stan na dzień 31.08.2015r.) wykazuje 13 publikacji indeksowanych, cytowanych 10 razy (w tym 2 bez autocytowań) oraz współczynnik Hirscha $h = 1$. W przypadku 11 z 13 indeksowanych prac jestem ich autorem lub współautorem o własnym udziale w ich realizacji wynoszącym od 50% do 65%. Analizę dorobku naukowego wykonaną przez Oddział E-biblioteki Biblioteki Głównej Politechniki Poznańskiej zamieszczono w załączniku 8 wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego.

Rodzaj publikacji/osiągnięcia		Przed doktoratem	Po doktoracie	Razem
Czasopisma	krajowe	3	46	49
	międzynarodowe		5	5
	baza WoS	1	9	10
Materiały konferencyjne	krajowe	4	36	40
	międzynarodowe		18	18
Rozdziały w monografiach			2	2
Skrypty akademickie			1	1
Projekty badawcze		4	33	37
Udział w konferencjach	krajowe	7	55	62
	międzynarodowe		18	18
Recenzje artykułów opublikowanych w czasopismach z bazy JCR			6	6
Recenzje artykułów opublikowanych w innych materiałach			47	47

Bibliometryczne wskaźniki oceny dorobku naukowego		
Źródło danych	Web of Science	Google Scholar
Indeks Hirscha h	1	3
Liczba cytowań ogółem	10	40
Liczba publikacji w bazie	13	65



 podpis

