



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE
WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI,
INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ

KATEDRA ENERGOELEKTRONIKI I AUTOMATYKI SYSTEMÓW PRZETWARZANIA ENERGII

Rozprawa doktorska

WARUNKI TECHNICZNE PRZYŁĄCZENIA ODBIORNIKÓW ENERGII ELEKTRYCZNEJ
BĘDĄCYCH ŹRÓDŁEM ZABURZEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH

– ANALIZA WYBRANYCH PRZYPADKÓW

mgr inż. Krzysztof Chmielowiec

Promotor:

prof. dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka

Kraków, 2016

Praca została realizowana w ramach
międzynarodowych studiów doktoranckich
KIC InnoEnergy PhD School

Wybrane elementy pracy zostały wykonane w ramach Programu Operacyjnego
Innowacyjna Gospodarka 2007 – 2013, nr projektu POIG.01.03.01-30-056/12

Wybrane elementy pracy zostały zrealizowane w ramach programu
Distributed Energy Resources Infrastructure (DERri)

Serdecznie dziękuję

*Panu profesorowi Zbigniewowi Hanzelce
za nieocenioną pomoc merytoryczną niezbędną do powstania niniejszej pracy,
za nieustanną motywację oraz wskazywanie drogi do realizacji założonych celów,
za zaszczyt wieloletniej współpracy*

*Pragnę również podziękować Kolegom z Laboratorium Jakości Energii
Elektrycznej AGH oraz wszystkim, którzy przyczynili się do powstania tej pracy*

*dr inż. Andrzejowi Firlitowi
dr inż. Markowi Rogozowi
mgr inż. Władysławowi Łoziakowi*

*dr inż. Krzysztofowi Piątkowi
mgr inż. Tomaszowi Dziwińskiemu
mgr inż. Krzysztofowi Woźnemu*

*mgr inż. Pawłowi Balawendrowi
mgr inż. Piotrowi Seredyńskiemu*

*mgr inż. Rafałowi Kozielowi
mgr inż. Krzysztofowi Szalwi
mgr inż. Rafałowi Szkodzie*

*Składam podziękowania dla dr Eduardo Zabala oraz dr Emilio Rodríguez
za udostępnienie aparatury badawczej Laboratorium TECNALIA
wykorzystanej do powstania niniejszej pracy*

*Pracę tą dedykuję mojej ukochanej żonie Dorocie
oraz dzieciom
Antoniemu, Ani i Agatce*

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń i symboli	8
1. Wprowadzenie	10
1.1 Warunki techniczne przyłączenia odbiorników energii elektrycznej	10
1.2. Cel, teza i plan pracy	10
1.3 Metodyka badań, struktura pracy.....	12
2. Analizator jakości dostawy energii elektrycznej klasy A.....	14
2.1 Badania porównawcze analizatorów jakości dostawy energii elektrycznej.....	14
2.1.1 Wartość skuteczna napięcia	16
2.1.1.1 Test 1.1 – Pomiar napięcia w warunkach ustalonych.....	16
2.1.1.2 Test 1.2 – Wpływ zmiany częstotliwości na niepewność pomiaru wartości skutecznej napięcia	17
2.1.1.3 Test 1.3 – Agregacja wyników pomiaru	18
2.1.1.4 Podsumowanie pomiarów wartości skutecznej napięcia	21
2.1.2 Wahania napięcia	21
2.1.2.1 Test 2.1 – Pomiar wartości P_{st} przy modulacji prostokątnej.....	22
2.1.2.2 Test 2.2 - Liniowość wskazań P_{st} przy modulacji prostokątnej – 110 zmian/min	23
2.1.2.3 Test 2.3 – Liniowość wskazań P_{st} przy modulacji prostokątnej – 1620 zmian/min	25
2.1.2.4 Test 2.4 – Wpływ zmiany częstotliwości na pomiar P_{st}	26
2.1.2.5 Podsumowanie pomiarów wahań napięcia	27
2.1.3 Odształcenie napięcia	28
2.1.3.1 Test 3.1 - Niepewność pomiaru dla pojedynczej harmonicznej	29
2.1.3.2 Test 3.2 - Poprawność wyznaczania wskaźnika THD.....	30
2.1.3.3. Test 3.3 – Badanie poprawności działania filtra antyaliasingowego	33
2.1.3.4 Test 3.4 – Agregacja wskaźnika THD.....	34
2.1.3.5 Podsumowanie pomiarów odształcenia napięcia	35
2.1.4 Asymetria składowej podstawowej napięcia.....	35
2.1.4.2 Test 4.2 – Niepewność pomiaru w obecności asymetrii amplitudowej	38
2.1.4.3 Test 4.3 – Niepewność pomiaru w obecności asymetrii amplitudowej i kątowej.....	38
2.1.4.4 Test 4.4 – Wpływ zmiany częstotliwości na niepewność pomiaru asymetrii napięcia	39
2.1.4.6 Podsumowanie pomiarów asymetrii napięcia	40
2.1.5 Zapady napięcia	40
2.1.5.2 Test 5.1 – Zapady napięcia o zmiennej amplitudzie oraz stałym czasie trwania	41

2.1.5.3 Test 5.2 – Zapady napięcia o stałej amplitudzie oraz zmiennym czasie trwania	42
2.1.5.4 Test 5.3 – Zapady wielostopniowe	43
2.1.5.5 Podsumowanie pomiarów zapadów napięcia	44
2.1.6 Podsumowanie badań porównawczych analizatorów JDEE	45
2.2 Procedura testowa badań analizatorów jakości energii elektrycznej klasy A w oparciu o wymagania normy IEC 62586-1	45
2.3 Badania porównawcze analizatorów JDEE – eksperyment pomiarowy w ramach Pikniku Jakości Energii [12]	46
3. Energooszczędne źródła światła w kontekście dopuszczalnych wymagań dla wskaźnika krótkookresowego migotania światła P_{st}	53
3.1 Przegląd obecnie stosowanych źródeł światła	53
3.2 Zjawisko wahań napięcia	54
3.3 Wpływ wahań napięcia na pracę różnych rodzajów źródeł światła	56
3.3.1 Opis badań	56
3.3.2 Wyniki badań – modulacja sinusoidalna	58
3.3.3 Wyniki badań – modulacja prostokątna	60
3.3.4 Jednostkowy wskaźnik względnej zmiany strumienia świetlnego $L_{unit}(f_m)$	61
3.4 Miernik migotania światła	62
3.4.1 Miernik IEC migotania światła	64
3.4.2 Miernik migotania światła w oparciu o pomiar strumienia świetlnego żarowych źródeł światła (Model INC)	65
3.4.3 Miernik migotania światła w oparciu o pomiar strumienia świetlnego lamp LED (Model LED) oraz CFL (Model CFL)	69
3.4.4 Porównanie modeli INC, LED, CFL	70
3.4.5 Propozycja wskaźnika migotania źródeł światła	73
4. Lokalizacja źródeł wahań napięcia w oparciu o jednopunktowe metody pomiaru. 75	
4.1 Główne założenia jednopunktowych metod lokalizacji zaburzeń jakości dostawy energii elektrycznej	75
4.1.1 Korelacja zmian P_{st} i mocy biernej (metoda I)	76
4.1.2 Ocena charakterystyki U–I (metoda II)	76
4.1.3 Pomiar mocy interharmonicznych (metoda III)	78

4.1.4 Pomiar mocy i energii wahań (metoda IV)	80
4.2 Weryfikacja symulacyjna jednopunktowych metod lokalizacji źródeł wahań napięcia. 81	
4.2.1 Układ odbiorca–dostawca	81
4.2.1.1 Test 4.1 - Źródło wahań napięcia po stronie dostawcy	82
4.2.1.2 Test 4.2 - Źródło wahań napięcia po stronie odbiorcy.....	84
4.2.1.3 Test 4.3 - Źródła wahań napięcia po obu stronach PWP	87
4.2.2 Badania symulacyjne w sieci IEEE 13 węzłowej.....	89
4.2.2.1 Test 4.4 – Sieć IEEE – źródło wahań napięcia po stronie odbiorcy lub dostawcy.....	90
4.3 Weryfikacja jednopunktowych metod lokalizacji źródeł wahań napięcia w laboratoryjnej sieci typu MicroGrid.....	96
4.4 Podsumowanie metod lokalizacji źródeł wahań napięcia	104
5. Wnioski końcowe i propozycje kontynuacji badań	106
Literatura	107
Załącznik A. Raport z badań zgodności analizatora jakości energii SO-52v11-eME z właściwymi dokumentami normalizacyjnymi w zakresie pomiarów jakości energii.....	111
Załącznik B. Lista wykonawców eksperymentu pomiarowego w ramach Pikniku JEE	112
Załącznik C. Efektywność energetyczna nowoczesnych źródeł światła	113
Załącznik D. Realizacja programowa poszczególnych bloków modelu IEC miernika migotania światła	120
Załącznik E. Model sieci testowej wykorzystanej do badań symulacyjnych lokalizacji źródeł wahań napięcia	122
Załącznik F. Wniosek projektowy DERri wraz z oceną komitetu ewaluacyjnego	125
Załącznik G. Lista publikacji autora pracy.....	133
Załącznik H. Lista międzynarodowych szkoleń odbytych w ramach KIC InnoEnergy PhD School	137
Załącznik I. Lista konferencji krajowych i międzynarodowych, na których autor prezentował wyniki badań.....	138

Wykaz ważniejszych oznaczeń i symboli

Oznaczenia

A	– amplituda
C	– pojemność
f	– częstotliwość
I	– wartość prądu (skuteczna)
k_{u0}	– wskaźnik asymetrii napięcia dla składowej symetrycznej kolejności zerowej
k_{u2}	– wskaźnik asymetrii napięcia dla składowej symetrycznej kolejności przeciwnej
L_r	– wskaźnik względnej zmiany strumienia świetlnego
L_{unit}	– jednostkowy wskaźnik względnej zmiany strumienia świetlnego
$L1, L2, L3$	– oznaczenia faz
P, Q, S	– moc pierwszej harmonicznej: czynna, bierna, pozorna
P_{lt}	– wskaźnik długookresowego migotania światła
P_{st}	– wskaźnik krótkookresowego migotania światła
P_{inst}	– wskaźnik chwilowego migotania światła
\underline{q}	– liczba zespolona
q	– moduł liczby zespolonej
U	– wartość napięcia (skuteczna)
X	– reaktancja
η	– sprawność
δ	– błąd względny
φ	– kąt przesunięcia fazowego prądu i napięcia

Akronimy

CCT	– temperatura barwowa (ang. <i>correlated color temperature</i>)
CPF	– funkcja skumulowanego prawdopodobieństwa (ang. <i>cumulative probability function</i>)
CRI	– wskaźnik oddawania barw (ang. <i>color rendering index</i>)
DPF	– współczynnik przesunięcia (ang. <i>displacement power factor</i>)
FE	– energia wahań napięcia (ang. <i>flicker energy</i>)
FFT	– szybka transformacja Fouriera (ang. <i>fast Fourier transform</i>)
FP	– moc wahań napięcia (ang. <i>flicker power</i>)
IEC	– Międzynarodowa Komisja Elektrotechniki (ang. <i>International Electrotechnical Commission</i>)
JDEE	– jakość dostawy energii elektrycznej
PF	– współczynnik mocy (ang. <i>power factor</i>)
PWP	– punkt wspólnego przyłączenia
RTC	– zegar czasu rzeczywistego (ang. <i>real time clock</i>)
THD	– całkowity współczynnik odkształcenia (ang. <i>total harmonic distortion</i>)

Indeksy

$(\cdot)_C$	– charakter pojemnościowy
$(\cdot)_{din}$	– wartość deklarowana
$(\cdot)_{filtr}$	– wartość po filtracji

- $(\cdot)_{fund}$ – wartość składowej podstawowej
- $(\cdot)_i$ – wartość dla i-tej harmonicznej
- $(\cdot)_{INC}$ – wartość dotycząca żarowego źródła światła
- $(\cdot)_L$ – charakter indukcyjny
- $(\cdot)_{max}$ – wartość maksymalna
- $(\cdot)_{min}$ – wartość minimalna
- $(\cdot)_m$ – wartość modulacji
- $(\cdot)_N$ – wartość znamionowa
- $(\cdot)_{rms}$ – wartość skuteczna
- $(\cdot)_{rms(1/2)}$ – wartość skuteczna napięcia zmierzona w czasie 20 ms (1 okres) i uaktualniana na zasadzie przesuwnego okna czasowego – co 10 ms (1/2 okresu)
- $(\cdot)_{sr}$ – wartość średnia
- $(\cdot)_{total}$ – wartość całkowita dla 3 faz
- $(\cdot)_z$ – wartość zmierzona
- $(\cdot)^0, (\cdot)^1, (\cdot)^2$ – składowa symetryczna kolejności zerowej, zgodnej, przeciwnej

Inne

- THD_{h1} – wartość wyznaczona z zastosowaniem wzoru (2.3)
- THD_{rms} – wartość wyznaczona z zastosowaniem wzoru (2.4)

1. Wprowadzenie

1.1 Warunki techniczne przyłączenia odbiorników energii elektrycznej

Warunki te określają – od strony technicznej – zakres prac projektowo-wykonawczych niezbędnych do przyłączenia do sieci zasilającej nowy obiekt, wymagający zasilania w energię elektryczną lub będący jej źródłem (np. źródła energii), bądź obiekt istniejący, który np. wymaga zmiany dotychczasowych warunków zasilania. W warunkach tych określa się m.in. wartość mocy przyłączeniowej, miejsce dostarczania lub wytwarzania energii elektrycznej, wymagania w zakresie układu pomiarowo-rozliczeniowego energii elektrycznej, a w szczególności pełny zakres prac niezbędnych do wykonania w celu przyłączenia do sieci wnioskowanego obiektu. Warunki przyłączenia określa się na podstawie wniosku złożonego przez podmiot ubiegający się o przyłączenie, który posiada tytuł prawny do korzystania z obiektu, w którym będą używane urządzenia, instalacje lub przyłączane sieci [48].

Z punktu widzenia wymagań jakości dostawy energii elektrycznej (JDEE), analizując proces przyłączania odbiorników do sieci elektroenergetycznej, należy tak formułować zapisy warunków przyłączenia, aby po zainstalowaniu nowego źródła lub odbioru, nie nastąpiło przekroczenie dopuszczalnych parametrów pracy sieci (w tym poziomów zaburzeń JDEE). W związku z powyższym, przyłączanie nowych odbiorów lub jednostek wytwórczych (turbiny wiatrowe, źródła fotowoltaiczne itp.), szczególnie w przypadkach, gdy charakteryzują się one pracą niespokojną tj. powtarzającymi się nagłymi zmianami obciążenia lub generacji energii elektrycznej, coraz częściej poprzedzane jest analizą wskaźników JDEE, a jej wynik jest jednym z kryteriów dla wydania decyzji przyłączeniowej.

1.2. Cel, teza i plan pracy

Analizując warunki techniczne przyłączania odbiorników oraz źródeł energii elektrycznej w części dotyczącej JDEE stwierdzono, że są one aktualnie niedoskonałe oraz wymagają zmian, z uwagi na:

- a) braki w zakresie procedur testowania analizatorów JDEE na zgodność z klasą A, czego skutkiem mogą być błędne wskazania tych urządzeń. Należy zaznaczyć, że wydaniu warunków technicznych przyłączenia powinno towarzyszyć wykonanie pomiarów JDEE w rozważanym punkcie, zarówno przed, jak i po wykonaniu instalacji. Procedura certyfikacji analizatorów JDEE powinna być jednoznaczna i nie budząca zastrzeżeń, co obecnie nie jest spełnione.
- b) przyjęcie wartości granicznych niektórych zaburzeń JDEE, które budzą wątpliwości, z uwagi na fakt, że coraz częściej obserwuje się ich przekroczenie, przy równoczesnym braku skarg ze strony odbiorców energii elektrycznej. Zjawisko to jest szczególnie widoczne w przypadku dopuszczalnych poziomów wahań napięcia (P_{st} i P_{lt}), na co duży wpływ ma obserwowany w ostatnich latach rozwój fluorescencyjnych oraz LED-owych źródeł światła [6][7][8]. Pojawia się w związku z tym pytanie czy obecnie przyjęte poziomy dopuszczalne w odniesieniu do wahań napięcia nie są zbyt restrykcyjne.
- c) brak wykorzystania w rozproszonych systemach monitoringu sieci elektroenergetycznych metod lokalizacji źródeł zaburzeń JDEE oraz oceny ich indywidualnej emisji, co jest etapem kluczowym w procesie wskazywania sprawcy oraz eliminacji tych zaburzeń.

Praca składa się z 4 rozdziałów. W rozdziale 2 opisane zostały badania porównawcze analizatorów JDEE oraz dokonano analizy przyczyn zaobserwowanych rozbieżności. Rozdział 3 opisuje badania laboratoryjne różnych typów źródeł światła ze szczególnym uwzględnieniem ich pracy w warunkach wahań napięcia. Rozważania na temat jednopunktowych metod lokalizacji zaburzeń JDEE stanowią zawartość rozdziału 4. Opracowanie kończy rozdział 5 prezentujący podsumowanie oraz wnioski.

Aktualnie dostępne normy serii PN-EN 61000 [43][44][45] określające wymagania dla urządzeń do pomiaru wskaźników JDEE, koncentrują się głównie na opisie metod pomiaru i określeniu dopuszczalnej niepewności pomiarowej. Oferowane na rynku analizatory JDEE okazują się być urządzeniami niepełnowartościowymi, których pomiar nie zawsze jest wiarygodny, co wykazano w publikacjach [5][15][26][47][60], których autorzy udokumentowali znacząco odbiegające od siebie wskazania analizatorów JDEE dokonujących równoczesnego pomiaru w tym samym punkcie pomiarowym. Do przyczyn takiego stanu rzeczy zaliczyć można przede wszystkim różnice w interpretacji wymagań zawartych w normach, gdyż jak dowodzą badania, zapisy te nie zawsze są jednoznaczne [15][60]. Kolejną przyczyną jest brak dostatecznych uregulowań w zakresie certyfikacji takich urządzeń, a także ich wzorcowania. Obecnie wytwórcy analizatorów JDEE decydują się na wykonywanie testów na zgodność z klasą A we własnym zakresie lub zlecają je uznanym w środowisku elektrotechnicznym laboratorium. Należy jednak stwierdzić, że aktualnie żaden tego typu podmiot nie posiada stosownej akredytacji IEC, co budzi wątpliwość w zasadność dotychczas wydanych certyfikatów klasy A. Wynikają z tego duże problemy w przypadkach chociażby procedur przetargowych stosowanych w zamówieniach publicznych. Weryfikacja zawartego w specyfikacji istotnych warunków zamówienia (SIWZ) wymogu posiadania przez analizator JDEE klasy pomiarowej A budzi wątpliwości, co można było zaobserwować analizując przetargi na rynku polskim z ostatnich kilku lat. Rozwiązaniem tej sytuacji wydaje się być dedykowana norma definiująca procedury badań analizatorów JDEE. Została ona wydana pod koniec 2013 roku. Rozważaniom dotyczącym procedur certyfikacji analizatorów JDEE poświęcony został drugi rozdział pracy.

Zagadnieniem poruszonym w rozdziale 3, związanym z wydawaniem warunków technicznych dla przyłączenia nowych odbiorników lub źródeł energii (przede wszystkim odnawialnych) do sieci, jest dopuszczalny poziom wahań napięcia. Zgodnie z [48], maksymalna wartość wskaźnika długookresowego migotania światła P_{lt} może wynosić 0,8 dla podmiotów zaliczanych do I i II grupy przyłączeniowej oraz 1,0 w przypadku III i IV grupy przyłączeniowej. W dobie nowoczesnych, energooszczędnych źródeł światła, które są mniej wrażliwe na wahania napięcia [6][7][8], te wartości dopuszczalne wydają się być zbyt restrykcyjne. Podstawą takiej tezy jest obserwowane w ostatnim czasie znaczne zmniejszenie roszczeń odbiorców energii elektrycznej, związanych ze zbyt wysokim poziomem wahań napięcia w przypadkach, gdy wskaźnik ten jest permanentnie przekraczany [39]. Dochodzi do sytuacji, w której dostawca energii motywowany wymaganiami rozporządzenia systemowego [48] lub innego dokumentu regulującego warunki zasilania odbiorców energii zobowiązany jest ograniczać poziom wahań napięcia w sieci (zazwyczaj powiązany z działaniami inwestycyjnymi) z uwagi na przekroczenie dopuszczalnych poziomów, podczas gdy z punktu widzenia odbiorcy, taki zabieg nie ma żadnego znaczenia. W związku z powyższym pojawiają się dwa pytania: Czy dotychczas stosowany miernik migotania światła jest dalej właściwym narzędziem do oceny tego zjawiska? Czy aktualnie stosowane poziomy dopuszczalne wahań napięcia są adekwatne do poziomu odczuwalnej uciążliwości spowodowanej efektem migotania światła?

Dotychczas funkcjonujący model, w którym problem odpowiedzialności za wprowadzanie zaburzeń JDEE angażował dwóch partnerów – dostawcę energii oraz jej odbiorcę – jest zastępowany nową konfiguracją, w której obecne są przynajmniej cztery, wzajemnie zależne strony: dostawca energii, odbiorca, producent urządzeń (odbiorników, źródeł) oraz podmiot odpowiedzialny za ich dobór, instalację oraz zabezpieczenie [27]. W przypadku wystąpienia zaburzenia, często zarówno dostawca jak i odbiorca uważają, że przyczyna znajduje się po drugiej ze stron. Zdarza się, że ich dyskusja prowadzi do wniosku, że to odbiorniki energii elektrycznej są zbyt podatne na warunki zasilania, lub są one niewłaściwie dobrane albo zainstalowane, aby mogły poprawnie działać w danym środowisku elektromagnetycznym. Zagadnienie to dotyczy zwłaszcza konsekwencji wystąpienia zmian napięcia (zapadów, wzrostów, przerw w zasilaniu), asymetrii i wahań napięcia zasilającego. Tym bardziej, że konsekwencje te przekładają się na wymierne koszty, które zmuszona jest ponieść przynajmniej jedna ze stron [28]. Pojawia się zatem rynkowa potrzeba opracowania narzędzia do wiarygodnego określania przyczyn oraz odpowiedzialności za generowanie zaburzeń JDEE. Zagadnieniu temu poświęcony jest czwarty rozdział pracy.

Na podstawie przedstawionych faktów sformułowane zostały następujące tezy pracy:

1. *Możliwe jest wykazanie, że stosowana obecnie procedura certyfikacji analizatorów JDEE dopuszcza obecność na rynku urządzeń dokonujących pomiaru wskaźników JDEE w sposób nieprawidłowy.*
2. *Możliwa jest modyfikacja miernika migotania światła tak, aby umożliwiał on analizę zjawiska w oparciu o pomiar strumienia świetlnego różnych typów źródeł światła (lamp CFL oraz lamp LED). Możliwe jest wykazanie, że aktualnie stosowane poziomy dopuszczalne wahań napięcia w sieciach dystrybucyjnych nie są adekwatne do odczuwalnej uciążliwości spowodowanej efektem migotania światła pochodzącym od nowoczesnych źródeł światła LED oraz CFL. Możliwe jest zaproponowanie wskaźnika służącego do ilościowej oceny efektu migotania światła danego typu lampy.*
3. *Możliwe jest opracowanie algorytmu jednopunktowej lokalizacji źródeł wahań napięcia zdolnego do implementacji w analizatorach JDEE.*

1.3 Metodyka badań, struktura pracy

I. Analizator JDEE w aspekcie procedury certyfikacyjnej klasy A:

- a) Źródłem danych były pomiary wskaźników JDEE wykonane za pomocą kilkunastu analizatorów JDEE klasy A, zasilanych z programowalnych generatorów napięcia,
- b) Do obróbki danych pomiarowych wykorzystywano dedykowane oprogramowanie dostarczane przez producentów poszczególnych analizatorów. Wyniki pomiarów odniesiono do norm określających dopuszczalną niepewność pomiaru analizatorów JDEE [29][43][44][45],
- c) Badania zgodności analizatora JDEE z wymaganiami klasy A dokonano w oparciu o normy [29][43][44][45],
- d) Eksperyment pomiarowy – badania porównawcze analizatorów JDEE zrealizowano w ramach wydarzenia o charakterze publicznym z bezpośrednim zaangażowaniem producentów oraz dystrybutorów aparatury pomiarowej będącej przedmiotem badań.

II. Nowoczesne źródła światła w kontekście dopuszczalnych wymagań dla wskaźnika migotania światła P_{lf} :

- a) Analiza własności energetycznych oraz strumienia świetlnego różnych źródeł światła przeprowadzona została w oparciu o pomiary z użyciem kuli fotometrycznej, luksomierza, analizatorów JDEE oraz programowalnego generatora napięcia,
- b) Budowa laboratoryjnego modelu miernika migotania światła działającego w oparciu o pomiar napięcia oraz natężenia oświetlenia pochodzącego od różnych źródeł światła zrealizowana została w oparciu o kartę pomiarową oraz środowisko LabVIEW,
- c) Procedura doboru filtra ważonego dla różnych źródeł światła została opracowana przy pomocy *System Identification Toolbox* dostępny w programie Matlab.

III. Jednopunktowa lokalizacja źródeł wahań napięcia:

- a) Badania symulacyjne metod lokalizacji źródeł zaburzeń JDEE wykonywano w programie Matlab/Simulink, w którym zbudowany został wybrany model sieci elektroenergetycznej.
- b) Urządzenie pomiarowe (lokalizator zaburzeń) zbudowano w oparciu o komputer przenośny współpracujący z kartą pomiarową oraz zestawem przetworników napięciowych i prądowych,
- c) Algorytmy lokalizacji źródeł wahań napięcia zostały zaimplementowane w środowisku LabVIEW,
- d) Algorytmy lokalizacji źródeł wahań napięcia zostały przetestowane w sieci wydzielonej laboratorium TECNALIA.

2. Analizator jakości dostawy energii elektrycznej klasy A

Obecnie na europejskim rynku znajduje się duży wybór analizatorów JDEE, których producenci deklarują zgodność swoich urządzeń z klasą pomiarową A. Deklaracje te poparte są zazwyczaj niezależnymi badaniami laboratoryjnymi lub opierają się na wewnętrznych testach przeprowadzonych przez wytwórców. W literaturze znaleźć można jednak publikacje [5][15][26][47][60], których autorzy opisują stwierdzone różnice wskazań urządzeń pomiarowych klasy A względem zapisów norm serii PN-EN 61000-4 [43][44][45], określających wymagania konstrukcyjne oraz algorytmy pomiarowe analizatorów JDEE. Niewątpliwą przyczyną takiego stanu rzeczy jest fakt, że pierwsze formalnie zatwierdzone procedury weryfikacji zgodności mierzonych wskaźników jakości dostawy energii elektrycznej z wymaganiami stawianymi w normach pojawiły się dopiero pod koniec 2013 roku, podczas gdy początki rynku analizatorów JDEE sięgają kilkunastu lat wstecz. Przywołane normy określają bowiem sposób pomiaru poszczególnych wskaźników JDEE oraz dopuszczalną niepewność pomiarową. Brak jest w nich pełnego opisu procedur weryfikacji zgodności analizatora z wymaganiami dla klasy A. Obecność jednoznacznych, poprawnie sformułowanych procedur wpłynęłaby skutecznie na eliminację wadliwych mierników z rynku.

2.1 Badania porównawcze analizatorów jakości dostawy energii elektrycznej

Niniejszy rozdział prezentuje wyniki pomiarów porównawczych przeprowadzonych na grupie trzynastu analizatorów jakości dostawy energii dostępnych na europejskim rynku (tab. 2.1). Badania zostały wykonane w Laboratorium Jakości Energii Elektrycznej w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Pochodzące z programowalnego generatora napięcie podawane było równocześnie na wejścia analizatorów JDEE. Wszystkie badane analizatory posiadały, zadeklarowaną przez producenta, klasę pomiarową A określającą wymagania odnośnie urządzeń do pomiaru wskaźników JDEE zgodnie z normą [44]. Przed rozpoczęciem każdego etapu badań zegary mierników były synchronizowane z dokładnością nie gorszą od 1 sekundy. Należy podkreślić, że opisywane w dalszej części rozdziału testy zostały dobrane w taki sposób, aby wyeliminować wpływ warunków brzegowych związanych z uzyskaną dokładnością synchronizacji.

Z uwagi na fakt, że harmonogram prowadzonych pomiarów porównawczych rozłożony był na kilkanaście miesięcy, w poszczególnych testach uczestniczyły różne zbiory analizatorów, na co wpływ miała ich bieżąca dostępność na wyposażeniu Laboratorium Jakości Energii Elektrycznej.

W toku przeprowadzonych badań porównawczych analizie poddano poprawność pomiaru: wartości skutecznej napięcia, odkształcenia napięcia, wahań napięcia, asymetrii napięcia oraz zapadów napięcia. Zakres oraz formuła prowadzonych testów wynikała z analizy zapisów norm [29][43][44][45] oraz posiadanych możliwości sprzętowych. Należy podkreślić, że przeprowadzone testy nie obejmowały wszystkich możliwych zagadnień związanych z nadawaniem klasy A. Intencją autora było zwrócenie uwagi na istnienie problemu poprzez wykonanie serii pomiarów o charakterze podstawowym i wybiórczym.

Jako źródła napięcia podawanego na wejścia analizatorów wykorzystywany był kalibrator jakości energii elektrycznej – Calmet C300 [53] lub programowalne źródło zasilania – NSG 1007 [54], dedykowane głównie do badań kompatybilności elektromagnetycznej. W tabeli 2.2 zgromadzono podstawowe dane techniczne obu urządzeń.

Tabela 2.1. Lista przyrządów poddanych badaniom porównawczym

Lp.	Producent	Analizator JDEE
1	A-eberle	PQ-BOX 100, PQIDA
3	Procom System	Certan PQ-100
4	Siemens	Siemeas Q80
5	Fluke	Fluke 435
6	Schneider Electric Power Logic	ION7650
7	Q-Wave Qualitrol	PowerQuality RTV
8	Dranetz	Encore Series 61000
9	Sonel	PQM-701
10	Lem (Fluke)	Topas 1000
11	Unipower	Unilyzer 902C
12	Elspec	G3500
13	Mikronika	SO-52v11-eME

Tabela 2.2. Dane techniczne kalibratora Calmet oraz generatora NSG 1007

	C300	NSG 1007
Napięcie	(2 - 250) V +/-0,01 zakresu	(0 - 300) V +/-0,5% zakresu (dla częstotliwości z przedziału (16 - 400) Hz)
Częstotliwość	(40,000 - 99,999) Hz +/-0,002 Hz	(16 - 81,91) Hz +/-0,01% wartości zadanej

Należy zwrócić uwagę, że znamionowa niepewność generatora NSG 1007 deklarowana jako 0,5% zakresu, co dla 300 V odpowiada niepewności +/-1,5 V, była większa od niepewności pomiarowej wymaganej od analizatorów JDEE ($\pm 0,2\%$ napięcia deklarowanego, czyli $\pm 0,23$ V). Z tego powodu ocena spełnienia kryterium poszczególnych testów, w zależności od wykorzystywanego generatora, realizowana była na dwa sposoby:

1. Dla testów z wykorzystaniem kalibratora Calmet C300 poprzez wyznaczenie względnego błędu pomiaru zgodnie z wzorem:

$$\delta = \frac{|x - x_z|}{x} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

gdzie: x - nastawa generatora, x_z - wartość zmierzona.

Sposób ten pozwalał na ocenę poprawności pomiaru poszczególnych analizatorów.

2. W testach z udziałem generatora NSG 1007 poprzez wyznaczenie rozrzutu wyników, jako bezwzględnej różnicy dwóch skrajnych wskazań danego wskaźnika dzielonej przez średnią arytmetyczną wskazań wszystkich przyrządów, zgodnie z wzorem:

$$Rozrzut = \frac{|x_{zmax} - x_{zmin}|}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

gdzie: x_{zmax} , x_{zmin} są to odpowiednio najmniejsze i największe wskazania spośród wskazań wszystkich analizatorów JDEE,
 n - liczba analizatorów JDEE.

Sposób ten pozwalał na ocenę poprawności pomiaru grupy analizatorów bez odniesienia do konkretnej jednostki.

Przeprowadzone badania zostały podzielone na następujące etapy:

- przedstawienie wytycznych właściwej normy odnoszących się do pomiaru danego wskaźnika JDEE,
- opis procedur testów oraz prezentacja otrzymanych wyników,
- analiza przyczyn zaobserwowanych rozbieżności.

2.1.1 Wartość skuteczna napięcia

Pomiar napięcia zasilającego jest pomiarem podstawowym, od poprawności którego zależy wiarygodność wyznaczania pozostałych wskaźników JDEE. Zgodnie z wymaganiami normy [44] analizatory klasy A powinny dokonywać pomiaru wartości skutecznej w przedziale 10 okresów dla systemów zasilania 50 Hz lub 12 okresów dla systemów zasilania 60 Hz. Każdy 10/12 okresowy przedział powinien przylegać i nie zachodzić na sąsiednie przedziały, z wyjątkiem ostatniego przedziału w obrębie 10 min znacznika czasu RTC, związanego z koniecznością synchronizacji przedziałów agregacji. Należy zaznaczyć jednak, że tak określona metoda pomiaru nie jest stosowana do detekcji i pomiaru zaburzeń: zapadów, wzrostów, przerw w zasilaniu i napięć przejściowych.

Algorytm agregacji wyników pomiaru wartości skutecznej napięcia powinien być realizowany z wykorzystaniem pierwiastka kwadratowego ze średniej arytmetycznej z wielkości wejściowych podniesionych do kwadratu. Norma wymaga, aby w zakresie (10–150)% U_{din} niepewność pomiaru nie przekraczała $\pm 0,1\% U_{din}$.

Weryfikację poprawności pomiaru wartości skutecznej napięcia przeprowadzono dla pięciu analizatorów JDEE (tab. 2.3). Jako źródło sygnału wzorcowego wykorzystano generator Calmet C300. Przyjęto $U_{din} = 57,7 \text{ V}$.

Tabela 2.3. Lista analizatorów JDEE wykorzystanych w pomiarach wartości skutecznej napięcia

Lp.	Producent	Analizator
1	Fluke	Fluke 435
2	Sonel	PQM-701
3	Lem (Fluke)	Topas 1000
4	Elspec	G3500
5	Mikronika	SO-52v11-eME

2.1.1.1 Test 1.1 – Pomiar napięcia w warunkach ustalonych

Opis testu	Na wejścia przyrządów podawany jest sygnał o częstotliwości $f = 50 \text{ Hz}$ oraz wartości skutecznej: <ol style="list-style-type: none"> $10\% U_{din} = 5,773 \text{ V}$, $80\% U_{din} = 46,184 \text{ V}$, $150\% U_{din} = 86,595 \text{ V}$.
Kryterium testu	Niepewność pomiaru próbek wartości skutecznej napięcia uśrednionych w czasie 10 okresów nie powinna przekroczyć $\pm 0,1\% U_{din} = \pm 0,05773 \text{ V}$.

Wyniki testu 1.1 zebrane zostały w tabeli 2.4 Stwierdzono poprawność wskazań dla wszystkich analizatorów biorących udział w badaniach.

Tabela 2.4. Wyniki testu 1.1

	Analizator	L1 [V] U_{rms_200ms}	L2 [V] U_{rms_200ms}	L3 [V] U_{rms_200ms}	Parametry sygnału	δ [% U_{din}]
a)	PQM-701	5,773	5,773	5,770	$U_{rms} = 5,773 \text{ V}$ $f = 50 \text{ Hz}$	+0,000 / -0,005
	Topas 1000	5,771	5,774	5,780		+0,012 / -0,003
	SO-52v11-eME	5,766	5,770	5,768		+0,000 / -0,012
	Fluke 435	5,790	5,787	5,781		+0,029 / -0,000
	G3500	5,757	5,756	5,762		+0,000 / -0,029
b)	PQM-701	46,181	46,182	46,179	$U_{rms} = 46,184 \text{ V}$ $f = 50 \text{ Hz}$	+0,000 / -0,009
	Topas 1000	46,187	46,195	46,222		+0,066 / -0,000
	SO-52v11-eME	46,179	46,181	46,188		+0,007 / -0,009
	Fluke 435	46,180	46,180	46,190		+0,010 / -0,007
	G3500	46,167	46,175	46,179		+0,000 / -0,029
c)	PQM-701	86,581	86,583	86,575	$U_{rms} = 86,595 \text{ V}$ $f = 50 \text{ Hz}$	+0,000 / -0,035
	Topas 1000	86,597	86,612	86,652		+0,099 / -0,000
	SO-52v11-eME	86,589	86,590	86,594		+0,000 / -0,010
	Fluke 435	86,607	86,590	86,594		+0,021 / -0,009
	G3500	86,564	86,564	86,577		+0,000 / -0,054

2.1.1.2 Test 1.2 – Wpływ zmiany częstotliwości na niepewność pomiaru wartości skutecznej napięcia

Opis testu	Na wejścia przyrządu podawany jest sygnał o wartości skutecznej 80% U_{din} (46,184 V) i częstotliwości: a) $f = 42,5 \text{ Hz}$, b) $f = 57,5 \text{ Hz}$.
Kryterium testu	Niepewność pomiaru próbek uśrednionych w czasie 10 okresów (200 ms) nie powinna przekroczyć $\pm 0,1\% U_{din} = \pm 0,05773 \text{ V}$.

Wyniki testu 1.2 zebrane zostały w tabeli 2.5. Stwierdzono poprawność wskazań wszystkich analizatorów będących obiektem badań.

Tabela 2.5. Wyniki testu 1.2

	Analizator	L1 [V] U_{rms_200ms}	L2 [V] U_{rms_200ms}	L3 [V] U_{rms_200ms}	Parametry sygnału	δ [% U_{din}]
a)	PQM-701	46,188	46,190	46,178	$U_{rms} = 46,184 \text{ V}$ $f = 42,5 \text{ Hz}$	+0,010 / -0,010
	Topas 1000	46,187	46,198	46,216		+0,055 / -0,000
	SO-52v11-eME	46,189	46,189	46,191		+0,012 / -0,000
	Fluke 435	46,190	46,190	46,182		+0,010 / -0,003
	G3500	46,170	46,174	46,177		+0,000 / -0,024
b)	PQM-701	46,187	46,190	46,170	$U_{rms} = 46,184 \text{ V}$ $f = 57,5 \text{ Hz}$	+0,010 / -0,024
	Topas 1000	46,198	46,204	46,226		+0,073 / -0,000
	SO-52v11-eME	46,180	46,181	46,187		+0,005 / -0,007
	Fluke 435	46,190	46,180	46,180		+0,010 / -0,007
	G3500	46,169	46,174	46,177		+0,000 / -0,026

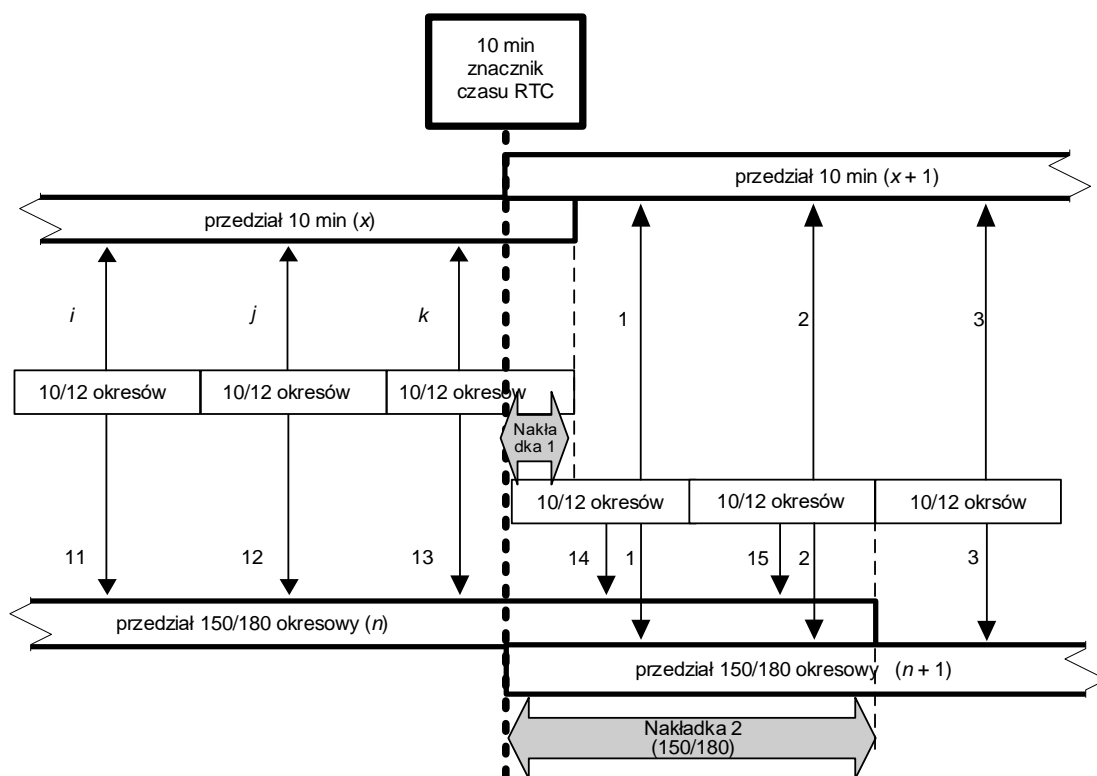
2.1.1.3 Test 1.3 – Agregacja wyników pomiaru

Zgodnie z [44] podstawowym okresem pomiaru wartości skutecznej napięcia zasilającego, dla systemu o częstotliwości 50 Hz, powinien być przedział 10-okresowy. Wartości 10-okresowe powinny być następnie agregowane w trzech dodatkowych przedziałach czasu:

- przedział 150-okresowy,
- przedział 10 min,
- przedział 2 h.

Pomiary 10-okresowe powinny być powtórnie synchronizowane dla każdego 10–minutowego znacznika RTC, tak jak to pokazano na rysunku 2.1. Agregacje powinny być realizowane z wykorzystaniem pierwiastka kwadratowego ze średniej arytmetycznej z wielkości wejściowych podniesionych do kwadratu

Przystępując do wykonania testu stwierdzono, że w przeważającej większości analizatorów dostęp do próbek 10-okresowych był niemożliwy (ograniczony funkcjonalnością oprogramowania). Wykluczało to możliwość pełnej weryfikacji procesu agregacji, chyba że wytwórca dostarczy oprogramowanie specjalne, rozszerzone o wgląd do dodatkowych danych. Wspominany powód był przyczyną, dla której testy agregacji zostały wykonane wyłącznie dla miernika SO-52v11-eME, w którym możliwy był odczyt wartości 10–okresowych poprzez dostęp do plików bazy danych.



Rys. 2.1. Synchronizacja przedziałów agregacji dla klasy A [44]

Test 1.3a – Agregacja wyników pomiaru – 10 okresów z 10 minutową synchronizacją

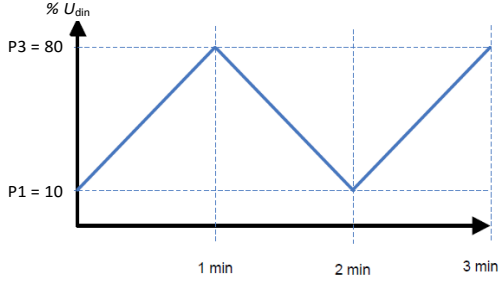
Opis testu	Test powinien trwać 11 minut i zawierać przynajmniej dwa kolejne znaczniki czasu próbki 10 min. Na wejścia przyrządu podawany jest sygnał o wartości skutecznej $80\% U_{\text{din}}$ oraz częstotliwości $f = 49,99 \text{ Hz}$.
Kryterium testu	Sprawdzeniu podlegają znaczniki czasu oraz liczba agregowanych próbek. Znacznik czasu próbki 10 min powinien wystąpić w czasie trwania próbki $U_{\text{rms}_200\text{ms}}$ o numerze porządkowym 3000. $49,99 \text{ Hz} = (2999,5/600) \times 10$

Wyniki testu 1.3a zebrane zostały w tabeli 2.6. Stwierdzono, że znacznik próbki 10 min wystąpił w czasie trwania próbki 10-okresowej nr 3000. Wynik testu jest poprawny.

Tabela 2.6. Wyniki testu 1.3a – analizator SO-52v11-eME

Nr próbki	Znacznik czasu	L1 [V]	L2 [V]	L3 [V]
	[rok/miesiąc/dzień godz:min:s:ms]	$U_{\text{rms}_200\text{ms}}$	$U_{\text{rms}_200\text{ms}}$	$U_{\text{rms}_200\text{ms}}$
1	2012/11/20 09:50:00.200:000000	46,1905	46,1905	46,1806
3000	2012/11/20 10:00:00.136:000000	46,1806	46,1905	46,2005

Test 1.3b – Agregacja wyników pomiaru – 150 okresów z 10 minutową synchronizacją

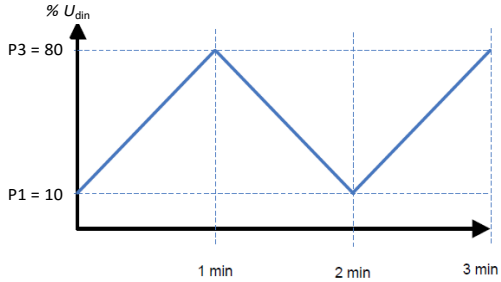
Opis testu	<p>Test powinien trwać 11 minut i zawierać przynajmniej dwa kolejne znaczniki czasu próbki 10 min. Na wejścia przyrządu podawany jest sygnał o częstotliwości 50,125 Hz, którego wartość skuteczna zmienia się liniowo w zakresie od P1 = 10% U_{din} do P3 = 80% U_{din} zgodnie z rysunkiem:</p> 
Kryterium testu	<p>Sprawdzeniu podlegają znaczniki czasu oraz liczba agregowanych próbek. Znacznik czasu próbki 10 min powinien przypadać pomiędzy kolejnymi próbkami U_{rms_3s} o numerach porządkowych 200 i 201. $50,125 \text{ Hz} = (200,5 / 600) \times 150$</p>

Wyniki testu 1.3b zebrane zostały w tabeli 2.7. Stwierdzono, że znacznik próbki 10 min wystąpił pomiędzy kolejnymi próbkami U_{rms_3s} o numerach 200 oraz 201. Wynik testu jest poprawny.

Tabela 2.7. Wyniki testu 1.3b – analizator SO-52v11-eME

Nr próbki	Znacznik czasu [rok/miesiąc/dzień godz:min:s:ms]	L1 [V] U_{rms_3s}	L2 [V] U_{rms_3s}	L3 [V] U_{rms_3s}
1	2012/11/20 10:50:02.992:000000	23,1793	23,1694	23,1796
200	2012/11/20 10:59:58.500:000000	10,9309	10,9309	10,921
201	2012/11/20 11:00:01.416:000000	12,9129	12,9149	12,923

Test 1.3c – Agregacja wyników pomiaru – 10 min

Opis testu	<p>Test powinien trwać 11 minut i zawierać przynajmniej dwa kolejne znaczniki czasu próbki 10 min. Na wejścia przyrządu podawany jest sygnał o częstotliwości 50 Hz, którego wartość skuteczna zmienia się liniowo w zakresie od P1 = 10% U_{din} do P3 = 80% U_{din}, zgodnie z rysunkiem:</p> 
Kryterium testu	<p>Sprawdzeniu podlega poprawność formuły wykorzystanej do uśrednienia wartości 10 min na podstawie wartości 200 ms.</p>

W wyniku analizy otrzymanych danych pomiarowych (tab. 2.8) stwierdzono, że agregacji wyników wartości skutecznej napięcia były realizowane z wykorzystaniem

pierwiastka kwadratowego ze średniej arytmetycznej z wielkości wejściowych podniesionych do kwadratu. Wynik testu jest poprawny.

Tabela 2.8. Wyniki testu 1.3c – analizator SO-52v11-eME

Znacznik czasu [rok/miesiąc/dzień godz:min:s:ms]	Wartości zmierzone			Wartości obliczone		
	L1 [V]	L2 [V]	L3 [V]	L1 [V]	L2 [V]	L3 [V]
	U_{rms_10min}	U_{rms_10min}	U_{rms_10min}	U_{rms_10min}	U_{rms_10min}	U_{rms_10min}
2012/11/20 19:10:00.000:000000	28,4761	28,4767	28,4758	28,4761	28,4767	28,4758

2.1.1.4 Podsumowanie pomiarów wartości skutecznej napięcia

W toku przeprowadzonych testów stwierdzono, że każdy z analizatorów prowadził pomiar wartości skutecznej napięcia w sposób prawidłowy. Otrzymane wyniki zawierały się w dopuszczalnym przedziale niepewności $\pm 0,1\% U_{din}$. Należy zaznaczyć, że proces agregacji próbek wartości skutecznej napięcia udało się zweryfikować tylko w przypadku jednego miernika, gdyż pozostałe nie udostępniały wyników pomiarów 10-okresowych. Przyjęty przez większość wytwórców analizatorów JDEE brak dostępu użytkownika do próbek 10-okresowych wydaje się być uzasadniony, gdyż norma [44] nie definiuje takiego wymagania, a w typowych pomiarach JDEE próbki te, poza rejestracjami zdarzeń, są zazwyczaj zbędne i usuwanie ich na bieżąco powoduje zmniejszenie pamięci potrzebnej do zapisu danych pomiarowych JDEE. Niemniej jednak w przypadku testów certyfikacyjnych są one konieczne, aby wiarygodnie ocenić poprawność agregacji danych pomiarowych. Dlatego również laboratoria wykonujące obecnie badania certyfikacyjne wymagają, aby dostarczany do testów miernik posiadał rozszerzone oprogramowanie umożliwiające dostęp do próbek zarówno U_{rms_200ms} , jak i otrzymywanych na każdym etapie agregacji.

2.1.2 Wahania napięcia

Wahania napięcia należą do jednych z najczęstszych zaburzeń spotykanych w sieciach elektroenergetycznych. Są one definiowane jako zmiany napięcia o amplitudzie $\pm 10\% U_N$ oraz o częstotliwości od 0,05 Hz do 35 Hz. Opisaną w normie [43] metodą oceny poziomu wahań napięcia, jest analiza jednego z jego skutków, czyli migotania światła, realizowana za pomocą miernika migotania światła. Do ilościowej oceny poziomu wahań napięcia wykorzystywane są wskaźniki migotania światła:

- P_{st} – obliczany w przedziale obserwacji 10 minut. Jest on dostatecznie długi, aby krótkotrwałe, sporadycznie występujące zmiany napięcia nie miały zbyt dużego wpływu na ostateczny wynik pomiaru i jednocześnie na tyle krótki, aby umożliwić szczegółowy opis odbiornika zaburzającego o długim cyklu pracy;
- P_{lt} – wyznaczany w przedziale obserwacji 2 godzin. Jest on wystarczająco długi, aby umożliwić analizę odbiorników przemysłowych charakteryzujących się z reguły długim cyklem pracy, szczególnie o losowym jego charakterze.

W tabeli 2.9 zebrano listę przyrządów wykorzystanych do badań porównawczych w zakresie pomiaru wahań napięcia. Jako źródło modulowanego napięcia wykorzystano programowalny generator NSG 1007.

Tabela 2.9. *Lista analizatorów JDEE – pomiary wahań napięcia*

Lp.	Producent	Urządzenie
1	A-eberle	PQI-DA
3	Fluke	Fluke 435
4	Lem (Fluke)	Topas 1000
5	Dranetz	Encore Series 61000
6	Procom System	Certan PQ-100
7	Unipower	Unilyzer 902C
8	Schneider	ION 7650
9	Siemens	Simeas Q80
10	Sonel	PQM-701
11	Q-Wave Qualitrol	PowerQuality RTV

2.1.2.1 Test 2.1 – Pomiar wartości P_{st} przy modulacji prostokątnej

Opis testu	Czas trwania testu: 10 min na każdy okres pomiarowy (P1...P7, Tabela 2.10). Na wejścia przyrządów podawany jest modulowany prostokątnie sygnał o częstotliwości nośnej $f = 50$ Hz oraz wartości skutecznej $U_{din} = 57,73$ V. Parametry przebiegu modulującego przedstawione zostały w tabeli 2.10.
Kryterium testu	Sprawdzeniu podlega poprawność wyznaczenia wskaźnika P_{st} . Dla każdego okresu pomiarowego wskaźnik P_{st} powinien wynosić $(1 \pm 5)\%$.

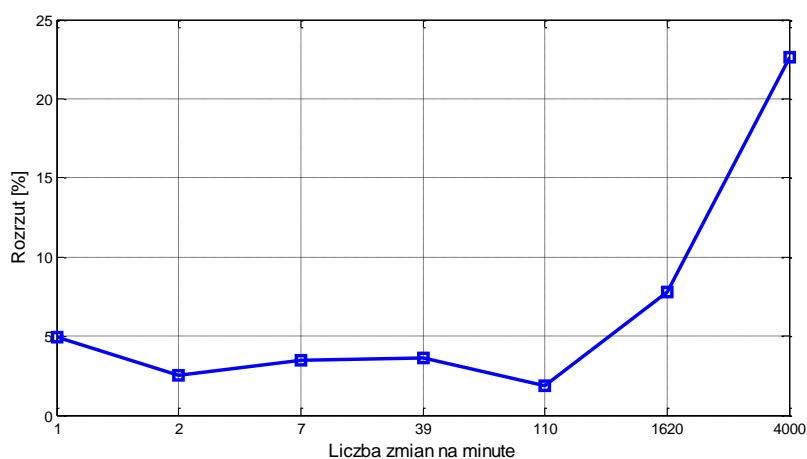
Tabela 2.10. *Test 2.1 – parametry modulacji*

Okres pomiarowy	Liczba zmian na minutę l_z	Częstotliwość modulacji f_m [Hz]	Względne zmiany napięcia $\Delta U/U$ [%]	Zmiany napięcia ΔU_i [V]
P1	1	0,0083	2,715	3,122
P2	2	0,0167	2,191	2,520
P3	7	0,0583	1,450	1,668
P4	39	0,325	0,894	1,028
P5	110	0,917	0,722	0,830
P6	1620	13,5	0,407	0,468
P7	4000	33,33	2,343	2,694

Na podstawie wyników wskazań P_{st} (tab. 2.11) można stwierdzić, że do częstotliwości modulacji 110 zmian na minutę, wskazania wszystkich analizatorów mieszczą się w dopuszczalnym przedziale niepewności. W ostatnich dwóch pomiarach stwierdzono wyraźne zawyżanie wartości przez jedno z urządzeń, co wpłynęło na zwiększenie rozrzutu wyników do 22,5% (rys. 2.2). Po wykluczeniu tego rejestratora z analizy rozrzut zmniejszył się do 4%.

Tabela 2.11. Wyniki testu 2.1

Analizator JDEE	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
PQ-IDA	1,002	1,003	1,036	0,979	0,965	1,060	0,989
Certan PQ-100	0,994	0,988	1,012	0,973	0,962	1,046	0,999
Simeas Q80	1	1	1,030	0,980	0,960	1,060	0,980
Fluke 435	1,030	1	1,030	0,980	0,960	1,050	1
ION 7650	1	1,002	1,033	0,975	0,961	1,028	1,019
PowerQuality RTV	0,990	1,010	1,040	0,960	0,970	1,110	1,210
Encore Series 61000	1,020	0,990	1,030	0,980	0,970	1,060	1,010
PQM-701	1,019	0,994	1,028	0,969	0,957	1,046	1,001
Topas 1000	1,020	0,993	1,025	0,969	0,956	1,045	1,001
Unilyzer 902C	1,040	1,015	1,050	0,992	0,975	1,065	1,000



Rys. 2.2. Test 2.1 - Rozrzut wyników

2.1.2.2 Test 2.2 - Liniowość wskazań P_{st} przy modulacji prostokątnej – 110 zmian/min

Opis testu	Czas trwania testu: 10 min na każdy okres pomiarowy (P1...P3, Tabela 2.12). Na wejścia przyrządów podawany jest modulowany prostokątnie sygnał o częstotliwości nośnej $f = 50$ Hz oraz częstotliwości modulacji $f_m = 0,917$ Hz, co odpowiada 110 zmianom na minutę. Amplitudy przebiegu modulującego, w każdym okresie pomiarowym wyznaczone są z zależności $\Delta U_i = k_i \cdot \Delta U$ dla $k_i \in [1; 10; 20]$ i wynoszą odpowiednio: $\Delta U_1 = 0,830$ V, $\Delta U_{10} = 8,303$ V, $\Delta U_{20} = 16,606$ V.
Kryterium testu	Sprawdzeniu podlega poprawność wyznaczenia wskaźnika P_{st} . Dla zadanych parametrów modulacji oczekiwane wyniki P_{st} w kolejnych pomiarach wynoszą: 1, 10 oraz 20. Dla warunków opisanych w [43] dopuszczalna niepewność pomiaru P_{st} wynosi 5% wartości zmierzonej i powinna być spełniona w przedziale od 0,2 do 10.

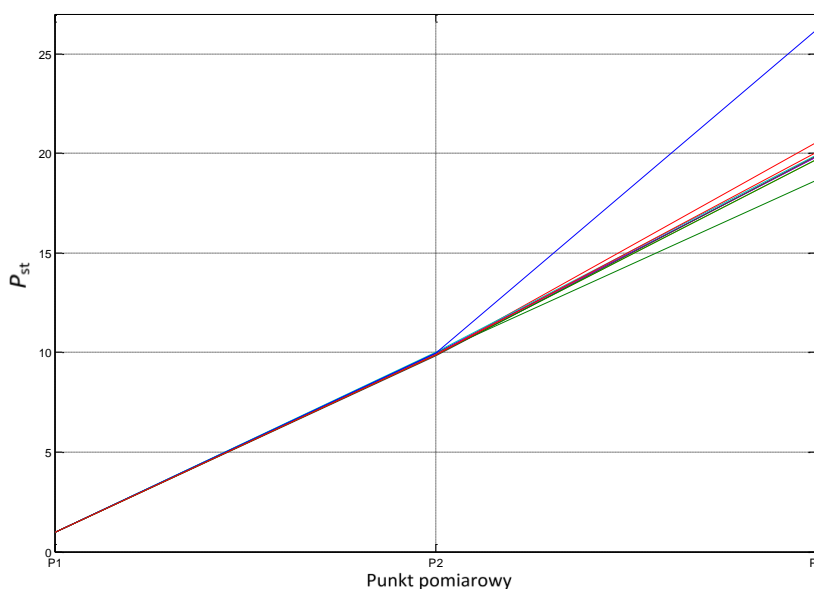
Wynik testu uznawany był za pozytywny jeżeli rozrzut wyników pomiaru względem ich wartości średniej był mniejszy niż 10%. Z analizy wyników w tabeli 2.12 oraz na rysunku 2.3 można stwierdzić, że tylko jeden z analizatorów nie wykazuje liniowości pomiaru P_{st} w zależności od głębokości modulacji prostokątnej. Zjawisko ma miejsce dla pomiaru P3 ($k =$

20). Po wykluczeniu tego wskazania z analizy stwierdzono, że rozrzut wyników względem wartości średniej oraz oczekiwanej jest mniejszy niż 10%.

Tabela 2.12. Wyniki testu 2.2 – liniowość wskazań przy modulacji prostokątnej – 110 zmian/min

Analizator JDEE	P1	P2	P3
PQ-IDA	0,965	9,962	19,848
Certan PQ-100	0,962	9,962	18,647
Simeas Q80	0,960	9,881	20,550
Fluke 435	0,960	10,04	19,900
ION 7650	0,961	9,94	19,825
PowerQuality RTV	0,970	9,9	19,700
Encore Series 61000	0,960	9,85	19,870
PQM-701	0,957	9,96	26,210
Topas 1000	0,956	9,87	19,680
Unilyzer 902C	0,973	9,862	20,037

Wartość oczekiwana	1	10	20
Rozrzut względem wartości oczekiwanej	-4,40%	-1,50% +0,40%	-6,77% +31,05%
Wartość średnia	0,962	9,923	20,427
Rozrzut względem wartości średniej	-0,67% +1,10%	-0,73% +1,18%	-8,71% +28,31%



Rys. 2.3. Graficzna prezentacja wyników testu 2.2

2.1.2.3 Test 2.3 – Liniowość wskaźń P_{st} przy modulacji prostokątnej – 1620 zmian/min

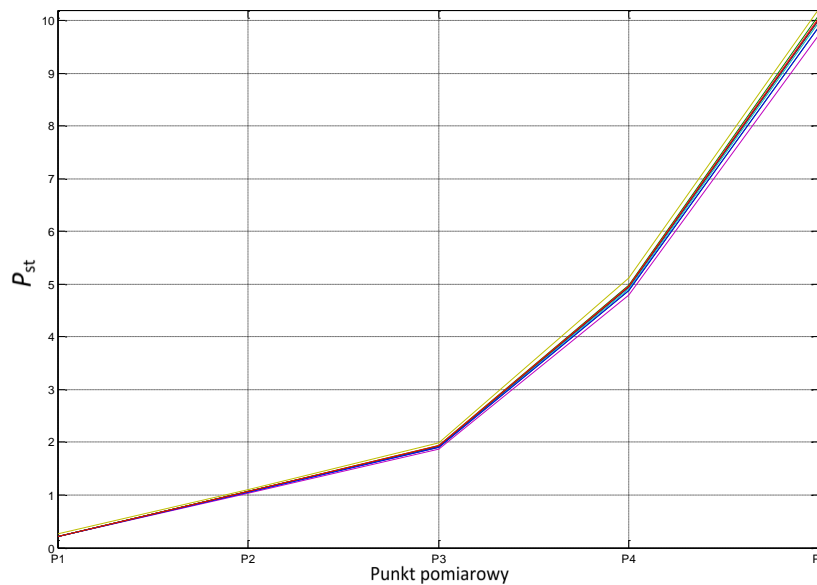
Opis testu	Czas trwania testu: 10 min na każdy okres pomiarowy (P1...P5, Tabela 2.13). Na wejścia przyrządów podawany jest modulowany prostokątnie sygnał o częstotliwości nośnej $f = 50$ Hz oraz częstotliwości modulacji $f_m = 13,5$ Hz, co odpowiada 1620 zmianom na minutę. Amplitudy przebiegu modulującego w każdym z okresów pomiarowych wyznaczane są z zależności $\Delta U_i = k_i \cdot \Delta U$ dla $k_i \in [0,2; 1; 2; 5; 10]$ i wynoszą odpowiednio: $\Delta U_1 = 0,094$ V, $\Delta U_2 = 0,468$ V, $\Delta U_3 = 0,936$ V, $\Delta U_4 = 2,340$ V, $\Delta U_5 = 4,680$ V, $\Delta U_6 = 9,360$ V.
Kryterium testu	Sprawdzeniu podlega poprawność wyznaczenia wskaźnika P_{st} . Dla zadanych parametrów modulacji oczekiwane wyniki P_{st} w kolejnych pomiarach wynoszą: 0,2; 1; 2; 5 oraz 10. Dopuszczalna niepewność pomiarowa wynosi 5% wartości zmierzonej.

Z analizy wyników zebranych w tabeli 2.13 można stwierdzić, że tylko jeden z analizatorów nie wykazuje liniowości wskaźń P_{st} w zależności od głębokości modulacji prostokątnej. Zjawisko ma miejsce dla pomiaru P1 ($k = 0,2$). Po wykluczeniu tego wskazania z analizy stwierdzono, że rozrzut wyników względem wartości zarówno średniej, jak i oczekiwanej, jest mniejszy niż 10%. Wyniki testu w formie graficznej zaprezentowane zostały na rysunku 2.4.

Tabela 2.13. Wyniki testu 2.3

Analizator JDEE	P1	P2	P3	P4	P5
PQ-IDA	0,216	1,060	1,927	4,945	10,04
Certan PQ-100	0,214	1,061	1,902	4,879	9,908
Simeas Q80	0,22	1,060	1,92	4,95	10,03
Fluke 435	0,21	1,050	1,92	4,91	9,99
ION 7650	0,209	1,029	1,871	4,798	9,75
PowerQuality RTV	0,26	1,110	1,99	5,12	10,24
Encore Series 61000	0,22	1,060	1,93	4,94	10,03
PQM-701	0,214	1,047	1,904	4,879	9,907
Topas 1000	0,219	1,069	1,942	4,98	10,12
Unilyzer 902C	0,216	1,063	1,943	4,97	10,08

Wartość oczekiwana	0,2	1	2	5	10
Rozrzut względem wartości oczekiwanej	+30%	+11,00%	-6,45%	-4,04% +2,40%	-2,50% +2,40%
Wartość średnia	0,220	1,061	1,925	4,937	10,010
Rozrzut względem wartości średniej	-5,19% +17,94%	-3,01% +4,63%	-2,80% +3,38%	-2,82% +3,7%	-2,59% +2,30%

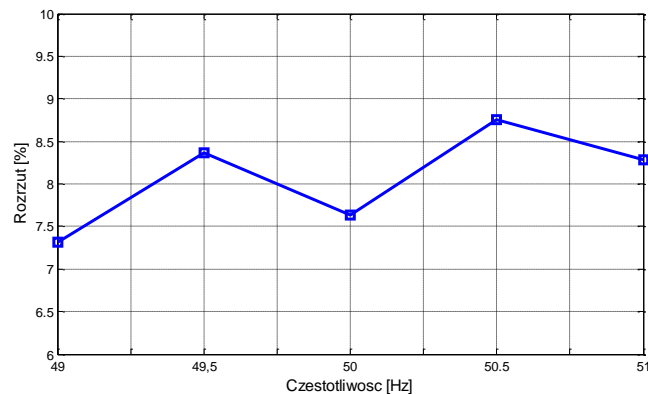


Rys. 2.4. Graficzna prezentacja wyników testu 2.3

2.1.2.4 Test 2.4 – Wpływ zmiany częstotliwości na pomiar P_{st}

Opis testu	Czas trwania testu: 10 min na każdy okres pomiarowy (P1...P5, Tabela 2.14). Na wejścia przyrządów podawany jest modulowany prostokątnie sygnał o wartości skutecznej $U_{din} = 57,73$ V. Parametry modulacji: $f_m = 13,5$ Hz, $\Delta U = 0,4623$ V. Częstotliwość nośna (składowej podstawowej) sygnału dla poszczególnych okresów pomiarowych jest różna i zawiera się w przedziale od 49 do 51 Hz ze skokiem 0,5 Hz.
Kryterium testu	Sprawdzeniu podlega poprawność wyznaczenia wskaźnika P_{st} . Dla zadanych warunków testu wpływ zmiany częstotliwości nie powinien być przyczyną przekroczenia dopuszczalnej niepewności pomiaru współczynnika P_{st} , którego oczekiwana wartość w każdym okresie pomiarowym wynosi $(1 \pm 5)\%$.

Na podstawie analizy wyników w tabeli 2.14 można stwierdzić, że całkowity rozrzut względem wartości średniej utrzymuje się w przedziale (7,2 – 8,7)%. Założone warunki testu zostały spełnione. Rysunek 2.5 przedstawia wykres całkowitego rozrzutu względem wartości średniej w zależności od częstotliwości mierzonego sygnału.



Rys. 2.5. Wyniki testu 2.4 – Rozrzut wskazań P_{st} w odniesieniu do wartości średniej

Tabela 2.14. Wyniki testu 2.4

Analizator JDEE	P1	P2	P3	P4	P5
PQ-IDA	1,057	1,058	1,060	1,062	1,063
Certain PQ-100	1,052	1,045	1,061	1,048	1,050
Simeas Q80	1,060	1,060	1,060	1,070	1,070
Fluke 435	1,050	1,050	1,050	1,060	1,060
ION 7650	0,994	1,012	1,029	1,046	1,064
PowerQuality RTV	1,070	1,100	1,110	1,140	1,150
Encore Series 61000	1,020	1,040	1,060	1,070	1,100
PQM-701	1,013	1,029	1,047	1,065	1,082
Topas 1000	1,034	1,051	1,069	1,087	1,130
Unilyzer 902C	1,030	1,051	1,063	1,090	1,090

Wartość oczekiwana	1				
Rozrzut względem wartości oczekiwanej	+7,0% -0,6%	+10,0%	+11,0%	+14,0%	+15,0%
Wartość średnia	1,038	1,050	1,061	1,074	1,086
Rozrzut względem wartości średniej	-4,24% +3,08%	-3,58% +4,80%	-3,01% +4,63%	-2,59% +6,17%	-3,31% +5,90%

2.1.2.5 Podsumowanie pomiarów wahań napięcia

Analiza wykonanych badań prowadzi do następujących wniosków:

- a) wskaźnik P_{st} wyznaczany był poprawnie przez przeważającą większość analizatorów JDEE we wszystkich zadanych punktach pomiarowych,
- b) stwierdzono pojedyncze przypadki widocznych rozbieżności względem wartości oczekiwanej lub uśrednionej w testach:
 - i. pomiaru sygnału o częstotliwości wahań 4000 zmian/min (test 2.1),
 - ii. pomiaru relatywnie dużej wartości $P_{st}=20$ (test 2.2),
 - iii. pomiaru relatywnie małej wartości $P_{st}=0,2$ (test 2.3).
- c) brak systematycznych błędów pomiarowych spowodowanych błędem algorytmu lub niepoprawną interpretacją zapisów normy [43],
- d) brak wyraźnego wpływu zmiany częstotliwości składowej podstawowej sygnału mierzonego na rozrzut wyników P_{st} (test 2.4).

Należy zwrócić uwagę na dokonanie istotnego postępu w jakości pomiaru P_{st} względem analogicznych pomiarów z roku 2008 opisanych w pracy [60], w której autor stwierdzał m.in. liczne błędy systematyczne wynikające z różnych interpretacji zapisów ówczesnej wersji normy [43]. Dokument ten nie określał jednoznacznie czy liczbę zmian na minutę należy interpretować jako liczbę wszystkich zmian napięcia, czy też liczbę okresów sygnału modulującego w ciągu jednej minuty, a także nie definiował w jaki sposób zmiany napięcia powinny występować

względem jego ustalonej wartości skutecznej. Skutkowało to rozbieżnościami wyników pomiarów na poziomie nawet 100% wartości mierzonej.

2.1.3 Odształcenie napięcia

Na wejścia analizatorów JDEE, za pomocą programowalnego generatora NSG 1007, podawano sygnały pomiarowe o wartości skutecznej 230 V o różnym stopniu odształcenia. Ocena poprawności pomiaru odbywała się poprzez obliczenie względnego błędu pomiaru δ dla poszczególnych harmonicznnych oraz wskaźnika THD.

Dla przyrządów mierzących harmoniczne napięcia i prądu zaleca się dwie klasy dokładności. Maksymalne dopuszczalne błędy podane w tabeli 2.15 dotyczą ustalonych sygnałów o pojedynczej częstotliwości, zawartych w przedziale częstotliwości pracy, przyłączonych do przyrządu pracującego w warunkach znamionowych określonych przez wytwórcę (zakres temperatury, zakres wilgotności, napięcie zasilające przyrządu itd.) [45]. Lista analizatorów wykorzystanych w pomiarach odształcenia napięcia przedstawiona została w tabeli 2.16.

Tabela 2.15. Wymagane dokładności dla pomiarów napięcia i prądu [45]

Klasa	Pomiar	Warunki	Maksymalny błąd
I	Napięcie	$U_m \geq 1\% U_{din}$ $U_m < 1\% U_{din}$	$\pm 5\% U_m$ $\pm 0,05\% U_{din}$
	Prąd	$I_m \geq 3\% I_{din}$ $I_m < 3\% I_{din}$	$\pm 5\% I_m$ $\pm 0,15\% I_{din}$
II	Napięcie	$U_m \geq 3\% U_{din}$ $U_m < 3\% U_{din}$	$\pm 5\% U_m$ $\pm 0,15\% U_{din}$
	Prąd	$I_m \geq 10\% I_{din}$ $I_m < 10\% I_{din}$	$\pm 5\% I_m$ $\pm 0,5\% I_{din}$
I_{din} : deklarowany prąd przyrządu pomiarowego U_{din} : deklarowane napięcie przyrządu pomiarowego U_m i I_m : mierzone wartości			

Tabela 2.16. Lista analizatorów JDEE wykorzystanych w pomiarach odształcenia napięcia

Lp.	Producent	Analizator JDEE
1	A-eberle	PQI-DA
2	A-eberle	PQ Box 200
3	Procom System	Certan PQ-100
4	Siemens	Simeas Q80
5	Fluke	Fluke 435
6	Schneider Electric PowerLogic	ION7650
7	Sonel	PQM-701
8	Lem (Fluke)	Topas 1000
9	PSL	PQube
10	Mikronika	SO-52v11-eME
11	Unipower	Unilyzer

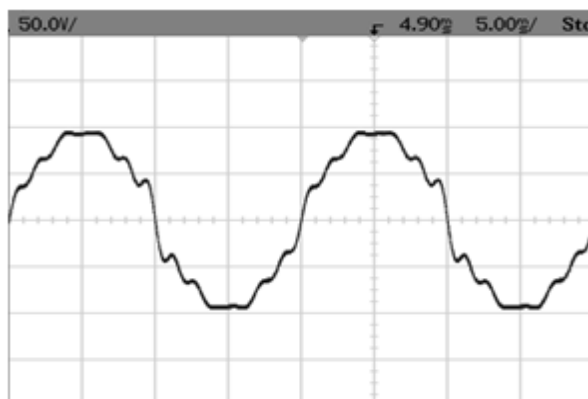
2.1.3.1 Test 3.1 - Niepewność pomiaru dla pojedynczej harmonicznej

Opis testu	Na wejścia przyrządów podawany jest sygnał napięciowy o wartości skutecznej $U_{\text{rms}} = 230 \text{ V}$ oraz zawartości poszczególnych harmonicznych podanej w tabeli 2.17.
Kryterium testu	Sprawdzeniu podlega pomiar wartości skutecznej wyższych harmonicznych. Dla zadanych warunków testu rozrzut wartości poszczególnych harmonicznych nie powinien przekraczać 10% względem wartości średniej wskazań.

Przebieg oscyloskopowy sygnału testowego przedstawiony został na rysunku 2.6. Wyniki testu 3.1 zebrane zostały w tabeli 2.18.

Tabela 2.17. Zawartość poszczególnych harmonicznych – test 3.1

Rząd harmonicznej	$U_{(h)}/U_{(1)}$ [%]	Rząd harmonicznej	$U_{(h)}/U_{(1)}$ [%]	Rząd harmonicznej	$U_{(h)}/U_{(1)}$ [%]
1	100	6	1	11	5
2	1	7	5	12	1
3	5	8	1	13	5
4	1	9	1	14	1
5	5	10	1	15	1



Rys. 2.6. Oscylogram przebiegu wykorzystanego w teście 3.1

Tabela 2.18. Test 3.1 - wyniki pomiaru poszczególnych harmonicznych

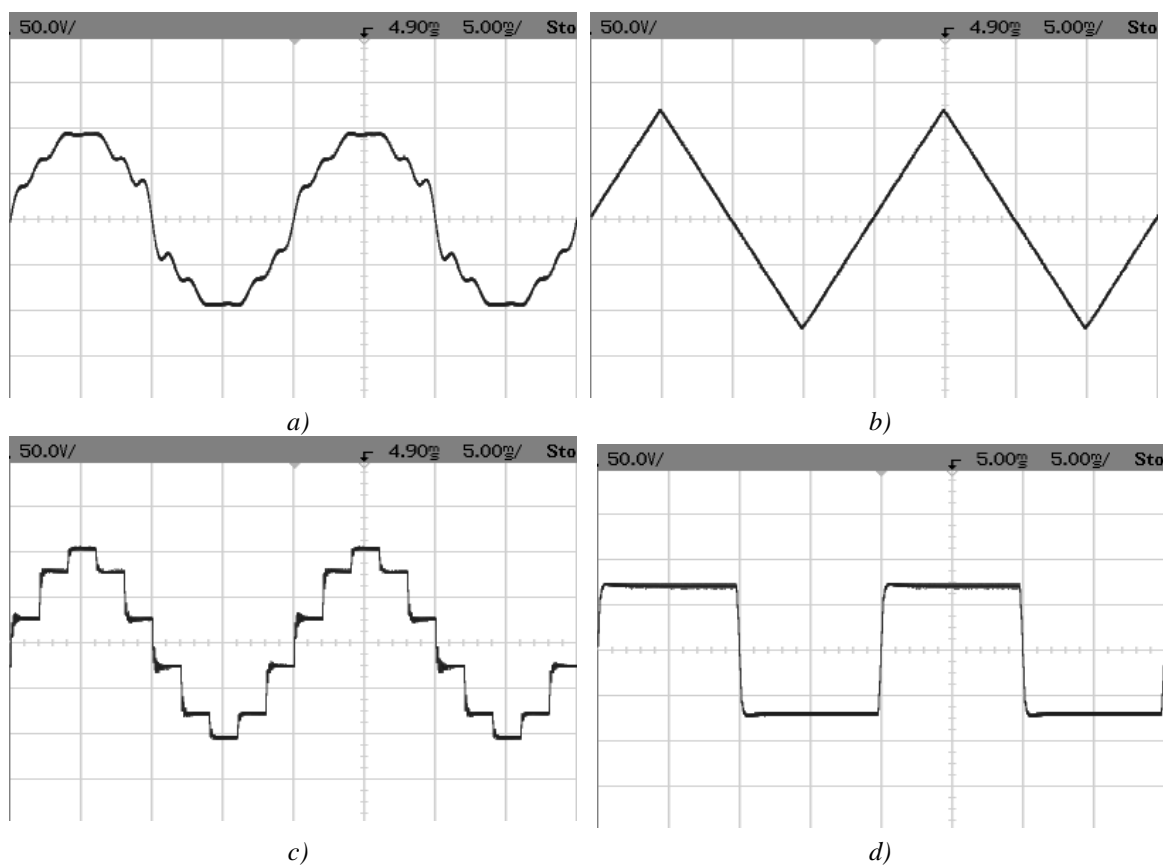
Rząd harmonicznej	Zawartość harmonicznej [%]														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
PQube	99,93	0,99	5,08	0,99	5,01	0,99	4,99	0,99	1,04	1,04	4,85	0,97	4,76	0,92	0,92
SO-52v11-eME	100,00	1,01	5,12	1,02	5,07	1,01	5,04	1,00	1,06	0,99	4,90	0,98	4,82	0,95	0,99
Certan PQ-100	100,02	1,01	5,08	1,02	5,03	1,01	4,99	0,99	1,05	0,98	4,84	0,96	4,75	0,94	0,97
Simeas Q80	99,80	1,01	5,08	1,02	5,03	1,02	4,99	1,00	1,05	0,98	4,86	0,98	4,77	0,95	0,98
Fluke 435	100,00	1,00	5,10	1,00	5,00	1,00	5,00	1,00	1,10	1,00	4,90	1,00	4,80	0,90	1,00
ION 7650	99,30	1,00	5,10	1,00	5,00	1,00	5,00	1,00	1,00	1,00	4,80	1,00	4,70	0,90	1,00
Topas 1000	100,07	1,00	5,10	1,01	5,05	1,02	4,99	0,99	1,04	0,98	4,84	0,97	4,78	0,95	0,98
PQM-701	99,98	1,01	5,09	1,01	5,04	1,01	5,00	1,00	1,05	0,98	4,87	0,98	4,79	0,95	0,98
PQ-IDA	100,00	1,00	5,10	1,02	5,04	1,00	5,00	1,00	1,05	0,98	4,87	0,97	4,79	0,95	0,98
Średnia	99,90	1,00	5,09	1,01	5,03	1,01	5,00	1,00	1,05	0,99	4,86	0,98	4,77	0,93	0,98
Rozrzut [%]	0,77	1,99	0,79	2,97	1,39	2,98	1,00	1,00	9,53	6,05	2,06	4,09	2,51	5,35	8,18

Podczas analizy wyników zauważono, że wśród analizatorów będących przedmiotem badań widoczne są rozbieżności w sposobie prezentowania wartości poszczególnych harmonicznych (wartości względne [%] lub bezwzględne [V]). W celu ujednoczenia prezentacji wyników dokonano konwersji wartości bezwzględnych na procentowe.

Analizując wyniki testu nie stwierdzono rozrzutu wyników pomiarowych powyżej 10% względem wartości średniej wskazań. Maksymalny rozrzut 9,53% otrzymano dla wyników pomiaru 9. harmonicznej.

2.1.3.2 Test 3.2 - Poprawność wyznaczania wskaźnika THD

Opis testu	Na wejścia przyrządów podawany jest odkształcony sygnał napięciowy o wartości skutecznej pierwszej harmonicznej $U_{(1)} = 230$ V. Charakter odkształcenia w poszczególnych okresach pomiarowych prezentowany jest na rysunkach 2.7a-d.
Kryterium testu	Sprawdzeniu podlega poprawność wyznaczania wskaźnika THD napięcia. Dla zadanych warunków testu rozrzut względem wartości średniej otrzymanych wskazań powinien być nie większy niż 10%.

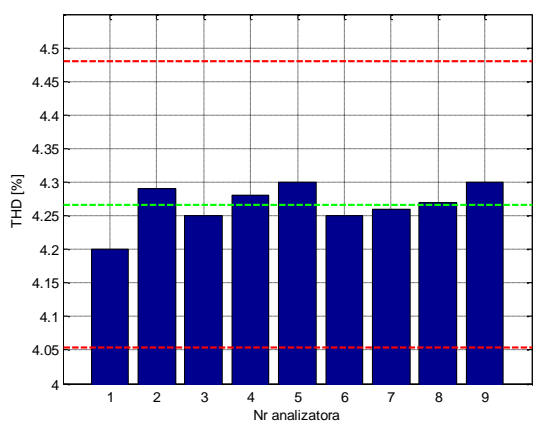


Rys. 2.7. Oscylogramy sygnałów testowych

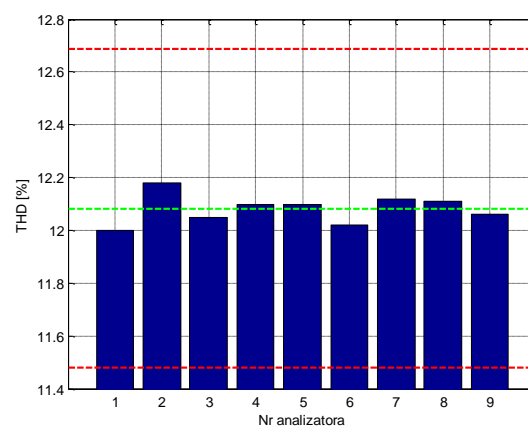
W tabeli 2.19 oraz na rysunku 2.8 zebrano wyniki pomiaru THD. Zieloną linią oznaczono wartość średnią. Czerwone linie wyznaczają przedział dopuszczalnej niepewności w ramach przyjętego kryterium testu.

Tabela 2.19. Wyniki pomiaru THD – test 3.2

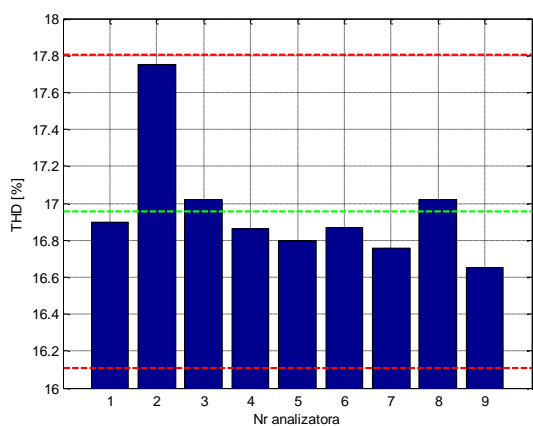
Przyrząd		THD [%]			
		sygnał a)	sygnał b)	sygnał c)	sygnał d)
1	PQube	4,2	12	16,9	41
2	SO-52v11-eME	4,29	12,18	17,75	45,32
3	Certan PQ-100	4,25	12,05	17,02	44,91
4	Simeas Q80	4,28	12,10	16,86	45,05
5	Fluke 435	4,30	12,10	16,80	45,00
6	ION 7650	4,25	12,02	16,87	41,03
7	Topas 1000	4,26	12,12	16,76	44,99
8	PQM-701	4,27	12,11	17,02	41,08
9	PQ-IDA	4,3	12,06	16,65	44,86
Średnia wskazań THD [%]		4,27	12,09	16,96	43,69
Rozrzut procentowy wokół wartości średniej [%]		+0,7%	+0,74%	+4,7%	+3,7%
		-1,6%	-0,74%	-1,8%	-6,2%



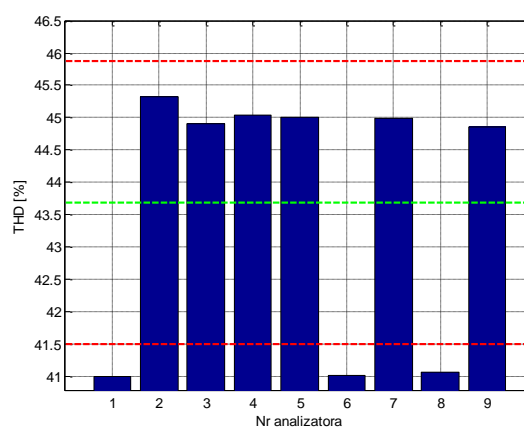
a)



b)



c)



d)

Rys. 2.8. Graficzna ilustracja wyników testu 3.2

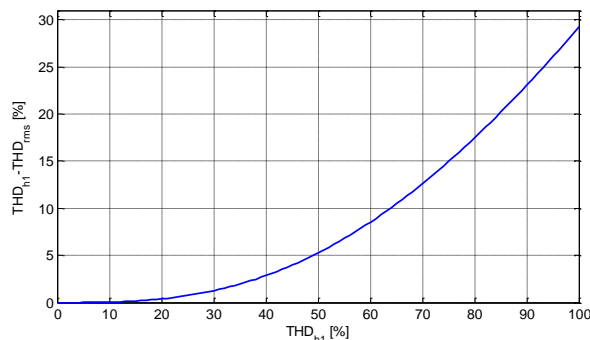
Po odczytaniu wartości bezwzględnych poszczególnych harmonicznych z wszystkich analizatorów, stwierdzono, że zawierały się one w przedziale $\pm 5\%$ względem wartości średniej i nie uwidaczniał się podział na dwie grupy, jaki można zaobserwować w przypadku pomiaru THD. Tym samym potwierdzono, że były one mierzone poprawnie. Dalsza analiza zjawiska wskazała na możliwą różnicę w wykorzystanej formule obliczeniowej wskaźnika THD. Ostatecznie wykazano, że trzy analizatory zaniżają wskazanie THD, obliczając go zgodnie z równaniem (2.4), w którym w mianowniku, zamiast 1-szej harmonicznej znajduje się wartość skuteczna.

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{n=2}^H \left(\frac{G_n}{h_{(1)}} \right)^2} \quad (2.3)$$

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{n=2}^H \left(\frac{G_n}{rms} \right)^2} \quad (2.4)$$

Aby zbadać przyczynę takiego stanu rzeczy sprawdzono zapisy instrukcji obsługi oraz specyfikacji technicznych analizatorów będących przedmiotem badań. Okazało się, że w jednym z przypadków, wytwórca określił dwa sposoby wyznaczania wskaźnika THD napięcia, wskazując wyraźnie na różnicę pomiędzy nimi. W dostarczonej instrukcji przedstawione zostały dwa równania wykorzystane do obliczeń. Osoba prowadząca pomiary może wybrać, które wyrażenie ma być wykorzystane do wyznaczania THD, jednak nazwa wskaźnika nie ulega zmianie. W pozostałych dwóch przypadkach nie znaleziono żadnej informacji na temat formuły stosowanej do wyznaczania THD, co należy interpretować jako istotny błąd ponieważ standard [44] określa tylko jedną metodę obliczania THD. Jedna z instrukcji obsługi podawała informację, że zakres pomiarowy urządzenia dla pomiaru THD wynosi (0 – 100)% co, może sugerować że THD liczone jest w odniesieniu do wartości *rms*, gdyż użycie takiej formuły automatycznie eliminuje możliwość otrzymania wskazań większych od 100%. Sytuacja w której analizator mierzy THD w zależności od *rms* powinna być jasno wskazana poprzez chociażby rozróżnienie nazwy wskaźnika. W przeciwnym wypadku użytkownicy analizatorów mogą być wprowadzani w błąd. Jeszcze gorzej, gdy analizator potrafi tylko mierzyć THD w odniesieniu do wartości *rms*, co jest niezgodne z normą [44].

Na rysunku 2.9 zilustrowany został wpływ różnicy zastosowanych formuł obliczeniowych na wskazanie THD. Można zauważyć, że w przypadku sygnałów odkształconych w niewielkim stopniu ($\text{THD}_{h1} < 15\%$) obserwowany rozrzut jest pomijalnie mały (poniżej 0,2%). Różnica większa od 5% pojawia się po przekroczeniu $\text{THD}_{h1}=50\%$.

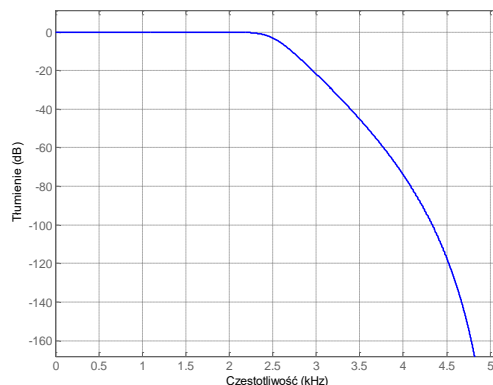


Rys. 2.9. Różnica pomiędzy wskaźnikami THD liczonymi za pomocą formuł (2.3) oraz (2.4)

2.1.3.3. Test 3.3 – Badanie poprawności działania filtra antyaliasingowego

Opis testu	Na wejścia przyrządów podawany jest sygnał o amplitudzie podstawowej harmonicznej $A_{(1)}=10\text{ V}$ oraz pojedynczej harmonicznej o amplitudzie 5 V (50% $A_{(1)}$) oraz częstotliwości $n \cdot f_s + f_0$, gdzie f_s oznacza częstotliwość próbkowania analizatora JDEE, n jest liczbą całkowitą, natomiast f_0 wynosi: a) 150 Hz, b) 350 Hz.
Kryterium testu	Sprawdzeniu podlega poprawność zastosowanego filtra antyaliasingowego. Zgodnie z [45] składowe o częstotliwościach znajdujących się poza zakresem pomiarowym przyrządu powinny być tłumione, aby nie wpływały na wyniki pomiarów. W tym celu należy stosować antyaliasingowy filtr dolnoprzepustowy, z tłumieniem co najmniej -3 dB dla częstotliwości powyżej deklarowanego zakresu pomiarowego. Tłumienie w paśmie zaporowym powinno być większe niż 50 dB . Oznacza to, że zmierzone amplitudy składowych rzędów $n \cdot f_s + f_0$, gdzie: n – liczba całkowita z przedziału od 2 do ∞ , f_s – częstotliwość próbkowania analizatora powinny być mniejsze niż $\sim 0,003$ ich rzeczywistej amplitudy.

Zastosowanie napięć na poziomie 10 V wynikało z ograniczeń sprzętowych generatora składowej wysokiej częstotliwości wykorzystanego do testu. Jako przykład filtra antyaliasingowego spełniającego wymagania stawiane przez normę [45] można wymienić filtr Butterwortha 5. rzędu, którego charakterystyka amplitudowa przedstawiona jest na rysunku 2.10. Wyniki testu zebrano w tabelach 2.20 i 2.21.



Rys. 2.10. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa filtra Butterwortha 5. rzędu

Tabela 2.20. Wyniki testu 3.3a

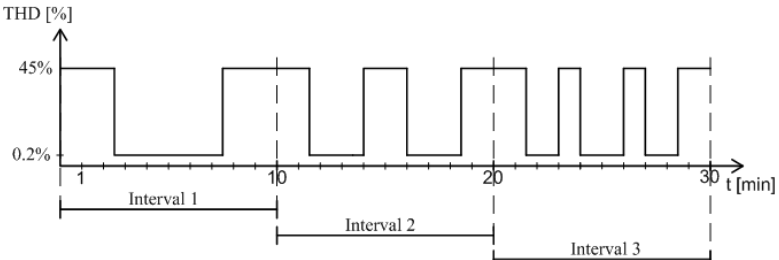
	Fluke 435	Unilyzer	Topas	PQ Box 200
f_s [kHz]	10,24	12,80	6,4	40,96
$f_0 = 150\text{ Hz}$	50,2%	50,2%	50,4%	50,2%
$2 \cdot f_s + f_0$	6%	0	0,073%	0,009%
$3 \cdot f_s + f_0$	0,1%	0	0,079%	0,009%
$4 \cdot f_s + f_0$	2,6%	0	< 0,1%	0,012%
$5 \cdot f_s + f_0$	0,2%	0	< 0,1%	0,008%
$6 \cdot f_s + f_0$	1,2%	0	< 0,1%	0,007%
$8 \cdot f_s + f_0$	0,4%	0	< 0,1%	0,008%
$10 \cdot f_s + f_0$	0,2%	0	< 0,1%	0,009%

Tabela 2.21. Wyniki testu 3.3b

	Fluke 435	Unilyzer	Topas 1000	PQ Box 200
f_s [kHz]	10,24	12,800	6,4	40,96
$f_0 = 150$ Hz	50,2%	50,2%	50,4%	50,2%
$2 \cdot f_s + f_0$	5,5%	0	< 0,1%	0,008%
$3 \cdot f_s + f_0$	0%	0	< 0,1%	0,010%
$4 \cdot f_s + f_0$	2,5%	0	< 0,1%	0,011%
$5 \cdot f_s + f_0$	0%	0	< 0,1%	0,008%
$6 \cdot f_s + f_0$	1,0%	0	< 0,1%	0,007%
$8 \cdot f_s + f_0$	0,3%	0	< 0,1%	0,008%
$10 \cdot f_s + f_0$	0,1%	0	< 0,1%	0,008%

Analizując wyniki testu można stwierdzić, że jeden z analizatorów nie posiada filtru antyaliasingowego. W pozostałych przypadkach tłumienie składowej wysokiej częstotliwości realizowane było z dostateczną skutecznością w rozumieniu zapisów normy [45].

2.1.3.4 Test 3.4 – Agregacja wskaźnika THD

Opis testu	<p>Czas trwania testu: 30 minut (10 minut na każdy przedział pomiarowy). Na wejścia przyrządów podawany jest sygnał napięcia o skokowej zmianie odkształcenia: od THD = 0,2% (prawie idealna sinusoida) do THD = 45% (przebieg prostokątny). Sekwencja poszczególnych zmian, rozłożona na trzy 10-minutowe interwały czasowe, przedstawiona została na rysunku 2.11. Zmiany zostały ustalone w taki sposób, aby udział każdego z dwóch przebiegów w każdym z trzech przedziałów pomiarowych wynosił 50%. Celem testu jest ocena poprawności agregacji 10-minutowej współczynnika THD.</p>  <p>Rys. 2.11. Agregacja 10-minutowa - sekwencja sygnału testowego</p>
Kryterium testu	<p>Sprawdzeniu podlegają 10-minutowe próbki THD napięcia. Zgodnie z [44] agregacje powinny być realizowane z wykorzystaniem pierwiastka kwadratowego ze średniej arytmetycznej z wielkości wejściowych podniesionych do kwadratu – zależność (2.5). W rozważanych interwałach czasowych oczekiwanym wynikiem jest THD = (31,86±5)% wartości mierzonej.</p>

$$\text{THD}_{10_min} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{200} \text{THD}_{3_sec}^2(i)}{200}} \quad (2.5)$$

Na rysunku 2.12 przedstawiono oscylogram napięcia prostokątnego podanego podczas testu, natomiast w tabeli 2.22 zawarte zostały wyniki pomiaru THD.



Rys. 2.12. Oscylogram sygnału testowego – test 3.4

Tabela 2.22. Wyniki pomiarów THD - agregacja 10 min

	Topas 1000	PQ Box 200	PQM-710	Simeas Q80	SO-52v11-eME
Interwał 1	30,12	29,72	22,23	45,05	30,06
Interwał 2	30,30	29,84	22,61	45,05	30,20
Interwał 3	30,48	29,88	22,86	45,05	30,25

Analiza otrzymanych wyników prowadzi do następujących wniosków:

- 1) Analizatory nr 1, 2 oraz 5 dokonywały poprawnej agregacji współczynnika THD. Otrzymane wartości mieszczą się w dopuszczalnym przedziale niepewności.
- 2) Analizator nr 3 agregował wartość 10 minutową w sposób błędny, najprawdopodobniej przy użyciu średniej arytmetycznej, co stwierdzono analizując jego wskazania.
- 3) Analizator nr 4 agregował wartość 10 minutową w sposób błędny. Przeprowadzone testy wskazują na fakt, że w przypadku tego urządzenia jako zagregowana wartość 10-minutowa wyświetlana była zawsze pierwsza zarejestrowana w danym interwale czasowym wartość 200 ms, co zostało potwierdzone poprzez wykonanie dodatkowego testu, w którym interwał 10-minutowy zaczynał się podaniem sygnału sinusoidalnego. Wskazanie THD w tym przypadku wyniosło 0,2%.

2.1.3.5 Podsumowanie pomiarów odkształcenia napięcia

W wyniku przeprowadzonych testów nie stwierdzono rozrzutu wskazań poszczególnych harmonicznym powyżej 10% względem ich wartości średniej, co zgodnie z założonym kryterium, można uznać za spełnienie warunków testu przez wszystkie analizatory JDEE. Zasadnicze różnice wskazań pojawiły się jednak w przypadku pomiaru THD, który w zależności od analizatora wyliczany był przy wykorzystaniu różnych formuł obliczeniowych. Innym napotkanym błędem były niepoprawne metody agregacji THD, realizowane poprzez wyliczanie średniej arytmetycznej lub poprzez przepisywanie pierwszej wartości 200 ms wyznaczonej w 10 minutowym oknie agregacji. W przypadku jednego analizatora stwierdzono brak filtra antyaliasingowego.

2.1.4 Asymetria składowej podstawowej napięcia

Pomiary asymetrii napięcia dotyczą wyłącznie systemów 3-fazowych. Wykonuje się je korzystając z metody składowych symetrycznych. Zgodnie z jej założeniami w przypadku asymetrii napięcia, oprócz składowej symetrycznej kolejności zgodnej U^1 , występuje także co

najmniej jedna z dodatkowych składowych: kolejności przeciwnej U^2 i/lub kolejności zerowej U^0 . Napięcia fazowe wyrażone za pomocą składowych symetrycznych opisują równania (2.6).

$$\begin{aligned}\underline{U}_{L1} &= \underline{U}_{L1}^0 + \underline{U}_{L1}^1 + \underline{U}_{L1}^2 \\ \underline{U}_{L2} &= \underline{U}_{L2}^0 + \underline{U}_{L2}^1 + \underline{U}_{L2}^2 \\ \underline{U}_{L3} &= \underline{U}_{L3}^0 + \underline{U}_{L3}^1 + \underline{U}_{L3}^2\end{aligned}\quad (2.6)$$

Przyjmując fazę L1 jako fazę odniesienia można zapisać:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{L1} \\ \underline{U}_{L2} \\ \underline{U}_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}^0 \\ \underline{U}^1 \\ \underline{U}^2 \end{bmatrix}\quad (2.7)$$

gdzie a jest tzw. operatorem obrotu o 120° i wynosi on: $a=e^{j120^\circ}$, $a^2=e^{j240^\circ}$.

Składowe symetryczne napięcia oblicza się z równań macierzowych znając moduł i przesunięcia fazowe wektorów napięć fazowych.

$$\begin{bmatrix} \underline{U}^0 \\ \underline{U}^1 \\ \underline{U}^2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_{L1} \\ \underline{U}_{L2} \\ \underline{U}_{L3} \end{bmatrix}\quad (2.8)$$

Dla systemów zasilających 50 Hz składowa podstawowa napięciowego sygnału wejściowego jest mierzona w przedziale 10 okresów. Miarą asymetrii są wskaźniki k_{u2} , k_{u0} równe stosunkowi wartości składowej przeciwnej i/lub zerowej do składowej zgodnej (2.9 oraz 2.10) [44]:

$$k_{u2} = \frac{U^2}{U^1} \cdot 100\% \quad (2.9)$$

$$k_{u0} = \frac{U^0}{U^1} \cdot 100\% \quad (2.10)$$

Wadą wyznaczania wskaźnika asymetrii wg zależności (2.9) i (2.10) jest konieczność znajomości składowych symetrycznych napięcia, co znacznie utrudnia jego praktyczne stosowanie. W normie [44] zaproponowana została alternatywna metoda obliczania wskaźnika asymetrii napięcia na podstawie wartości skutecznych napięć międzyfazowych:

$$k_{u2} = \sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\beta}}{1+\sqrt{3-6\beta}}} \times 100 \text{ gdzie } \beta = \frac{U_{L12}^4 + U_{L23}^4 + U_{L31}^4}{(U_{L12}^2 + U_{L23}^2 + U_{L31}^2)^2} \quad (2.11)$$

gdzie: U_{L12} , U_{L23} , U_{L31} – wartości skuteczne składowej podstawowej napięć międzyprzewodowych.

Pomiary porównawcze asymetrii napięcia wykonano dla siedmiu analizatorów oraz przy wykorzystaniu generatora Calmet C300 (tab. 2.23).

W celu sprawdzenia niepewności pomiaru i zakresu pomiarowego badanych urządzeń przeprowadzono testy, podczas których odczytywano wskaźniki asymetrii podawane przez przyrządy. W przypadku analizatora PQube w niektórych testach nie udało się uzyskać stabilnego wskazania. W tym przypadku jako wynik zapisywana była wartość średnia wraz

z wskazaniem rozrzutu wskazań analizatora. Ocena pomiarów wykonano zgodnie z wymaganiami normy [44], która określa maksymalną niepewność pomiarową na poziomie $\pm 0,15$.

Tabela 2.23. Lista analizatorów JDEE wykorzystanych w pomiarach asymetrii napięcia

Lp.	Producent	Analizator
1	A-eberle	PQ-Box 200
2	Elspec	G3500
3	Fluke	Fluke 435
4	Lem (Fluke)	Topas 1000
5	Mikronika	SO-52v11-eME
6	PSL	PQube
7	Sonel	PQM-701

2.1.4.1 Test 4.1 – Niepewność pomiaru przy zasilaniu symetrycznym

Opis testu	Na wejścia przyrządów podawane jest trójfazowe sinusoidalne napięcie o parametrach: Faza L1: 100% U_{din} , Faza L2: 100% U_{din} , Faza L3: 100% U_{din} , przy zachowaniu symetrii kątowej.
Kryterium testu	Kryterium zgodności pomiaru wykonywanego przez poszczególne mierniki stanowi uzyskanie wartości wskaźników asymetrii k_{u0} , k_{u2} w zakresie pomiędzy 0% a 0,15% w całym okresie pomiaru.

W tabeli 2.24 zebrano wyniki testu 4.1. W przypadku rejestratora PQ-Box 200 odczytywany był wyłącznie wynik pomiaru składowej symetrycznej kolejności przeciwnej k_{u2} ponieważ w wybranym trybie pomiarowym odczyt drugiego wskaźnika był niedostępny. Z uwagi na różną dokładność wskazań badanych urządzeń wartości podawane przez mierniki G3500, SO-52v11-eME oraz PQM-701 zaokrąglono do części setnych procenta. Przepisano wskazania pozostałych urządzeń, w szczególności analizatora PQube, wykonującego pomiar asymetrii z dokładnością zaledwie do części dziesiątych. Wszystkie analizatory spełniły założone kryterium testu.

Tabela 2.24. Wyniki testu 4.1

Analizator	k_{u0} [%]	k_{u2} [%]
PQ-Box 200	-	0,01
G3500	0,01	0,01
Fluke 435	0,01	0,00
Topas 1000	0,00	0,00
SO-52v11-eME	0,00	0,00
PQube	0,0	0,0
PQM-701	0,01	0,03

2.1.4.2 Test 4.2 – Niepewność pomiaru w obecności asymetrii amplitudowej

Opis testu	Na wejścia analizatorów podawane jest napięcie trójfazowe o wartościach skutecznych napięć poszczególnych faz: a) faza L1: 73% U_{din} , faza L2: 80% U_{din} , faza L3: 87% U_{din} b) faza L1: 152% U_{din} , faza L2: 140% U_{din} , faza L3: 128% U_{din} W układzie podanego napięcia zachowana jest symetria kąтова.
Kryterium testu	Kryterium zgodności pomiaru wykonywanego przez poszczególne mierniki stanowi uzyskanie wartości wskaźników asymetrii w zakresie $k_{u0}=5\% \pm 0,15\%$ oraz $k_{u2}=5\% \pm 0,15\%$ w całym okresie pomiaru [44].

Wyniki testu prezentowane są w tabeli 2.25. Wszystkie analizatory spełniły wymagania testu.

Tabela 2.25. Wyniki testu 4.2

Analizator	a)		b)	
	$k_{u0}[\%]$	$k_{u2}[\%]$	$k_{u0}[\%]$	$k_{u2}[\%]$
PQ-Box 200	-	5,04	-	4,96
G3500	5,08	5,04	4,94	4,96
Fluke 435	5,08	5,05	4,96	4,96
Topas 1000	5,11	5,04	4,93	5,06
SO-52v11-eME	5,06	5,04	4,93	4,94
PQube	5,0	5,0	4,9	4,9
PQM-701	5,05	5,03	4,95	4,98

Wartość oczekiwana	5,00			
Maksymalna różnica wskazań	+0,11	+0,05	0	+0,06
	0	0	-0,1	-0,1

2.1.4.3 Test 4.3 – Niepewność pomiaru w obecności asymetrii amplitudowej i kątowej

Opis testu	Na wejścia analizatorów podawane jest napięcie o wartościach skutecznych napięć poszczególnych faz odpowiednio: faza L1: 100% U_{din} , faza L2: 90% U_{din} , faza L3: 100% U_{din} . Dodatkowo w układzie podanego napięcia występuje asymetria kątowa, przy czym kąty pomiędzy napięciami faz wynoszą: $\angle U_{L1L2} = 118^\circ$, $\angle U_{L1L3} = 122^\circ$.
Kryterium testu	Kryterium zgodności wykonywanego pomiaru stanowi uzyskanie wskaźników asymetrii w zakresie $k_{u0} = 2,47\% \pm 0,15\%$ oraz $k_{u2} = 4,52\% \pm 0,15\%$ w całym okresie pomiaru [44].

Wyniki pomiarów prezentowane są w tabeli 2.26. Wymagania testu nie zostały spełnione przez analizator PQube, którego wskazania nie uległy stabilizacji w całym okresie trwania testu.

Tabela 2.26. Wyniki testu 4.3

Analizator	k_{u0} [%]	k_{u2} [%]
PQ-Box 200	-	4,53
G3500	2,46	4,53
Fluke 435	2,46	4,53
Topas 1000	2,44	4,51
SO-52v11-eME	2,44	4,53
PQube	2,35 ±0,05	4,5
PQM-701	2,34	4,45
Wartość oczekiwana:	2,47*	4,52
Maksymalna różnica wskazań:	0 -0,13	+0,01 -0,07

* analizator PQube został wyłączony z obliczeń z uwagi brak stabilizacji wskazań

2.1.4.4 Test 4.4 – Wpływ zmiany częstotliwości na niepewność pomiaru asymetrii napięcia

Opis testu	Na wejścia analizatorów podawane jest napięcie trójfazowe o wartościach skutecznych napięć poszczególnych faz: L1: 100% U_{din} , L2: 90% U_{din} , L3: 100% U_{din} . Dodatkowo w układzie podanego napięcia występuje asymetria kątowna, przy czym kąty międzyfazowe wynoszą: $\angle U_{L1L2}=118^\circ$, $\angle U_{L1L3}=122^\circ$. Częstotliwość składowej podstawowej podanego napięcia wynosi: a) 42,5 Hz; b) 57,5 Hz
Kryterium testu	Kryterium zgodności wykonywanego pomiaru stanowi uzyskanie wskaźników asymetrii w zakresie $k_{u0}=2,47\% \pm 0,15\%$ oraz $k_{u2}=4,52\% \pm 0,15\%$ w całym okresie pomiaru. Można zauważyć, że przyjęte kryterium jest analogiczne do testu 4.3 z uwagi na fakt, że częstotliwość składowej podstawowej nie powinna mieć wpływu na pomiar asymetrii.

Tabela 2.27. Wyniki testu 4.4

Analizator	a) $f = 42,5$ Hz		b) $f = 57,5$ Hz	
	k_{u0} [%]	k_{u2} [%]	k_{u0} [%]	k_{u2} [%]
PQ-Box 200	-	4,52	-	4,53
G3500	2,46	4,52	2,45	4,53
Fluke 435	2,47	4,52	2,46	4,52
Topas 1000	2,46	4,51	2,45	4,51
SO-52v11-eME	2,46	4,51	2,45	4,51
PQube	2,3 ±0,1*	4,45 ±2,05*	2,3	4,5
PQM-701	2,43	4,46	2,43	4,46
Wartość oczekiwana	2,47	4,52	2,47	4,52
Maksymalna różnica wskazań	0 -0,04	0 -0,06	0 -0,04	+0,01 -0,06

* analizator PQube został wyłączony z obliczeń z uwagi na brak stabilizacji wskazań

Wskazania odczytane z analizatorów stanowią zawartość tabeli 2.27. Analizując wyniki można stwierdzić, że kryterium testu nie zostało spełnione przez analizator PQube, którego wskazania nie uległy stabilizacji w całym okresie trwania testu (punkt a) lub wykroczyły poza zakres określony w kryterium testu (punkt b). Wskazania pozostałych analizatorów były poprawne.

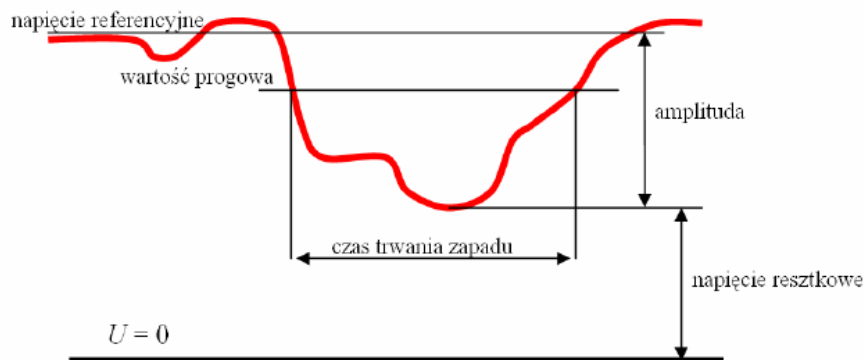
2.1.4.6 Podsumowanie pomiarów asymetrii napięcia

W ramach przeprowadzonych badań dokonano oceny wskazań asymetrii napięcia mierzonej przez siedem równolegle przyłączonych analizatorów JDEE. Przeprowadzone testy obejmowały warunki zarówno asymetrii amplitudowej, jak i kątowej. Warunki wszystkich przeprowadzonych testów zostały spełnione przez sześć z siedmiu analizatorów wykorzystanych do badań. Zastrzeżenia pojawiły się względem analizatora PQube, w przypadku którego obserwowano niestabilność wskazań podczas części testów, skutkujące niespełnieniem założonych wymagań.

2.1.5 Zapady napięcia

Zapad napięcia (*ang. voltage dip, voltage sag*) definiowany jest jako nagłe zmniejszenie wartości skutecznej napięcia poniżej pewnej wartości progowej napięcia deklarowanego (najczęściej 90% U_{din}), trwające przez czas nie krótszy niż 10 ms, po którym następuje wzrost tego napięcia do wartości równej lub bliskiej początkowej. Ilustracja zapadu przedstawiona została na rysunku 2.13. Norma [44] opisuje zapady napięcia za pomocą dwóch parametrów, amplitudy (lub napięcia resztkowego) i czasu trwania. Są one wyznaczane na podstawie jednookresowych wartości skutecznych napięcia uaktualnianych w każdym półokresie $U_{rms(1/2)}$. Wartość $U_{rms(1/2)}$ zawiera z definicji harmoniczne, interharmoniczne, napięcia sygnalizacyjne itp. Napięcie resztkowe jest najmniejszą wartością $U_{rms(1/2)}$ zmierzona w którymkolwiek kanale podczas trwania zapadu. Amplituda zapadu jest różnicą pomiędzy napięciem referencyjnym i napięciem resztkowym. Wyrażana jest najczęściej w procentach napięcia referencyjnego.

W pomiarach zapadów napięcia wykorzystane zostały analizatory JDEE przedstawione w tabeli 2.28. Weryfikacji w ramach testów podlegała poprawność wyznaczania czasu trwania oraz amplitudy (napięcia resztkowego) przez każde z urządzeń w układzie 1-fazowym. Badania wykonane zostały z wykorzystaniem generatora NSG 1007.



Rys. 2.13. Zapad napięcia i jego wielkości charakterystyczne

Tabela 2.28. *Lista analizatorów JDEE - pomiar zapadów napięcia*

Lp.	Producent	Analizator
1	Lem (Fluke)	Topas 1000
2	Siemens	Simeas Q80
3	Sonel	PQM-701
4	Schneider	ION 7650
5	Mikronika	SO-52v11-eME

2.1.5.2 Test 5.1 – Zapady napięcia o zmiennej amplitudzie oraz stałym czasie trwania

Opis testu	Napięcie 1-fazowe $U_{\text{din}} = 230 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$. Sygnał testowy zawiera zapady napięcia trwające 10 okresów (200 ms) o amplitudach odpowiednio: 60% oraz 80% U_{din} .
Kryterium testu	Niepewność pomiaru napięcia resztkowego nie powinna przekroczyć $\pm 0,2\% U_{\text{din}}$ oraz niepewność pomiaru czasu trwania zapadu nie powinna przekroczyć sumy niepewności wyznaczenia początku zapadu (1 półokres) i niepewności wyznaczenia końca zapadu (1 półokres), tj. 20 ms. Wyznaczanie czasu trwania zapadu odbywać się powinno w oparciu o wartości $U_{\text{rms}(1/2)}$, w wyniku czego, dla amplitud zapadów podawanych w niniejszym teście, zmierzona wartość czasu zapadu powinna być o 10 ms dłuższa niż jego rzeczywisty czas trwania.

Wyniki testu 5.1 zebrane zostały w tabeli 2.29. Kryterium pomiaru napięcia resztkowego spełnione zostało przez wszystkie analizatory. Całkowity rozrzut wyników pomiaru napięcia resztkowego wyniósł 0,16% dla pierwszego oraz 0,66% dla drugiego zdarzenia. Stwierdzono relatywnie duże różnice w pomiarach czasu trwania zapadów. Maksymalna różnica wskazań analizatorów wyniosła 34 ms. Ponadto wyniki pomiaru czasu trwania zapadu, niebędące wielokrotnością 10, wskazują na niepoprawną aplikację algorytmu pomiarowego.

Tabela 2.29. *Wyniki testu 5.1 – faza L1*

Analizator JDEE	Napięcie resztkowe [V]	Czas [ms]	Napięcie resztkowe [V]	Czas [ms]
	60% U_{din}		80% U_{din}	
Topas 1000	137,9	200	45,36	200
Simeas Q80	137,99	230	45,48	234
PQM-701	137,8	210	45,38	210
ION 7650	137,77	210	45,31	207
SO-52v11-eME	137,87	210	45,61	210
Wartość średnia	137,87	212	45,43	212
Rozrzut	0,16%		0,66%	
Maksymalna różnica wskazań		+18 ms -12 ms		+22 ms -12 ms

2.1.5.3 Test 5.2 – Zapady napięcia o stałej amplitudzie oraz zmiennym czasie trwania

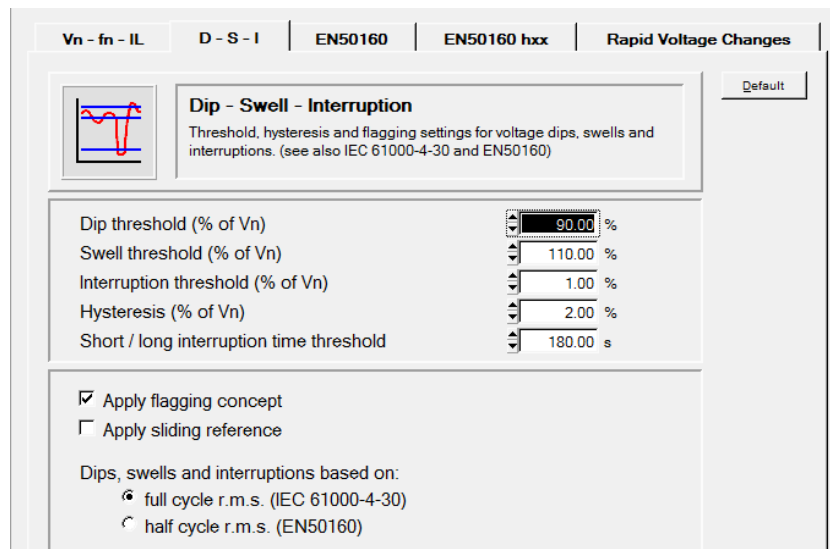
Opis testu	Napięcie 1-fazowe $U_{\text{din}} = 230 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$. Sygnał testowy zawiera zapady napięcia o amplitudzie 50% U_{din} (115 V) trwające odpowiednio: 10, 20 oraz 200 ms.
Kryterium testu	Niepewność pomiaru napięcia resztkowego nie powinna przekroczyć $\pm 0,2\% U_{\text{din}}$ oraz niepewność pomiaru czasu trwania zapadu nie powinna przekroczyć sumy niepewności wyznaczenia początku zapadu (1 półokres) i niepewności wyznaczenia końca zapadu (1 półokres), tj. 20ms. Wyznaczanie czasu trwania zapadu odbywać się powinno w oparciu o wartości $U_{\text{rms}(1/2)}$, w wyniku czego, dla amplitudy zapadów równej 50% U_{din} zmierzona wartość czasu zapadu powinna być o 10 ms dłuższa niż jego rzeczywisty czas trwania

Wyniki testu 5.2 zebrano w tabeli 2.30. Na szczególną uwagę zasługuje wskazanie przyrządu Topas 1000 podczas pomiaru zapadu o czasie trwania 10 ms. Zmierzone napięcie resztkowe równe 115,3 V wyraźnie odbiega od wartości oczekiwanej oraz wskazań pozostałych przyrządów. Po dokładnej analizie tego przypadku stwierdzono, że kalkulacja parametrów zapadów napięcia w tym mierniku realizowana była w oparciu o 10 milisekundowe okno czasowe, co spowodowało pojawienie się odmiennych wskazań. Rysunek 2.14 przedstawia okno konfiguracyjne programu PQ Analyze służącego do obsługi analizatora Topas 1000, w którym użytkownik może dokonać wyboru okna czasowego do wyznaczania parametrów zdarzeń.

Tabela 2.30. Wyniki testu 5.2 – faza L1

Analizator JDEE	Napięcie resztkowe [V]	Czas [ms]	Napięcie resztkowe [V]	Czas [ms]	Napięcie resztkowe [V]	Czas [ms]
Czas trwania zdarzenia	10 ms		20 ms		200 ms	
Topas 1000	115,3*	10	114,8	20	114,8	200
Simeas Q80	181,9	41	115,4	52	114,96	231
PQM-710	181,7	20	115	30	114,9	210
ION7650	181,7	18	115	30	114,77	210
SO-52v11-eME	181,69	21	115,04	30	114,96	210
Wartość średnia	181,75	22	115,05	32	114,88	212
Rozrzut względny	0,12%		0,52%		0,17%	
Maksymalna różnica wskazań		+19 ms -12 ms		+20 ms -12 ms		+19 ms -12 ms

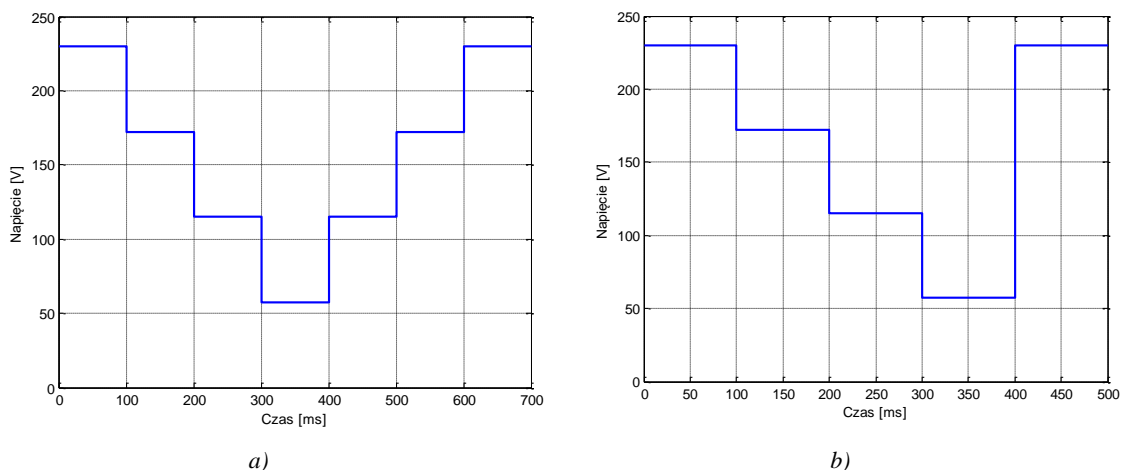
* wskazanie wyłączone z dalszych obliczeń



Rys. 2.14. Okno konfiguracyjne programu PQ Analyze (Topas 1000)

2.1.5.4 Test 5.3 – Zapady wielostopniowe

Opis testu	Napięcie 1-fazowe $U_{\text{din}} = 230 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$. Sygnał napięciowy zawiera dwa wielostopniowe zapady napięcia (rys. 2.15) o maksymalnej amplitudzie 50% U_{din} (115 V) trwające odpowiednio: 500 ms oraz 300 ms. Amplitudy poszczególnych stopni wynoszą: 25%, 50% oraz 75% U_{din} . Czas trwania każdego ze stopni: 100 ms.
Kryterium testu	Niepewność pomiaru napięcia resztkowego nie powinna przekroczyć $\pm 0,2\%$ U_{din} oraz niepewność pomiaru czasu trwania zapadu nie powinna przekroczyć sumy niepewności wyznaczenia początku zapadu (1 półokres) i niepewności wyznaczenia końca zapadu (1 półokres), tj. 20 ms.



Rys. 2.15. Sekwencje wielostopniowych zapadów napięcia – test 5.3

Wyniki pomiaru zebrane zostały w tabeli 2.31. Na ich podstawie stwierdzono, że pomiar napięcia resztkowego realizowany był poprawnie przez wszystkie analizatory. Pojawiły się natomiast zastrzeżenia do dwóch przyrządów, których wskazania czasu trwania zapadów nie były wielokrotnością 10.

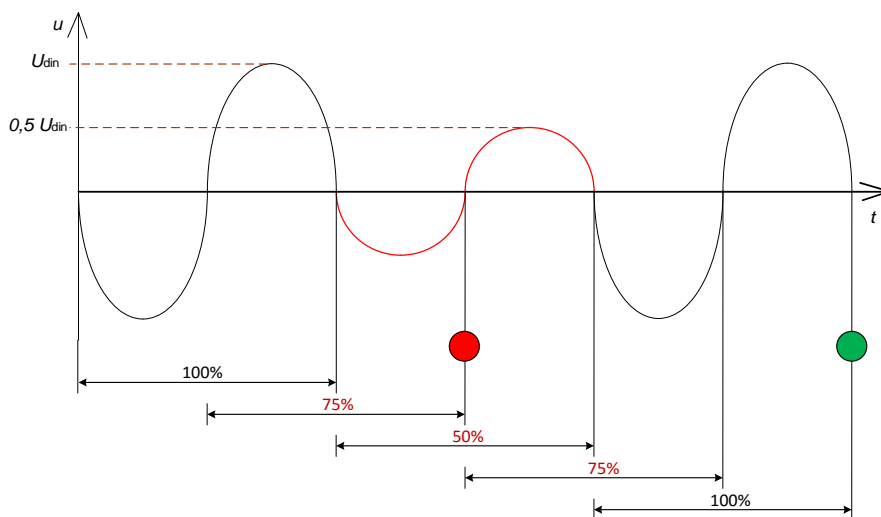
Tabela 2.31. Wyniki testu 5.3 – faza LI

Analizator JDEE	Napięcie resztkowe [V]	Czas [ms]	Napięcie resztkowe [V]	Czas [ms]
	a)		b)	
Topas 1000	56,98	500	56,95	300
Simeas Q80	57,11	525	57,11	328
PQM-710	57,04	510	57,04	310
ION7650	57,04	509	57,04	298
SO-52v11-eME	57,17	510	57,11	310
Wartość oczekiwana	57,07	511	57,05	309
Rozrzut względny	0,33%		0,28%	
Maksymalna różnica wskazań		+14 ms -11 ms		+19 ms -11 ms

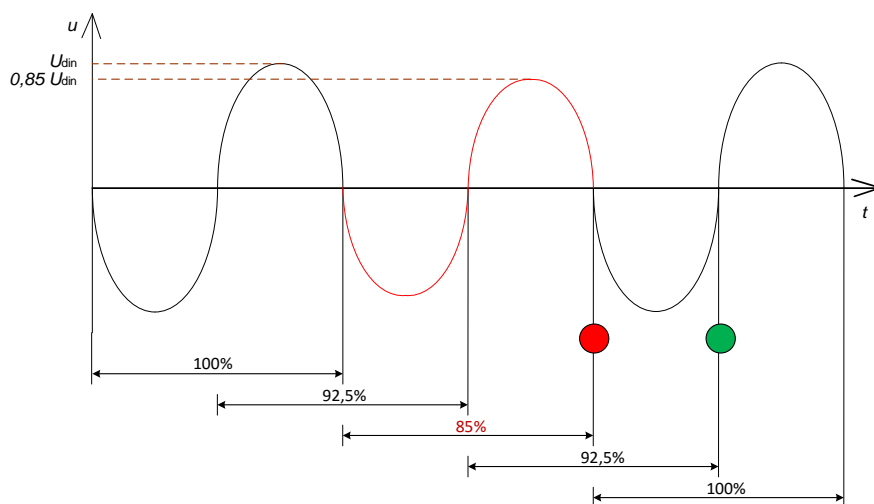
2.1.5.5 Podsumowanie pomiarów zapadów napięcia

W ramach testów na wejścia analizatorów JDEE podano zapady napięcia o różnych amplitudach oraz czasach trwania. Stwierdzono, że analizatory w sposób poprawny wyznaczały amplitudy zapadów napięcia. Inaczej było natomiast w przypadku pomiaru czasu trwania zdarzenia. W prezentowanych testach różnice wskazań przy pomiarze czasu zapadu sięgały ponad 30 ms.

Wśród przyczyn tego zjawiska doszukać się można możliwych błędów w interpretacji zapisów normy [44], która wymaga, aby do wyznaczania czasu trwania zapadów wykorzystywana była wartość $U_{\text{rms}(1/2)}$ tj. wartość skuteczna wyznaczana w czasie jednego okresu, lecz uaktualniana co pół okresu, może powodować wątpliwości wytwórców analizatorów JDEE, gdyż pomiar obarczony jest systematycznym błędem ± 10 ms, w zależności od amplitudy zapadu. Sytuacja ta jest widoczna w przypadku testów 5.1–5.3. W celu jej wyjaśnienia można posłużyć się symulacjami dwóch zapadów napięcia przedstawionymi na rysunkach 2.16 oraz 2.17. Na pierwszej z nich prezentowany jest zapad napięcia o amplitudzie 50% oraz czasie trwania 1 okres (20 ms). Przyjęty próg zapadu wynosi 90% U_{din} . Widać, że wartości trzech próbek $U_{\text{rms}(1/2)}$ znajdują się poniżej progu zapadu. Znacznikiem czasu uznanym za początek zapadu zostanie moment oznaczony czerwonym punktem, natomiast czas trwania zapadu będzie liczony do momentu oznaczonego zielonym punktem. Różnica czasu pomiędzy tymi dwoma punktami wynosi 30 ms, a więc jest większa o 10 ms od rzeczywistego czasu trwania zapadu. W drugim przypadku – zapad napięcia o amplitudzie 85%, czasie trwania 1 okres (20 ms) – wskazany przez analizator JDEE czas trwania zapadu będzie wynosił 10 ms pomimo, że w rzeczywistości jest on o 10 ms dłuższy. Opisany błąd systematyczny wynika bezpośrednio z samej metody, a w szczególności z przyjęcia $U_{\text{rms}(1/2)}$ jako wartość bazową do dalszych obliczeń.



Rys. 2.16. Symulacja zapadu napięcia o czasie trwania 20 ms oraz amplitudzie 50% U_{din}



Rys. 2.17. Symulacja zapadu napięcia o czasie trwania 20 ms oraz amplitudzie 85% U_{din}

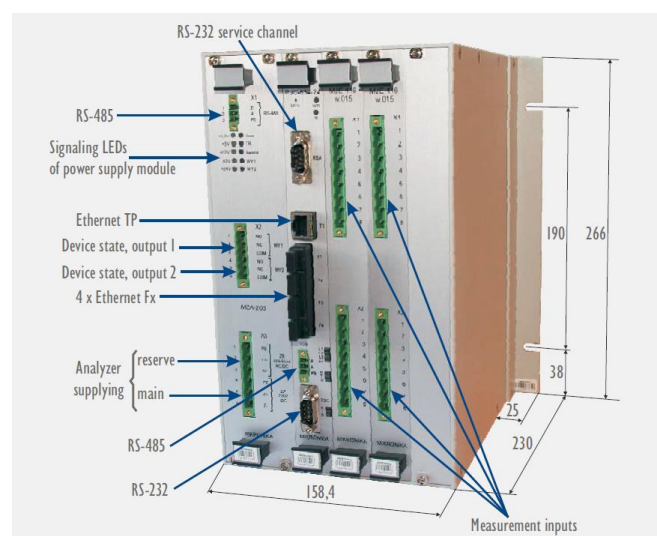
2.1.6 Podsumowanie badań porównawczych analizatorów JDEE

Przeprowadzone badania porównawcze analizatorów wykazały, że z bardzo dużym prawdopodobieństwem wiele analizatorów obecnych na rynku nie gwarantuje wiarygodnego pomiaru parametrów JDEE pomimo posiadania certyfikatu klasy A. Stwierdzono, że bezspornym potwierdzeniem tej tezy powinna być analiza aktualnych procedur testowych klasy A oraz eksperyment pomiarowy, przeprowadzony z wykorzystaniem aparatury wzorcowej przy udziale producentów analizatorów JDEE.

2.2 Procedura testowa badań analizatorów jakości energii elektrycznej klasy A w oparciu o wymagania normy IEC 62586-1

W oparciu o normę [29] przeprowadzone zostały pełne badania zgodności z wymaganiami klasy A dla analizatora JDEE SO-52v11-eME produkowanego przez Badawczo-Rozwojową Spółdzielnię Pracy Mikroprocesorowych Systemów Automatyki **MIKRONIKA**. Analizator przeznaczony jest do prowadzenia pomiarów w polach rozdzielni elektroenergetycznych niskiego, średniego i wysokiego napięcia. Analizator może pracować

w wersji z jednym lub z dwoma modułami jakości dostawy energii obsługiwanymi jednocześnie (rys. 2.18). Wszystkie testy były przeprowadzone z jednoczesnym pomiarem w dwóch modułach. W badaniach wykorzystano opracowane przez producenta oprogramowanie dedykowane do analizy jakości energii – SYNDIS PQ. Analizator został poddany badaniom w warunkach laboratoryjnych, podczas których sprawdzono zgodność z wymaganiami norm [29][43][44][45]. Przeprowadzone testy obejmowały ocenę: częstotliwości, wartości skutecznej napięcia, wahań napięcia, zapadów i wzrostów napięcia, asymetrii napięcia, harmonicznego napięcia, interharmonicznego napięcia, napięć sygnalizacyjnych, zagregowanego współczynnika wzrostu i obniżenia napięcia, flagowania oraz niepewności czasu pomiaru. Jako źródło sygnałów testowych wykorzystane zostały programowalne generatory napięcia Calmet C300 oraz Omicron CMC 256plus. Pełna treść raportu z pomiarów znajduje się w posiadaniu zleceniodawcy badań Badawczo-Rozwojowej Spółdzielni Pracy Mikroprocesorowych Systemów Automatyki **MIKRONIKA**. Za jego zgodą zostanie ona udostępniona recenzentom pracy jako Załącznik A.



Rys. 2.18. Analizator SO-52v11-eME [52]

2.3 Badania porównawcze analizatorów JDEE – eksperyment pomiarowy w ramach Pikniku Jakości Energii [12]

W dniu 23 października 2014 na terenie Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, przy współdziale TAURON Dystrybucja S.A., zorganizowany został Piknik Jakości Energii Elektrycznej. Celem tego wydarzenia była promocja jakości dostawy energii elektrycznej (JDEE) oraz wymiana doświadczeń z tej dziedziny posiadanych przez producentów oraz użytkowników analizatorów JDEE. Integralnym elementem Pikniku były eksperymentalne badania porównawcze analizatorów oferowanych przez obecnych na polskim rynku przedstawicieli producentów oraz dystrybutorów urządzeń pomiarowych. Wydarzeniu towarzyszyła seria wykładów seminaryjnych (rys. 2.19).



Rys. 2.19. *Piknik JEE – część seminaryjna*



Rys. 2.20. *Piknik JEE – część eksperymentalna*

Uczestnikami badań porównawczych (rys. 2.20) byli zaproszeni producenci i dystrybutorzy analizatorów JDEE klasy A (zgodnie z deklaracją producenta potwierdzoną aktualnym certyfikatem). Sygnały testowe zostały zaproponowane przez zespół specjalistów (AGH, TAURON Dystrybucja) w oparciu o wymagania norm:

- PN-EN 61000-4-30 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC), Część 4-30: Metody badań i pomiarów – Metody pomiaru jakości energii,
- PN-EN 61000-4-15 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC), Część 4-15: Metody badań i pomiarów – Miernik migotania światła – Specyfikacja funkcjonalna i projektowa,
- PN-EN 61000-4-7 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC), Część 4-7: Metody badań i pomiarów – Ogólny przewodnik dotyczący pomiarów harmonicznych i interharmonicznych oraz przyrządów pomiarowych, dla sieci zasilających i przyłączonych do nich urządzeń,

- IEC 62586-1, Power quality measurement in power supply systems, Part 1: Power Quality Instruments (PQI),
- IEC 62586-2, Power Quality Measurement in Power Supply Systems – Part 2: Functional tests and uncertainty requirements.

a także propozycje testów otrzymane od producentów analizatorów JDEE, które w ich ocenie mogły pozytywnie wyróżnić dany produkt względem oferty konkurencji. Sygnały testowe były zaprojektowane w taki sposób, aby dokonać oceny pomiaru:

- częstotliwości,
- wartości skutecznej napięcia,
- wahań napięcia,
- przerw, zapadów oraz wzrostów napięcia,
- asymetrii napięcia,
- harmonicznym i interharmonicznym napięcia.

Wśród badanych analizatorów znalazły się urządzenia oferowane przez czternastu producentów (tab. 2.32). Konfiguracja mierników, ich podłączenie do stanowiska testowego, a także odczyt danych pomiarowych, wykonywane były indywidualnie przez uczestników eksperymentu.

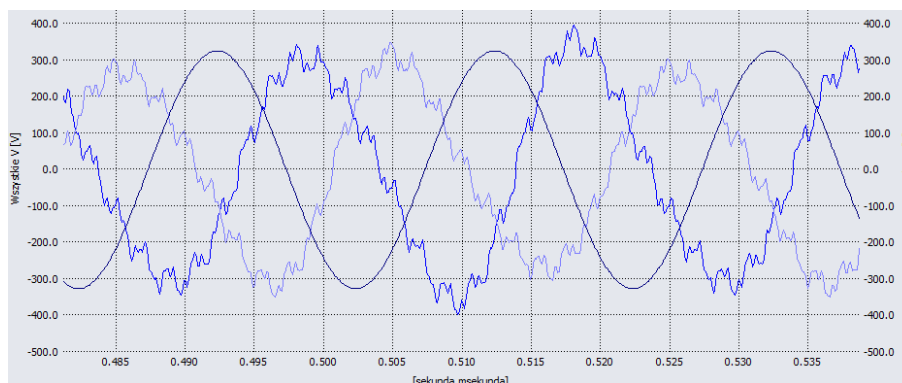
Tabela 2.32. *Lista analizatorów biorących udział w eksperymencie pomiarowym*

Lp.	Producent	Model
1	Fluke	Fluke 1760
2	Electro Industries / Gaugetech	Nexus 1500
3	Unipower AB	UP-2210
4	Dewetron	DEWE-3020
5	Alstom	iSTAT M355
6	Mikronika	SO-52v11-eME
7	Siemens	SIMEAS Q80
8	A-eberle	PQ Box 200
9	Schneider-Electric	ION7650
10	Sonel	PQM-703
11	Power Standards Lab	PQube
12	ELSPEC	G4500
13	Metrel	MI 2892
14	Dranetz	Mavowatt 270

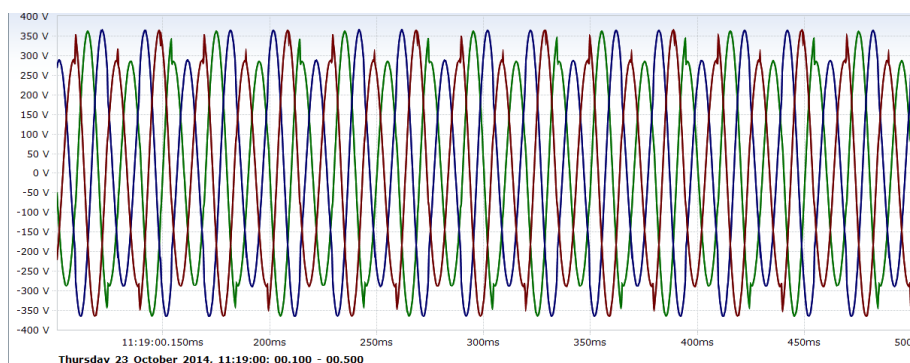
Przyjęta metoda eksperymentu polegała na podłączeniu wszystkich analizatorów w tym samym punkcie pomiarowym oraz na simultanicznym podaniu na ich wejścia pomiarowe trójfazowego sygnału napięciowego, zawierającego zdefiniowaną serię zaburzeń napięcia (zmiany wartości skutecznej oraz częstotliwości, odkształcenie, asymetria, wahania) i zdarzeń (zapady, wzrosty napięcia, przerwy w zasilaniu). Zostały one zaprojektowane w taki sposób, aby możliwa była ocena pomiaru wszystkich wskaźników JDEE. Źródłem sygnałów testowych były wysokiej klasy programowalne kalibratory laboratoryjne. Wśród zaproponowanych testów znalazły się także takie, które polegały na wytworzeniu w tym samym czasie różnych zaburzeń JDEE, co było nie lada wyzwaniem dla analizatorów. Przykładowe przebiegi sygnałów testowych przedstawione zostały na rysunkach 2.21–2.23. Całkowity czas trwania

eksperymentu wyniósł 4,5 godziny. Po zakończeniu procedury testowej każdy z uczestników przekazał komisyjnie na nośniku elektronicznym zarejestrowane wyniki pomiarów. Nad poprawnym przebiegiem tej części Pikniku czuwała specjalna Komisja złożona z przedstawicieli AGH oraz TAURON Dystrybucja.

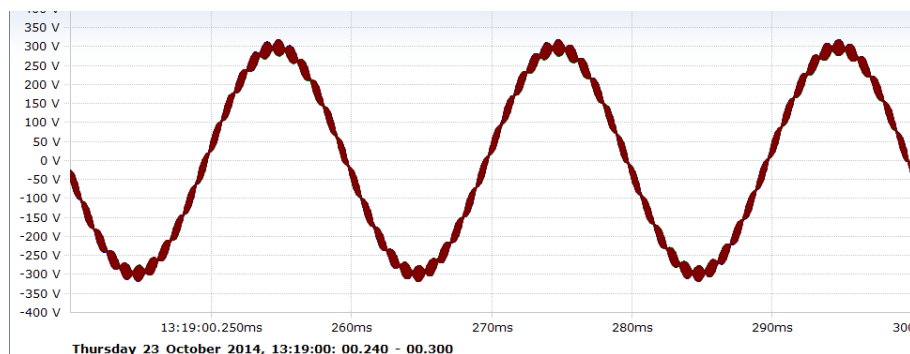
Oddzielną grupę testów stanowiły pomiary zdarzeń – zapadów, wzrostów napięcia oraz przerw w zasilaniu. W tych przypadkach generator napięcia wzorcowego wytwarzał serie zdarzeń. Ocenie podlegała dokładność pomiaru ich parametrów tj. czasu trwania i amplitudy zapadu/wzrostu napięcia. Przykładowe przebiegi sygnałów testowych zdarzeń zarejestrowanych podczas eksperymentu pomiarowego przedstawiono na rysunkach 2.24–2.26.



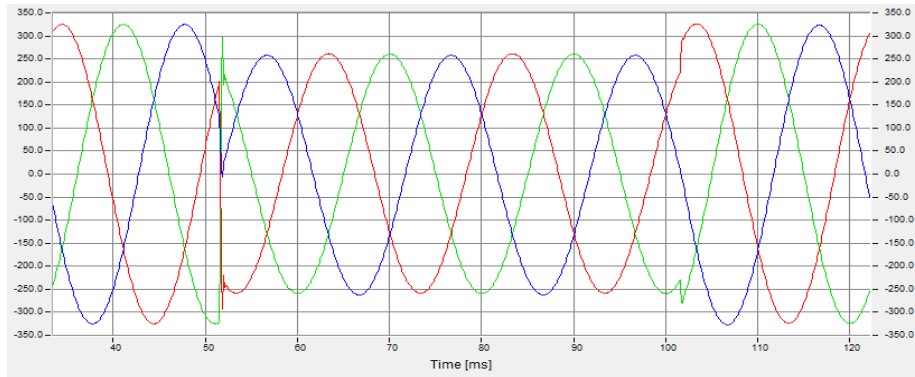
Rys. 2.21. Przykładowa rejestracja napięć – test kombinacji zaburzeń JDEE



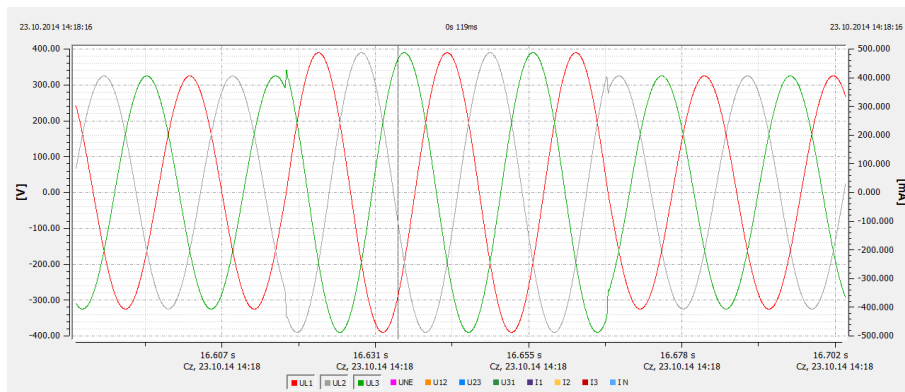
Rys. 2.22. Przykładowa rejestracja napięć – test wahań napięcia



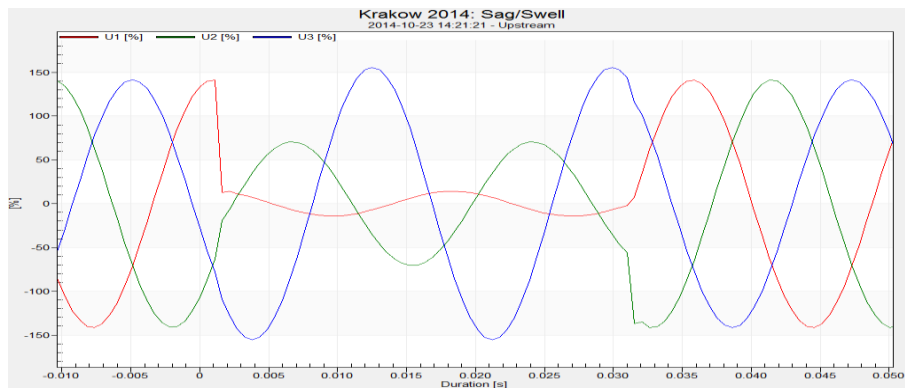
Rys. 2.23. Przykładowa oscyloskopowa rejestracja napięcia – test filtru antyaliasingowego



Rys. 2.24. Rejestracja przykładowego zapadu napięcia

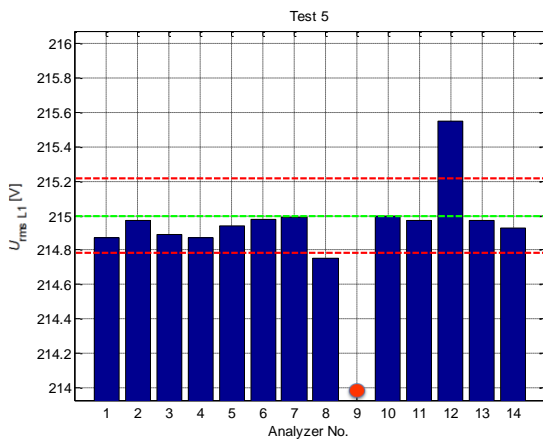


Rys. 2.25. Rejestracja przykładowego wzrostu napięcia

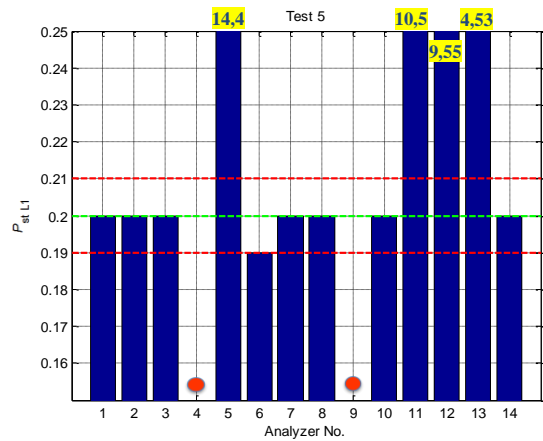


Rys. 2.26. Rejestracja przykładowego zdarzenia

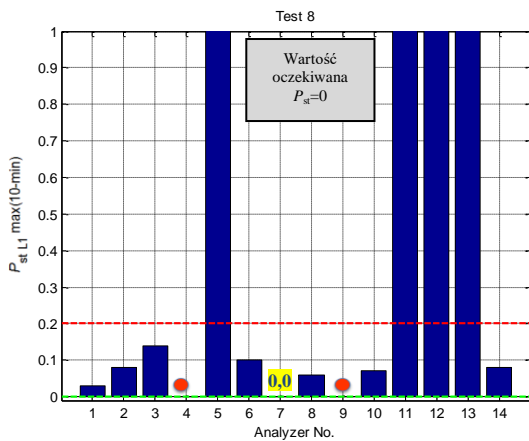
Porównując wyniki wskazań analizatorów JDEE, które wzięły udział w eksperymencie stwierdzić można, że wielokrotnie nie zawierały się one w przedziale dopuszczalnej niepewności pomiarowej, szczególnie w przypadkach, gdy wygenerowany sygnał testowy był kombinacją zaburzeń JDEE. W kilku przypadkach analizatory nie dokonywały pomiaru wymaganego wskaźnika jakości (dotyczyło to głównie pomiarów harmonicznnych, interharmonicznnych oraz zdarzeń) lub otrzymane wyniki przekraczały wartości spodziewane. Przykładowe wyniki testów przedstawiono na rysunku 2.27, na którym porównywane są wskazania wszystkich czternastu analizatorów zarejestrowane podczas badań.



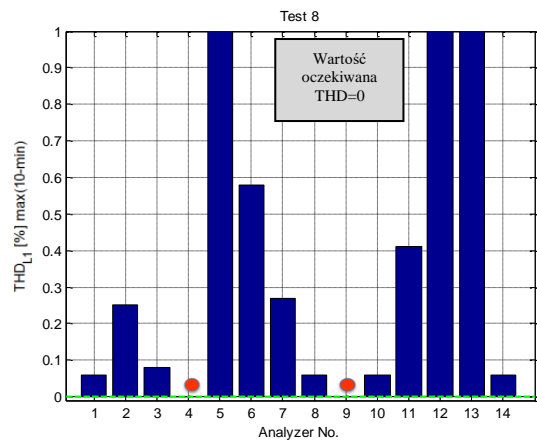
a)



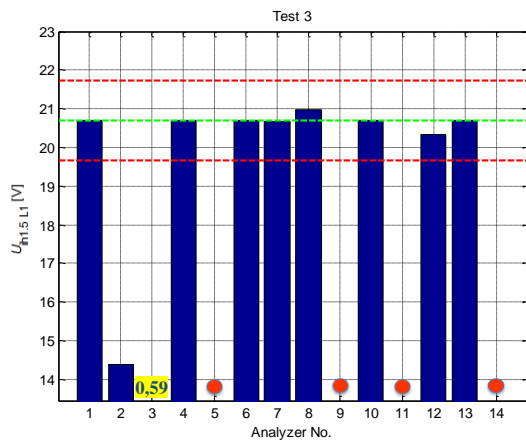
b)



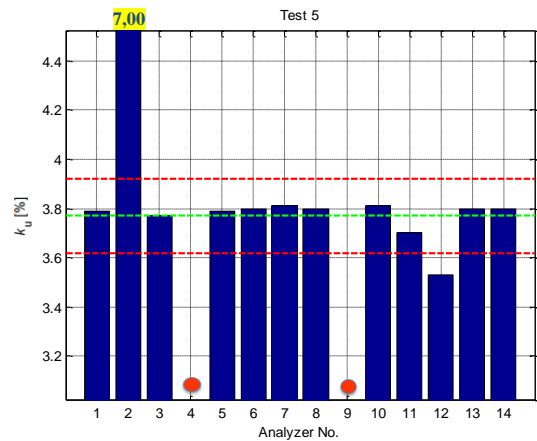
c)



d)



e)



f)

Rys. 2.27. Porównanie wskazań analizatorów JDEE - wybrane testy eksperymentu pomiarowego (linie czerwone – wartości graniczne dopuszczalnego normami przedziału niepewności pomiaru, linia zielona – wartość spodziewana)

Legenda:



analizator nie dokonał rejestracji wymaganej wielkości

14,4

odczytany wynik wykracza poza przyjęty zakres wykresu, natomiast jego dokładna wartość została wskazana w formie liczbowej

Należy zaznaczyć, że część analizatorów poradziła sobie dobrze z bardzo wymagającą procedurą. Zbiorcze zestawienie wyników z eksperymentu pomiarowego przedstawiono w tabeli 2.33.

Tabela 2.33. Zbiorcze zestawienie wyników z eksperymentu pomiarowego w ramach Pikniku JEE

Analizator JDEE	Test 1	Test 3		Test 4		Test 5	Test 7			Test 8		Test 9	Test 10		Test 11	
Fluke 1760	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE
Nexus 1500	TAK	NIE	TAK	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	TAK	TAK	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE
UP-2210	TAK	NIE	NIE	TAK	TAK	TAK	TAK	NIE	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	NIE	TAK
DEWE-3020	TAK	NIE	NIE	TAK	NIE	NIE	TAK	NIE	NIE	NIE	TAK	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE
iSTAT M355	TAK	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	TAK	NIE	NIE	NIE	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK
SO-52v11-eME	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	NIE	TAK	TAK	TAK	TAK
SIMEAS Q80	TAK	TAK	TAK	NIE	NIE	TAK	NIE	NIE	NIE	TAK	TAK	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE
PQ Box 200	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	NIE	NIE	TAK	TAK	TAK	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE
ION7650	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE
PQM-703	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK
PQube	TAK	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	TAK	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE
G4500	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE	TAK	TAK	TAK	NIE	NIE
MI 2892	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	NIE	TAK	TAK	NIE	NIE	NIE	TAK	NIE	TAK	NIE	NIE
Mavowatt 270	TAK	NIE	NIE	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	TAK	NIE	NIE	NIE	NIE	NIE

Przeprowadzony w ramach wydarzenia eksperyment pomiarowy pozwolił na uzyskanie wielu cennych informacji na temat analizatorów JDEE, wiarygodności prowadzonych pomiarów, przyczyn rozbieżności wyników, a także wiedzy dotyczącej metodyki oraz warunków przyznawania klasy A. Pełna wersja raportu zawierająca szczegółowy opis procedury testowej oraz wyniki eksperymentu pomiarowego jest dostępna do pobrania na stronie internetowej wydarzenia www.piknikjee.pl [12]. Lista wykonawców eksperymentu pomiarowego przedstawiona została w Załączniku B.

3. Energooszczędne źródła światła w kontekście dopuszczalnych wymagań dla wskaźnika krótkookresowego migotania światła P_{st}

W ciągu ostatnich dwóch dekad rynek źródeł światła powiększył się o nowe, energooszczędne rozwiązania, które z dużym stopniem zastąpiły tradycyjne żarówki. Trend był dodatkowo stymulowany rozporządzeniem Komisji Europejskiej [49] określającym szczegółowy harmonogram wycofywania żarowych źródeł światła z europejskiego rynku. Miejsce konwencjonalnych rozwiązań stopniowo zaczęły zajmować świetlówki kompaktowe (*ang. compact fluorescent lamps – CFL*) oraz lampy LED (*ang. light emitting diode*).

Zasady działania nowych produktów nie opierają się o termiczne wytwarzanie światła i w związku z tym charakteryzują się odmiennymi własnościami strumienia świetlnego, którego dynamika ma bezpośredni wpływ na emisję wahań napięcia. Liczne publikacje dowodzą ponadto o co najmniej 5-krotnie większej skuteczności świetlnej nowoczesnych źródeł światła w porównaniu z ich żarowymi odpowiednikami [13][14][22][51], co stanowi główny argument zwolenników wycofania tradycyjnej żarówki, a także wpływa na stale rosnącą popularność nowoczesnych źródeł światła zarówno w zastosowaniach komunalnych, jak i przemysłowych. Potwierdzają to zebrane w Załączniku C badania "energetyczne" energooszczędnych źródeł światła.

Bezpośrednią przyczyną rozważań nad efektem migotania różnych rodzajów źródeł światła jest obserwowana w ostatnim czasie coraz mniejsza liczba skarg odbiorców energii elektrycznej na ten rodzaj zaburzenia [38][39], pomimo stwierdzonego pomiarowo przekroczenia wartości granicznych wskaźników wahań napięcia. Zjawisko może być skutkiem zamiany żarowych źródeł światła na ich energooszczędne odpowiedniki (CFL oraz LED). Pojawia się więc teza, że w świetle nowych uwarunkowań, obecne dopuszczalne poziomy wskaźnika P_{st} są zbyt restrykcyjne i być może bardziej właściwym, z punktu widzenia nakładów inwestycyjnych na poprawę JDEE, może być ich zwiększenie.

Niniejszy rozdział został poświęcony porównaniu żarowych źródeł światła z ich odpowiednikami: CFL oraz lampami LED w kontekście odporności wytwarzanego strumienia świetlnego na wahania napięcia zasilającego. W pierwszej części dokonano przeglądu wybranych rodzajów źródeł światła. Następnie omówiono wahania napięcia, jego przyczyny oraz skutki, ze szczególnym uwzględnieniem efektu migotania światła. W dalszej kolejności przedstawiono wyniki badań poświęconych wpływowi wahań napięcia na pracę różnych rodzajów źródeł światła, opracowano modele mierników migotania światła zbudowanych w oparciu o charakterystyki filtrów ważonych lamp CFL i LED oraz przedstawiono ogólną metodologię oceny odporności źródeł światła na wahania napięcia. Rozdział kończy propozycja uproszczonego wskaźnika efektu migotania światła mającego zastosowanie do danego modelu lub typu lamp.

3.1 Przegląd obecnie stosowanych źródeł światła

W dzisiejszych czasach do wytwarzania strumienia świetlnego stosuje się różnorodne rodzaje lamp elektrycznych (tab. 3.1). Promieniowanie widzialne powstaje w nich na szereg odmiennych sposobów: poprzez wytworzenie wysokiej temperatury (lampy żarowe), jako rezultat wyładowań elektrycznych (lampy wyładowcze) lub na skutek rekombinacji nośników ładunku elektrycznego (lampy LED).

Tab. 3.1. *Przegląd wybranych rodzajów źródeł światła*

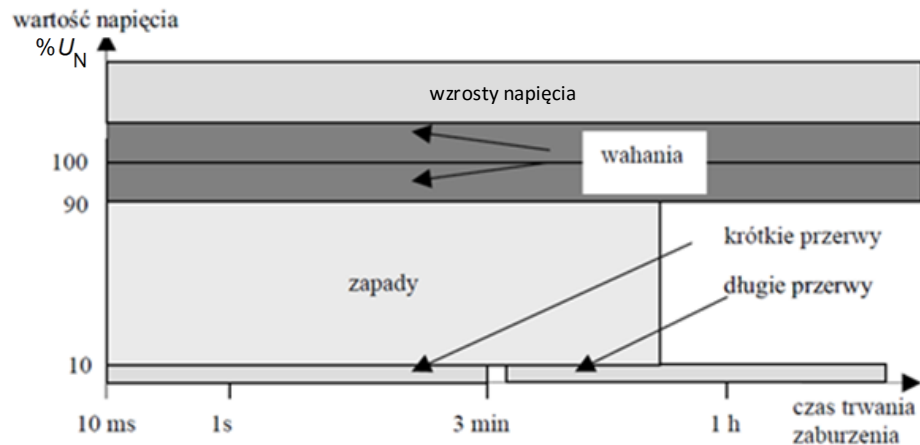
Źródło światła	Zasada działania
Tradycyjna żarówka	Opiera się o emisję promieniowania widzialnego po podgrzaniu żarnika, zazwyczaj wykonanego z włókna ogniotrwałego (początkowo grafit, obecnie wolfram) do określonej temperatury. Skuteczność świetlna tradycyjnej żarówki o mocy 60 W jest szacowana na około 12 lm/W.
Lampa halogenowa	Rodzaj lampy żarowej, w której włókno wolframowe umieszczone jest w gazie obojętnym z niewielką domieszką gazu z grupy halogenów np. jod lub brom. Dzięki jej obecności ma miejsce tzw. halogenowy cykl regeneracyjny wydłużający żywotność lampy oraz zwiększający skuteczność świetlną do około 18 lm/W.
Świetlówka kompaktowa (CFL)	Świetlówka kompaktowa należy do grupy lamp luminescencyjnych, w których wykorzystywane jest promieniowanie rezonansowe atomów rtęci emitowane przy przejściu atomu ze stanu wzbudzenia bezpośrednio do stanu podstawowego. W wyniku zmiany poziomu energetycznego z wyższego na niższy powstaje promieniowanie elektromagnetyczne o długości fal klasyfikujących je w przedziale promieniowania UV. Promieniowanie nadfioletowe jest niewidzialne dla człowieka, dlatego konieczne jest zastosowanie luminoforu, który będąc pobudzany światłem UV emituje widmo ciągłe promieniowania elektromagnetycznego w zakresie światła widzialnego. Skuteczność świetlna wynosi (55-65) lm/W.
Dioda LED	Dioda LED jest półprzewodnikowym przyrządem optoelektronicznym, który emituje promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie zarówno widzialnym, podczerwieni, jak i nadfioletu. Diody wytwarzają światło na zasadzie elektroluminescencji (wzbudzenie atomów lub cząstek odbywa się kosztem energii pola elektrycznego). Powstała w ten sposób energia jest wyzwalamana zarówno w postaci ciepła nagrzewającego złącze, jak i w postaci promieniowania. Skuteczność świetlna lamp LED może osiągnąć 140 lm/W.

3.2 Zjawisko wahań napięcia

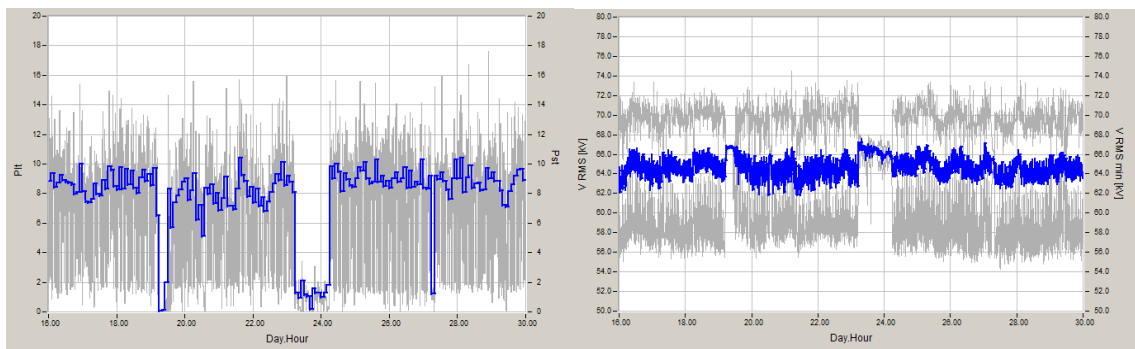
Wahaniami napięcia określa się serię szybkich zmian wartości skutecznej napięcia o dynamicznym przebiegu, bądź zmian obwiedni jego przebiegu czasowego [24]. Rysunek 3.1 prezentuje podział zaburzeń wartości skutecznej napięcia w odniesieniu do napięcia deklarowanego U_{din} . Obszar wahań napięcia obejmuje zmiany wartości skutecznej w przedziale $\pm 10\% U_{din}$. W przypadku wahań okresowych przyjmuje się, że zjawisko jest pomiarowo analizowane w przedziale od 0,05 Hz do 35 Hz.

Podstawową przyczyną wahań napięcia jest zmienność w czasie głównie mocy biernej odbiorników, określanych mianem niespokojnych tj. napędów elektrycznych dużej mocy, napędów walcowniczych, maszyn wyciągowych itp. [25]. Wahania napięcia są powodowane także przez procesy łączeniowe baterii kondensatorów, spawarki elektryczne, regulatory mocy, piły, windy, dźwigi, a więc ogólnie przez odbiorniki o zmiennym obciążeniu, których moc jest znaczna w relacji do mocy zwarciowej w punkcie ich przyłączenia do systemu zasilającego. Jako przykład, na rysunku 3.2 przedstawiono wykresy wskaźników wahań napięcia P_{lt} oraz P_{st} wraz z odpowiadającymi im wartościami napięcia otrzymanymi w wyniku pomiarów na zasilaniu dużego zakładu przemysłowego (110 kV). Przeprowadzone pomiary ujawniły, że współczynnik P_{lt} w całym okresie pomiaru przekracza ponad dwunastokrotnie wartość dopuszczalną, która dla sieci 110 kV wynosi 0,8. Na rysunku 3.2b liniami szarymi zaznaczono wartość minimalną i maksymalną napięcia skutecznego wyznaczone za okres 10 min. Linie te obrazują maksymalną zmienność napięcia w ciągu jednego interwału pomiarowego. Jak wykazała dalsza analiza zmienność tego napięcia silnie zależy od charakteru pracy odbiornika. Zjawisko to jest bardzo dobrze widoczne po analizie korelacji pomiędzy wskaźnikiem P_{st}

a wartością prądu, mocy czynnej oraz biernej. Przedstawione wykresy korelacyjne (rys. 3.3) wykazują, że wraz ze wzrostem obciążenia rośnie poziom wahań napięcia.



Rys. 3.1. Zjawiska wpływające na wartość skuteczną napięcia (U_N - napięcie znamionowe) [25]



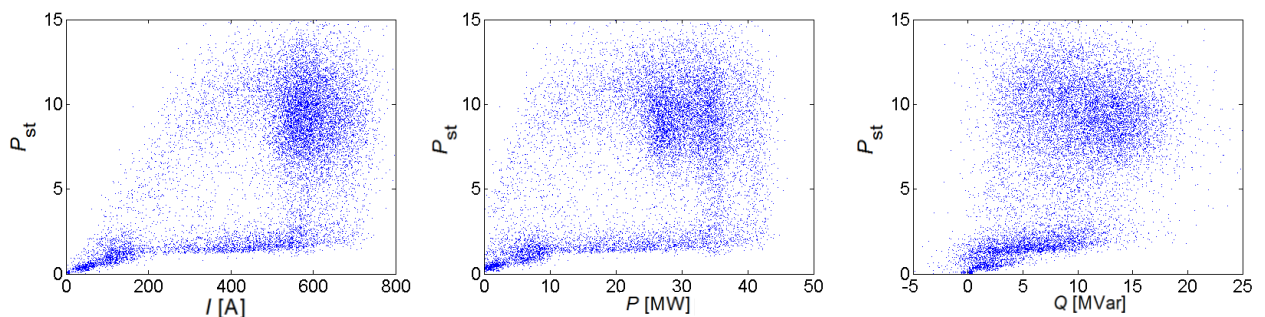
skala P_{it}, P_{st} : 0–20

skala U_{rms} : (50–80) kV

Rys. 3.2. Przebiegi czasowe dla wybranego punktu pomiarowego [21]:

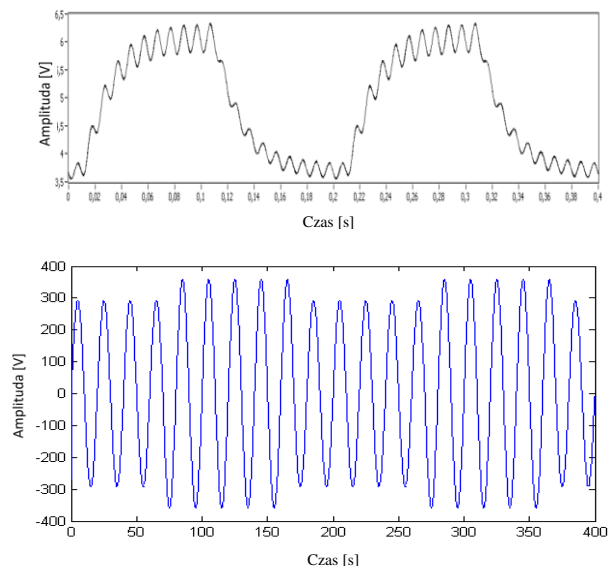
(a) współczynnik P_{it} (linia niebieska) na tle współczynnika P_{st} (linia szara),

(b) wartość skuteczną napięcia (linia niebieska) wraz z wartościami (10 ms) min i max (linie szare)



Rys. 3.3. Wykresy korelacyjne między P_{st} , a wartością prądu, mocy czynnej oraz biernej [21]

Wahania oddziałują negatywnie na pracę wielu odbiorników energii, zarówno spokojnych, jak i niespokojnych. Są również powodem dodatkowych strat mocy w elementach sieci elektroenergetycznej. Bardzo istotną konsekwencją tego zaburzenia jest migotanie strumienia świetlnego w źródłach światła (ang. *flicker*). Właśnie to zjawisko jest podstawowym kryterium przyjętym do oceny szkodliwości i uciążliwości wahań napięcia. Rysunek 3.4 przedstawia przykładową zmianę strumienia świetlnego żarówki w reakcji na krótkotrwałą zmianę napięcia zasilającego.



Rys. 3.4. Zmiana sygnału odpowiadającej wartości strumienia świetlnego żarówki wywołana zmianą napięcia zasilającego [7]

3.3 Wpływ wahań napięcia na pracę różnych rodzajów źródeł światła

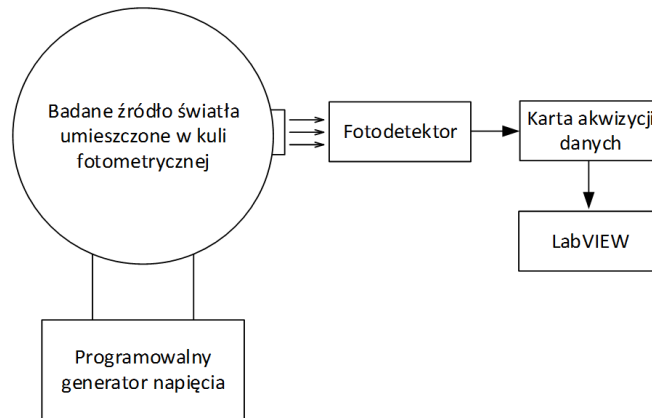
3.3.1 Opis badań

Do badań odporności źródeł światła wykorzystano 21 obiektów (tab. 3.2), reprezentujących różne rodzaje (żarówka, lampa halogenowa, CFL, lampa LED) oraz różnych producentów. Każdemu z badanych źródeł przyporządkowano indywidualne oznaczenie wykorzystywane następnie do prezentacji wyników.

Schemat układu pomiarowego przedstawiony został na rysunku 3.5. Badany obiekt umieszczono w kuli fotometrycznej i zasilono z programowalnego generatora napięcia NSG 1007 [54] umożliwiającego wytworzenie modulacji o ściśle określonych parametrach. Strumień świetlny, po przetworzeniu na sygnał napięciowy za pomocą przetwornika światło-napięcie OPT 101 [58], był przekazywany do karty akwizycji danych zintegrowanej z komputerem z zainstalowanym środowiskiem LabVIEW, w którym realizowana była analiza danych pomiarowych.

Tab. 3.2. Lista źródeł światła użytych do badań migotania światła

Typ	Oznaczenie	Moc [W]	Typ	Oznaczenie	Moc [W]
Lampa CFL	CFL1	9	Lampa LED	LED1	7
	CFL2	23		LED2	12
	CFL3	24		LED3	4,5
	CFL4	25		LED4	10
	CFL5	15		LED5	4,5
	CFL6	24		LED6	1,6
	CFL7	15		LED7	12
	CFL8	18		LED8	2
Lampa żarowa	INC1	60	Lampa halogenowa	H1	42
	INC2	60		H2	53
				H3	60

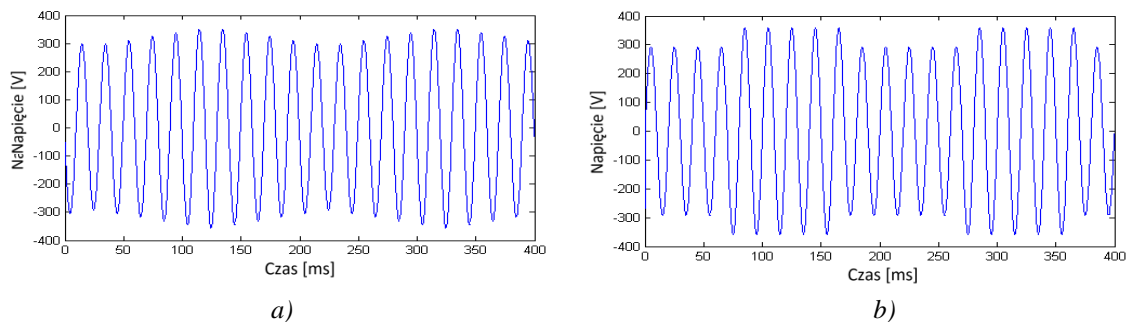


Rys. 3.5. Schemat układu pomiarowego migotania światła

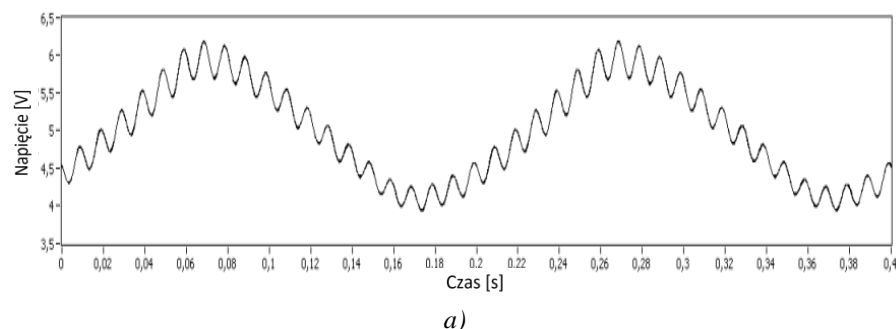
Do oceny poziomu migotania światła w przypadku różnych typów lamp wykorzystana została metoda zaproponowana w [6]. Polega ona na analizie Fouriera sygnału natężenia światła. W przypadku zasilania napięciem sinusoidalnym 50 Hz, w widmie strumienia świetlnego lampy obecna jest składowa stała oraz składowa o częstotliwości 100 Hz. W przypadku, gdy w napięciu zasilającym obecna jest jeszcze modulacja amplitudy pojawiają się dodatkowe składowe o częstotliwościach: f_m , $100 + f_m$, $100 - f_m$, gdzie f_m jest częstotliwością modulacji (rys. 3.6–3.8). Do określenia ilościowego wpływu wahań napięcia można się posłużyć wskaźnikiem względnej zmiany strumienia świetlnego:

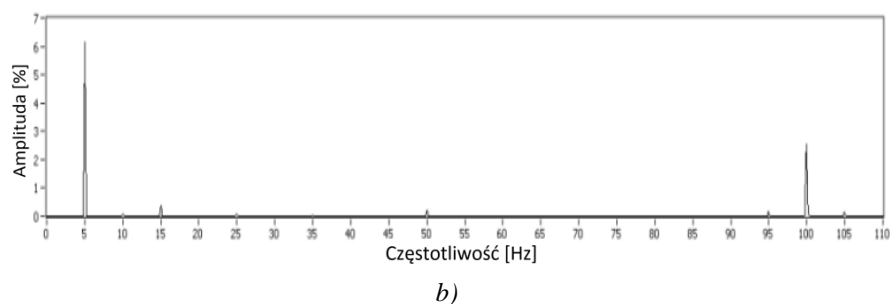
$$L_r(f_m) = \frac{L_{fm}}{L_{av}} \times 100 \quad (3.2)$$

gdzie : L_{fm} – amplituda składowej o częstotliwości modulacji f_m w widmie strumienia świetlnego lampy,
 L_{av} – strumień świetlny lampy.

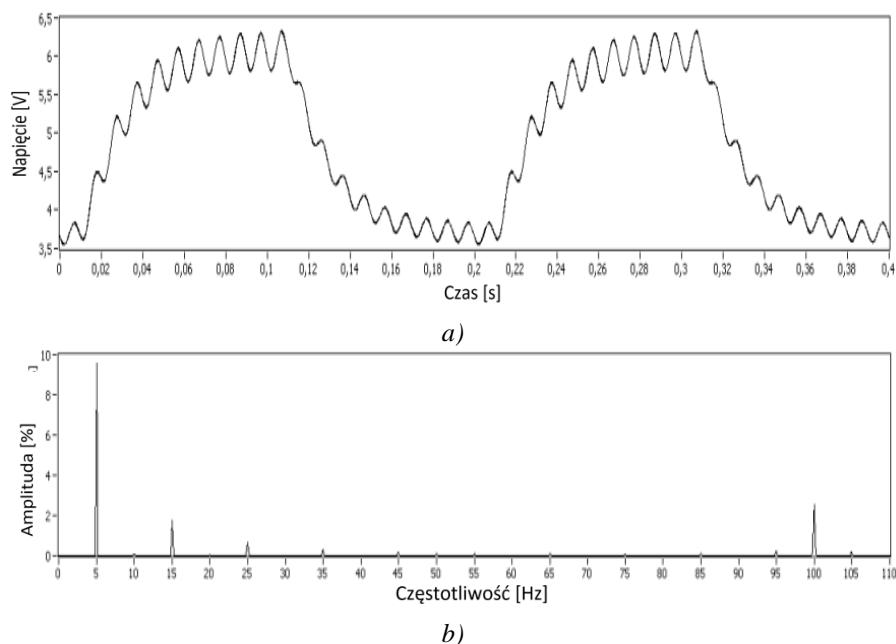


Rys. 3.6. Napięcie 230 V, 50 Hz z modulacją sinusoidalną (a), prostokątną (b) - $U_m=10\% U_{din}$, $f_m=5$ Hz





Rys. 3.7. Sygnał odpowiadający wartości strumienia świetlnego żarówki 60 W zasilanej napięciem z modulacją sinusoidalną 5 Hz; a) przebieg czasowy, b) spektrum po odfiltrowaniu składowej stałej



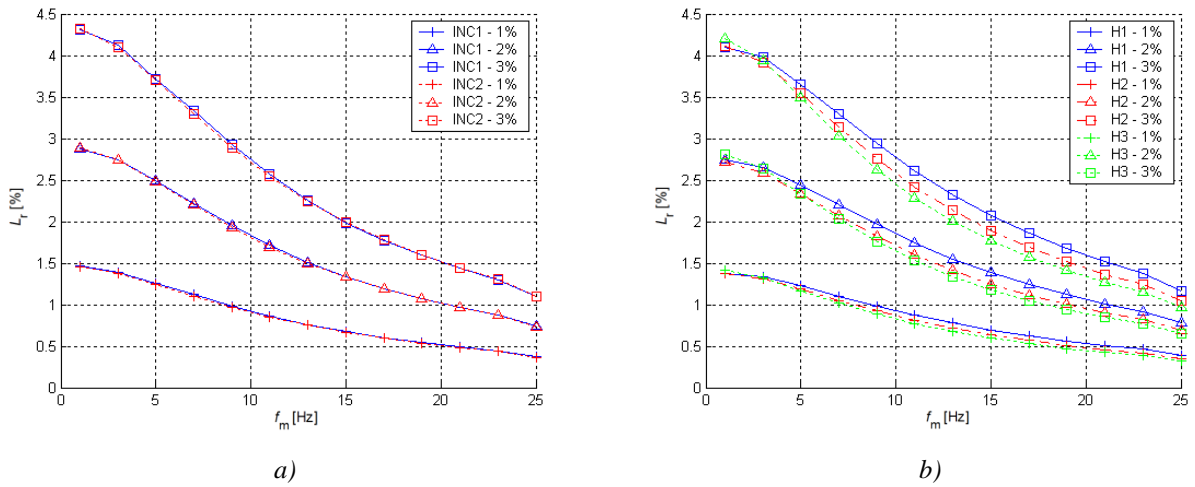
Rys. 3.8. Sygnał odpowiadający wartości strumienia świetlnego żarówki 60 W zasilanej napięciem z modulacją prostokątną 5 Hz; a) przebieg czasowy, b) spektrum po odfiltrowaniu składowej stałej

3.3.2 Wyniki badań – modulacja sinusoidalna

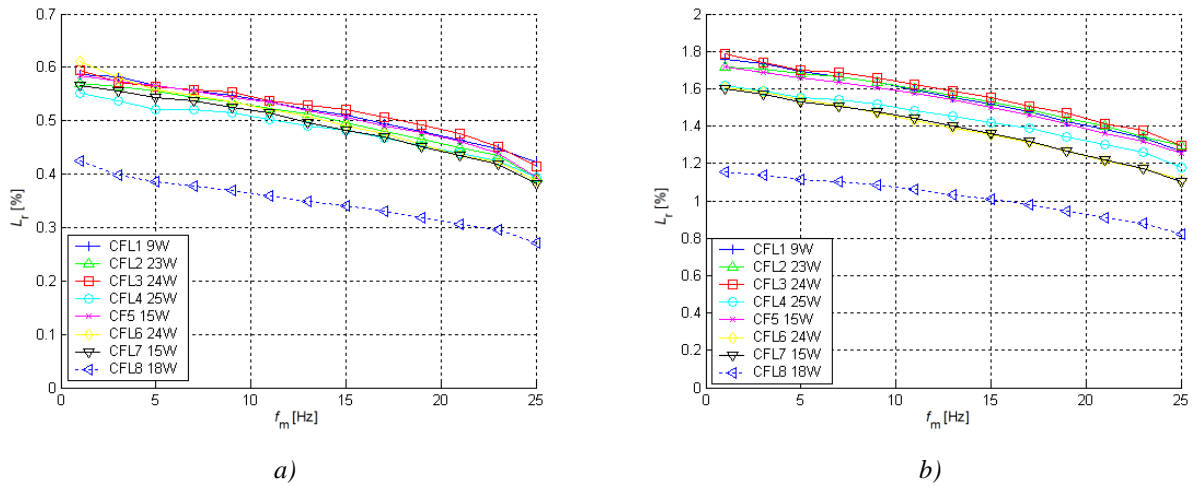
Na rysunkach 3.9–3.11 prezentowane są przebiegi $L_r(f_m)$ otrzymane dla różnych poziomów modulacji napięcia zasilającego: 1, 2 lub 3%. W przypadku lamp żarowych przebiegi pokrywają się. Wraz ze wzrostem częstotliwości modulacji, wskaźnik $L_r(f_m)$ ulega widocznemu zmniejszeniu. W przypadku amplitudy modulacji równej 3%, największa zarejestrowana wartość sięga około 4,3% ($f_m = 1$ Hz), podczas gdy najmniejsza około 1,1% ($f_m = 25$ Hz). Porównując wyniki otrzymane dla żarówki widoczna jest liniowa zależność pomiędzy wartością współczynnika $L_r(f_m)$ oraz amplitudą modulacji. Charakterystyki otrzymane dla lamp halogenowych (rys. 3.9b) są zbliżone do charakterystyk żarówek.

W przypadku świetlówek kompaktowych stwierdzić można, że są one mniej wrażliwe na wahania napięcia niż lampy żarowe w prawie całym rozpatrywanym zakresie częstotliwości. Dla napięcia modulowanego częstotliwością 1 Hz wartości wskaźnika $L_r(f_m)$ są średnio 65% mniejsze, niż w przypadku żarowych źródeł światła. Otrzymane charakterystyki są bardziej płaskie, co oznacza że wskaźnik $L_r(f_m)$ jest mniej zależny od częstotliwości modulacji. W przypadku źródeł wyładowczych zaobserwować można dużą rozbieżność otrzymanych przebiegów w zależności od badanego obiektu. Inaczej od pozostałych zachowuje się obiekt CFL8, którego charakterystyki znajdują się wyraźnie poniżej średniej. Według deklaracji

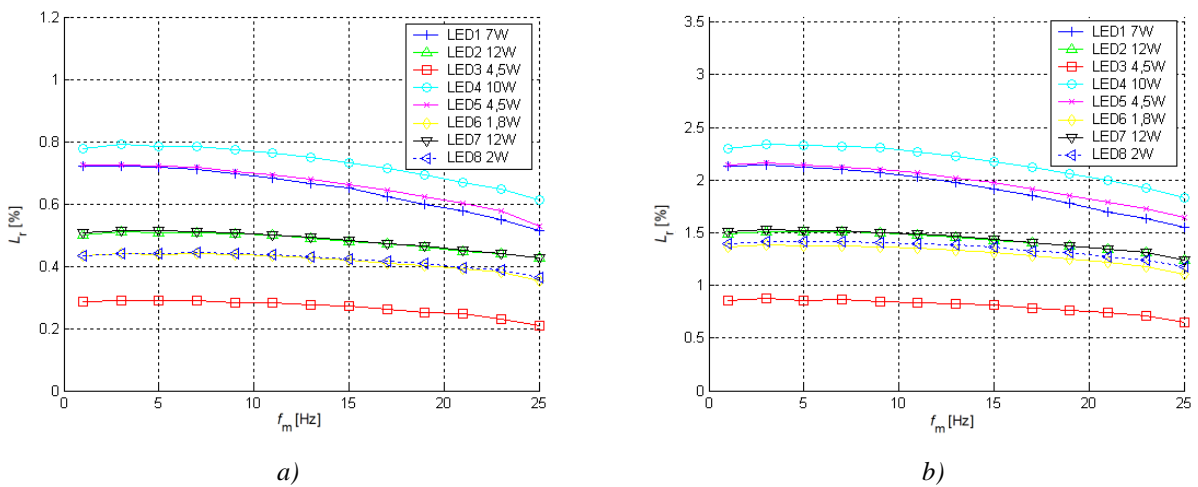
producenta jest on dedykowany do współpracy z regulatorami mocy opartymi na sterowaniu fazowym.



Rys. 3.9. Przebiegi $L_r(f_m)$ żarówek (a) oraz lamp halogenowych (b) – modulacja sinusoidalna: 1, 2 oraz 3% U_{din}



Rys. 3.10. Przebiegi $L_r(f_m)$ lamp CFL dla modulacji sinusoidalnej: 1% U_{din} (a) oraz 3% U_{din} (b)



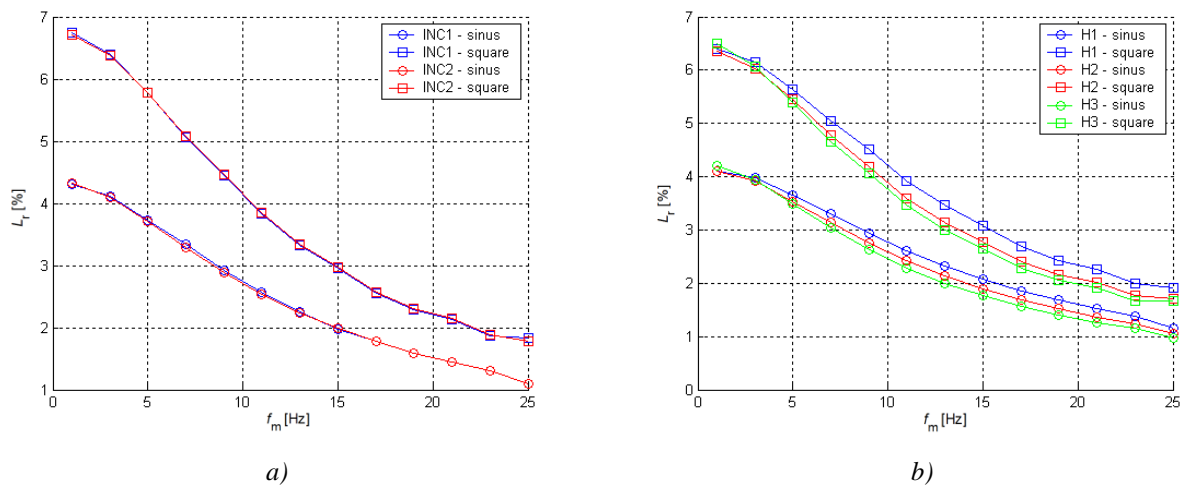
Rys. 3.11. Przebiegi $L_r(f_m)$ lamp LED dla modulacji sinusoidalnej: 1% U_{din} (a) oraz 3% U_{din} (b)

Lampy LED charakteryzują się najslabszą korelacją wzajemną wskaźnika $L_r(f_m)$ od częstotliwości modulacji (najbardziej płaskie charakterystyki). Należy jednak zauważyć, że nie jest możliwe sformułowanie jednoznacznej opinii odnośnie czułości poszczególnych lamp na

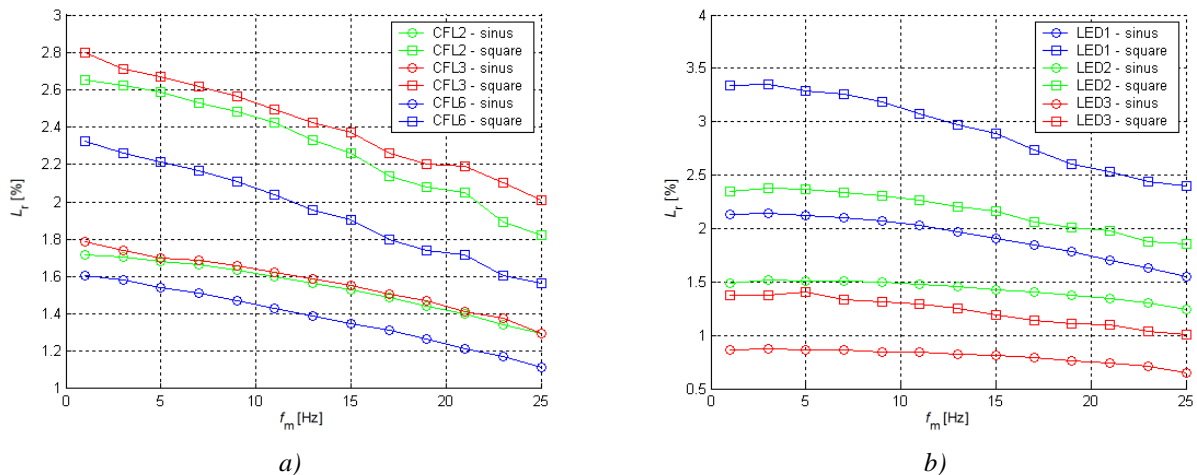
wahania napięcia, ponieważ w zależności od mierzonego obiektu, występują duże różnice w wartości wskaźnika $L_r(f_m)$. Dla przykładu obiekt LED3 jest pod tym względem lepszy od wszystkich świetlówek kompaktowych, podczas gdy obiekt LED4 jest od nich gorszy.

3.3.3 Wyniki badań – modulacja prostokątna

Procedura badań z zastosowaniem modulacji prostokątnej przebiegała analogicznie jak dla modulacji sinusoidalnej. Stwierdzono, że modulacja prostokątna powoduje średnio 50% wzrost składowej modulacji w widmie strumienia świetlnego w porównaniu z wynikami otrzymanymi dla modulacji sinusoidalnej. Dokładne wyliczenia dla poszczególnych rodzajów źródeł światła zaprezentowane zostały w tabeli 3.3. Charakterystyki poszczególnych źródeł światła otrzymane dla różnych rodzajów modulacji przedstawiono na rysunkach 3.12 i 3.13.



Rys. 3.12. Przebiegi $L_r(f_m)$ przy modulacji sinusoidalnej (sinus) oraz prostokątnej (square) – a) żarówki, b) lampy halogenowe



Rys. 3.13. Przebiegi $L_r(f_m)$ przy modulacji sinusoidalnej (sinus) oraz prostokątnej (square) – a) lampy CFL, b) lampy LED

Tab. 3.3. Przyrost $L_r(f_m)$ dla badań z wykorzystaniem modulacji prostokątnej w odniesieniu do modulacji sinusoidalnej ($f_m = 5 \text{ Hz}$, $U_m = 3\%$)

Rodzaj źródła	Przyrost $L_r(f_m)$	Rodzaj źródła	Przyrost $L_r(f_m)$
Żarówka	51,3%	CFL	47,9%
Halogen	51,1%	LED	52,1%

Tradycyjne żarowe źródła światła zostały porównane względem ich obecnych zamienników oferowanych na rynku. Stwierdzono, że najbardziej wrażliwymi na zmiany napięcia są żarowe źródła światła (włączając lampy halogenowe). Zjawisko migotania w przypadku świetlówek kompaktowych jest przeważnie mniej uciążliwe, aczkolwiek wraz ze wzrostem częstotliwości do 25 Hz zaczynają się one zachowywać podobnie do źródeł żarowych. Ocena wrażliwości oświetlenia LED na wahania napięcia, z uwagi na dużą różnicę pomiędzy wskazaniem poszczególnych obiektów, powinna być wykonywana dla konkretnej lampy LED.

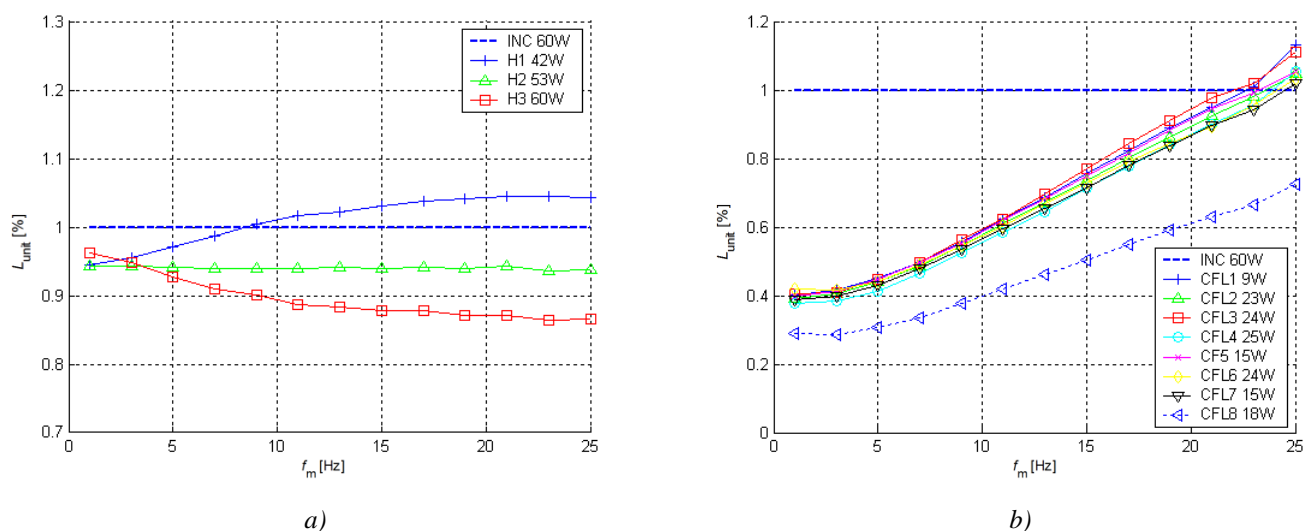
3.3.4 Jednostkowy wskaźnik względnej zmiany strumienia świetlnego $L_{\text{unit}}(f_m)$

Użytecznym dla porównania różnych typów źródeł światła pod kątem ich odporności na wahania napięcia jest jednostkowy wskaźnik względnej zmiany strumienia świetlnego $L_{\text{unit}}(f_m)$, definiowany jako stosunek wskaźnika $L_r(f_m)$ danego źródła odniesiony do wskaźnika otrzymanego dla tradycyjnej żarówki [6].

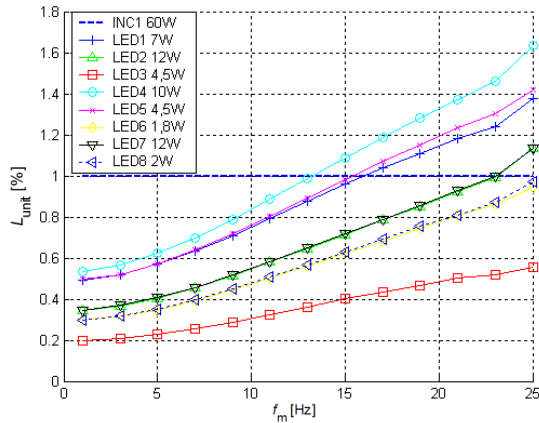
$$L_{\text{unit}}(f_m) = \frac{L_r(f_m)}{L_{\text{INC}}(f_m)} \times 100 \quad (3.3)$$

gdzie: $L_{\text{INC}}(f_m)$ – wskaźnik względnej zmiany strumienia świetlnego tradycyjnej żarówki.

Analizując przebiegi $L_{\text{unit}}(f_m)$ zauważyć można, że lampy halogenowe charakteryzują się podobną jak tradycyjna żarówka odpowiedzią na wahania napięcia (rys. 3.14a) – wartości zbliżone do jedności w całym rozważanym przedziale częstotliwości. Inaczej jest w przypadku pozostałych rodzajów lamp. Efekt migotania obserwowany u świetlówek kompaktowych jest relatywnie niewielki dla małych częstotliwości wahań (rys. 3.14b). Jego najmniejszą wartość równą około 0,3 otrzymano dla modulacji 1 Hz. Widać jednak, że począwszy od 23 Hz lampy CFL przenoszą wahania napięcia w większym stopniu niż źródła żarowe. Oczywiście dla najbardziej istotnej, z punktu widzenia ludzkiego organizmu, częstotliwości 8,8 Hz wskaźnik jest dalej mały i wynosi mniej niż 0,6. Ocena lamp LED nie jest jednoznaczna z uwagi na duże różnice pomiędzy badanymi źródłami (rys. 3.15). Wystarczy porównać dwa skrajne przebiegi otrzymane dla LED3 oraz LED4.



Rys. 3.14. Wskaźnik $L_{\text{unit}}(f_m)$ dla (a) lamp halogenowych, (b) lamp CFL – amplituda modulacji 3%



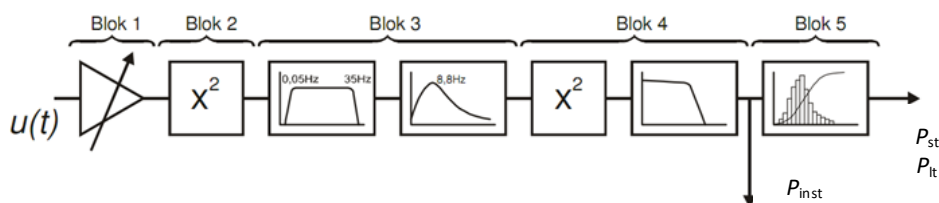
Rys. 3.15. Wskaźnik $L_{\text{unit}}(f_m)$ dla lamp LED – amplituda modulacji 3%

3.4 Miernik migotania światła

Do oceny poziomu wahań napięcia wyróżnić można dwie metody pomiarowe. Pierwsza polega na ilościowej ocenie zmian wartości skutecznej lub przebiegu czasowego obwiedni napięcia. Drugą jest pomiar pośredni poprzez ocenę skutku wahań napięcia, jakim jest zjawisko migotania światła i to ta metoda realizowana jest przez opisany w [43] miernik. Pozwala ona określić poziom ludzkiej irytacji powodowanej zmianami strumienia świetlnego. Jego konstrukcja zapewnia odwzorowanie trzech niezbędnych elementów składających się na postrzeganie tego zjawiska tj. strumienia świetlnego, oka ludzkiego i reakcji mózgu. Jedynie strumień świetlny jest możliwy do bezpośredniego pomiaru. Pozostałe składniki muszą być odtworzone w taki sposób, aby odwzorowywały dokładnie zachowanie oka i mózgu. Tylko jeśli warunek ten jest spełniony, możliwy jest pomiar wpływu migotania światła na człowieka. Wykazano, że organizm ludzki jest najbardziej wrażliwy na zmiany strumienia świetlnego o częstotliwości 8,8 Hz, czemu odpowiada charakterystyka jednego z filtrów modelujących układ *oko–mózg*. Aby ocenić poziom migotania światła opracowano dwa wskaźniki postrzegania:

- P_{st} – wskaźnik krótkookresowego migotania światła (ang. *short-term flicker severity index*),
- P_{lt} – wskaźnik długookresowego migotania światła (ang. *long-term flicker severity index*).

Wartości $P_{\text{st}} = 1$ jest uznawana za próg postrzegania migotania światła. Rysunek 3.16 przedstawia uproszczony schemat blokowy miernika migotania światła [43].



Rys. 3.16. Schemat blokowy miernika migotania światła

W strukturze przyrządu można wyróżnić pięć bloków funkcjonalnych:

Blok 1 dokonuje normalizacji sygnału wejściowego $u(t)$ poprzez wyznaczenie poziomu względnych zmian napięcia $d(t)=u(t)/U$, gdzie U jest średnią skuteczną wartością napięcia

wyznaczoną w okresie ostatniej minuty pomiaru. Dzięki temu możliwe jest prowadzenie pomiarów niezależnie od rzeczywistej wartości napięcia wejściowego.

Blok 2 przeprowadza demodulację sygnału nośnego 50 Hz poprzez podniesienie do kwadratu. Blok ten symuluje reakcję lampy.

Blok 3 zawiera dwa filtry. Pierwszy z nich jest pasmowoprzepustowy i tłumi składową stałą (poniżej 0,05 Hz), a także składowe powyżej 35 Hz. Drugim jest filtr ważony $F(s)$ o charakterystyce częstotliwościowej odpowiadającej żarowemu źródłu światła o mocy 60W, 230V (uznanemu za najbardziej powszechne w Europie). Częstotliwość rezonansowa filtra ważonego odpowiada największej wrażliwości oka ludzkiego na migotanie światła – 8,8 Hz w oparciu o model percepcji wzrokowej opracowany przez Rashbassa i Koenderinka [23].

$$F(s) = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \cdot \frac{1 + \frac{s}{\omega_2}}{(1 + \frac{s}{\omega_3})(1 + \frac{s}{\omega_4})} \quad (3.4)$$

gdzie:

$k = 1,74802$; $\lambda = 2\pi 4,05981$ rad/s; $\omega = 2\pi 9,15494$ rad/s ; $\omega_2 = 2\pi 2,27979$ rad/s; $\omega_3 = 2\pi 1,22535$ rad/s; $\omega_4 = 2\pi 21,9$ rad/s.

Współczynniki te są poprawne dla napięcia 230 V.

Blok 4 – Model nieliniowej reakcji mózgu. Blok ten realizuje funkcję podnoszenia do kwadratu oraz funkcję całkowania tak otrzymanego sygnału za pomocą filtra dolnoprzepustowego pierwszego rzędu o stałej czasowej 300 ms. Sygnał P_{inst} na wyjściu bloku 4 reprezentuje chwilowy poziom migotania.

Blok 5 – Ostatnim etapem wyznaczenia wskaźników migotania światła jest blok przeprowadzający analizę statystyczną. Ze względu na zmieniający się – najczęściej losowo – poziom wahań napięcia, oprócz wyznaczenia maksymalnego poziomu P_{inst} , należy dokonać oceny statystycznej w jakim procentowo czasie obserwacji dany poziom migotania jest przekroczony. Analiza statystyczna prowadzi zatem do ustalenia relacji pomiędzy liczbowymi wartościami określającymi poziom migotania, a czasami ich występowania.

Zebrane próbki należy sklasyfikować, a następnie wyznaczyć funkcję skumulowanego prawdopodobieństwa CPF (ang. *cumulative probability function*). Do wyznaczenia krótkookresowego wskaźnika migotania wykorzystywana jest zależność:

$$P_{st} = \sqrt{k_{0,1}P_{0,1} + k_1P_1 + k_3P_3 + k_{10}P_{10} + k_{50}P_{50}} \quad (3.5)$$

gdzie:

$k_{0,1} \dots k_{50}$ – współczynniki wagowe,

$P_{0,1} \dots P_{50}$ – poziom migotania w percentylach, dla których wyznaczono skumulowane prawdopodobieństwo.

Do wyznaczenia długookresowego wskaźnika migotania światła wykorzystywana jest następująca zależność:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N P_{sti}^3}{N}} \quad (3.6)$$

gdzie: P_{sti} są kolejnymi wartościami P_{st} występującymi w czasie obserwacji zjawiska.

Norma zaleca przyjęcie $N = 12$, co odpowiada dwunastu dziesięciominutowym wartościom P_{st} , w ciągu dwugodzinnego pomiaru P_{lt} .

3.4.1 Miernik IEC migotania światła

W ramach pracy wykonany został w środowisku LabVIEW laboratoryjny model miernika migotania światła. Realizacja programowa poszczególnych bloków funkcyjnych miernika opisana została w Załączniku D. Poprawność działania miernika została zweryfikowana poprzez wykonanie testu 3.1.

Test 3.1 - Model IEC miernika migotania światła – pomiar P_{st}

Opis testu	Na wejście modelu IEC miernika migotania światła podawane jest napięcie sinusoidalne o wartości skutecznej 230 V zmodulowane sygnałem prostokątnym o częstotliwościach wskazanych w tabeli 5 normy [43]. Źródłem sygnału testowego jest kalibrator Omicron 256plus. Amplitudy wahań sygnału testowego odpowiadają następującym poziomom wskaźnika P_{st} : a) $P_{st} = 1$, b) $P_{st} = 10$.
Kryterium testu	Niepewność pomiaru nie powinna przekroczyć $\pm 5\%$ wartości oczekiwanej tj.: a) $P_{st} = 1 \pm 0,05$, b) $P_{st} = 10 \pm 0,5$.

Wyniki testu zostały zebrane w tabelach 3.4 i 3.5. Stwierdzono zgodność wszystkich wskazań modelu IEC z zadaniem kryterium testu.

Tab. 3.4. Model IEC miernika migotania światła – test P_{st} (tabela 5 normy [43])

Lp.	Liczba zmian na minutę	Częstotliwość [Hz]	Zmiana napięcia [%]	P_{st}		Błąd względny	
	[min^{-1}]			Model IEC	PQ Box 200	Model IEC	PQ Box 200
1	1	0,0083	2,715	1,02	1,00	2,0%	0,0%
2	2	0,0167	2,191	0,99	1,00	-1,0%	0,0%
3	7	0,0583	1,450	1,01	1,00	1,0%	0,0%
4	39	0,3250	0,894	1,03	1,00	3,0%	0,0%
5	110	0,9170	0,722	1,02	1,01	2,0%	1,0%
6	1620	13,500	0,407	1,02	0,99	2,0%	-1,0%
7	4000	33,(3)	2,343	1,02	1,00	2,0%	0,0%

Tab. 3.5. Model IEC miernika migotania światła – test liniowości wskazań P_{st}

Lp.	Liczba zmian na minutę	Częstotliwość [Hz]	Zmiana napięcia [%]	P_{st}		Błąd względny	
	[min ⁻¹]			Model IEC	PQ Box 200	Model IEC	PQ Box 200
1	1	0,0083	27,15	10,05	11,09	0,5%	10,9%
2	2	0,0167	21,91	10,25	10,31	2,5%	3,1%
3	7	0,0583	14,50	10,25	9,98	2,5%	-0,2%
4	39	0,3250	8,94	10,26	9,99	2,6%	-0,1%
5	110	0,9170	07,22	10,29	9,98	2,9%	-0,2%
6	1620	13,500	4,07	10,17	10,01	1,7%	0,1%
7	4000	33,(3)	23,43	10,20	9,83	2,0%	-1,7%

3.4.2 Miernik migotania światła w oparciu o pomiar strumienia świetlnego żarowych źródeł światła (Model INC)

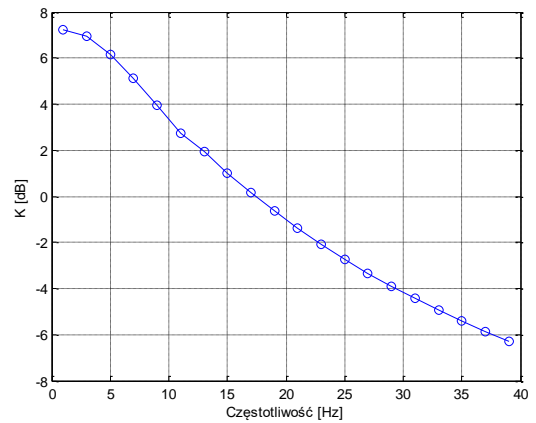
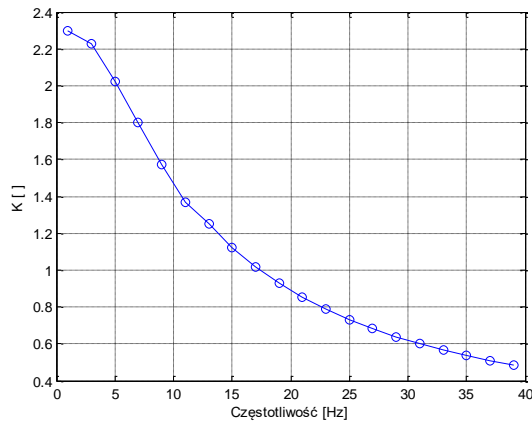
Model miernika opisanego w rozdziale 3.4.1 i Załączniku D wyznacza wskaźniki migotania światła w oparciu o pomiar napięcia sieciowego. Przeprowadzono modyfikację tego miernika tak, aby możliwe był wyznaczenie wskaźników migotania światła w oparciu o pomiar natężenia oświetlenia wytwarzanego przez żarówkę 60 W. W tym celu dokonano przekształcenia dwóch pierwszych bloków funkcyjnych modelu IEC. W ich miejsce wstawione zostały dwa filtry. Pierwszy z nich jest filtrem wygładzającym. Następnie sygnał jest dzielony przez ten sam przebieg przefiltrowany filtrem dolnoprzepustowym do wydzielenia składowej stałej. Najbardziej istotna modyfikacja dotyczyła parametrów filtra ważonego. Podawana przez normę [43] transmitancja odpowiada reakcji *lampa-oko-mózg*. Aby zbudować model miernika migotania światła w oparciu o pomiar strumienia żarowych źródeł światła należy filtr ważony uprościć do postaci *oko-mózg*. Dokonano tego poprzez realizację czterech etapów [18]:

Etap 1. Wyznaczenie metodą kolejnych pomiarów współczynnika $K(f_m)$ określającego stopień w jakim wprowadzenie interharmonicznej do napięcia zasilającego wpływa na zmiany obwiedni natężenia strumienia świetlnego pochodzącego z żarówki.

$$K(f_m) = \frac{\frac{\Delta\Phi}{\Phi}}{\frac{\Delta U}{U}} = \frac{\frac{\Phi_{f\Phi}}{\Phi_{DC}}}{\frac{U_{IH}}{U_1}} \quad (3.7)$$

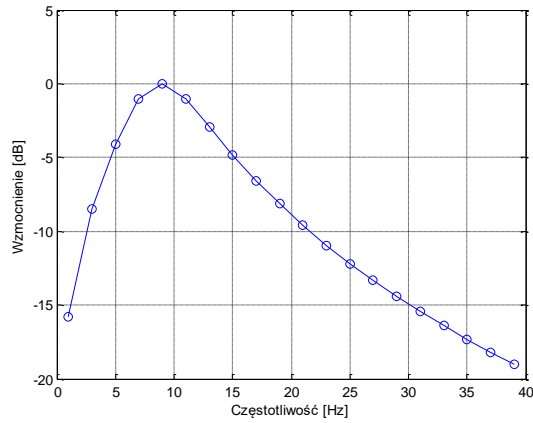
gdzie: $\Phi_{f\Phi}$ - amplituda interharmonicznej w widmie strumienia świetlnego lampy,
 Φ_{DC} - wartość składowej stałej w widmie strumienia świetlnego lampy,
 U_{IH} - amplituda interharmonicznej napięcia zasilającego lampę,
 U_1 - amplituda pierwszej harmonicznej napięcia zasilającego lampę.

Przyjęto $\Delta U = 3\%$ w całym zakresie rozważanych częstotliwości. Przebieg $K(f_m)$ uzyskany dla żarówki o mocy 60 W, przedstawiony został na rysunku 3.17.



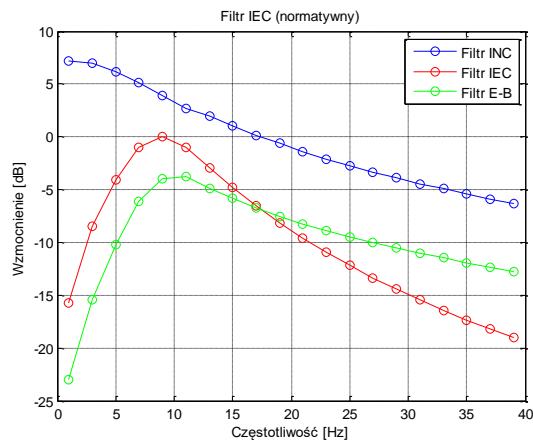
a) b)
Rys. 3.17. Wskaźnik $K(f_m)$ dla lampy żarowej, $\Delta U=3\%$

Etap 2. Graficzne wyznaczenie charakterystyki filtra *lampa-oko-mózg* (zwanego dalej filtrem IEC) na podstawie transmitancji filtra ważonego zawartej w [43] (rys. 3.18).



Rys. 3.18. Charakterystyka filtra IEC

Etap 3. Wyznaczenie charakterystyki wzmocnienia w funkcji częstotliwości dla filtra *oko-mózg* (dalej zwanym E-B (ang. *eye-brain*)) jako graficzną różnicę charakterystyki filtra IEC oraz charakterystyki filtra INC (rys. 3.19).



Rys. 3.19. Porównanie charakterystyk amplitudowych filtrów

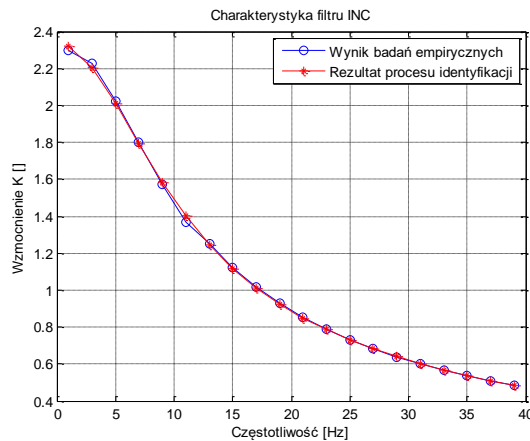
Etap 4. Identyfikacja transmitancji filtrów INC oraz E-B w oparciu o estymator LS (ang. *least squares*), ocena stopnia dopasowania (rys. 3.20, rys. 3.22) oraz zbadanie odpowiedzi filtru na wymuszenie skokiem jednostkowym (rys. 3.21, rys. 3.23).

Transmitancja filtru INC

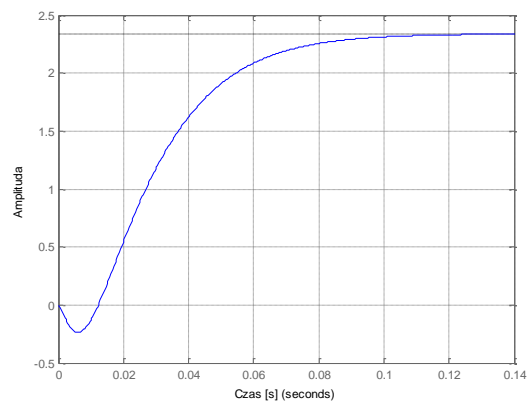
$$Filtr_INC(s) = \frac{-32s^3 - 6,449e^4s^2 + 4,834e^5s + 1,03e^9}{s^4 + 761,6s^3 + 1,87e^5s^2 + 1,598e^7s + 4,402e^8}$$

$$Filtr_INC(z) = \frac{-0,04662z^3 + 0,09627z^2 - 0,05123z + 0,00229}{z^4 - 3,332z^3 + 4,142z^2 - 2,277z + 0,4669}$$

$$T=0,001\text{ s}$$



Rys. 3.20. Wynik identyfikacji filtru INC



Rys. 3.21. Odpowiedź filtru INC na wymuszenie skokiem jednostkowym

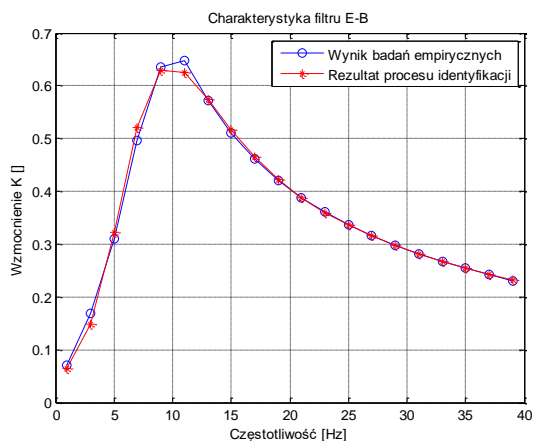
Transmitancja filtru E-B

$$Filtr_E - B(s) = \frac{-19,17 s^5 - 3,633e^4 s^4 + 2,426e^5 s^3 + 2,844e^8 s^2 + 1,616e^8 s - 6,1e^{10}}{s^6 + 841,7 s^5 + 2,342e^5 s^4 + 2,616e^7 s^3 + 1,711e^9 s^2 + 6,074e^{10} s + 1,131e^{12}}$$

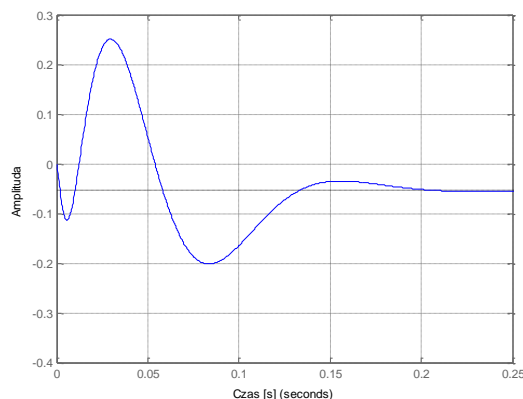
$$Filtr_E - B(z) = \frac{-0,02613 z^5 + 0,1069 z^4 - 0,1658 z^3 + 0,1175 z^2 - 0,03461 z - 0,002099}{z^6 - 5,266 z^5 + 11,51 z^4 - 13,37 z^3 + 8,702 z^2 - 3,007 z + 0,431}$$

$$T=0,001\text{ s}$$

Zamiana w tradycyjnym modelu miernika migotania światła transmitancji filtru $F(s)$ (3.4) filtrem E-B jest ostatnim krokiem w celu otrzymania modelu miernika migotania światła działającego w oparciu o pomiar natężenia oświetlenia pochodzącego z żarówki. Poprawność działania modelu INC została zweryfikowana poprzez wykonanie testu 3.2. Należy zwrócić uwagę, że znajomość transmitancji filtru E-B jest punktem wyjścia do budowy miernika migotania światła działającego w oparciu o źródła inne niż żarowe. Miernik taki, opracowany indywidualnie dla danej lampy lub rodzaju lamp, może być użytecznym narzędziem do wyznaczenia wskaźnika ich odporności na wahania napięcia. Taka miara liczbowa stanowiąc może istotny wyznacznik jakości danego źródła światła i występować obok dotychczas spotykanych parametrów takich jak: skuteczność świetlna, temperatura barwowa CCT czy współczynnik oddawania barw CRI.



Rys. 3.22. Wynik identyfikacji filtru E-B



Rys. 3.23. Odpowiedź filtru E-B na wymuszenie skokiem jednostkowym

Test 3.2 – Model INC miernika migotania światła - pomiary $P_{inst,max}$

Opis testu	Na wejście modelu INC miernika migotania światła podawane jest napięcie sinusoidalne o wartości skutecznej 230 V zmodulowane sygnałem prostokątnym o parametrach zdefiniowanych w tabeli 2b normy [43].
Kryterium testu	Niepewność pomiaru poszczególnych próbek $P_{inst,max}$ nie powinna przekroczyć $1\pm 8\%$.

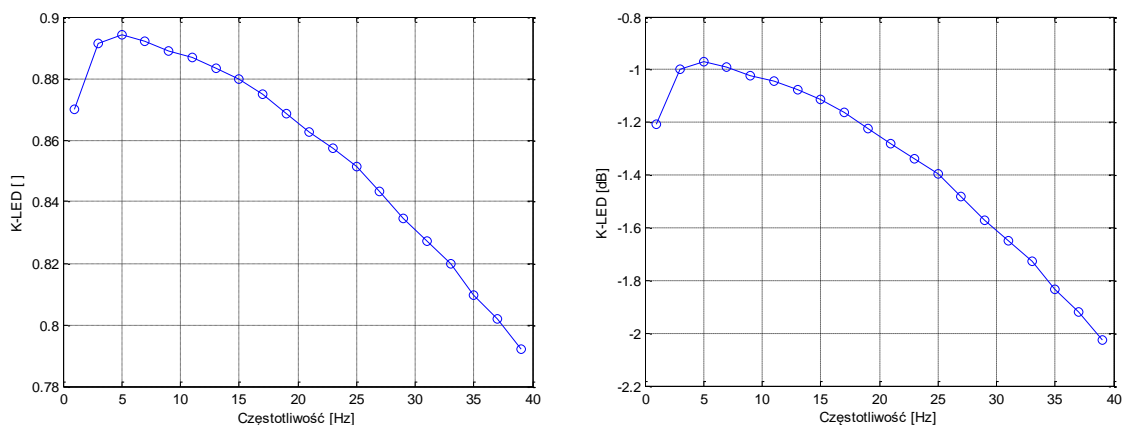
Wyniki testu 3.1 zostały zebrane w tabeli 3.6. Stwierdzono zgodność wszystkich wskazań modelu IEC z zadaniem kryterium testu.

Tab. 3.6. Model INC miernika migotania światła – test 3.2

Lp.	Częstotliwość	Zmiana napięcia	$P_{inst,max}$		P_{st}	
	[Hz]	[%]	Model INC	Model IEC	Model INC	Model IEC
1	0,5	0,509	1,05	1,08	0,68	0,64
2	3,5	0,342	0,99	1,03	0,69	0,71
3	8,8	0,196	1,00	1,06	0,70	0,73
4	18	0,446	0,94	1,02	0,70	0,72
5	21,5	0,592	0,94	1,05	0,68	0,72
6	25	0,764	0,93	1,03	0,68	0,72
7	28,0	0,915	0,93	1,06	0,68	0,73
8	30,5	0,847	0,99	1,08	0,69	0,73
9	33 1/3	1,671	0,93	1,04	0,68	0,73

3.4.3 Miernik migotania światła w oparciu o pomiar strumienia świetlnego lamp LED (Model LED) oraz CFL (Model CFL)

Do wykonania modelu miernika migotania światła w oparciu o pomiar natężenia światła lampy LED wytypowany został obiekt LED2 (tab. 3.2) o mocy 12 W. Wyznaczony metodą kolejnych pomiarów przebieg charakterystyki $K(f_m)$ prezentowany jest na rysunku 3.24.



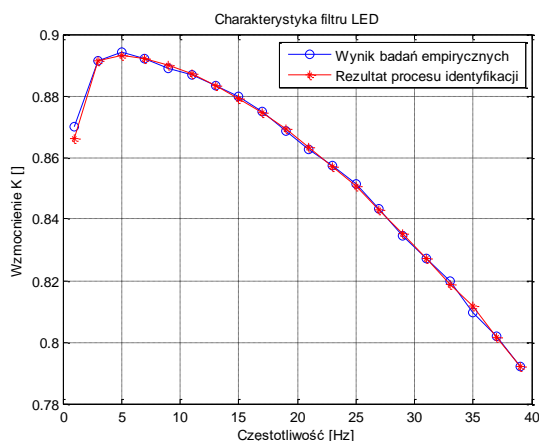
Rys. 3.24. Wskaźnik $K(f_m)$ dla lampy LED2, $\Delta U = 3\%$

Wykorzystując estymator LS dokonano identyfikacji transmitancji filtru LED. Następnie dokonano oceny dopasowania (rys. 3.25) oraz zbadano odpowiedź filtru na wymuszenie skokiem jednostkowym (rys. 3.26). Stwierdzono, że dopasowanie jest równe 96,64% a filtr jest stabilny.

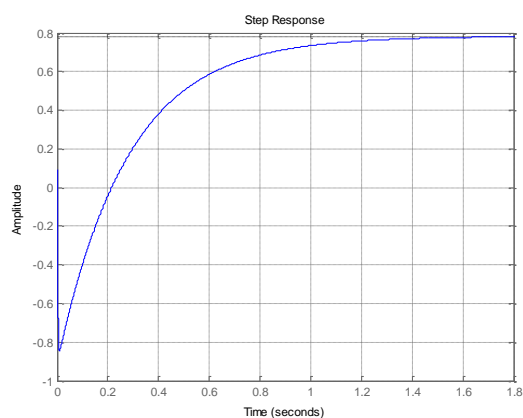
$$\begin{aligned} & \text{Filtr_LED}(s) \\ &= \frac{0,090993 (s - 2000)(s + 1998)(s + 4,092)(s - 3,141)(s^2 + 1,738 s + 2,424e^4)(s^2 + 0,4487 s + 4,811e^4)}{(s + 636,9)(s + 636,7)(s + 4,343)(s + 3,39)(s^2 + 1,738 s + 2,424e^4)(s^2 + 0,4487 s + 4,811e^4)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Filtr_LED}(z) \\ &= \frac{0,090993 (z - 3,181)(z - 1,003)(z - 0,9959)(z - 0,001313)(z^2 - 1,974 z + 0,9983)(z^2 - 1,952 z + 0,9996)}{(z - 0,9966)(z - 0,9957)(z - 0,529)(z - 0,5289)(z^2 - 1,974 z + 0,9983)(z^2 - 1,952 z + 0,9996)} \end{aligned}$$

$$T=0,001 s$$

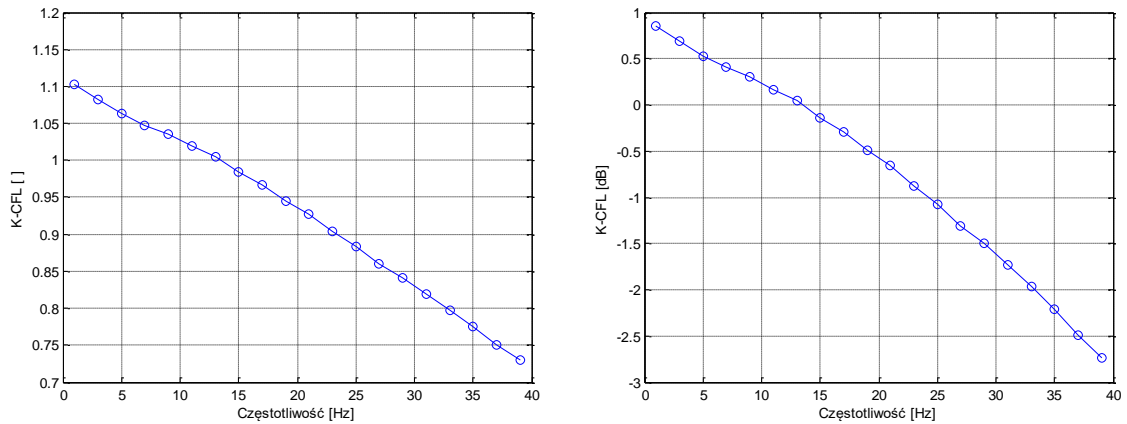


Rys. 3.25. Wynik identyfikacji lampy LED



Rys. 3.26. Odpowiedź filtru LED na wymuszenie skokiem jednostkowym

Do wykonania modelu miernika migotania światła w oparciu o pomiar natężenia światła lampy CFL wytypowany został obiekt CFL15 (tab. 3.2) o mocy 15 W. Wyznaczony metodą kolejnych pomiarów przebieg charakterystyki $K(f_m)$ prezentowany jest na rysunku 3.27.

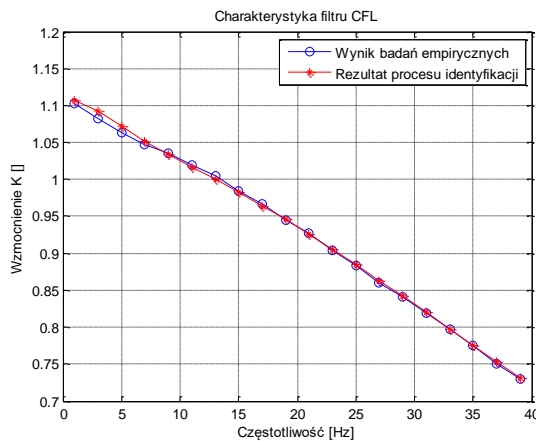


Rys. 3.27. Wskaźnik $K(f_m)$ dla lampy CFL15, $\Delta U = 3\%$

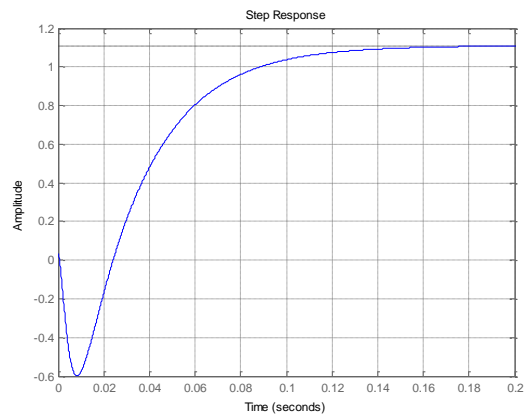
Wykorzystując estymator LS dokonano identyfikacji transmitancji filtru CFL. Następnie dokonano oceny dopasowania (rys. 3.28) oraz zbadano odpowiedź filtru na wymuszenie skokiem jednostkowym (rys. 3.29). Stwierdzono, że dopasowanie jest równe 96,74% a filtr jest stabilny.

$$\text{Filtr_CFL}(s) = \frac{0,035671(s + 2000)(s - 2000)(s + 42,04)(s - 38,3)}{(s + 371,9)(s + 371,7)(s + 40,59)(s + 36,9)}$$

$$\text{Filtr_CFL}(z) = \frac{0,035671(z - 3,515)(z - 1,039)(z - 0,9588)(z + 0,06708)}{(z - 0,9638)(z - 0,9602)(z - 0,6896)(z - 0,6894)}$$



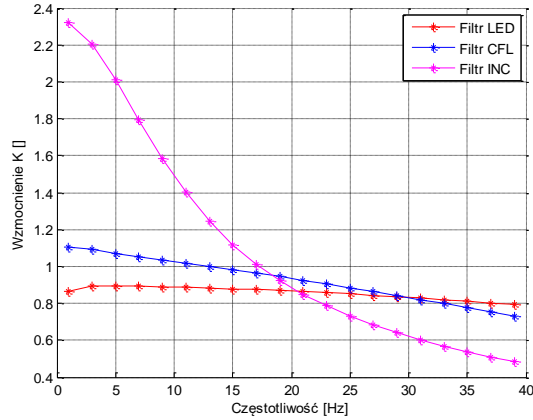
Rys. 3.28. Wynik identyfikacji lampy CFL



Rys. 3.29. Odpowiedź filtru CFL na wymuszenie skokiem jednostkowym

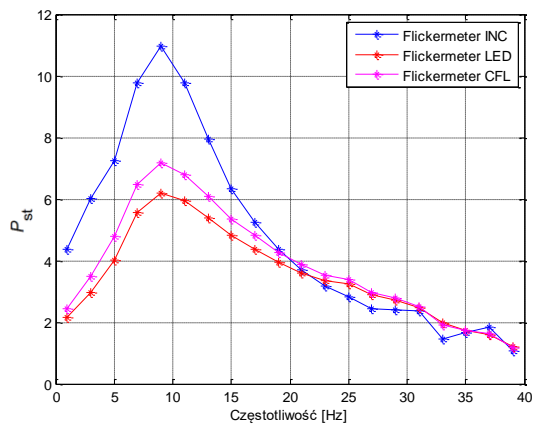
3.4.4 Porównanie modeli INC, LED, CFL

Rysunek 3.30 przedstawia porównanie charakterystyk wyznaczonych dla modeli INC, LED oraz CFL miernika migotania światła. Przeprowadzono pomiary wskaźnika P_{st} mierzonego przez wykonane modele, na których wejście podawane było napięcie zmodulowane sygnałem prostokątnym $\Delta U/U = 3\%$ w zakresie od 1 do 39 Hz oraz interharmoniczną o amplitudzie 3% składowej podstawowej również w zakresie od 1 do 39 Hz. W tabelach 3.7 i 3.8 oraz rysunkach 3.31 i 3.32 prezentowane są otrzymane wyniki.



Rys. 3.30. Porównanie charakterystyk filtrów: INC, LED oraz CFL

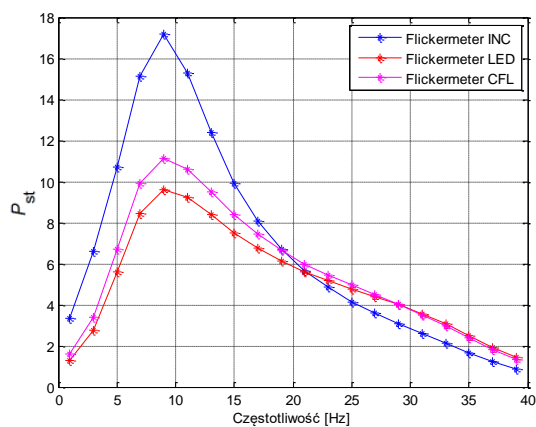
Z wykresów przedstawionych na rysunkach 3.31 i 3.32 odczytać można, że w przedziale częstotliwości poniżej 19 Hz żarówka jest mniej odporna na wahania napięcia od badanych lamp LED oraz CFL. Dla częstotliwości modulacji 8,8 Hz, a więc najczulszej z punktu widzenia ludzkiego organizmu, pomiar miernikiem IEC dla $U_{ih} = 3\%$ wykazał $P_{st} = \sim 17$, podczas gdy mierzące ten sam sygnał mierniki LED i CFL zarejestrowały odpowiednio $P_{st} = \sim 9,5$ oraz $P_{st} = \sim 11$. Oznacza to, że zamiana żarówki lampą CFL spowoduje redukcję P_{st} na poziomie 60%, natomiast wykorzystanie lampy LED, redukcję na poziomie 100%. Oczywiście redukcje te dotyczą wyłącznie wahań o modulacji prostokątnej o częstotliwości 8,8 Hz. Począwszy od 19 Hz modulacji wskazania miernika IEC maleją względem pozostałych mierników sięgając wartości mniejszej o 25% dla modulacji o częstotliwości 33 Hz.



Rys. 3.31. Wyniki testu dla modulacji prostokątnej

Tab. 3.7. Porównanie modeli INC, LED oraz CFL – modulacja prostokątna

Lp.	f [Hz]	ΔU	P_{st}		
			Model INC	Model LED	Model CFL
1	1	$A_m = 3\%$	4,37	2,17	2,44
2	3		6	2,98	3,49
3	5		7,25	4,01	4,79
4	7		9,78	5,57	6,47
5	9		10,95	6,2	7,16
6	11		9,77	5,93	6,8
7	13		7,96	5,39	6,09
8	15		6,33	4,81	5,36
9	17		5,25	4,37	4,81
10	19		4,36	3,94	4,27
11	21		3,69	3,61	3,87
12	23		3,19	3,35	3,54
13	25		2,82	3,25	3,37
14	27		2,45	2,91	2,98
15	29		2,4	2,73	2,78
16	31		2,36	2,47	2,5
17	33		1,44	1,97	1,91
18	35		1,67	1,74	1,73
19	37		1,83	1,59	1,63
20	39		1,08	1,2	1,18



Rys. 3.32. Wyniki testu dla modulacji interharmonicznej

Tab. 3.8. Porównanie modeli INC, LED oraz CFL – interharmoniczna

Lp.	f [Hz]	ΔU	P_{st}		
			Model INC	Model LED	Model CFL
1	1	$U_{ih} = 3\%$	3,32	1,27	1,62
2	3		6,62	2,77	3,39
3	5		10,69	5,63	6,73
4	7		15,14	8,44	9,93
5	9		17,17	9,58	11,12
6	11		15,31	9,25	10,59
7	13		12,37	8,39	9,48
8	15		9,92	7,51	8,37
9	17		8,08	6,76	7,43
10	19		6,72	6,13	6,65
11	21		5,67	5,61	6,00
12	23		4,85	5,17	5,45
13	25		4,15	4,78	4,96
14	27		3,61	4,4	4,49
15	29		3,1	4,02	4,03
16	31		2,61	3,57	3,52
17	33		2,13	3,07	2,97
18	35		1,65	2,49	2,37
19	37		1,23	1,93	1,81
20	39		0,89	1,45	1,33

3.4.5 Propozycja wskaźnika migotania źródeł światła

Wskaźnik migotania światła FEI (ang. *flicker effect indicator*) jest wyznaczanym indywidualnie dla danego modelu lampy lub rodzaju lamp, parametrem określającym poziom jego odporności na wahania napięcia zasilającego. Celem wskaźnika FEI jest dostarczenie miary liczbowej mogącej służyć jako dodatkowe kryterium porównywania źródeł światła będących w ofercie rynkowej, analogicznie jak to się obecnie odbywa w przypadku powszechnie uznanych wskaźników CTT lub CRI.

Procedura wyznaczania wskaźnika FEI dla danej lampy X jest następująca:

1. Wyznaczenie współczynnika $K(f_m)$ (3.7) dla lampy X,
2. Identyfikacja transmitancji operatorowej $F(s)$ lampy X,
3. Modyfikacja bloku 3 modelu IEC miernika migotania światła poprzez zamianę transmitancji filtru ważonego na szeregowe połączenie transmitancji operatorowej $F(s)$ lampy X oraz transmitancji filtru E–B wyznaczonej w rozdziale 3.4.2 (Etap 4)
4. Pomiarowe wyznaczenie sumy wskazań P_{st} zmodyfikowanego miernika migotania światła dla przyjętej amplitudy modulacji prostokątnej w zakresie częstotliwości od 1 do 39 Hz.

5. Wyznaczenie ilorazu sumy wskaźników P_{st} do sumy wskaźników P_{st} otrzymanej dla takich samych wahań napięcia przy wykorzystaniu modelu IEC miernika migotania światła.

$$FEI = \frac{\sum_{k=1}^n P_{st_model_X(k)}}{\sum_{k=1}^n P_{st_model_IEC(k)}} \quad n = 1, 3, 5, \dots, 39 \quad (3.8)$$

W tabeli 3.9 zebrano rezultaty FEI otrzymane dla żarówki 60 W, lampy LED2 oraz CFL15. Analizując otrzymane wyniki widać, że z punktu widzenia przyjętego kryterium najbardziej odpornym na wahania napięcia jest lampa CFL15. Podmiana tradycyjnej żarówki na tę lampę powinna spowodować średnie zmniejszenie efektu migotania światła o 26%. W przypadku zastosowania lampy LED2 oczekiwana redukcja wynosi 19%.

Tab. 3.9. Wskazania FEI otrzymane dla różnych modeli źródeł światła

Źródło światła	FEI
Żarówka	1,00
CFL15	0,74
LED2	0,81

Należy pamiętać jednak, że faktyczna redukcja migotania zależać będzie w dużym stopniu od rzeczywistej wiodącej częstości wahań napięcia zasilającego źródło światła. Posługując się wskaźnikiem FEI można wykazać, że zasadniczo produkty bazujące na nowoczesnych technologiach oświetleniowych LED oraz CFL redukują efekt migotania światła w odniesieniu do tradycyjnych źródeł żarowych. W związku z powyższym, potwierdzona zostaje teza, że aktualnie stosowane poziomy dopuszczalne wahań napięcia w sieciach dystrybucyjnych nie są adekwatne do odczuwalnej uciążliwości spowodowanej efektem migotania światła pochodzącym od nowoczesnych źródeł światła LED oraz CFL. Uzasadnionym wydaje się być zwiększenie tych poziomów dopuszczalnych, przy spełnieniu warunku dostatecznego udziału technologii LED oraz CFL w całkowitym zbiorze odbiorników oświetleniowych przyłączonych do sieci dystrybucyjnej.

4. Lokalizacja źródeł wahań napięcia w oparciu o jednopunktowe metody pomiaru

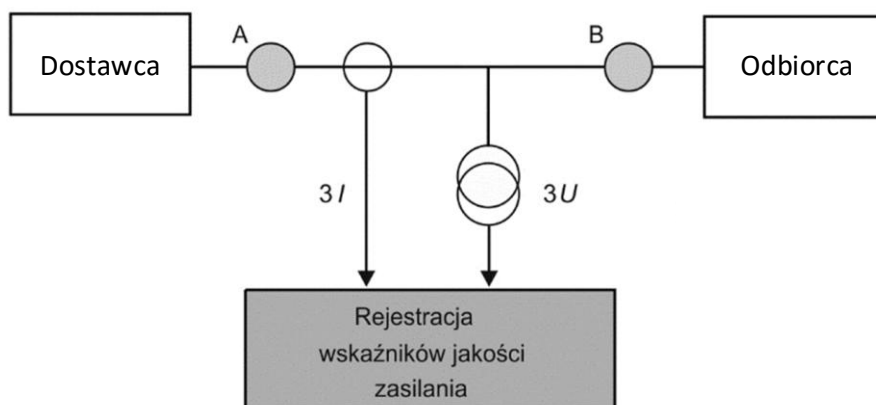
Dotychczas funkcjonujący model rynku energetycznego, w którym problem określenia odpowiedzialności za wprowadzanie zaburzeń JDEE angażował dwóch partnerów – dostawcę energii oraz jej odbiorcę – wraz z rozwojem sieci elektroenergetycznych oraz rozproszonych źródeł energii, zastępowany jest nową konfiguracją, w której obecne są przynajmniej cztery, wzajemnie zależne strony: dostawca energii, odbiorca, producent urządzeń (odbiorników) oraz podmiot odpowiedzialny za ich dobór, instalację oraz zabezpieczenie. W przypadku wystąpienia zaburzenia, często zarówno dostawca jak i odbiorca, wzajemnie argumentują, że przyczyna znajduje się po drugiej ze stron. Zdarza się, że ich dyskusja prowadzi do wniosku, że to odbiorniki energii elektrycznej są zbyt podatne na warunki zasilania, lub są niewłaściwie dobrane albo zainstalowane, aby mogły poprawnie działać w danym środowisku elektromagnetycznym. Zagadnienie to dotyczy zwłaszcza konsekwencji wystąpienia zmian napięcia (zapadów, wzrostów, przerw w zasilaniu), asymetrii i wahań w napięciu zasilającym, gdyż skutki obecności tych zaburzeń napięcia przekładają się na wymierne koszty [28], które zmuszona jest ponieść przynajmniej jedna ze stron. Naturalną konsekwencją wymienionych czynników jest zatem rynkowa potrzeba posiadania narzędzia do wiarygodnej identyfikacji źródeł zaburzeń JDEE, mogącego mieć zastosowanie przy określeniu odpowiedzialności za ich skutki. Wyzwanie to realizowane może być przy wykorzystaniu dostępnych metod lokalizacji zaburzeń, które w zależności od ich specyfiki, podzielić można na metody jedno- oraz wielopunktowe.

Niniejszy rozdział poświęcony jest metodom lokalizacji źródeł wahań napięcia przy wykorzystaniu metod jednopunktowych. W rozdziale 4.1 przybliżone zostały główne założenia jednopunktowych metod lokalizacji zaburzeń JDEE. W rozdziale 4.2 zawarto opisy wybranych metod lokalizacji źródeł wahań napięcia. Ich skuteczność jest następnie weryfikowana w układach symulacyjnych: uproszczonym obwodzie *odbiorca–dostawca* oraz w 13 węzłowej sieci bazującej na modelu IEEE, co stanowi zawartość rozdziału 4.3. Ostatnim etapem prac była analiza działania metod lokalizacji wykonana w warunkach laboratoryjnej sieci microgrid w laboratorium TECNALIA.

4.1 Główne założenia jednopunktowych metod lokalizacji zaburzeń jakości dostawy energii elektrycznej

Pierwszym krokiem w celu lokalizacji źródeł zaburzeń JDEE jest wykonanie pomiarów napięć i prądów w rozważanym punkcie sieci. Bardzo często takim punktem jest granica własności sieci pomiędzy dostawcą i odbiorcą, tzw. punkt wspólnego przyłączenia PWP. Idea jednopunktowej metody lokalizacji zaburzeń JDEE przedstawiona została na rysunku 4.1.

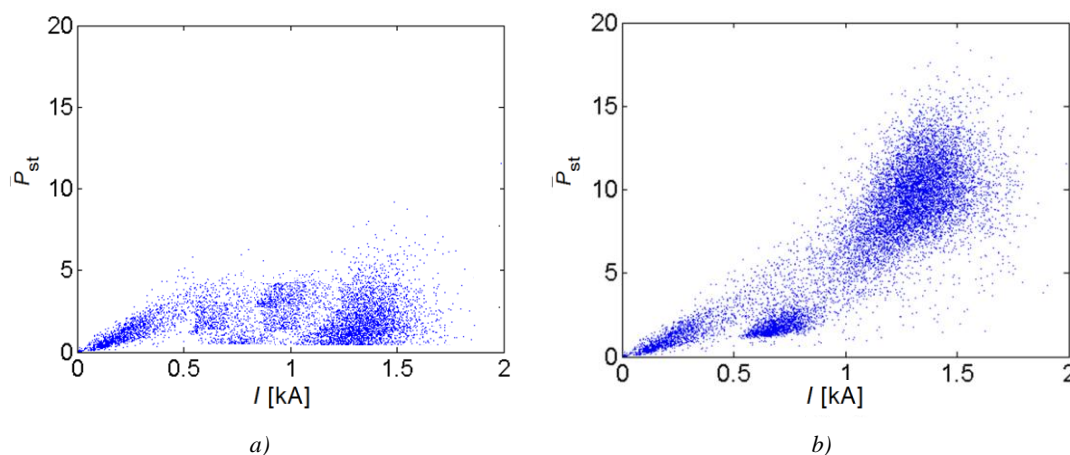
W punktach A i B znajdują się potencjalne źródła zaburzeń. Zastosowanie dedykowanych metod pozwala zlokalizować źródło na podstawie charakterystycznych zjawisk w przebiegach napięć i prądów. Metody lokalizacyjne określają czy źródło zaburzeń znajduje się „powyżej” (z lewej strony) bądź „poniżej” (z prawej strony) PWP. Osobnym i bardziej zaawansowanym zagadnieniem jest ocena indywidualnej emisji zaburzenia w przypadku, gdy jego źródła obecne są po obu stronach PWP. To zagadnienie nie jest jednak przedmiotem rozważań prezentowanych w pracy.



Rys. 4.1. Idea jednopunktowej metody lokalizacji zaburzeń JDEE

4.1.1 Korelacja zmian P_{st} i mocy biernej (metoda I)

Metoda korelacji polega na równoległej obserwacji przebiegów mocy i wskaźników migotania światła. Pomiary mogą być prowadzone w pobliżu odbiornika podejrzewanego o wywoływanie zmian napięcia. Jeżeli stwierdzona zostanie silna korelacja pomiędzy miarami liczbowymi tj. znacznym zmianom przepływu prądu, poboru mocy czynnej lub biernej towarzyszą duże zmiany współczynnika P_{st} – oznacza to, że odbiornik zasilany z badanej linii jest dominującym źródłem zaburzenia. Na rysunku 4.2 przedstawiono przykładowe wykresy korelacyjne. W przypadku (a) występuje słaba korelacja pomiędzy wartością P_{st} i wartością zmian prądu, natomiast w przypadku (b) korelacja ta jest silna.



Rys. 4.2. Przykładowe wykresy korelacyjne

Metoda korelacyjna należy do metod statystycznych. W jej przypadku ufność wskazania źródła zaburzenia JDEE zależy w dużym stopniu od długości okresu pomiarowego.

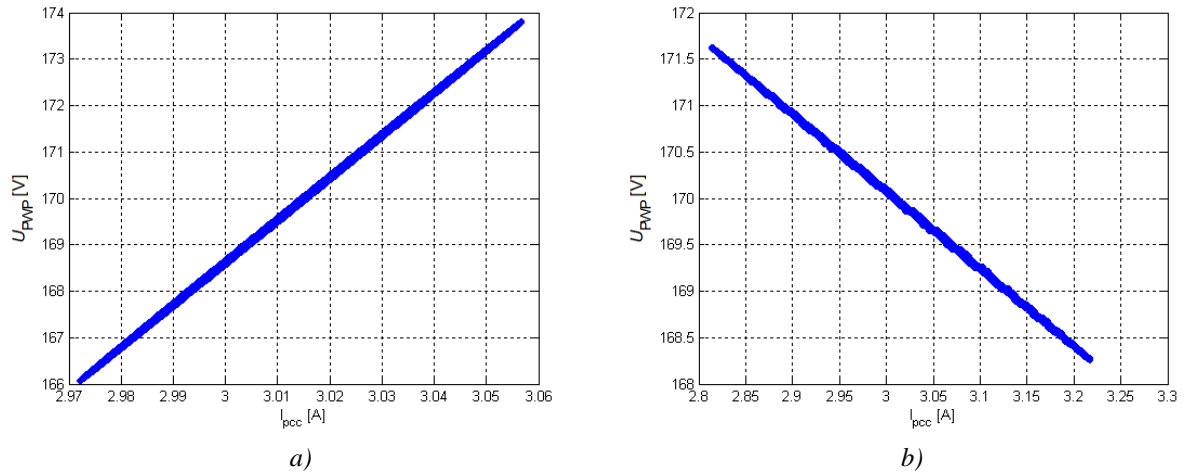
4.1.2 Ocena charakterystyki $U-I$ (metoda II)

Metoda ta polega na obserwacji wzajemnych zmian napięcia oraz prądu w PWP podczas trwania zaburzenia [40]. W wyniku jej zastosowania otrzymuje się przebieg narastający, bądź malejący, co pozwala wskazać położenie źródła zaburzeń. Miarodajnym wskaźnikiem nachylenia charakterystyki może być również znak pochodnej funkcji $U(I)$ lub funkcji powstałej w wyniku aproksymacji.

Zgodnie z wytycznymi metody przyjmuje się, że źródło wahań napięcia znajduje się powyżej PWP, w przypadku gdy wraz z zmniejszaniem napięcia, następuje zmniejszanie prądu

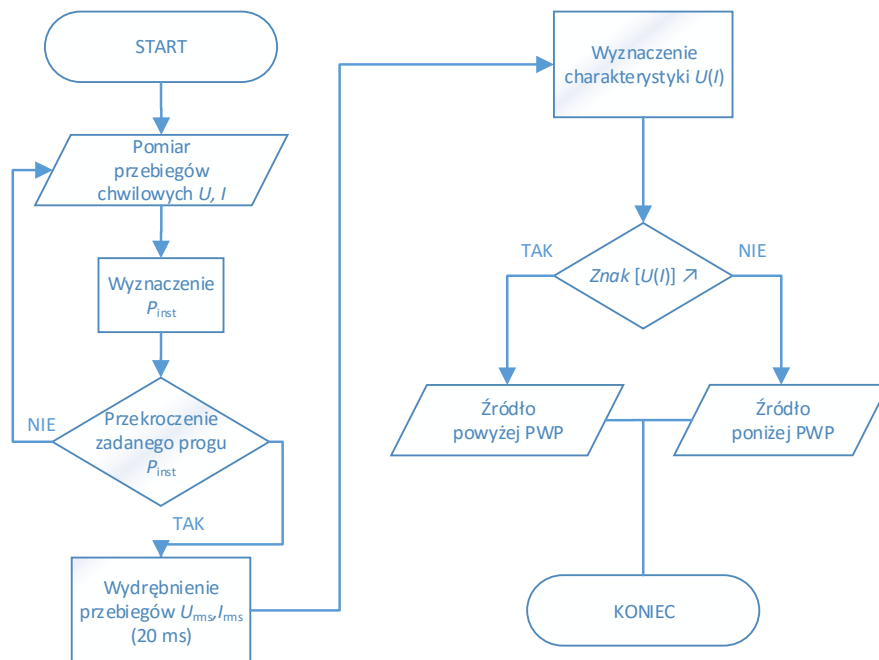
oraz odwrotnie – gdy napięcie rośnie, rośnie także prąd. Odpowiada to rosnącemu przebiegowi charakterystyki $U(I)$ (rys. 4.3a).

Z drugiej strony przyjmuje się, że źródło wahań napięcia znajduje się poniżej PWP, gdy przyrostowi/zmniejszeniu prądu odpowiada zmniejszenie/zwiększenie napięcia, co wynika z faktu, że mierzony prąd jest sumą prądu obciążenia i prądu związanego ze zmianami poboru energii przez np. odbiornik niespokojny. Taką zależność przedstawia malejąca charakterystyka $U(I)$ (rys. 4.3b)



Rys. 4.3. Charakterystyki $U(I)$ dla źródła wahań napięcia przyłączonego: a) powyżej PWP; b) poniżej PWP

Łatwo można wykazać, że przedstawiona metoda nie wykazuje 100% skuteczności. Może ona zawieść w przypadkach, gdy po stronie odbiorcy znajdują się np. układy energoelektroniczneysterowane do utrzymywania stałej mocy. Ich odpowiedź na zmiany napięcia będzie wtedy inna niż w omówionych przypadkach. Jest to istotna niedoskonałość metody, gdyż ogranicza jej stosowalność w obwodach z tego typu odbiorcami oraz wymusza posiadanie informacji o rodzaju dominujących odbiorników po stronie odbiorcy. Na rysunku 4.4 przedstawiono uproszczony algorytm zastosowania omawianej metody.

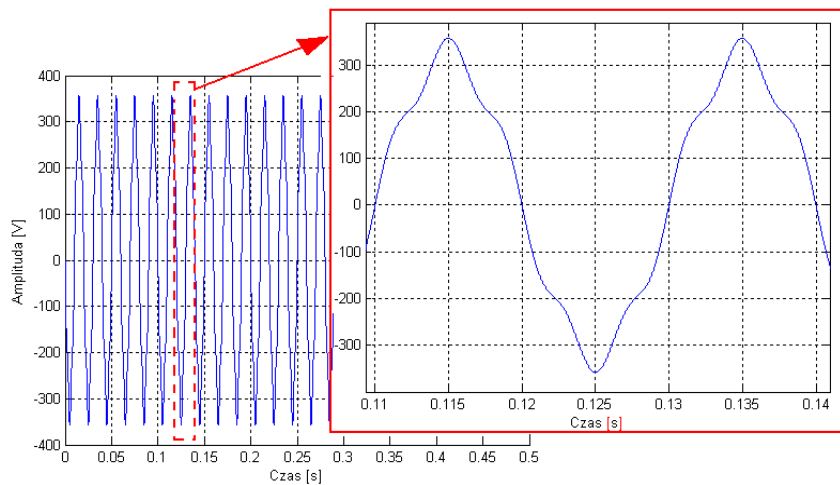


Rys. 4.4. Algorytm metody II

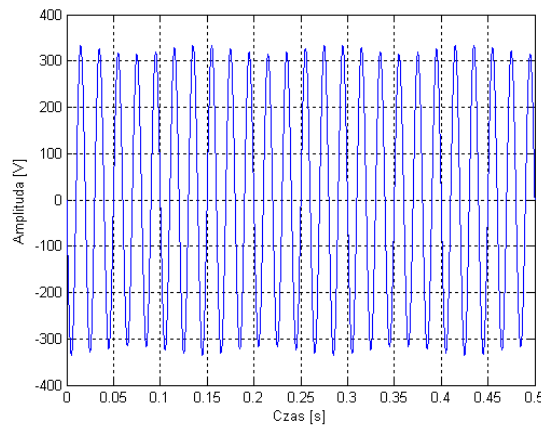
4.1.3 Pomiar mocy interharmonicznych (metoda III)

Fakt, że wahania napięcia mogą być traktowane jako zjawisko interharmoniczne jest podstawą działania metody III. Opiera się ona na dwóch obserwacjach [41]:

Obserwacja I. Odkształcenie interharmonicznymi może powodować wahania napięcia. Składowa częstotliwości podstawowej napięcia oraz składowe interharmoniczne nie są ze sobą zsynchronizowane, w przeciwieństwie do składowych harmonicznych. Efektem tego jest modulowanie napięcia. Rysunek 4.5 przedstawia przebieg napięcia o częstotliwości 50 Hz odkształcony 5. harmoniczną o amplitudzie 10% składowej podstawowej. Wartość chwilowa współczynnika migotania światła P_{inst} wynosi zero. Na rysunku 4.6 przedstawiono napięcie odkształcone interharmoniczną 57 Hz o amplitudzie 3% składowej podstawowej. Widoczna jest wyraźna modulacja przebiegu ($f_m = 7$ Hz), a współczynnik P_{inst} ma niezerową wartość.



Rys. 4.5. Przebieg $U=230$ V, $f_{fund}=50$ Hz, $U_h=10\%$ U, $f_h=250$ Hz



Rys. 4.6. Przebieg $U = 230$ V, $f_{fund} = 50$ Hz, $U_{ih} = 3\%$ U, $f_{ih} = (43 \div 57)$ Hz

Częstotliwość modulacji jest zależna od rzędu interharmonicznej. Jeśli przyjąć częstotliwość interharmoniczną jako:

$$f_{ih} = h \cdot f_1 + \Delta f_h \quad (4.1)$$

gdzie: $h \cdot f_1$ - wielokrotność częstotliwości podstawowej najbliższa częstotliwości f_{ih} , Δf_h - częstotliwość modulacji sygnału 50 Hz.

Obserwacja II. Wahania napięcia powodują powstawanie interharmonicznych. Przebieg napięcia, w którym występują wahania może być w ogólnym przypadku opisany równaniami (4.2) oraz (4.3):

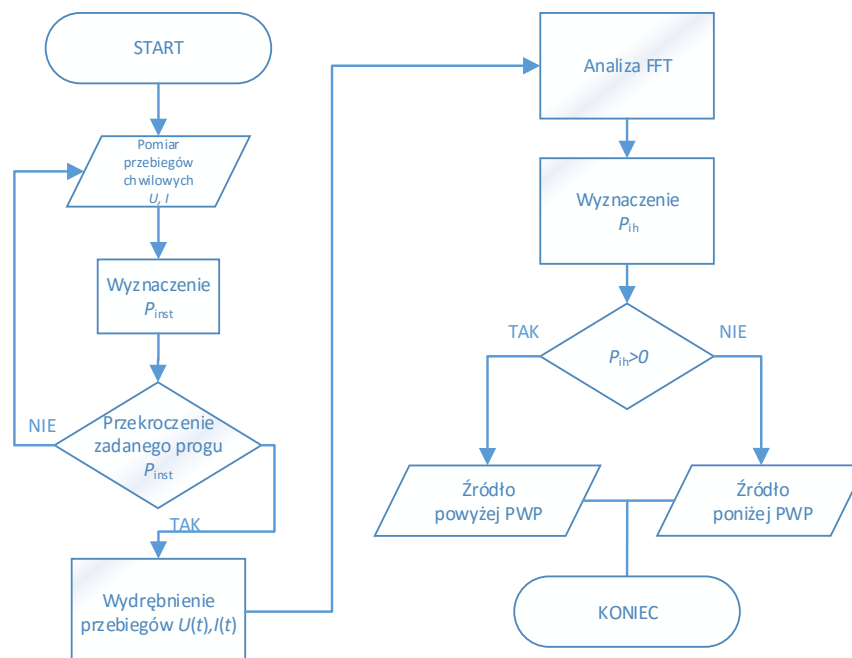
$$u(t) = A[\cos(\omega t + \omega_1 t) + \cos(\omega t - \omega_1 t)] \quad (4.2)$$

$$u(t) = A \cdot \cos(\omega t) + 0,5 \cdot A \cdot m[\cos(\omega t + \omega_1 t) + \cos(\omega t - \omega_1 t)] \quad (4.3)$$

Częstotliwości $\omega + \omega_1$ oraz $\omega - \omega_1$ są w tym przypadku częstotliwościami składowych interharmonicznych. Mogą się one pojawiać w wyniku obecności odbiorników o zmiennym obciążeniu. Jednakże zmiany te niekoniecznie zachodzą z częstotliwościami będącymi krotnością częstotliwości podstawowej, stąd możliwość występowania interharmonicznych. Jako przykład można podać odbiornik o zmiennej impedancji opisanej równaniem:

$$z(t) = 1 - Z \cdot \sin(2\pi f_i t) \quad (4.4)$$

Przyjmując, że f_i jest częstotliwością zmian impedancji, w efekcie odbiornik będzie wywoływał wahania napięcia o podobnym charakterze. Można zaobserwować więc, że w wyniku fluktuacji impedancji, w przebiegu napięcia pojawią się dodatkowe składowe interharmoniczne o częstotliwościach f_i . Problem lokalizacji źródła zaburzenia można zatem sprowadzić do zagadnienia lokalizacji źródła interharmonicznych, np. poprzez wyznaczenie kierunku przepływu mocy dla wyróżnionych składowych. W praktyce częstotliwości interharmonicznych podlegają ciągłym zmianom, jako efekt zmiany warunków pracy urządzeń będących źródłem tych składowych, lecz istnieje małe prawdopodobieństwo, że w tym samym czasie dwa lub więcej odbiorników będą generować interharmoniczne o tej samej częstotliwości. Algorytm postępowania przedstawiono na schemacie blokowym (rys. 4.7).



Rys. 4.7. Algorytm metody III

Po stwierdzeniu obecności wahań napięcia, z rejestrowanego przebiegu wyodrębniane są przedziały czasu z zaburzeniami. W wyniku analizy Fouriera wyznaczane są amplitudy i fazy interharmonicznych o największym udziale. Dla każdej z nich wyznaczana jest następnie moc czynna. Znak mocy czynnej interharmonicznych jest wskaźnikiem pozwalającym określić

położenie źródła zaburzenia. Jeżeli jest dodatni – źródło znajduje się powyżej PWP, jeśli ujemny – poniżej PWP.

4.1.4 Pomiar mocy i energii wahań (metoda IV)

Metoda zaproponowana w [1] wprowadza pojęcie tzw. „mocy wahań napięcia” (ang. flicker power – FP), które opiera się na definicji tej wielkości w dziedzinie czasu. Dla prezentacji istoty metody zakłada się, że napięcie oraz prąd w punkcie przyłączenia są wielkościami sinusoidalnymi ze zmodulowanymi amplitudami, według następujących zależności:

$$u_{PWP}(t) = (U_{(1)} + m_u(t))\cos(\omega_{(1)}t) \quad (4.7)$$

$$i_{PWP}(t) = (I_{(1)} + m_i(t))\cos(\omega_{(1)}t + \varphi) \quad (4.8)$$

gdzie:

$U_{(1)}$ amplituda składowej podstawowej napięcia,

$I_{(1)}$ amplituda składowej podstawowej prądu,

$m_u(t)$ funkcja modulująca napięcia,

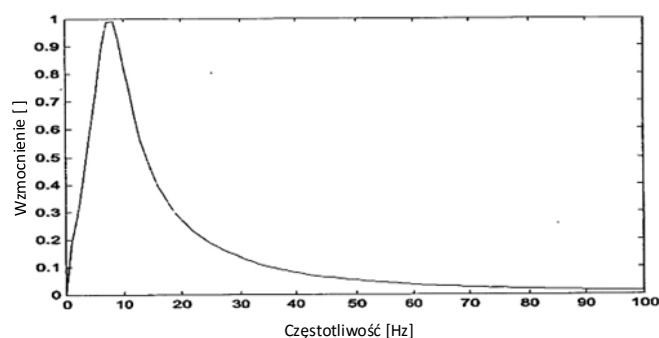
$m_i(t)$ funkcja modulująca prądu,

ϕ faza początkowa prądu,

$\omega_{(1)}$ pulsacja składowej podstawowej.

Zgodnie z algorytmem metody (rys. 4.9) wyznaczenie mocy oraz energii wahań wymaga wyodrębnienia z mierzonego sygnału składowej odpowiadającej za modulację przebiegów. W tym celu wykorzystywany jest filtr pasmowo-przepustowy o transmitancji (4.9) [43]. Odpowiedź częstotliwościowa tego filtra przedstawiona jest na rysunku 4.8.

$$F(s) = \frac{100,54993s}{s^2 + 51,01708s + 3308,90172} \cdot \frac{s + 15175,30251}{s^2 + 143,5s + 15175,30251} \quad (4.9)$$



Rys. 4.8. Odpowiedź częstotliwościowa filtra - zależność (4.9)

Dla torów prądowego i napięciowego, bloki funkcjonalne są identyczne. Sygnały po filtracji to odpowiednio: $m_{u\Pi}(t)$, $m_{i\Pi}(t)$. W kolejnym kroku są one mnożone, w wyniku czego uzyskuje się wartość chwilową mocy wahań:

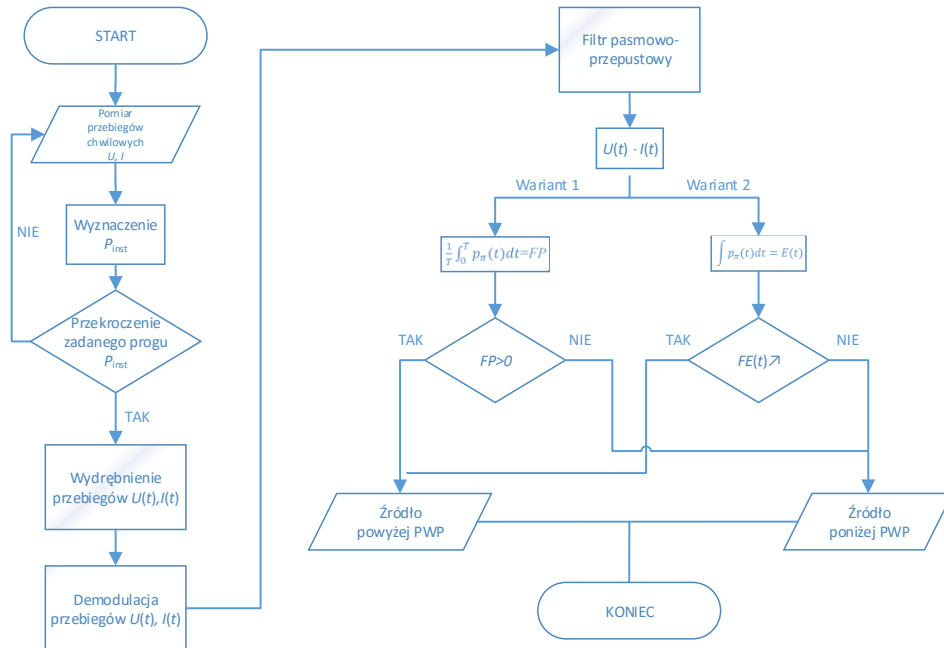
$$p_{\Pi}(t) = m_{u\Pi}(t) \cdot m_{i\Pi}(t) \quad (4.10)$$

a następnie wartość średnią mocy wahań:

$$\frac{1}{T} \int_0^T p_{\Pi}(t) dt = FP(t) \quad (4.11)$$

Na podstawie znaku tej wielkości można określić położenie źródła zaburzeń. Jeżeli moc wahań jest większa od zera to źródło zaburzeń zlokalizowane jest powyżej PWP, jeżeli moc wahań przyjmuje wartości ujemne – poniżej PWP. Metoda pozwala także na wnioskowanie na podstawie przebiegu charakterystyki energii wahań (4.12). Jeżeli $FE(t)$ jest rosnąca to źródło zaburzeń przyłączone jest powyżej PWP, jeżeli $FE(t)$ jest malejąca – poniżej PWP.

$$\int p_{\Pi}(t)dt = FE(t) \quad (4.12)$$

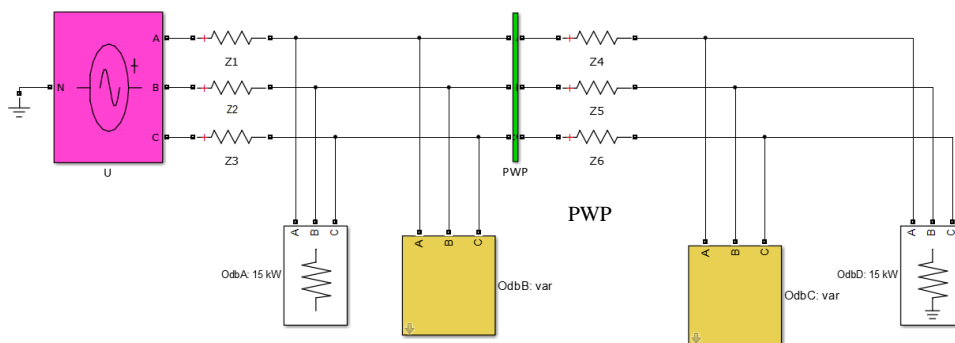


Rys. 4.9. Algorytm metody IV

4.2 Weryfikacja symulacyjna jednopunktowych metod lokalizacji źródeł wahań napięcia

4.2.1 Układ odbiorca–dostawca

Układ testowy (rys. 4.10) składa się z symetrycznego, trójfazowego źródła zasilającego ($U_{\text{din}} = 400 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$), odbiorników trójfazowych: dwóch o stałej mocy 15 kW (OdbA, OdbD) oraz dwóch o zmiennej mocy (OdbB, OdbC), będących źródłem wahań. Pomiar realizowany jest w punkcie PWP.



Rys. 4.10. Układ odbiorca–dostawca przeznaczony do weryfikacji jednopunktowych metod lokalizacji wahań napięcia

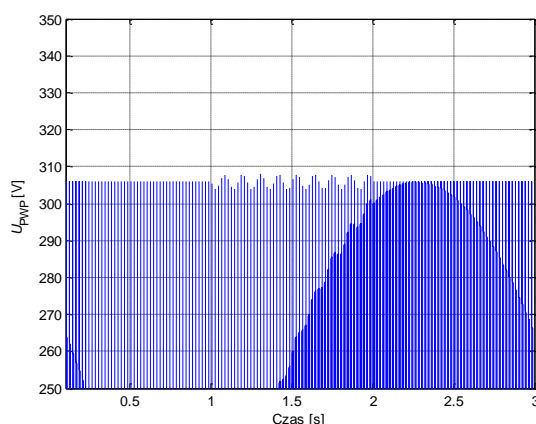
4.2.1.1 Test 4.1 - Źródło wahań napięcia po stronie dostawcy

Dla przyjętych warunków symulacji element B jest rezystancyjnym odbiornikiem o prądzie nominalnym $I_N = 10$ A, $\cos\varphi = 1$. W warunkach znamionowych zasilania $U_f = 230$ V moc odbiornika B wynosi $P_N = 6,9$ kW. Odbiornik pobiera prąd zmodulowany sinusoidalnie o parametrach modulacji $A_m = 50\% I_N$, $f_m = 9$ Hz. Parametry odbiornika przedstawione zostały w tabeli 4.1.

Tab. 4.1. Parametry odbiornika B

I_N	$\cos\varphi$	P_N	Q_N	I_m	f_m	t_{start}	t_{stop}
10 A	1	6,9 kW	0 Var	50% I_N	9 Hz	1 s	2 s

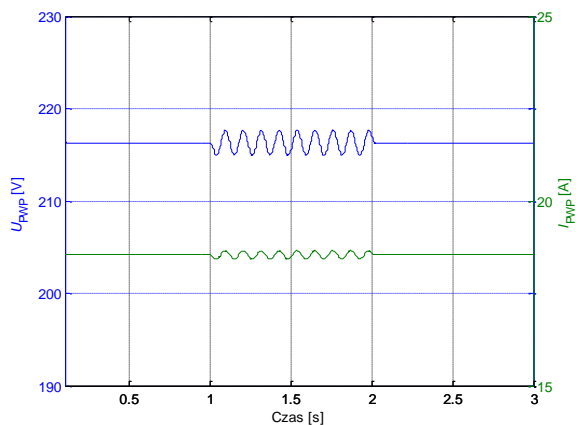
W efekcie zmiennego obciążenia (modulacja prądu) w punkcie PWP obserwowane są wahania napięcia (rys. 4.11).



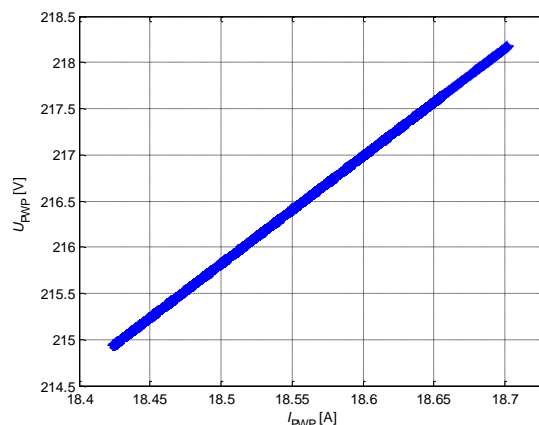
Rys. 4.11. Przebieg napięcia w PWP (test 4.1, faza L1)

Wynik zastosowania metody II

Dla przebiegów napięcia i prądu w punkcie wspólnego przyłączenia obliczane są wartości skuteczne uśrednione w czasie 20 ms (rys. 4.12). Na podstawie tych próbek tworzona jest następnie charakterystyka $U(I)$, którą przedstawia rysunek 4.13. W prezentowanym przypadku charakter przebiegu jest rosnący, a zatem pochodna funkcji aproksymującej przebieg przyjmuje wartość dodatnią. Potwierdza to, że źródło wahań napięcia przyłączone jest powyżej PWP.



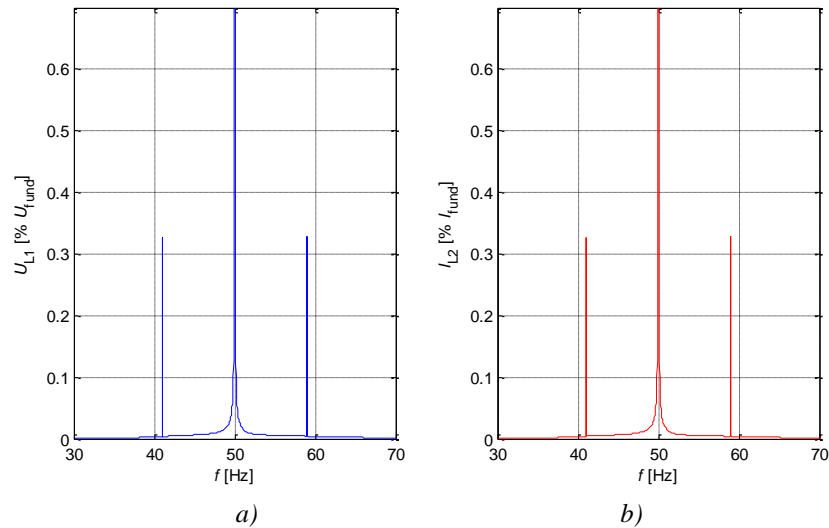
Rys. 4.12. Przebiegi U_{PWP} (20 ms) oraz I_{PWP} (20 ms)



Rys. 4.13. Charakterystyka $U_{\text{PWP}}(I_{\text{PWP}})$ (20 ms)

Wynik zastosowania metody III

Zgodnie z algorytmem metody III, dla wybranego fragmentu przebiegu (rys. 4.11), wykonywana jest analiza FFT. Analizując jej wynik (rys. 4.14) można stwierdzić, że w widmie zmierzonych sygnałów, oprócz składowej podstawowej (50 Hz), występują także interharmoniczne o częstotliwościach 41 Hz i 59 Hz.



Rys. 4.14. Widmo częstotliwościowe przebiegu napięciowego (a) i prądowego (b)

Zmierzone wartości amplitud interharmonicznego prądu oraz napięcia, wraz z informacją o ich kącie fazowym, wykorzystywane są następnie do obliczenia mocy interharmonicznych (tab. 4.2), zgodnie z ogólnym wzorem (4.13) zastosowanym oddzielnie dla każdej rozważanej interharmonicznej.

$$P = UI \cos(\varphi_{U,I}) \quad (4.13)$$

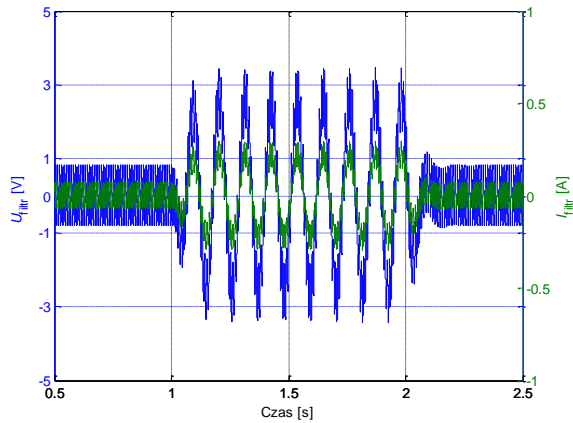
Tab. 4.2. Składowe częstotliwościowe U , I , moce interharmoniczne

	f [Hz]	A	φ [°]	P [W]
U_{L1} [V]	41	1,01	-90,74	0,09
I_{L1} [A]		0,09	-90,74	
U_{L1} [V]	59	1,01	88,94	0,09
I_{L1} [A]		0,09	88,94	
U_{L1} [V]	50	305,9	-0,9	8 019
I_{L1} [A]		26,22	-0,9	

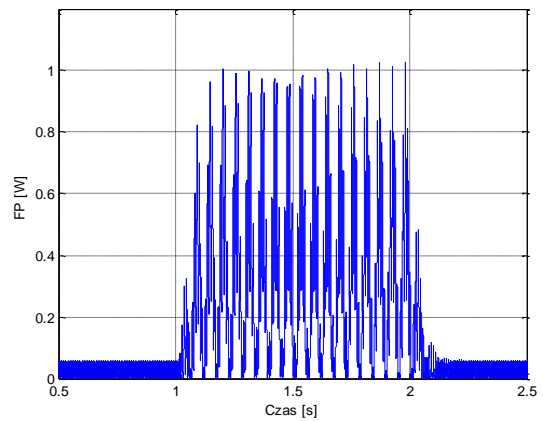
Moce dla obu interharmonicznych występujących w obwodzie są dodatnie, co wskazuje na położenie źródła zaburzenia powyżej PWP.

Wynik zastosowania metody IV

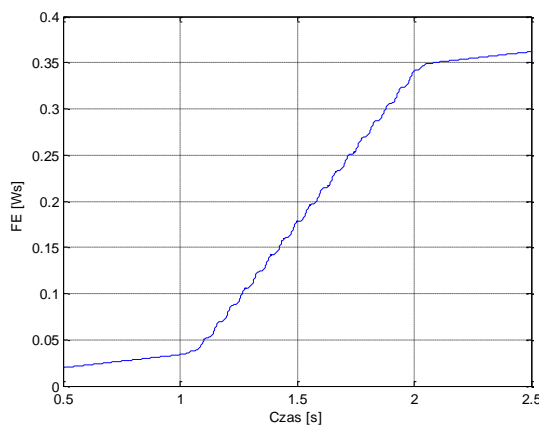
Zgodnie z algorytmem metody IV, sygnały napięcia i prądu poddawane są demodulacji a następnie filtracji. Przebiegi otrzymane na wyjściu filtra przedstawiono na rysunku 4.15 Kolejne przebiegi (rys. 4.16, rys. 4.17) ilustrują moc i energię wahań.



Rys. 4.15. Przebiegi U, I po filtracji (faza L1)



Rys. 4.16. Moc wahań (faza L1)



Rys. 4.17. Energia wahań (faza L1)

Na podstawie przedstawionych przebiegów można stwierdzić, że wartości chwilowe mocy wahań są dodatnie, a energia wahań rośnie, co wskazuje na przyłączenie źródła zaburzenia powyżej PWP.

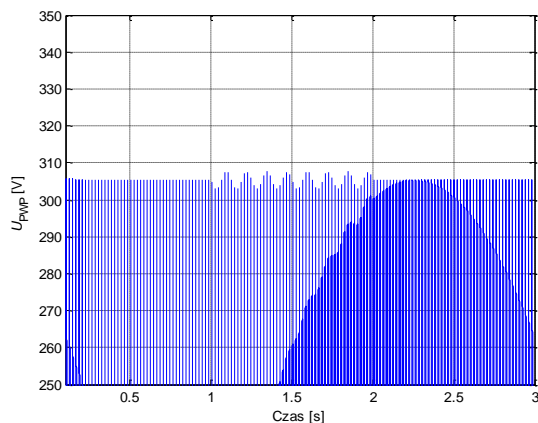
4.2.1.2 Test 4.2 - Źródło wahań napięcia po stronie odbiorcy

Dla przyjętych warunków symulacji element C jest odbiornikiem o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym. W warunkach znamionowych przy zasilaniu $U_f = 230$ V moc odbiornika wynosi $P_N = 8,28$ kW, $Q_N = 6,21$ kVar. Prąd odbiornika jest zmodulowany sinusoidalnie o parametrach modulacji $A_m = 50\%$ I_N , $f_m = 8$ Hz. Parametry odbiornika przedstawione zostały w tabeli 4.3

Tab. 4.3. Parametry odbiornika C

I_N	$\cos\varphi$	P_N	Q_N	I_m	f_m	t_{start}	t_{stop}
15 A	0,8	8,28 kW	6,21 kVar	50% I_N	8 Hz	1 s	2 s

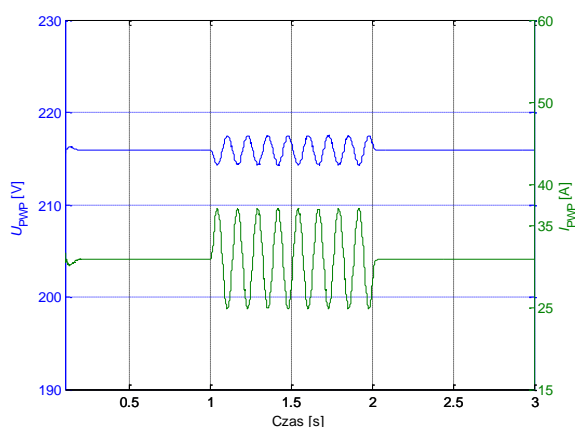
W efekcie zmiennego obciążenia (modulacja prądu) w punkcie PWP obserwowane są wahania napięcia (rys. 4.18).



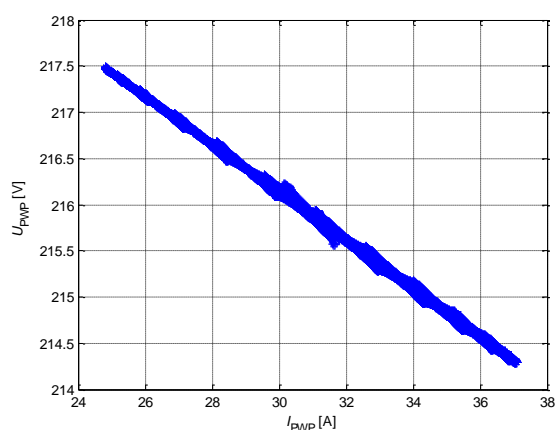
Rys. 4.18. Przebieg napięcia w PWP (faza L1)

Wynik zastosowania metody II

Wartości skuteczne napięcia i prądu w fazie L1 (uśrednione w czasie 20 ms) w funkcji czasu przedstawiono na rysunku 4.19. Charakterystyka $U(I)$ została zilustrowana na rysunku 4.20.



Rys. 4.19. Przebiegi U_{PWP} oraz I_{PWP} (20 ms)

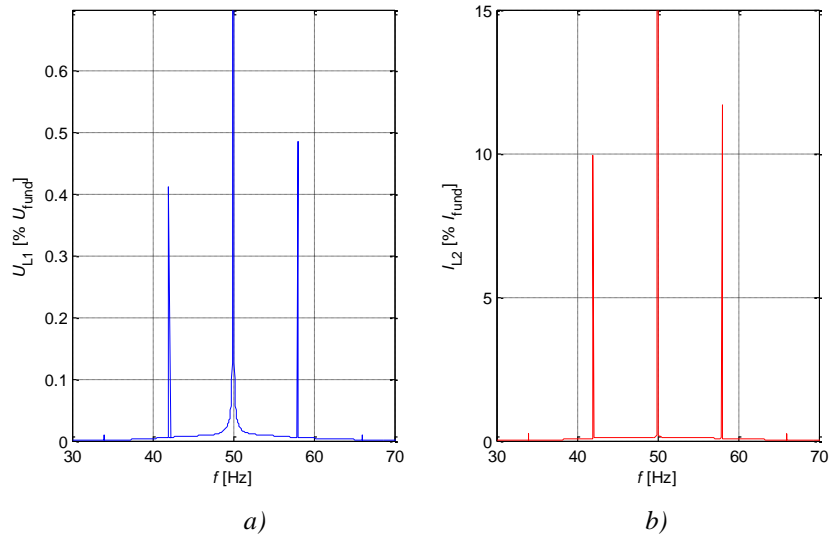


Rys. 4.20. Charakterystyka $U_{PWP}(I_{PWP})$ (20 ms)

Okazuje się, że charakterystyka jest malejąca, a tym samym pochodna funkcji aproksymującej przebieg przyjmuje wartość ujemną – źródło wahań napięcia przyłączone jest poniżej PWP.

Wynik zastosowania metody III

Widmo częstotliwościowe przebiegu napięcia oraz prądu w PWP zilustrowano na rysunku 4.21. Oprócz harmonicznej podstawowej (o częstotliwości 50 Hz) w widmie uwidaczniają się także składowe o częstotliwościach 42 oraz 58 Hz. Dane i wyniki obliczeń mocy dla tych składowych zestawiono w tabeli 4.4. Obliczenia wykazują, że moce są ujemne. Oznacza to przyłączenie źródła generującego wahań w obwodzie poniżej PWP, co potwierdza wiarygodność zastosowanej metody.



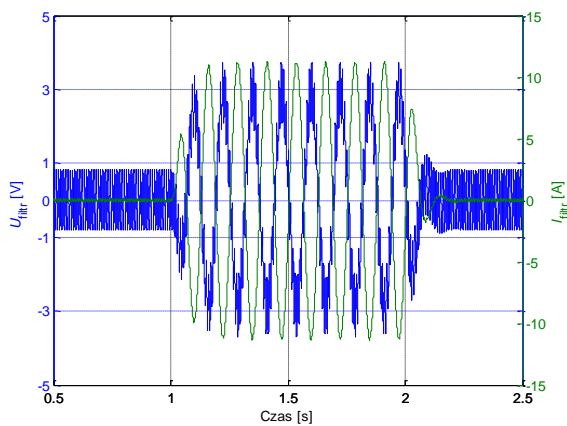
Rys. 4.21. Widmo częstotliwościowe przebiegu napięciowego (a) i prądowego (b)

Tab. 4.4. Składowe częstotliwościowe U , I , moce interharmoniczne

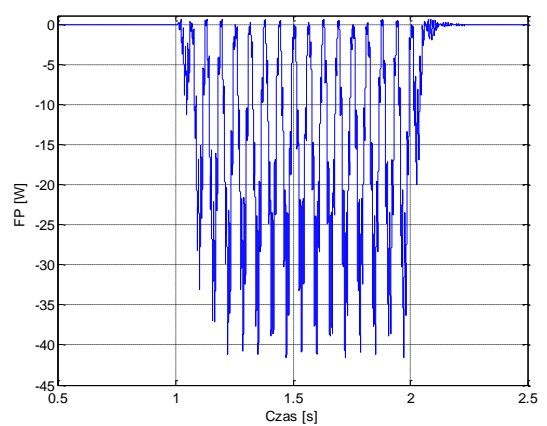
	f [Hz]	A	φ [°]	P [W]
U_{L1} [V]	42	1,27	-122,3	-5,55
I_{L1} [A]		4,36	57,7	
U_{L1} [V]	58	1,49	57,1	-7,59
I_{L1} [A]		5,10	-122,9	
U_{L1} [V]	50	305,3	-0,3	12 890
I_{L1} [A]		43,59	-14,8	

Wynik zastosowania metody IV

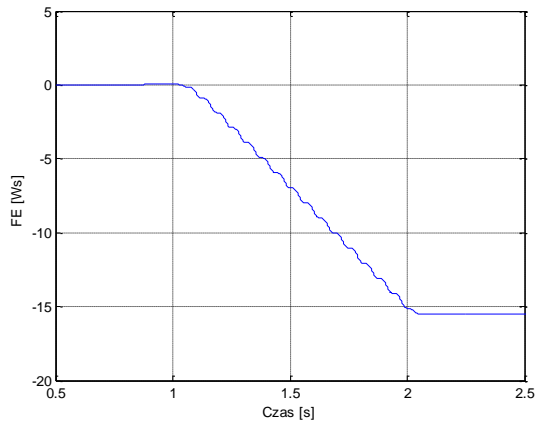
Sygnaly napięcia i prądu po przejściu przez filtr nie są zgodne w fazie, lecz przesunięte o 180° (rys. 4.22). Chwilowa moc wahań przyjmuje wartości ujemne (rys. 4.23) czego skutkiem jest malejący przebieg charakterystyki energii wahań (rys. 4.24). Sugeruje to przyłączenie źródła zaburzeń poniżej PWP, co jest zgodne ze stanem faktycznym.



Rys. 4.22. Sygnaly U , I po filtracji (faza L1)



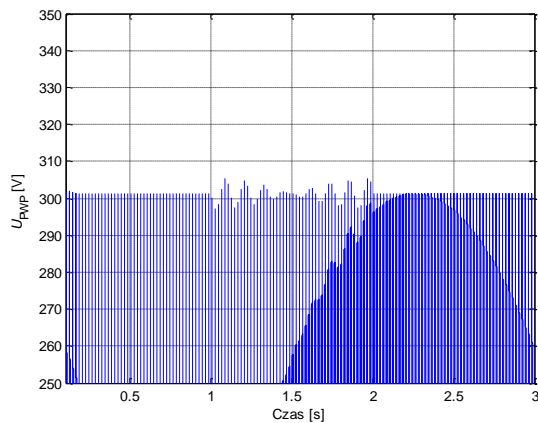
Rys. 4.23. Moc wahań (faza L1)



Rys. 4.24. Energia wahań (faza L1)

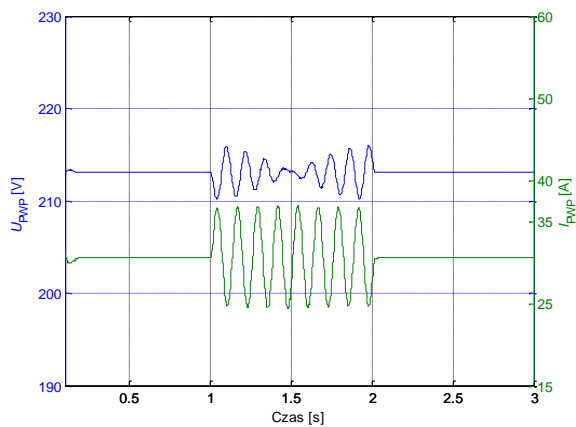
4.2.1.3 Test 4.3 - Źródła wahań napięcia po obu stronach PWP

Dla przyjętych warunków symulacji w obwodzie funkcjonują równocześnie elementy B (tab. 4.1) oraz C (tab. 4.3). W efekcie zmiennych obciążeń (modulacja prądu) w punkcie PWP obserwowane są wahania napięcia (rys. 4.25, rys. 4.26).

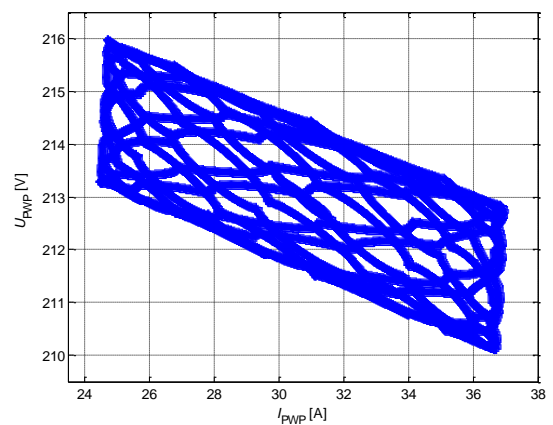


Rys. 4.25. Przebieg napięcia w PWP (test 3, faza L1)

Wynik zastosowania metody II



Rys. 4.26. Przebiegi U_{PWP} oraz I_{PWP} (20 ms)

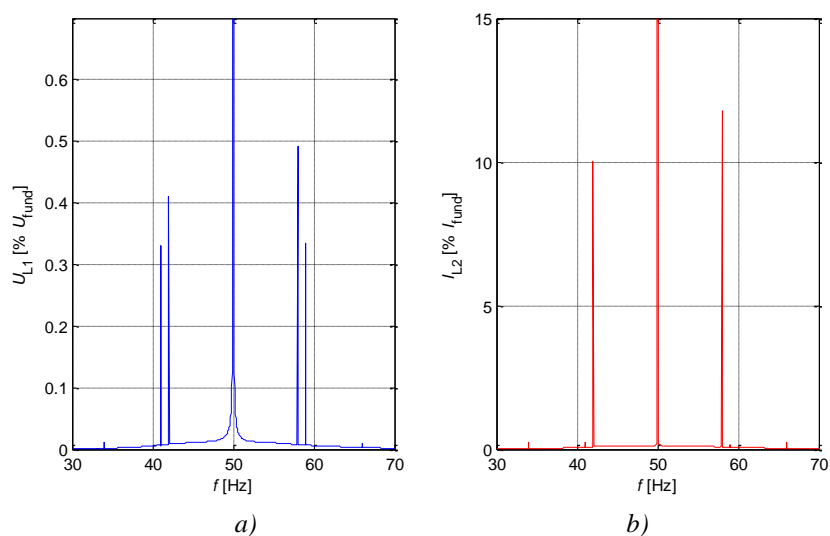


Rys. 4.27. Charakterystyka $U_{PWP}(I_{PWP})$ (20 ms)

Na rysunku 4.27 przedstawiono bardzo nietypową charakterystykę $U(I)$. Nie jest możliwe stwierdzenie monotoniczności przebiegu funkcji, co oznacza, że w tym przypadku opisywana metoda lokalizacji źródła wahań nie jest skuteczna. Tym samym nie pozwala na jednoznaczną ocenę jego położenia, aczkolwiek wskazuje na fakt, że źródła zaburzenia obecne są po obu stronach PWP.

Wynik zastosowania metody III

Wynik analizy FFT dla napięcia zarejestrowanego w PWP przedstawiony został na rysunku 4.28. Do obliczeń mocy interharmonicznych (tab. 4.5) wybrano cztery składowe o największych amplitudach.



Rys. 4.28. Widmo częstotliwościowe przebiegu napięciowego (a) i prądowego (b)

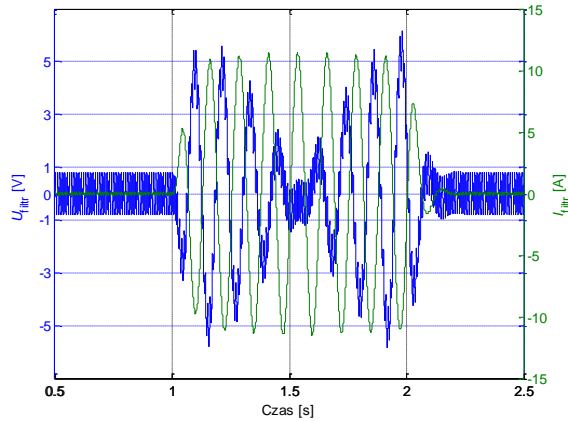
W opisywanym przypadku moce interharmonicznych powiązanych z odbiornikiem C (42 i 58 Hz) przyjmują wartości ujemne, natomiast moce interharmonicznych powiązanych z odbiornikiem B (41 i 59 Hz) są dodatnie. Fakt ten pozwala na stwierdzenie istnienia źródeł zaburzeń po obu stronach PWP.

Tab. 4.5. Składowe częstotliwościowe U, I, P

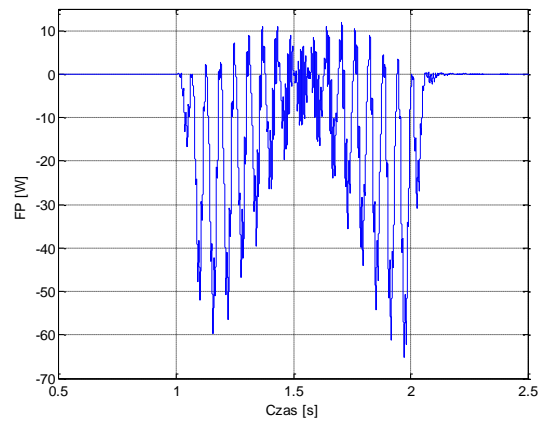
	f [Hz]	A	φ [°]	P [W]
U_{L1} [V]	41	1,01	-90,1	0,09
I_{L1} [A]		0,09	-91,9	
U_{L1} [V]	42	1,25	-122,3	-5,47
I_{L1} [A]		4,36	57,6	
U_{L1} [V]	50	301,3	-033	12 610
I_{L1} [A]		43,26	-14,9	
U_{L1} [V]	58	1,46	57,6	-7,64
I_{L1} [A]		5,11	-123	
U_{L1} [V]	59	1,01	89,5	0,08
I_{L1} [A]		0,09	90,5	

Wynik zastosowania metody IV

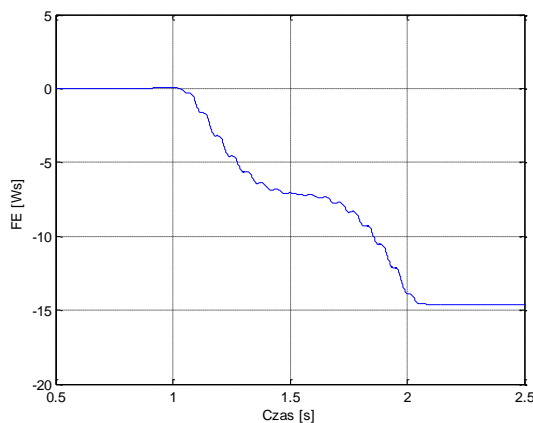
Sygnały napięcia i prądu po przejściu przez filtr przedstawione zostały na rysunku 4.29. Obserwując przebieg mocy chwilowej wahań (rys. 4.30) można stwierdzić, że przyjmuje ona zarówno wartości dodatnie jak i ujemne. Oznacza to obecność źródeł zaburzeń po obu stronach PWP. Ujemna energia wahań (rys. 4.31) wskazuje na fakt, że dominujące źródło wahań zlokalizowane jest po stronie odbiorcy.



Rys. 4.29. Sygnały U, I po filtracji (faza $L1$)



Rys. 4.30. Moc chwilowa wahań (faza $L1$)



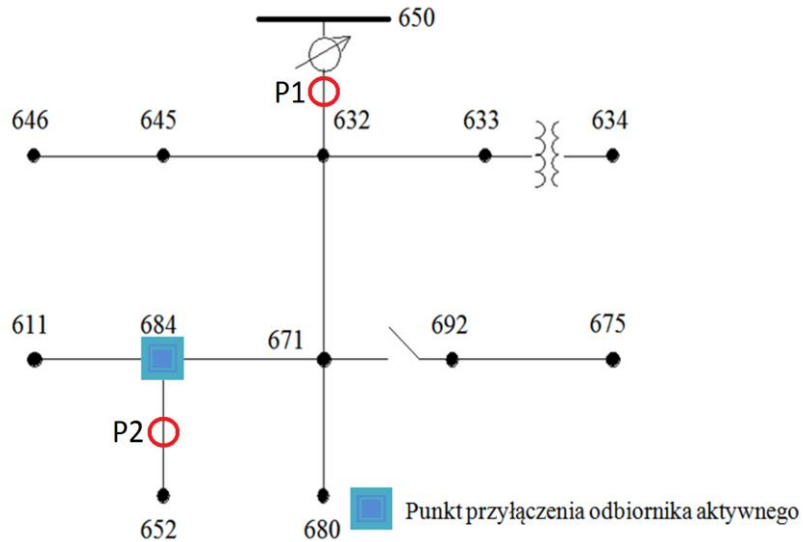
Rys. 4.31. Energia wahań (faza $L1$)

4.2.2 Badania symulacyjne w sieci IEEE 13 węzłowej

Platformę symulacyjną stanowi 13-węzłowa sieć elektroenergetyczna (rys. 4.32) wykonana w oparciu o model IEEE 13-Node Test Feeder [30], zawierająca następujące elementy:

- transformator zasilający 115/6,3 kV,
- linie kablowe i napowietrzne,
- transformator liniowy 6,3/0,42 kV,
- odbiorniki pasywne (R, L) oraz odbiornik zaburzający.

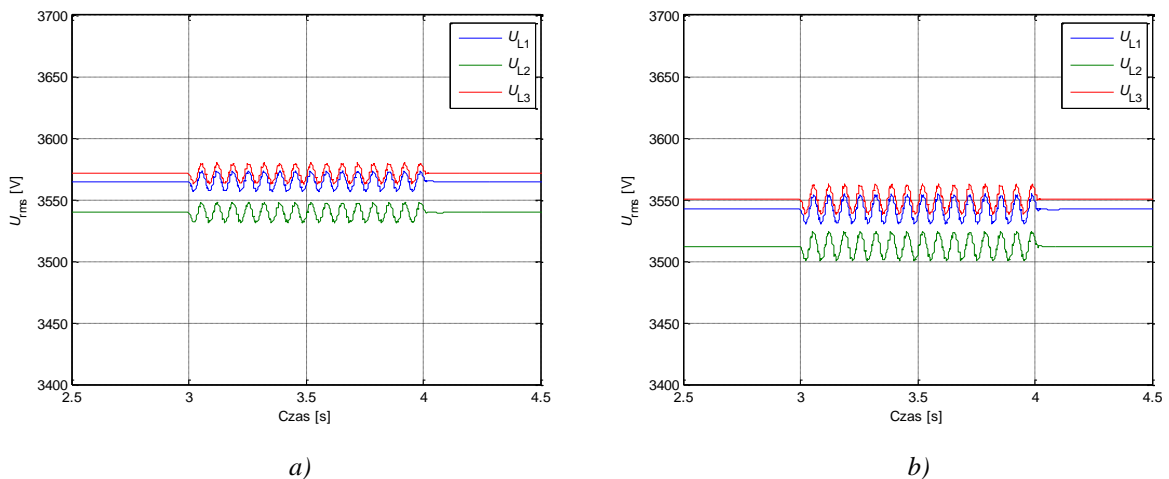
Szczegółowy opis, opracowanego w programie Matlab/Simulink, modelu sieci testowej stanowi zawartość Załącznika E.



Rys. 4.32. Schemat sieci IEEE 13 wraz z lokalizacją źródła zaburzeń oraz punktów pomiarowych

4.2.2.1 Test 4.4 – Sieć IEEE – źródło wahań napięcia po stronie odbiorcy lub dostawcy

Dla przyjętych warunków symulacji do węzła 684 sieci IEEE przyłączono odbiornik wywołujący wahania napięcia. Odbiornik powoduje przepływ sinusoidalnie zmodulowanego prądu o parametrach $A_m = 66,7\% I_N$, $f_m = 15$ Hz. W efekcie zmiennego obciążenia, oraz obecności impedancji poszczególnych elementów sieci, w punktach pomiarowych P1 oraz P2 (rys. 4.32) obserwowane są wahania napięcia (rys. 4.33) na poziomie odpowiednio $P_{inst} = \sim 1,3$ oraz $P_{inst} = \sim 2,8$. Parametry odbiornika zaburzającego zebrano w tabeli 4.6.



Rys. 4.33. Zarejestrowane przebiegi napięć i prądów w P1 a) oraz P2 b)

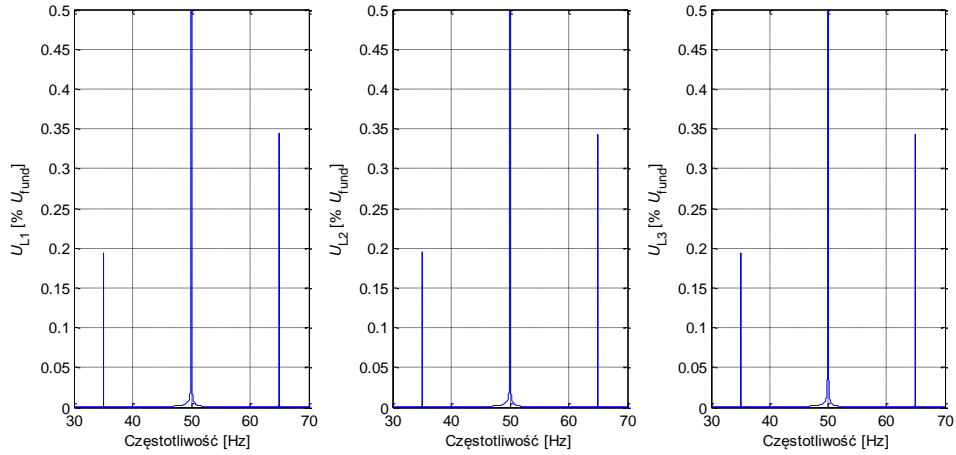
Tab. 4.6. Parametry odbiornika aktywnego (test 3)

U_N	I_N	$\cos\varphi$	I_m	f_m	t_{start}	t_{stop}
6,3 kV	30 A	0,9	20 A	15 Hz	3 s	4 s

Wynik zastosowania metody III – P1

Wyniki analizy Fouriera dla przebiegów napięcia i prądu w pierwszym punkcie pomiarowym przedstawiono na rysunkach 4.34 i 4.35. Oprócz harmonicznej podstawowej (50 Hz) w widmie uwidaczniają się składowe interharmoniczne o częstotliwościach równych

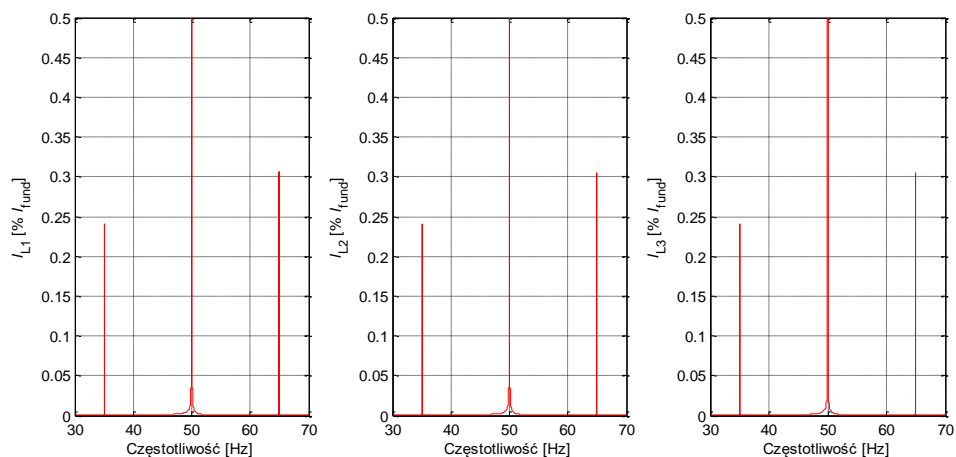
$f + f_m$ oraz $f - f_m$, będące bezpośrednim skutkiem obecności odbiornika przyłączonego do węzła 684. Dane i wyniki obliczeń mocy składowej podstawowej oraz mocy tych składowych zestawiono w tabeli 4.7. Moce poszczególnych interharmonicznycy przyjmują wartości ujemne. Potwierdza to fakt, że źródło zaburzeń znajduje się poniżej punktu pomiarowego.



Rys. 4.34. Widma napięć w punkcie P1

Tab. 4.7. Składowe częstotliwościowe U , I , $P - P1$

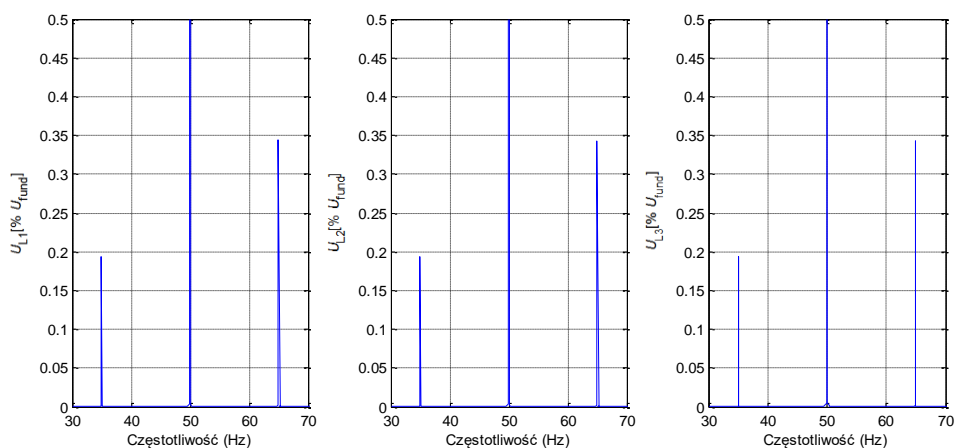
	f [Hz]	A	φ [°]	P [W]
U_{L1} [V]	35	7,11	-71	-22,3
I_{L1} [A]		13,88	31	
U_{L1} [V]	65	12,92	113	-22,2
I_{L1} [A]		13,82	-150	
U_{L1} [V]	50	5041	-32	$9,9 \cdot 10^5$
I_{L1} [A]		223	-60	
U_{L2} [V]	35	7,08	169	-22,1
I_{L2} [A]		13,66	90	
U_{L2} [V]	65	12,77	-6,5	-21,7
I_{L2} [A]		13,66	90,5	
U_{L2} [V]	50	5005	-152	$8,1 \cdot 10^5$
I_{L2} [A]		229	163	
U_{L3} [V]	35	7,14	49	-22,5
I_{L3} [A]		13,94	152	
U_{L3} [V]	65	12,93	-126	-22,2
I_{L3} [A]		13,84	-29	
U_{L3} [V]	50	5050	88	$6,6 \cdot 10^5$
I_{L3} [A]		167	49	



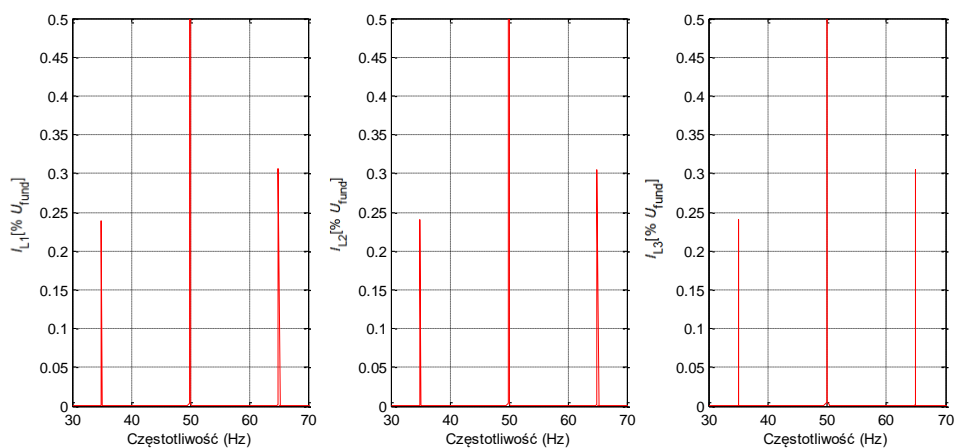
Rys. 4.35. Widma prądów w punkcie P1

Wynik zastosowania metody III – P2

Wyniki analizy Fouriera w punkcie P2 przedstawiono na rysunkach 4.36 i 4.37.



Rys. 4.36. Widma napięć w punkcie P2



Rys. 4.37. Widma prądów w punkcie P2

Oprócz harmoniczej podstawowej (50 Hz) w widmie uwidaczniają się składowe interharmoniczne o częstotliwościach równych $f + f_m$ oraz $f - f_m$, będące bezpośrednim skutkiem

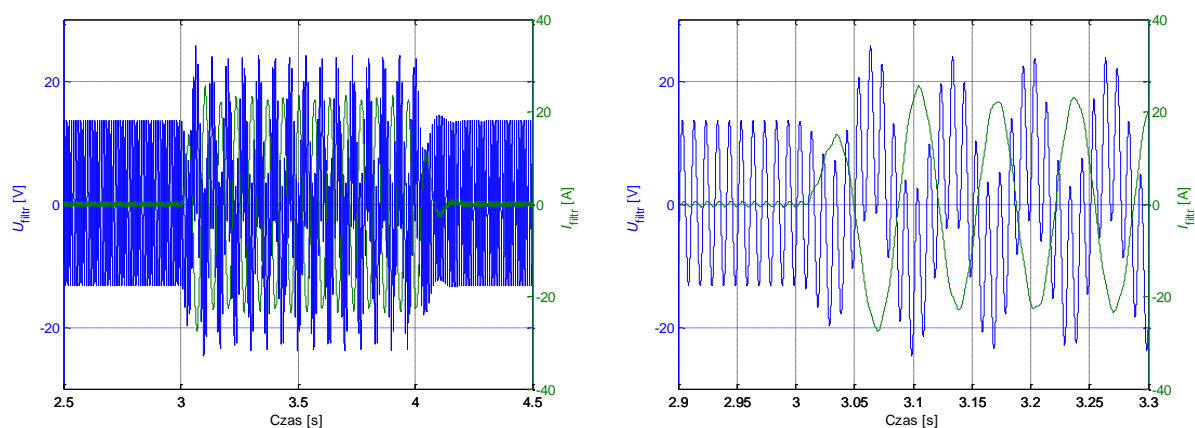
obecności odbiornika przyłączonego do węzła 684. Dane i wyniki obliczeń mocy składowej podstawowej oraz mocy interharmonicznych zarejestrowanych w P2 zestawiono w tabeli 4.8. Moce poszczególnych interharmonicznych przyjmują wartości dodatnie. Na tej podstawie można wywnioskować, że źródło zaburzeń znajduje się powyżej punktu P2, co jest zgodne z zadanymi warunkami symulacji.

Tab. 4.8. Składowe częstotliwościowe $U, I, P - P2$

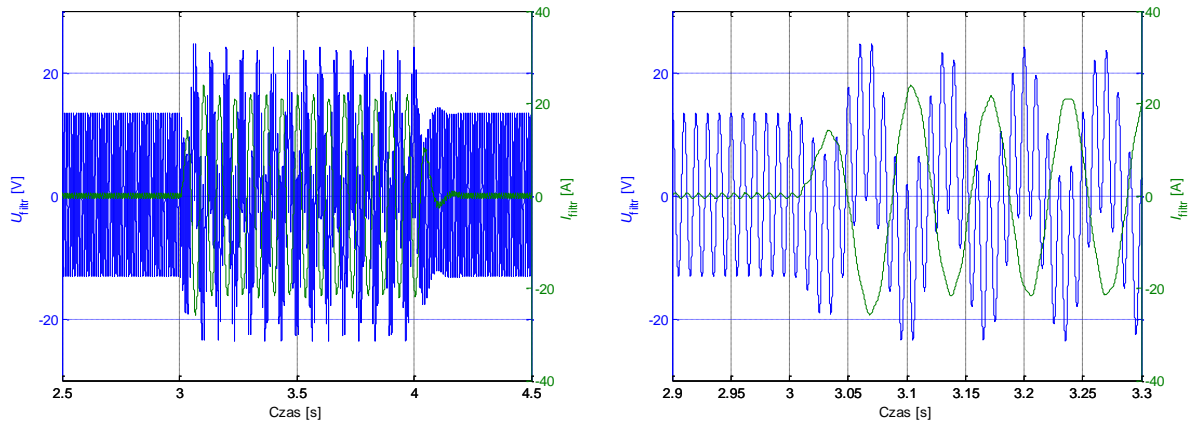
	f [Hz]	A	φ [°]	P [W]
U_{L1} [V]	35	9,71	-77,7	0,33
I_{L1} [A]		0,06	-133,4	
U_{L1} [V]	65	17,21	109,5	1,05
I_{L1} [A]		0,08	71,3	
U_{L1} [V]	50	5009	-32,6	$8,9 \cdot 10^4$
I_{L1} [A]		25,24	-78,2	
U_{L2} [V]	35	9,66	162,6	0,33
I_{L2} [A]		0,06	107,2	
U_{L2} [V]	65	17,03	-10,1	1,02
I_{L2} [A]		0,08	-48,2	
U_{L2} [V]	50	4967	-152,2	$8,7 \cdot 10^4$
I_{L2} [A]		25,03	162,3	
U_{L3} [V]	35	9,74	42,7	0,33
I_{L3} [A]		0,06	-12,8	
U_{L3} [V]	65	17,23	-129,7	1,05
I_{L3} [A]		0,08	-167,8	
U_{L3} [V]	50	5021	88,0	$8,9 \cdot 10^4$
I_{L3} [A]		25,3	42,5	

Wynik zastosowania metody IV – P1

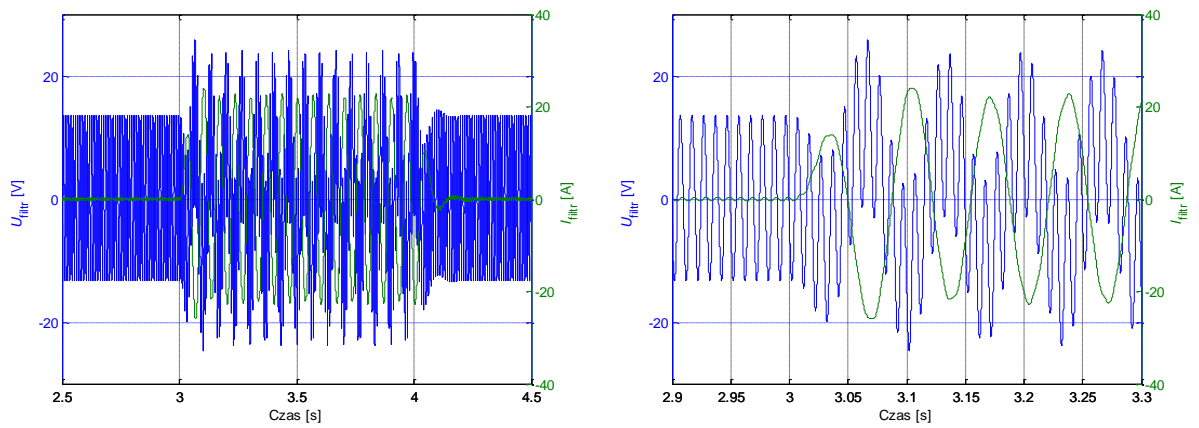
Na rysunkach 4.38–4.40 zestawiono przebiegi napięć i prądów po filtracji. Z przebiegów mocy chwilowej wahań (rys. 4.41) oraz energii wahań (rys. 4.42) wynika, że źródło zaburzeń zlokalizowane jest poniżej P1.



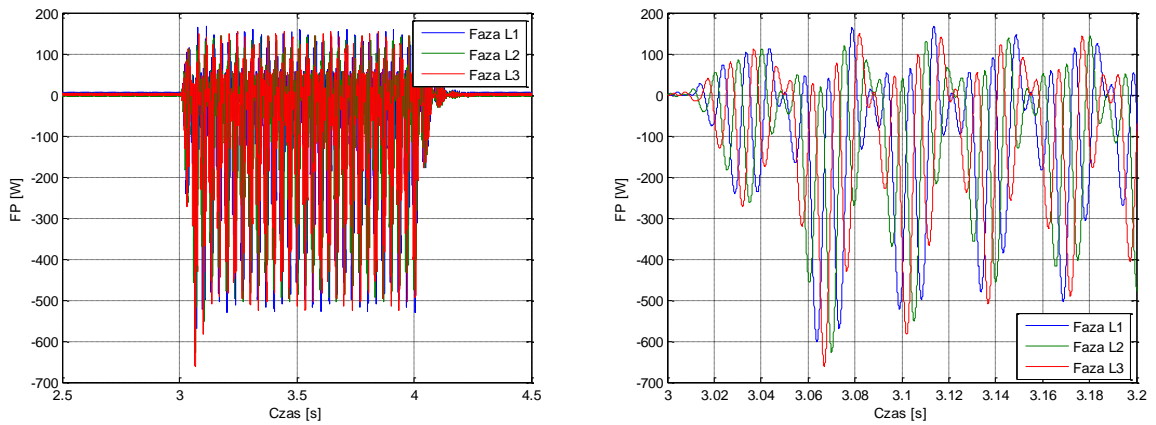
Rys. 4.38. Przebieg sygnałów U, I po filtracji (faza L1)



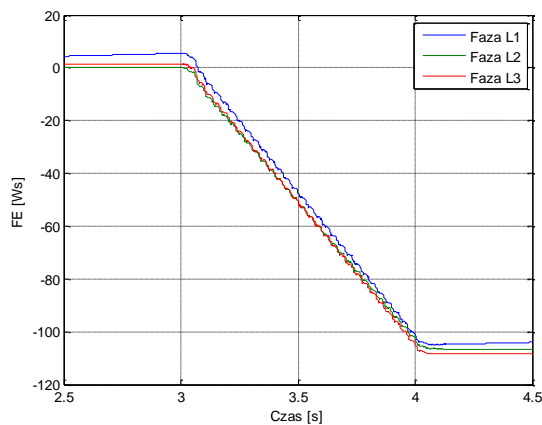
Rys. 4.39. Przebieg sygnałów U, I po filtracji (faza L2)



Rys. 4.40. Przebieg sygnałów U, I po filtracji (faza L3)



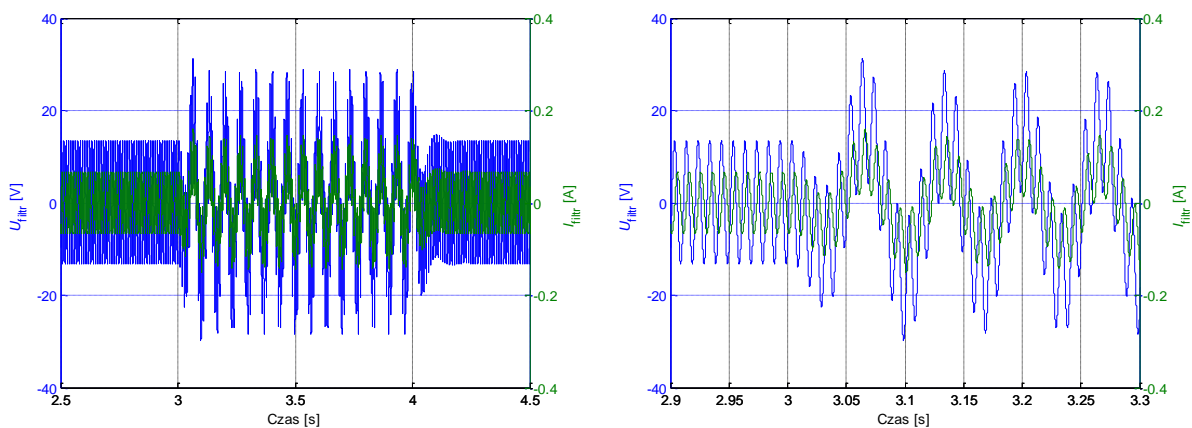
Rys. 4.41. Przebieg mocy chwilowej wahań



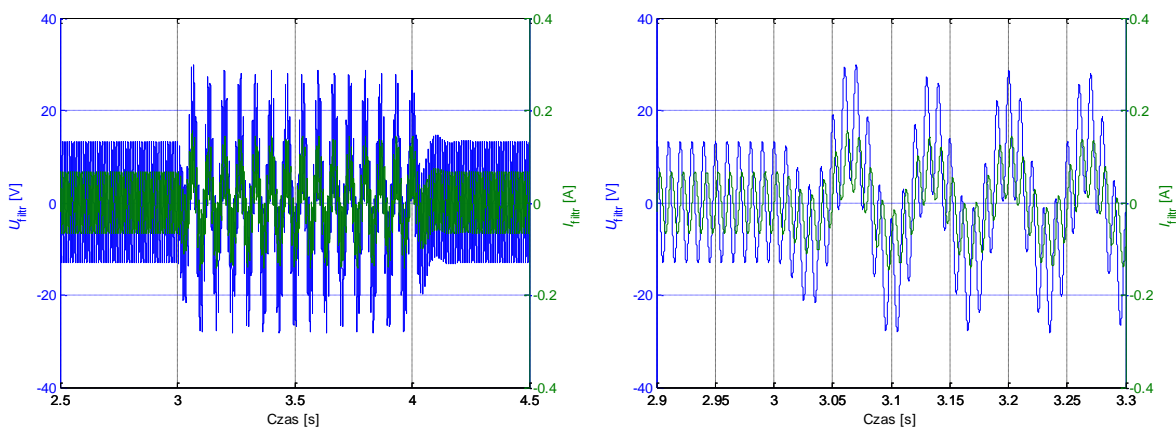
Rys. 4.42. Przebieg energii wahań

Wynik zastosowania metody IV – P2

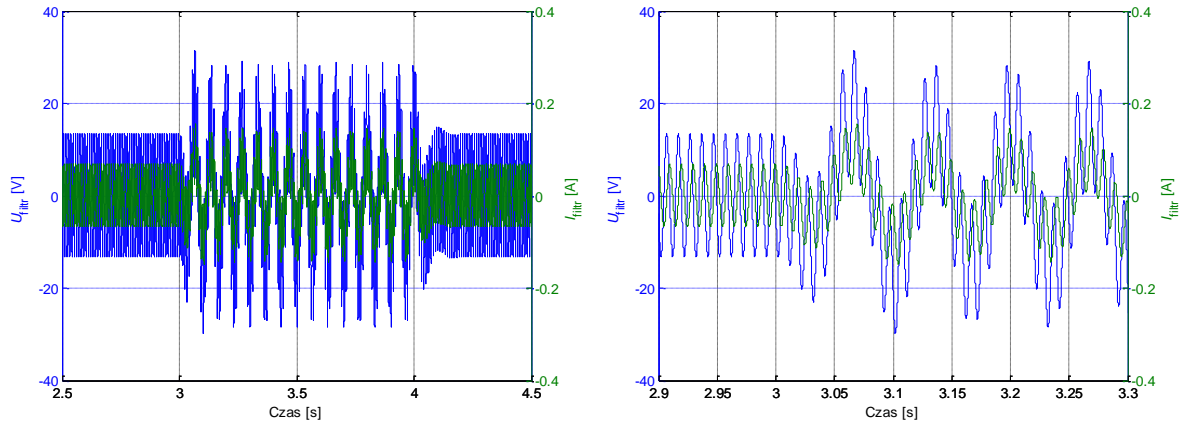
Na rysunkach 4.43–4.45 zestawiono przebiegi napięć i prądów po filtracji. Z przebiegów mocy chwilowej wahań (rys. 4.46) oraz energii wahań (rys. 4.47) wynika, że źródło zaburzeń zlokalizowane jest powyżej P2.



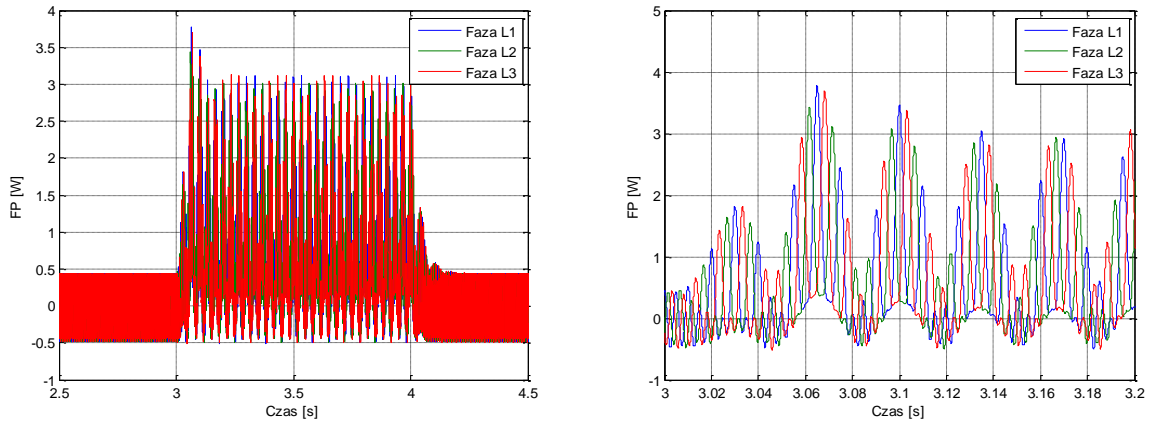
Rys. 4.43. Przebieg sygnałów U, I po filtracji (faza L1)



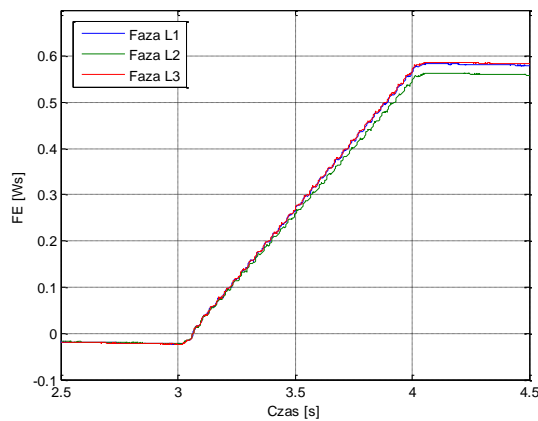
Rys. 4.44. Przebieg sygnałów U, I po filtracji (faza L2)



Rys. 4.45. Przebieg sygnałów U, I po filtracji (faza L3)



Rys. 4.46. Przebieg mocy chwilowej wahań



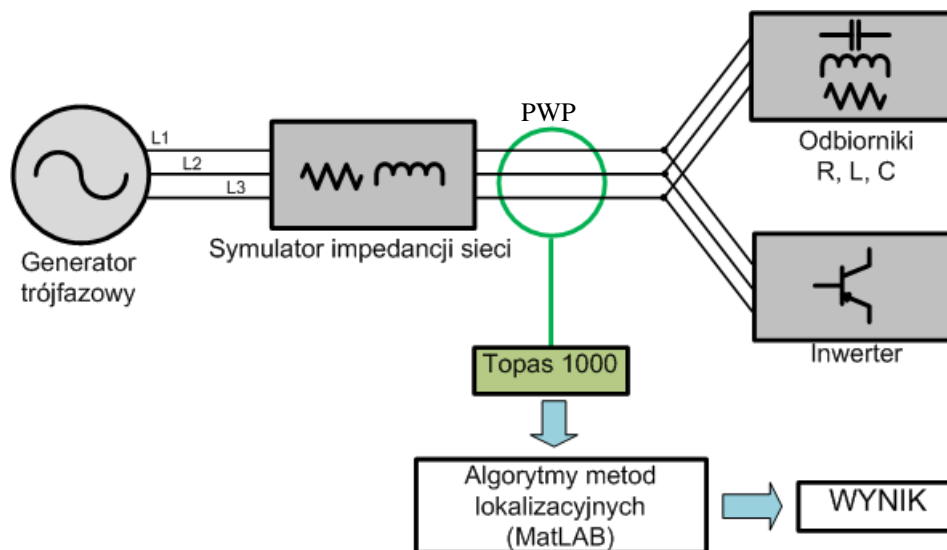
Rys. 4.47. Przebieg energii wahań

4.3 Weryfikacja jednopunktowych metod lokalizacji źródeł wahań napięcia w laboratoryjnej sieci typu MicroGrid

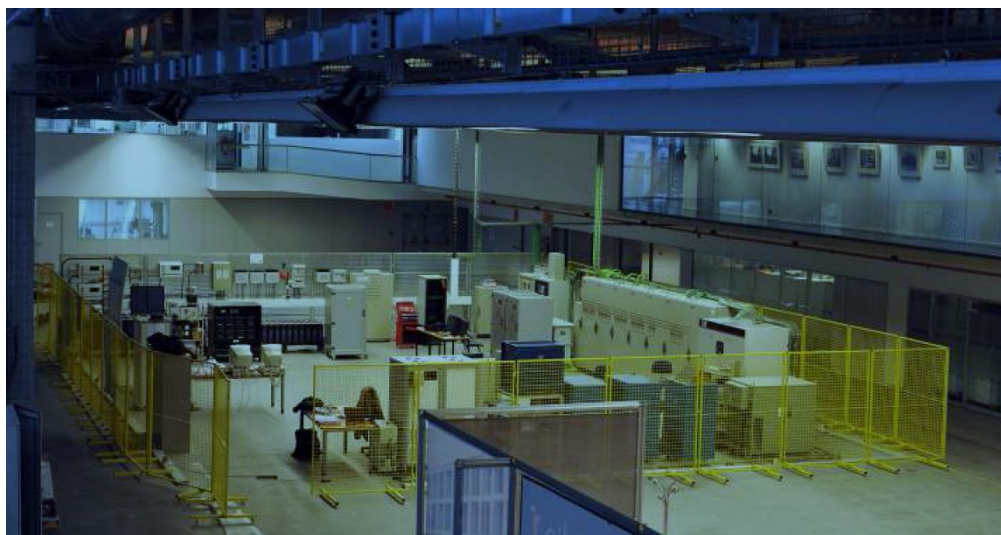
Badania nad lokalizacją źródeł wahań napięcia kontynuowano w laboratorium TECNALIA w Derio (Hiszpania) w ramach projektu DERri (Distributed Energy Resources Research Infrastructure). Wniosek projektowy wraz z decyzją komitetu ewaluacyjnego zamieszczono w Załączniku F. Laboratorium TECNALIA prowadzi badania w szerokim

zakresie elektrotechniki, w szczególności źródeł rozproszonych i sieci *smart grid*. Na wyposażeniu laboratorium znajduje się sieć wydzielona typu MicroGrid [57] oraz wysokiej klasy generatory i odbiorniki programowalne. Na potrzeby zadania badawczego były one wykorzystywane do symulowania zaburzeń w systemie elektroenergetycznym, związanych z obecnością wahań napięcia.

Rysunek 4.48 zawiera schemat ideowy sieci wydzielonej laboratorium TECNALIA oraz toru przetwarzania danych. Na rysunku 4.49 przedstawiono zdjęcie głównej hali laboratorium, w której powadzone były badania.



Rys. 4.48. Schemat ideowy sieci wydzielonej laboratorium TECNALIA oraz toru przetwarzania danych



Rys. 4.49. Laboratorium TECNALIA [17]

Lista najważniejszych urządzeń wykorzystywanych w projekcie:

- generator trójfazowy Pacific Power Source 3060-MS (62,5 kVA),
- symulator impedancji sieci dystrybucyjnej, umożliwiający wykorzystanie kilkunastu konfiguracji reaktancji i rezystancji linii,
- odbiorniki trójfazowe o charakterze rezystancyjnym (50 kW),
- odbiorniki trójfazowe o charakterze indukcyjnym (2x36 kVA),
- baterie kondensatorów,

- falownik (programowalne źródło prądu),
- analizator jakości energii elektrycznej TOPAS 1000.

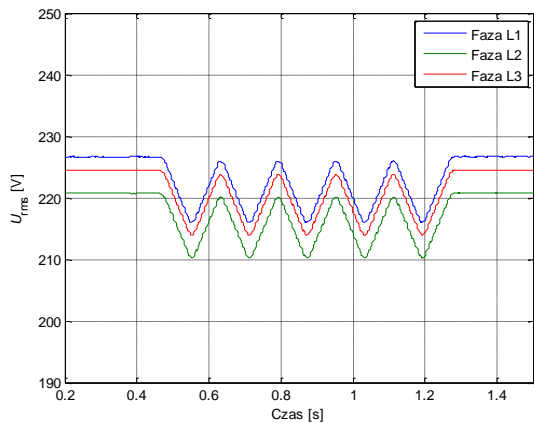
W ramach przeprowadzonych badań wykonane zostały testy metod lokalizacyjnych źródeł wahań napięcia znajdujących się po obu stronach PWP.

Test 4.5 Laboratorium TECNALIA – źródło wahań po stronie dostawcy

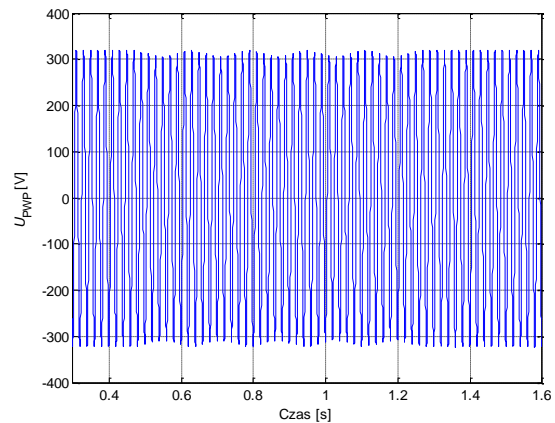
Badany obwód stanowi laboratoryjna sieć wydzielona (rys. 4.48). Parametry poszczególnych elementów obwodu zebrano w tabeli 4.9. Źródło wahań napięcia zlokalizowane jest powyżej PWP. Programowalny generator napięcia wytwarza napięcia sinusoidalne o parametrach modulacji przedstawionych na rysunku 4.50. Przebieg napięcia zarejestrowanego w PWP przedstawiony został na rysunku 4.51.

Tab. 4.9. Parametry elementów składowych laboratoryjnej sieci wydzielonej w TECNALIA

Wariant	Parametry sieci		Odbiorniki			Inwerter		PF
	R [Ω]	L [mH]	P [kW]	Q _L [kVar]	Q _C [kVar]	P [kW]	Q _L [kVar]	
1A	0,05	1,16	18,06	0	0	0	0	1
1B	0,05	1,16	11,11	0	12,5	0	0	-0,75



Rys. 4.50. Przebieg napięć testowych wytworzonych przez generator

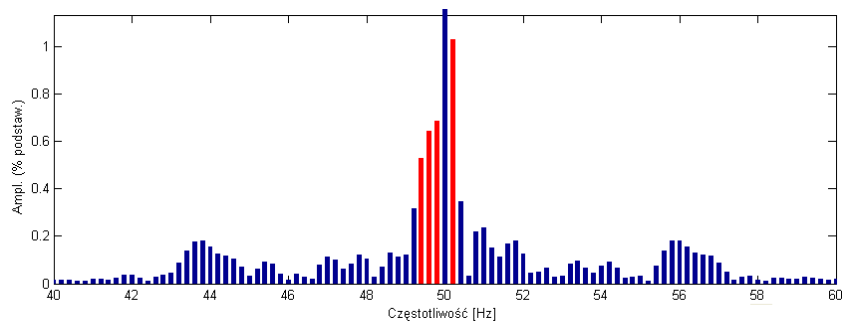


Rys. 4.51. Przebieg napięcia w PWP (faza L1)

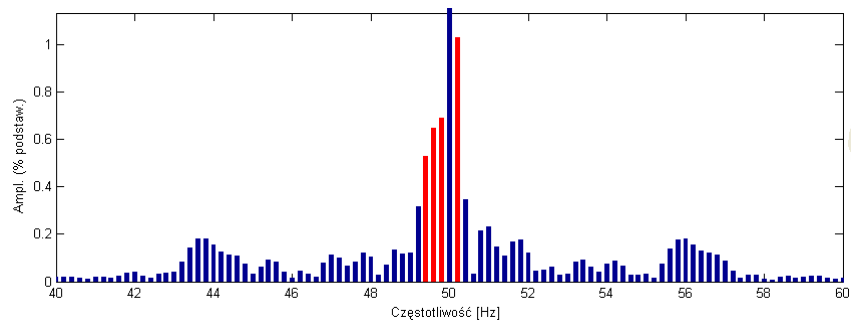
Wynik zastosowania metody III

WARIANT A – obwód rezystancyjny PF = 1

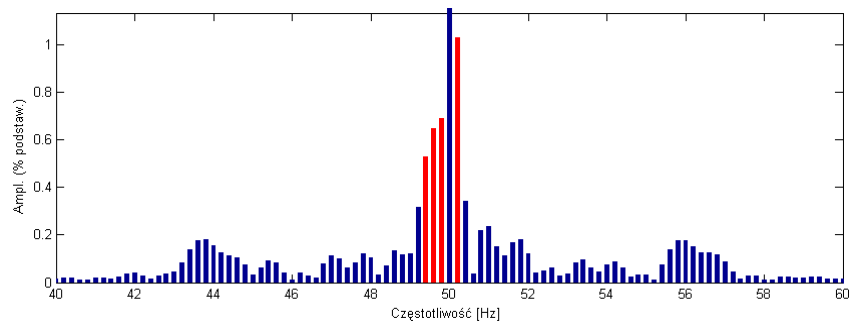
Wyniki analizy FFT przedstawiono na rysunkach 4.52–4.57.



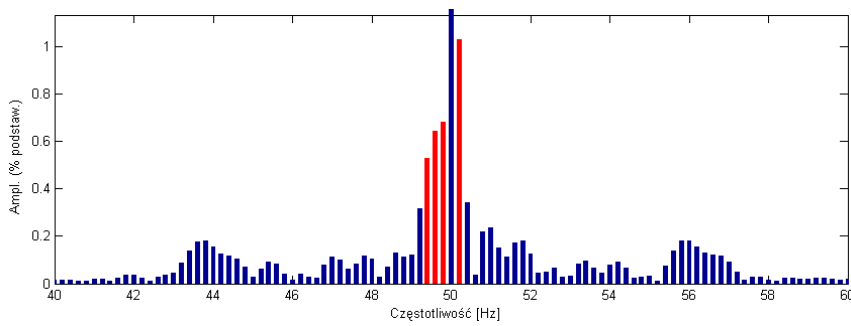
Rys. 4.52. Widmo przebiegu napięciowego – faza L1



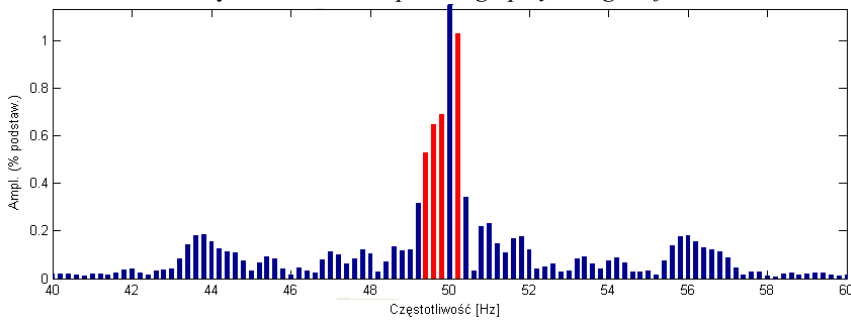
Rys. 4.53. Widmo przebiegu prądowego – faza L2



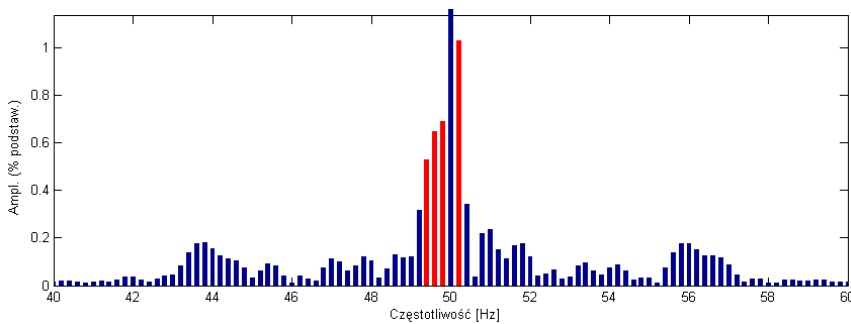
Rys. 4.54. Widmo przebiegu napięciowego – faza L3



Rys. 4.55. Widmo przebiegu prądowego – faza L1



Rys. 4.56. Widmo przebiegu prądowego – faza L2



Rys. 4.57. Widmo przebiegu prądowego – faza L3

Obliczenia mocy przedstawiono dla czterech interharmonicznych o największych amplitudach (zaznaczone kolorem czerwonym) zestawiono w tabeli 4.10.

Tab. 4.10. Składowe częstotliwościowe U , I , P

	f [Hz]	A	φ [°]	P [W]
U_{L1} [V]	49,4	1,202	20,0	0,165
I_{L1} [A]		0,138	19,5	
U_{L1} [V]	49,6	1,451	-9,0	0,241
I_{L1} [A]		0,166	-9,5	
U_{L1} [V]	49,8	1,542	-12,6	0,272
I_{L1} [A]		0,177	-13,0	
U_{L1} [V]	50,2	2,335	177,5	0,625
I_{L1} [A]		0,268	177,0	
U_{L2} [V]	49,4	1,185	259,4	0,161
I_{L2} [A]		0,136	260,5	
U_{L2} [V]	49,6	1,453	230,7	0,242
I_{L2} [A]		0,166	231,9	
U_{L2} [V]	49,8	1,543	227,1	0,272
I_{L2} [A]		0,177	228,2	
U_{L2} [V]	50,2	2,303	56,9	0,607
I_{L2} [A]		0,264	58,0	
U_{L3} [V]	49,4	1,189	139,4	0,162
I_{L3} [A]		0,136	138,8	
U_{L3} [V]	49,6	1,458	110,7	0,243
I_{L3} [A]		0,167	110,3	
U_{L3} [V]	49,8	1,548	107,5	0,274
I_{L3} [A]		0,177	107,0	
U_{L3} [V]	50,2	2,310	-62,5	0,610
I_{L3} [A]		0,264	-62,8	

Moce wszystkich wybranych interharmonicznych są dodatnie – źródło wahań napięcia przyłączone jest po stronie dostawcy.

WARIANT B – obwód rezystancyjno-pojemnościowy PF = 0,75

Obliczenia mocy dla czterech interharmonicznych o największych amplitudach zestawiono w tabeli 4.11.

Tab. 4.11. Zestawienie wyników obliczeń mocy dominujących interharmonicznych

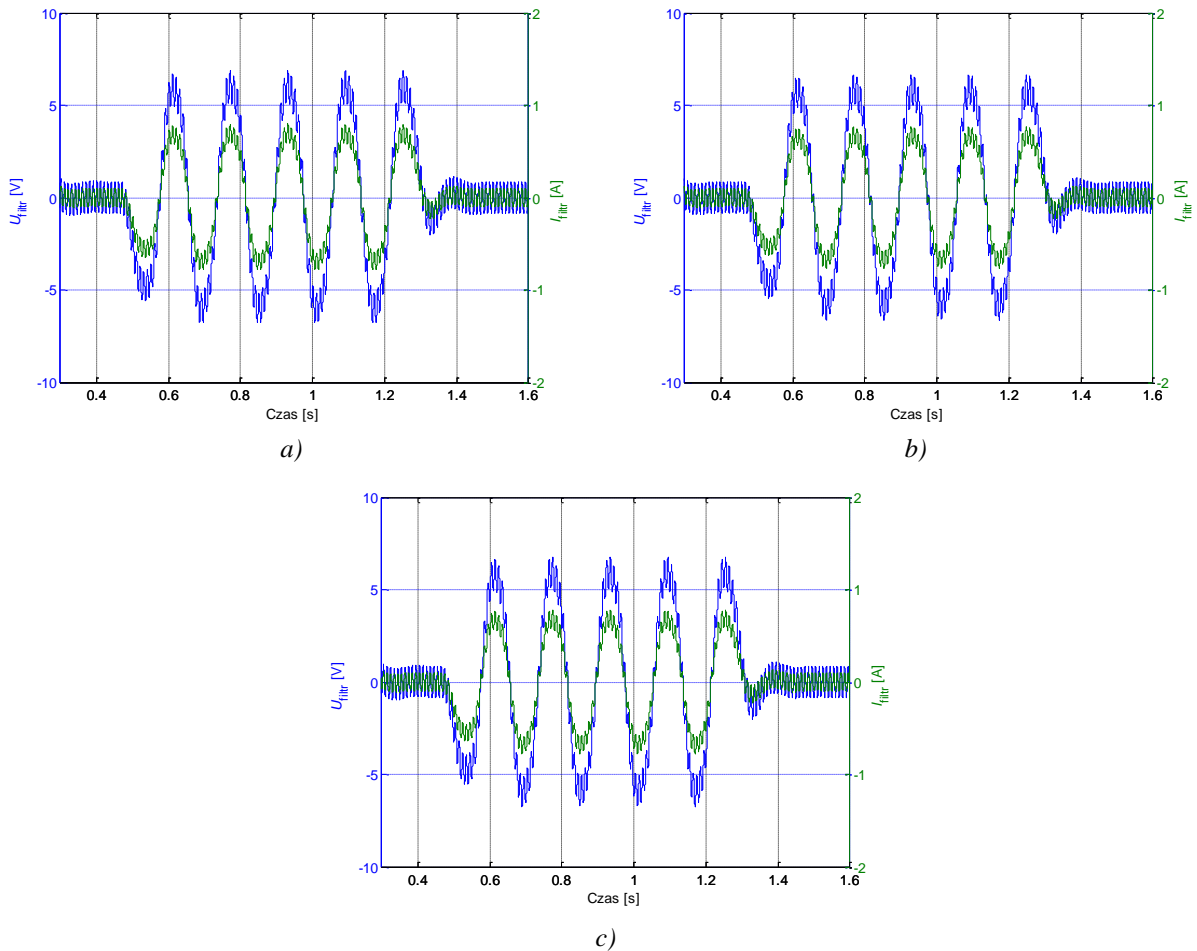
Wariant 1B	Faza		Częstotliwość interharmonicznej				Σ
			49,4 Hz	49,6 Hz	49,8 Hz	50,2 Hz	
P	L1	0,105	0,152	0,161	0,378	0,796	
	L2	0,095	0,140	0,147	0,341	0,723	
	L3	0,098	0,146	0,153	0,372	0,769	

Moce interharmonicznych wyznaczone dla wariantów 1A oraz 1B przyjmowały wartości dodatnie. Potwierdza to poprawność metody III. Na poprawność wyników nie miał wpływu charakter odbiornika.

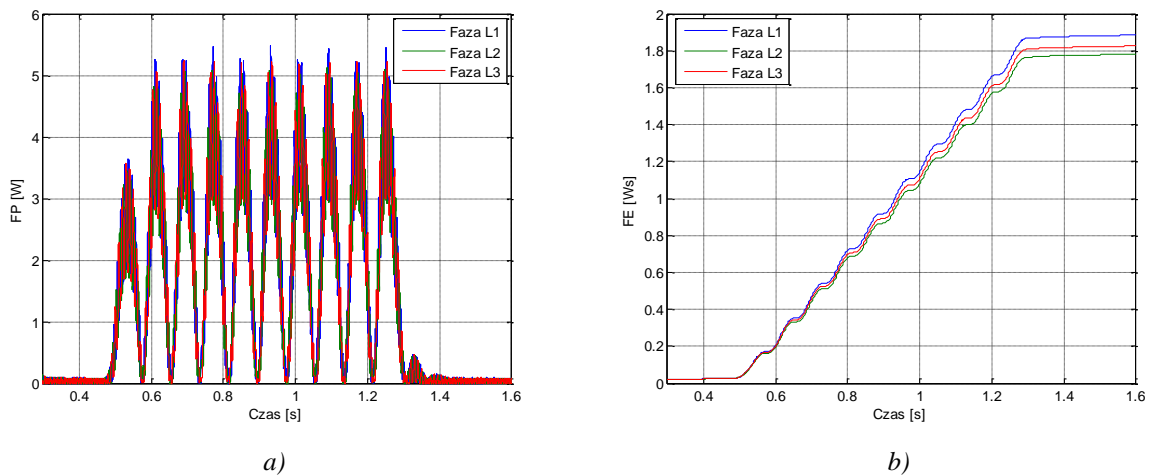
Wynik zastosowania metody IV

WARIANT 1A - obwód rezystancyjny PF = 1

Na rysunku 4.58 przedstawiono przebiegi prądu i napięć po filtracji, a na rysunku 4.59 przebiegi mocy i energii wahań. Zarówno przebieg mocy chwilowej wahań przyjmujący wyłącznie dodatnie wartości, jak i rosnący charakter przebiegów energii wahań we wszystkich fazach potwierdzają istnienie źródła zaburzeń powyżej PWP.

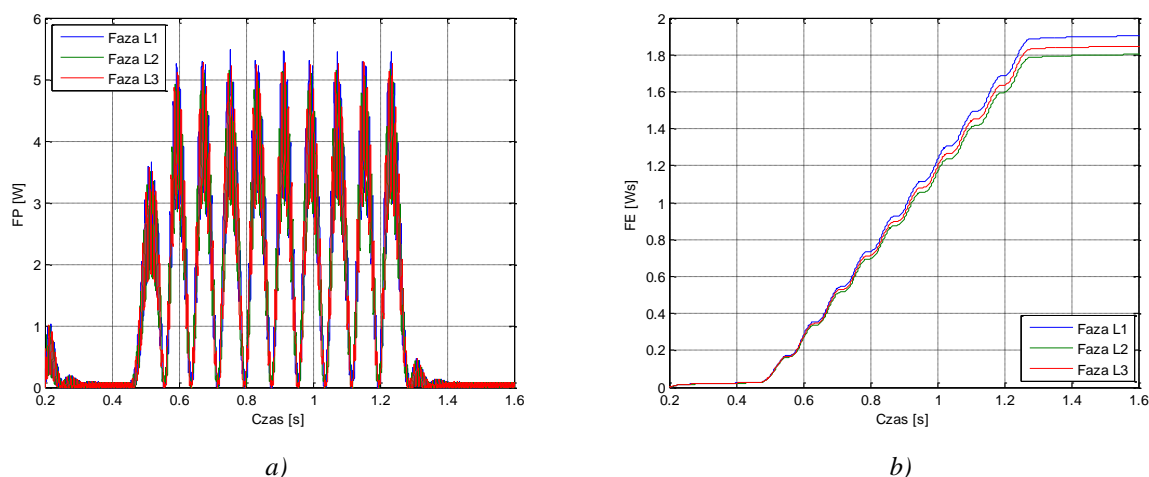


Rys. 4.58. Przebieg U, I po filtracji a) faza L1, b) faza L2, c) faza L3



Rys. 4.59. Przebieg mocy a) i energii b) wahań

WARIANT 1B – obwód rezystancyjno-pojemnościowy PF=0,75



Rys. 4.60. Przebieg mocy a) i energii b) wahań

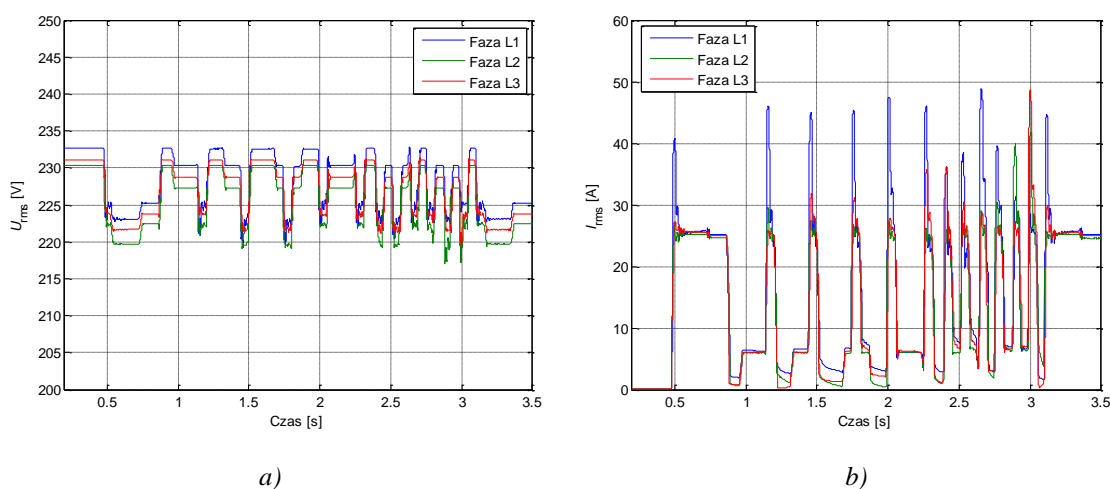
Wyznaczone moce wahań (rys. 4.59a, rys. 4.60a) przyjmują wartości dodatnie, z kolei energia wahań (rys. 4.59b, rys. 4.60b) ma charakter rosnący dla wszystkich wariantów. Stwierdzić należy, że źródła są lokalizowane poprawnie.

Test 4.6 Laboratorium TECNALIA – źródło wahań po stronie odbiorcy

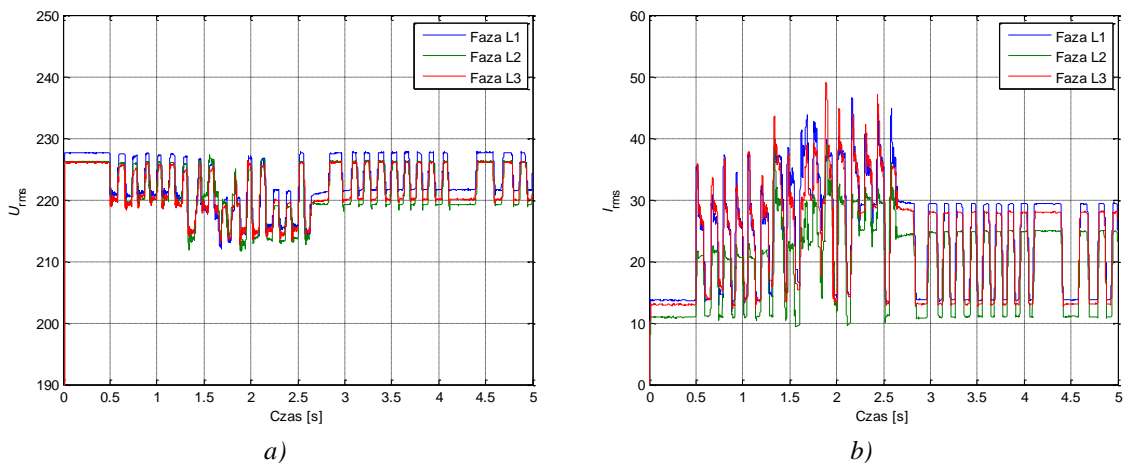
Dla zadanych warunków testu źródło wahań napięcia stanowi stochastycznie załączany odbiornik rezystancyjno-indukcyjny oraz falownik. Obwód zasilano przemiennym napięciem sinusoidalnym o wartości skutecznej 230 V. Parametry obwodu zastosowanego do testów zestawiono w tabeli 4.12. Przebiegi napięć i prądów przedstawiono na rysunkach 4.61–4.62.

Tab. 4.12. Parametry elementów obwodu (test 4.6)

Nr	Parametry sieci		Odbiorniki			Inwerter	
	R [Ω]	L [mH]	P [kW]	Q _L [kVar]	Q _C [kVar]	P [kW]	Q _L [kVar]
A	0,25	0,49	4,17	17,5	0	0	0
B	0,25	0,49	13,89	15	0	1,39	2,5



Rys. 4.61. Przebieg wartości skutecznej napięć a) i prądów b) (2A)



Rys. 4.62. Przebieg wartości skutecznej napięć a) i prądów b) (2B)

Wynik zastosowania metody III

Wyniki obliczeń mocy dla wybranych (dominujących) interharmonicznych zestawiono w tabeli 4.13. Obliczone moce dla wszystkich faz jednoznacznie wskazują na obecność źródła wahań poniżej PWP. Jest to zgodne z prawdą i potwierdza poprawność działania zastosowanej metody lokalizacji. Wszystkie moce dominujących interharmonicznych przyjmują wartości ujemne. Oznacza to, że źródło wahań przyłączone jest poniżej PWP.

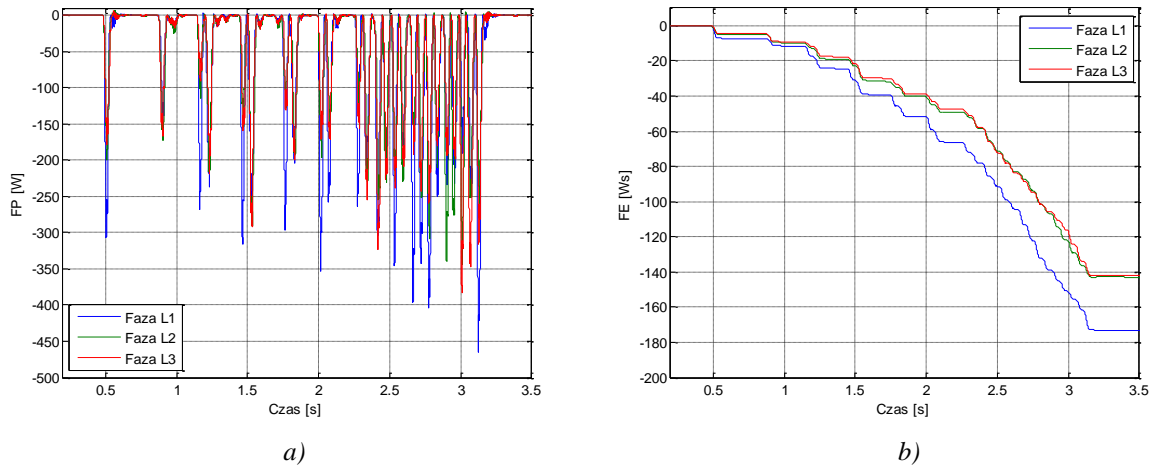
Tab. 4.13. Zestawienie wyników obliczeń mocy dominujących interharmonicznych

Wariant 2A	Faza		Częstotliwość interharmonicznej				Σ
			49,4 Hz	49,6 Hz	49,8 Hz	50,2 Hz	
P	L1		-2,659	-10,191	-9,353	-5,566	-27,769
	L2		-4,343	-10,257	-11,766	-7,955	-34,321
	L3		-2,776	-9,680	-10,425	-5,486	-28,367
Wariant 2B	Faza		Częstotliwość interharmonicznej				Σ
			42,8 Hz	50,2 Hz	50,4 Hz	57,4 Hz	
P	L1		-6,225	-9,290	-5,134	-3,815	-24,464
	L2		-5,994	-8,472	-3,727	-3,740	-21,933
	L3		-5,231	-5,067	-3,423	-3,415	-17,136

Wynik zastosowania metody IV

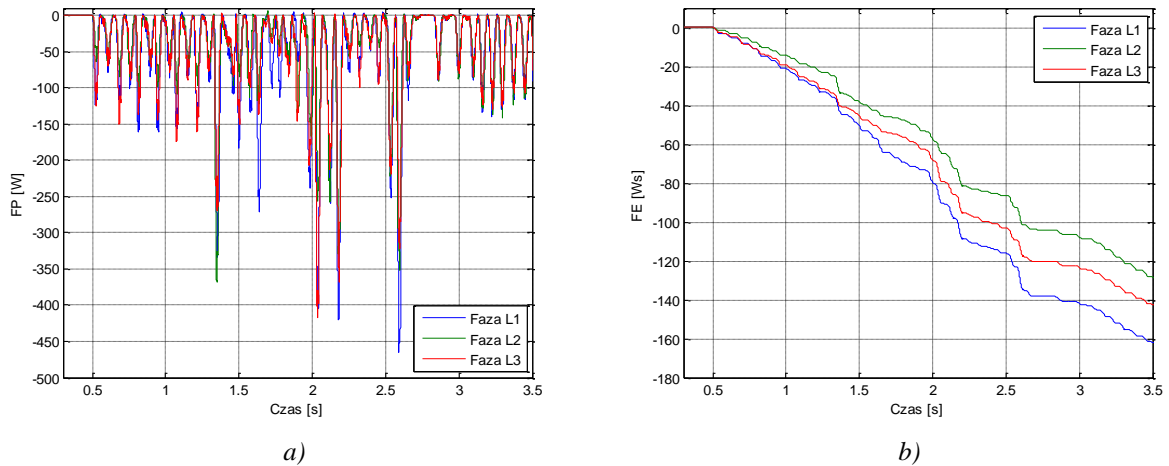
Na rysunkach 4.63 i 4.64 przedstawiono moce i energie wahań zarejestrowane dla wariantów 2A i 2B. Potwierdzają one przyłączenie źródła zaburzenia poniżej PWP.

WARIANT 2A



Rys. 4.63. Przebieg mocy chwilowej wahań a) i energii wahań b) (2A)

WARIANT 2B



Rys. 4.64. Przebieg mocy chwilowej wahań a) i energii wahań b) (2B)

4.4 Podsumowanie metod lokalizacji źródeł wahań napięcia

W ramach rozdziału przedstawiono podstawy teoretyczne czterech metod lokalizacji źródeł wahań napięcia. Część z nich została zaimplementowana oraz przetestowana w warunkach symulacyjnych i rzeczywistych. Każda z prób wykorzystywała inny rodzaj zaburzenia w sieci, co pozwoliło na badanie algorytmów w szerokim zakresie możliwych zdarzeń. Wykonano m.in. testy w warunkach obecności kilku źródeł wahań napięcia – każde o odmiennej charakterystyce i wpływie na JDEE. Bardzo istotne wnioski płyną z wyników badań w obwodach rzeczywistych. Potwierdzono działanie wybranych algorytmów, sprawdzono zależności pomiędzy charakterem elementów obwodu a skutecznością działania metod. Szczególnie cenne okazały się wyniki pomiarów prowadzonych w laboratorium TECNALIA. Zastosowanie symulatora sieci MicroGrid zbliżyło warunki testowe do warunków rzeczywistej sieci. W tabeli 4.14 dokonano podsumowania przeprowadzonych testów.

Wyniki pomiarów laboratoryjnych pozwalają sądzić, że zaproponowane metody znajdują w przyszłości zastosowanie w lokalizatorach źródeł zaburzeń. Dużym wyzwaniem jest jednak zagwarantowanie skuteczności tych metod w rzeczywistym systemie, który zawiera wiele odbiorników o bardzo zróżnicowanym oddziaływaniu. Ogólna ocena wykonanych testów jest

jednak pozytywna, co wskazuje na duży potencjał implementacji algorytmów lokalizacji wahań napięcia w analizatorach JDEE.

Tab. 4.14. Podsumowanie testów lokalizacji źródeł wahań napięcia

Nr testu	Układ symulacyjny	Rzeczywista lokalizacja źródła wahań	Wskazania metod lokalizacji		
			Metoda II	Metoda III	Metoda IV
4.1	odbiorca-dostawca	dostawca	dostawca	dostawca	dostawca
4.2		odbiorca	odbiorca	odbiorca	odbiorca
4.3		obie strony (dominuje odbiorca)	obie strony	obie strony	obie strony (dominuje odbiorca)
4.4 P1	sieć IEEE	odbiorca	nie dotyczy	odbiorca	odbiorca
4.4 P2		dostawca	nie dotyczy	dostawca	dostawca
4.5	Microgrid lab. TECNALIA	dostawca	nie dotyczy	dostawca	dostawca
4.6		odbiorca	nie dotyczy	odbiorca	odbiorca

5. Wnioski końcowe i propozycje kontynuacji badań

Podczas badań zmierzających do rozwiązania postawionego problemu przeanalizowano zapisy dokumentów normalizacyjnych regulujących procedurę certyfikacji analizatorów JDEE. Przeprowadzono szereg badań porównawczych oraz pełną procedurę testową w zakresie nadawania certyfikatu klasy A. Błędy w pomiarach wskaźników JDEE realizowanych analizatorami klasy A wykazano poprzez przeprowadzenie eksperymentu pomiarowego, podczas którego zastosowano autorską procedurę testową obejmującą różnorodne kombinacje zaburzeń JDEE. Eksperyment pomiarowy oraz późniejsza analiza danych pomiarowych zostały prowadzone przy współpracy z przedstawicielami środowiska akademickiego, jak i przemysłowego, reprezentowanego przez producentów analizatorów JDEE oraz przedstawicieli dystrybutora energii elektrycznej.

W zakresie pomiarów migotania światła wykazano różnice w działaniu różnych typów źródeł światła. Na przykładach lamp CFL oraz LED przedstawiono metodologię modyfikacji miernika IEC migotania światła do pomiaru poziomu zaburzenia obserwowanego w przypadku zastosowania dowolnego typu lampy. Przedstawiono różnice w poziomach efektu migotania światła obserwowanego podczas pracy tych źródeł. Zaproponowano metodykę wyznaczania wskaźnika efektu migotania światła FEI służącego jako przystępne kryterium oceny ich odporności na wahania napięcia. Wykazano, że przy założeniu dostatecznego udziału nowoczesnych źródeł światła CFL oraz LED w całkowitym zbiorze lamp uzasadnionym jest zwiększenie dopuszczalnych poziomów wahań napięcia w sieci dystrybucyjnej.

Kolejnym celem zrealizowanym w pracy była weryfikacja skuteczności metod lokalizacji źródeł wahań napięcia, która została wykonana zarówno w badaniach symulacyjnych (schemat zastępczy odbiorca-dostawca oraz sieci 13 węzłowa), jak i w sieci wydzielonej laboratorium TECNALIA. Wykazano duży potencjał dla implementacji algorytmów lokalizacji wahań napięcia w analizatorach JDEE.

Za oryginalne elementy niniejszej pracy Autor uznaje:

1. Wykazanie oraz analiza techniczna przyczyn błędów pomiaru wskaźników JDEE dokonywanych przez dostępne na rynku analizatory JDEE klasy A.
2. Opracowanie procedury weryfikacji zgodności analizatora JDEE z wymaganiami klasy A,
3. Opracowanie metodyki budowy miernika migotania światła w oparciu o dowolny typ źródła światła,
4. Zaproponowanie wskaźnika efektu migotania światła służącego do oceny odporności źródeł światła na wahania napięcia,
5. Weryfikację skuteczności metod lokalizacji wahań napięcia w systemie elektroenergetycznym, zarówno w badaniach symulacyjnych, jak i laboratoryjnych.

Przeprowadzone w niniejszej pracy badania mogą być kontynuowane poprzez:

1. Czynny udział w pracach komitetu normalizacyjnego IEC, ukierunkowany na poprawę jakości procesu nadawania klasy A analizatorom JDEE, w oparciu o doświadczenia związane z przeprowadzonymi badaniami porównawczymi,
2. Rozwijanie idei wskaźnika FEI tak, aby był on jak najlepszym narzędziem do oceny odporności źródeł światła na wahania napięcia,
3. Aplikację metod lokalizacji zaburzeń JDEE w urządzeniach monitorujących pracę systemów elektroenergetycznych.

Literatura


- [1] **Axelberg P.:** On Tracing Flicker Sources and Classification of Voltage Disturbances, Thesis for the degree of doctor of philosophy, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2007.
- [2] **Axelberg P., Bollen M.:** Algorithm for Determining the Direction to a Flicker Source, IEEE Transactions on Power Delivery, 2006.
- [3] **Axelberg P., Bollen M.:** Trace of Flicker Sources by Using the Quantity of Flicker Power IEEE Transactions on Power Delivery / 23/1, Styczeń 2008.
- [4] **Balawender P.:** Analiza porównawcza własności metrologicznych wybranych analizatorów jakości energii elektrycznej - detekcja oraz agregacja zdarzeń / Praca dyplomowa inżynierska, AGH Kraków 2012.
- [5] **Balawender P., Chmielowiec K., Firlit A., Piątek K., Szkoda R., Ziętek M.:** Pomiar porównawczy rejestratorów jakości energii – wahania napięcia, Jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych w Polsce oraz efektywność energetyczna: V konferencja: Lidzbark Warmiński, 25–26 kwietnia 2012 / Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej.
- [6] **Cai R., Cobben J.F.G., Myrzik J.M.A., Blom J.H., Kling W.L.:** Flicker responses of different lamp types, Gener. Transm. Distrib., 2009, Vol. 3, Iss. 9.
- [7] **Chmielowiec K.:** Flicker effect of different types of light sources, IEEE EPQU2011, Lisbon, 17 to 19 October 2011.
- [8] **Chmielowiec K.:** Wpływ zmian napięcia na pracę różnych rodzajów źródeł światła, Wiadomości Elektrotechniczne: miesięcznik naukowo-techniczny Stowarzyszenia Elektryków Polskich, ISSN 0043-5112. — 2012 R.
- [9] **Chmielowiec K., Firlit A., Piątek K.:** Analiza pracy wybranych farm wiatrowych w Polsce. Cz. 2, Jakość energii elektrycznej, Wiadomości Elektrotechniczne: miesięcznik naukowo-techniczny Stowarzyszenia Elektryków Polskich 2012 R.
- [10] **Chmielowiec K., Hanzelka Z., Firlit A., Piątek K., Woźny K., Rogóż M.:** Pomiar porównawczy analizatorów jakości energii elektrycznej - eksperyment pomiarowy w ramach Pikniku, Jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych w Polsce: VI konferencja: Białka Tatrzańska, 9–10 czerwca 2015 r. / Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej.
- [11] **Chmielowiec K., Koziel R., Hanzelka Z., Firlit A., Piątek K., Woźny K.:** Jednopunktowe metody lokalizacji źródeł wahań napięcia w systemie elektroenergetycznym, Jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych w Polsce: VI konferencja: Białka Tatrzańska, 9–10 czerwca 2015 r.
- [12] **Chmielowiec K., Rogóż M., Hanzelka Z., Bień A., Firlit A., Kolek K., Piątek P., Woźny K.:** Piknik jakości energii elektrycznej. Raport z eksperymentu pomiarowego - badania porównawcze analizatorów JEE, ISBN: 978-83-7464-825-7, 2015.
- [13] **Chmielowiec K., Szalwia K., Sreedyński P.:** Świetlówki kompaktowe jako odbiorniki energii elektrycznej, Elektro Info ; ISSN 1642-8722. — 2011 nr 4.
- [14] **Chmielowiec K., Szalwia P., Sreedyński P.:** Świetlówki kompaktowe – czy naprawdę energooszczędne?, JAKOŚĆ ENERGII 2010: jakość energii w sieciach elektroenergetycznych: I konferencja naukowo-techniczna: 25–26 listopada 2010 r., Piechowice.
- [15] **Chmielowiec K., Ziętek M., Piątek K., Firlit A., Szkoda R., Balawender P.:** Comparative tests of power quality analyzers – harmonic distortion, ICHQP: 2012

- IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power: Hong Kong, 17–20 June 2012 / IEEE Power & Energy Society.
- [16] **Chmielowiec K., Zietek M.:** Voltage sags – methods for source localization and reduction of negative impact on industrial plants, 1st KIC InnoEnergy Scientist conference: Leuven, Belgium, November 4–9, 2012: book of abstracts / European Institute of Innovation & Technology. — [Leuven: EIT], [2012].
- [17] DERri - Distributed Energy Resources Research Infrastructure, www.der-ri.net.
- [18] **Drapela J., Mastny P., Prochazka Z.:** Interharmonics-Flicker Curves of Lamps and Compatibility Level for Interharmonic Voltages, Proc. of the 5th WSEAS/IASME Int. Conf. on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, Tenerife, Spain, December 16-18, 2005.
- [19] **Farrokh Payam A., Mirzaeian Dehkordi B., Sadri M.S., Moallem M.:** An Energy Method for Determination of Flicker Source at the Point of Common Coupling, EUROCON 2007.
- [20] **Farrokh Payam A., Moallem M.:** Determination of flicker source at the Point of Common Coupling using flicker energy, Journal of Electrical Systems, Czerwiec 2009.
- [21] **Firlit A., Piątek K.:** Wpływ dużego odbiorcy przemysłowego na poziom wahań napięcia w sieciach wysokich napięć, Jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych w Polsce oraz efektywność energetyczna: V konferencja: Lidzbark Warmiński, 25–26 kwietnia 2012 / Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej.
- [22] **Gorczevska M., Gandecki A., Kędziora W., Zalesińska M.:** Comparative study of integrated type compact fluorescent lamps, Przegląd Elektrotechniczny R. 80 NR 5/2004.
- [23] Guide to quality of electrical supply for industrial installations. Part 5: Flicker, UIEPQ 1999.
- [24] **Hanzelka Z.:** Jakość dostawy energii elektrycznej: zaburzenia wartości skutecznej napięcia, Komitet Elektrotechniki Polskiej Akademii Nauk. — Kraków: Wydawnictwa AGH, 2013.
- [25] **Hanzelka Z.:** Jakość energii elektrycznej, część 3 - wahania napięcia, www.twelvee.com.pl.
- [26] **Hanzelka Z., Chmielowiec K., Firlit A., Świątek B.:** New challenges for voltage quality studies, Przegląd Elektrotechniczny = Electrical Review, Stowarzyszenie Elektryków Polskich.
- [27] **Hanzelka Z., Słupski P., Piątek K., Warecki J., Zieliński M.:** Single-Point Methods for Location of Distortion, Unbalance, Voltage Fluctuation and Dip Sources in a Power, Power quality – monitoring, analysis and enhancement, Rijeka 2011.
- [28] **Hanzelka Z., Targosz R.:** Techniczno-ekonomiczne aspekty racjonalnej gospodarki energetycznej – próba oceny stanu świadomości, przyczyn i kosztów złej jakości energii elektrycznej, JAWĘ 2004: jakość energii a gospodarka energetyczna: X konferencja naukowo-techniczna: Krosno-Eger, 27 kwietnia – 2 maja 4004 r.
- [29] IEC 62586-1:2013 Power quality measurement in power supply systems - Part 1: Power quality instruments (PQI).
- [30] IEEE 13 Node Test Feeder, IEEE Distribution System Analysis Subcommittee.
- [31] Instrukcja ruchu i eksploatacji sieci dystrybucyjnej (IRiESD), Energa Operator.
- [32] Instrukcja ruchu i eksploatacji sieci przesyłowej (IRiESP), Polskie Sieci Przesyłowe.

- [33] **Kacejko P., Machowski J.:** Zwarcia w systemach elektroenergetycznych / // WNT Warszawa 2002.
- [34] **Kowalski Z.:** Jakość Energii Elektrycznej, Wyd. Politechniki Łódzkiej 2007.
- [35] **Kowalski Z.:** Wahania napięcia w układach elektroenergetycznych / Kowalski Z. WNT Warszawa, 1985.
- [36] **Kozieł R.:** Lokalizacja źródeł wahań napięcia w systemie elektroenergetycznym / Praca dyplomowa magisterska, AGH Kraków 2013.
- [37] **Moaddabi N., Sadeghi S.H.H., Askarian Abyane H., Mazlumi K.:** A Lookup Method for Power System Flicker Source Detection Using Direction of Propagation , 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2008.
- [38] **Mróz M.:** Jakość energii elektrycznej jako kryterium przyłączania elektrowni wiatrowych do sieci zasilającej, Rozprawa doktorska. Kraków: Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, 2014.
- [39] **Mróz M., Chmielowiec K. Hanzelka Z.:** Voltage fluctuations in networks with distributed power sources, 2012 IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power: Hong Kong, 17–20 June 2012 / IEEE Power & Energy Society.
- [40] **Nassif A., Nino E., Xu W.:** A V-I Slope-Based Method for Flicker Source Detection, 37th Annual North American Power Symposium, 2005.
- [41] **Nassif A., Zhang D., Xu W.:** Flicker Source Identification by Interharmonic Power Direction, Electrical and Computer Engineering Conference, Kanada 2005.
- [42] PN-EN-50160:2010 – Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych.
- [43] PN-EN-61000-4-15:2011 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) -- Część 4-15: Metody badań i pomiarów -- Miernik migotania światła -- Specyfikacja funkcjonalna i projektowa.
- [44] PN-EN-61000-4-30:2011 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) -- Część 4-30: Metody badań i pomiarów -- Metody pomiaru jakości energii.
- [45] PN-EN 61000-4-7:2007/A1:2011 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) -- Część 4-7: Metody badań i pomiarów -- Ogólny przewodnik dotyczący pomiarów harmonicznym i interharmonicznym oraz przyrządów pomiarowych, dla sieci zasilających i przyłączonych do nich urządzeń.
- [46] **Poormonfaredazimi M., Moghadam H., Doroudi A.:** A Novel method to trace flicker sources, 17th Electrical Power Distribution Networks (EPDC) Conference, 2012.
- [47] **Rogóż M.:** System oceny jakości energii elektrycznej dla potrzeb kontraktu na dostawę energii i określenia warunków technicznych przyłączenia odbiorników, Rozprawa doktorska, Kraków: Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, 2007.
- [48] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego.
- [49] Rozporządzenie Komisji Europejskiej Nr 244/2009 z dnia 18 marca 2009 r.
- [50] **Rybka A.:** Analiza porównawcza własności metrologicznych wybranych analizatorów jakości energii elektrycznej – asymetria napięcia / Praca dyplomowa inżynierska, AGH Kraków 2012.
- [51] **Seredyński P., Szalwia K.:** Energooszczędne źródła światła (LED i CFL) jako odbiorniki energii elektrycznej / Praca dyplomowa magisterska, AGH Kraków 2011.
- [52] Specyfikacja techniczna analizatora SO-52v11-eME, www.mikronika.pl.
- [53] Specyfikacja techniczna generatora Calmet C300, www.calmet.com.pl.

- [54] Specyfikacja techniczna generatora NSG-1007, www.teseq.com.
- [55] Specyfikacja techniczna analizatora JDEE Topas 1000, www.fluke.com.
- [56] Specyfikacja techniczna luxomierza Mavolux, www.gossen-photo.de.
- [57] Specyfikacja techniczna sieci microgrid laboratorium TECNALIA, www.TECNALIA.com.
- [58] Specyfikacja techniczna przetwornika OPT101, www.ti.com.
- [59] **Szkoda R.:** Analiza porównawcza własności metrologicznych wybranych analizatorów jakości energii elektrycznej – wahania oraz harmoniczne napięcia / Praca dyplomowa inżynierska, AGH Kraków 2012.
- [60] **Szlosek M.:** Zastosowanie sieci neuronowych do rozpoznawania zaburzeń elektromagnetycznych i pomiaru ich ilościowych wskaźników, rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, 2009.

Załącznik A. Raport z badań zgodności analizatora jakości energii SO-52v11-eME z właściwymi dokumentami normalizacyjnymi w zakresie pomiarów jakości energii



**CENTRUM PROMOCJI JAKOŚCI I EFEKTYWNEGO
UŻYTKOWANIA ENERGII ELEKTRYCZNEJ**

Katedra Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych
Akademia Górniczo-Hutnicza im. S. Staszica
30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30, B1, p. 119
tel. (0-12) 617-28-78; fax. (0-12) 633-22-84;
e-mail: hanzel@uci.agh.edu.pl


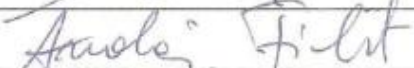



Opracowanie nt.

**Badania zgodności analizatora jakości energii
SO-52v11-eME z właściwymi dokumentami
normalizacyjnymi w zakresie pomiarów jakości energii**

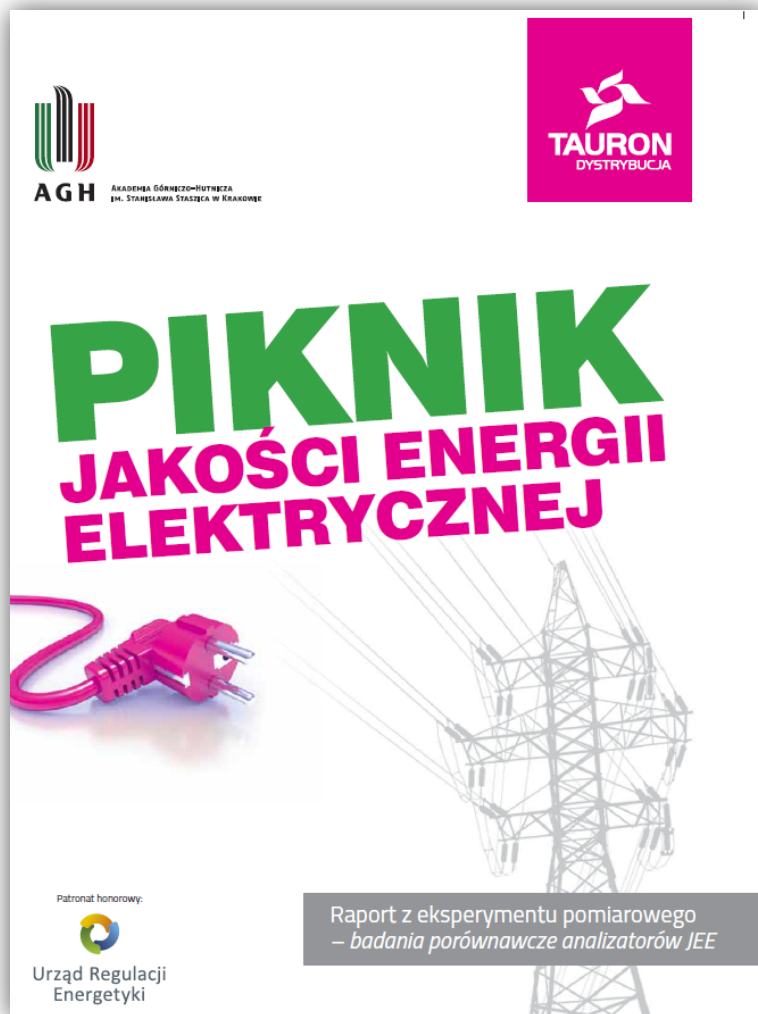
Wykonawcy:

dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka, prof. AGH
dr inż. Andrzej Firlit
dr inż. Krzysztof Piątek
mgr inż. Krzysztof Chmielowiec
inż. Paweł Balawender

Kraków, grudzień 2012

Imię i Nazwisko	Udział procentowy w realizacji badań zgodności analizatora jakości energii SO-52v11-eME z właściwymi dokumentami normalizacyjnymi w zakresie pomiarów jakości energii	
prof. dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka	10%	
dr inż. Andrzej Firlit	10%	
dr inż. Krzysztof Piątek	10%	
mgr inż. Krzysztof Chmielowiec	50%	
mgr inż. Paweł Balawender	20%	

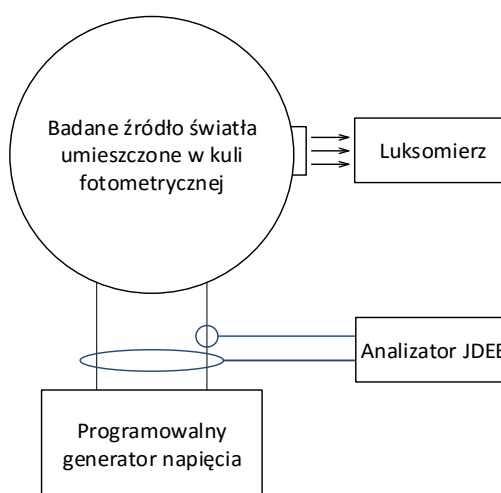
Załącznik B. Lista wykonawców eksperymentu pomiarowego w ramach Pikniku JEE



Imię i Nazwisko	Udział procentowy w opracowaniu procedury testowej, analizie danych pomiarowych oraz przygotowaniu raportu końcowego	
mgr inż. Krzysztof Chmielowiec	35%	
dr inż. Marek Rogóż	20%	
prof. dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka	10%	
dr hab. inż. Andrzej Bień, prof. AGH	10%	
dr inż. Andrzej Firlit	10%	
dr inż. Krzysztof Piątek	10%	
mgr inż. Krzysztof Woźny	5%	

Załącznik C. Efektywność energetyczna nowoczesnych źródeł światła

Badania zostały wykonane na grupie 27 świetlówek kompaktowych (tab. C.1) oraz 21 lamp LED (tab. C.2). Źródła światła zostały wybrane losowo z ogólnodostępnej partii produktów przeznaczonych do sprzedaży. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rysunku C.1. Badane źródło światła, znajdujące się w temperaturze pokojowej, umieszczono w zamkniętej kuli fotometrycznej, a następnie zasilono napięciem znamionowym 230 V, pochodzącym z programowalnego generatora NSG 1007. W układzie zainstalowany był analizator JDEE, służący do pomiaru parametrów elektrycznych (U , I , P) oraz luksomierz mierzący natężenie oświetlenia wewnątrz kuli fotometrycznej. Za wzorzec służący do wyznaczenia całkowitego strumienia świetlnego posłużyła żarówka o mocy 60 W, dla której przyjęto całkowity strumień świetlny $\psi = 700$ lm. W ramach badań poddano analizie: pobór mocy czynnej, własności dynamiczne strumienia świetlnego oraz skuteczność świetlną w ustalonym stanie pracy.



Rys. C.1. Układ pomiarowy do badań źródeł światła

Tab. C.1. Lista lamp CFL wykorzystanych do badań efektywności energetycznej

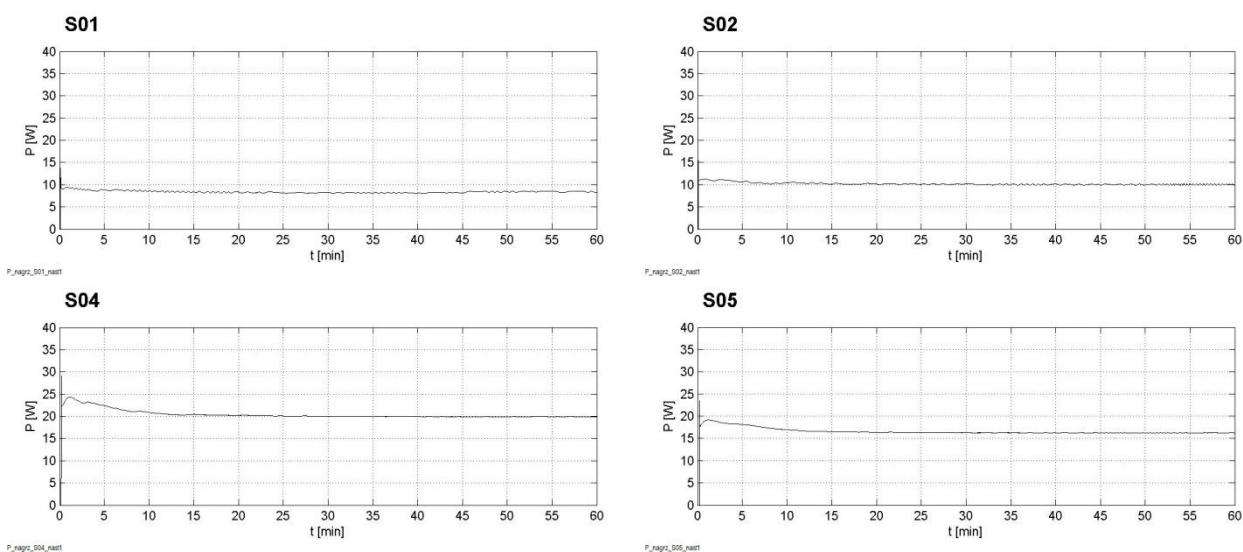
Oznaczenie	Producent	Model	P [W]	Oznaczenie	Producent	Model	P [W]
S01	CMI	---	9	S15	OSRAM	DIMMABLE	20
S02	CMI	---	11	S16	OSRAM	Energy Saver	22
S03	CMI	---	15	S17	Philips	Economy	9
S04	GE	EnergySaving	23	S18	Philips	Economy	11
S05	GE	EnergySaving	20	S19	Philips	Economy	14
S06	GE	EnergySaving	15	S20	Polux	---	30
S07	North-Star	classic 2U	15	S21	Polux	---	24
S08	OSRAM	DuluxLonglife	30	S22	Polux	---	20
S09	OSRAM	DuluxStar	24	S23	Polux	---	15
S10	OSRAM	DuluxStar	21	S24	Polux	---	13
S11	OSRAM	DuluxStar	17	S25	Polux	---	9
S12	OSRAM	DuluxStar	14	S26	SYLVANIA	Economy	15
S13	OSRAM	DuluxStar	11	S27	SYLVANIA	FAST-Start	15
S14	OSRAM	DuluxStar	8				

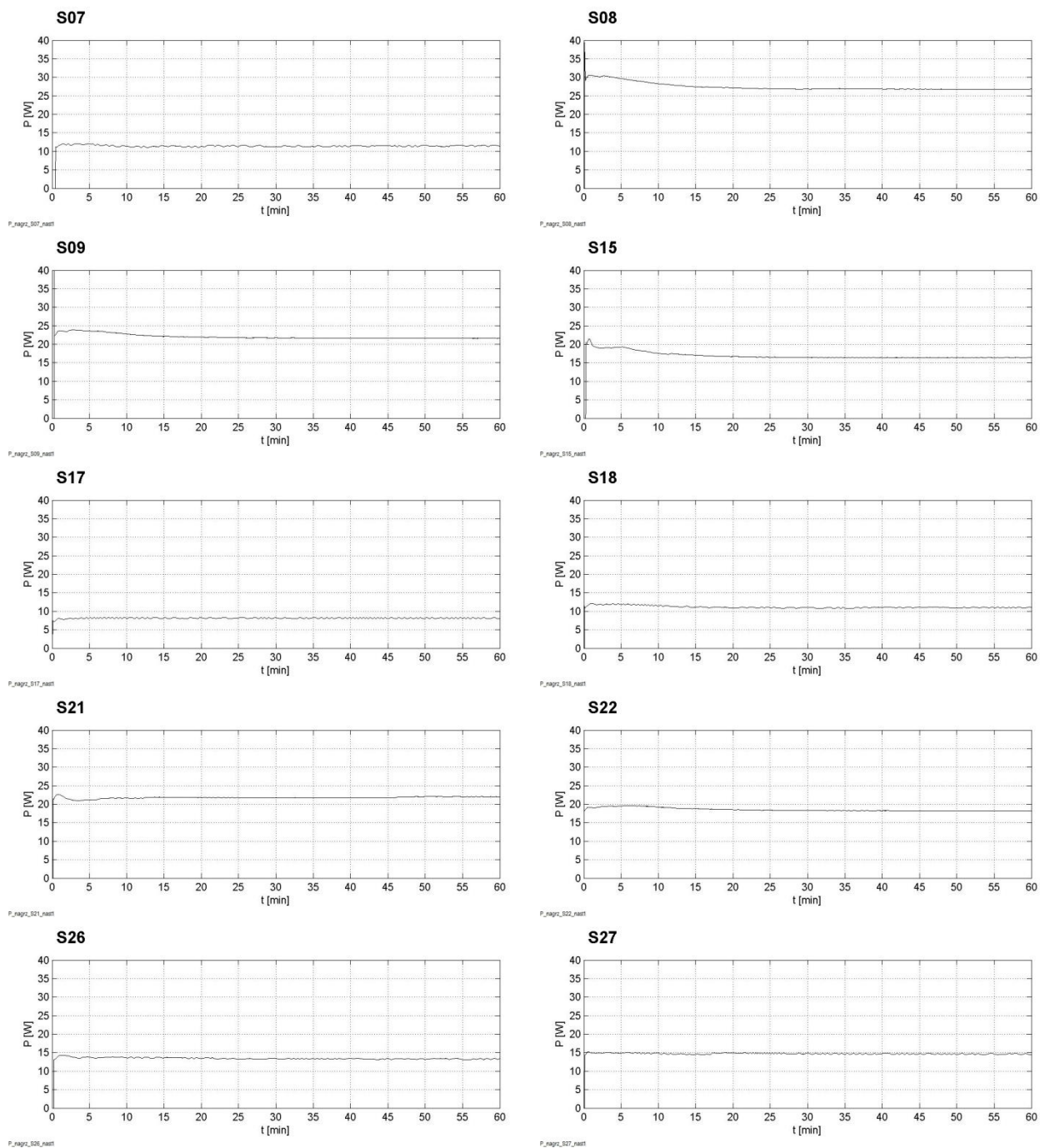
Tab. C.2. Lista lamp LED wykorzystanych do badań efektywności energetycznej

Oznaczenie	Producent	Model	P [W]	Oznaczenie	Producent	Model	P [W]
L01	ECO-LED	45 LED B50	2,3	L12	Kanlux	90 E27-WW	4,5
L02	ECO-LED	45 LED B50	2,3	L13	Kanlux	60 E27-WW	3,8
L03	ECO-LED	60 LED B60	3	L14	ECO-LED	A19 Multichip	7
L04	ECO-LED	60 LED B60	3	L15	Osram	LED Parathom	12
L05	ECO-LED	60 LED C35	3	L16	Osram	LED Parathom	2
L06	ECO-LED	60 LED C35	3	L17	ANS	classic LED	4,1
L07	ECO-LED	90 LED P55	4,5	L18	ANS	classic LED	4,3
L08	Kanlux	led36 E27-WW	2	L19	ANS	classic LED	6
L09	Kanlux	led48 E27-WW	3	L20	Philips	MyVision	9
L10	Kanlux	led54 E27-WW	6	L21	Philips	Econic	5
L11	Kanlux	86 E27-WW	10				

Moc czynna

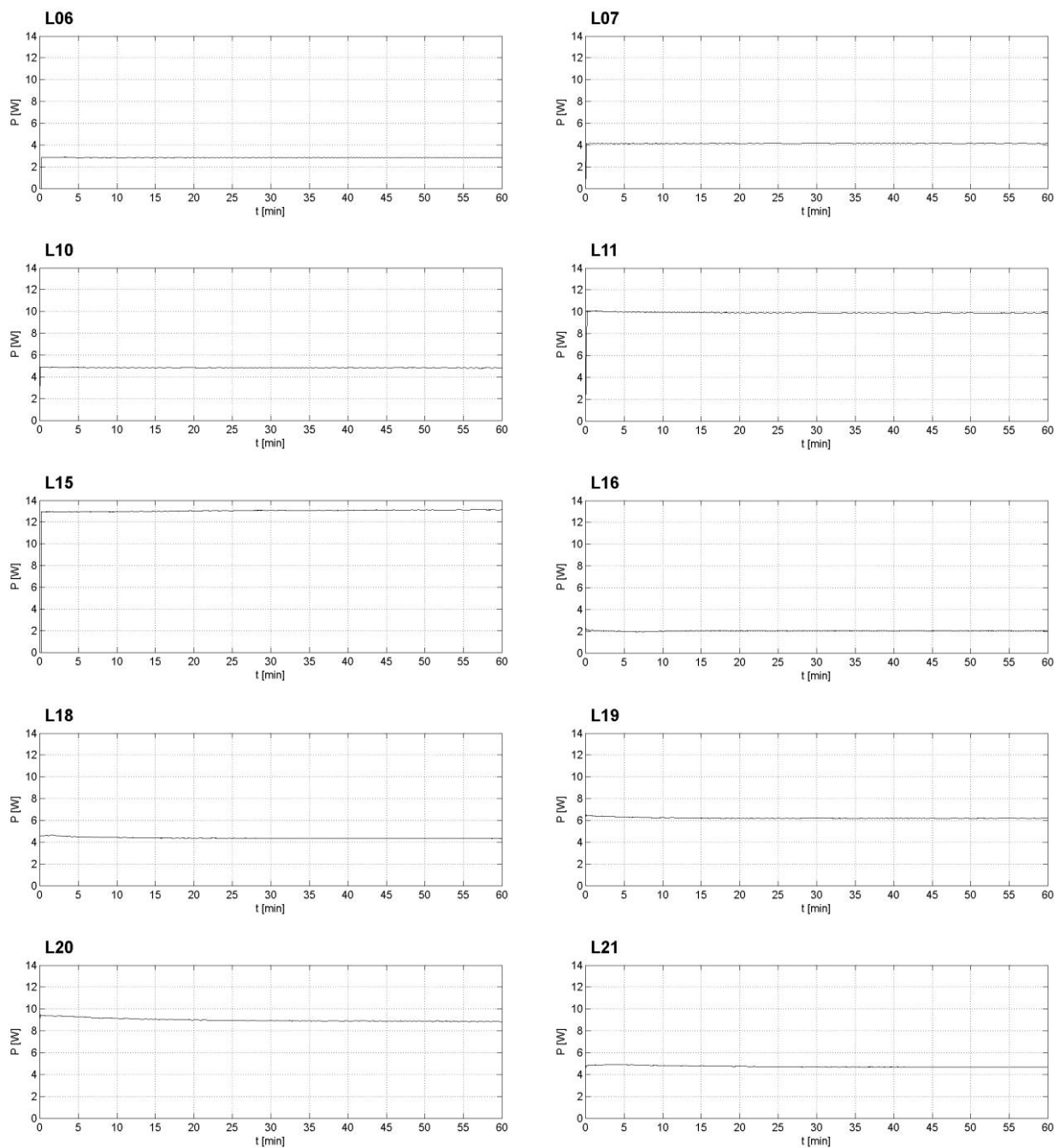
Z przebiegów mocy czynnej reprezentatywnego zbioru badanych świetlówek (rys. C.2) wynika, że praca świetlówki kompaktowej w pierwszych minutach po załączeniu może być zmienna i przeważnie charakteryzuje się zwiększonym poborem mocy (względem mocy w stanie ustalonym). Czas potrzebny do ustabilizowania warunków pracy wynosi nawet kilkanaście minut (np. S08). Analiza przebiegów pozwala na stwierdzenie, że w większości przypadków pracująca w stanie ustalonym świetlówka pobiera mniejszą moc od deklarowanej przez producenta. Przykładowo znamionowa moc świetlówki S15 wynosi 20 W podczas, gdy wynik pomiaru w stanie ustalonym wynosi mniej niż 17 W. Podobnie dla S04, gdzie różnica pomiędzy deklaracją producenta a mocą w stanie ustalonym utrzymywana jest na poziomie 3 W.





Rys. C.2. Przebiegi mocy czynnej badanych świetlówek

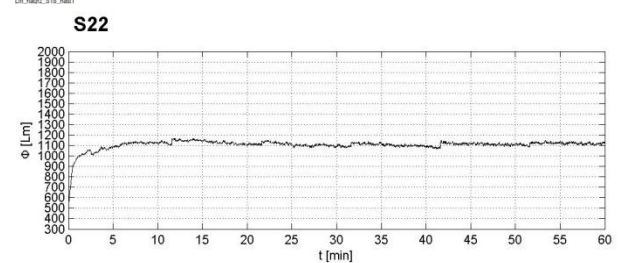
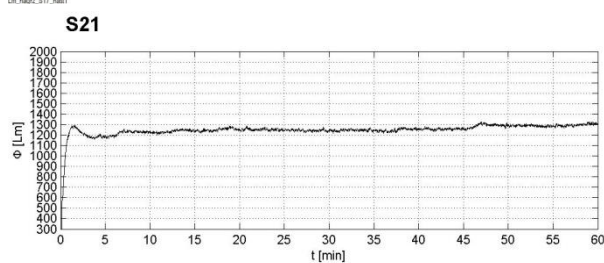
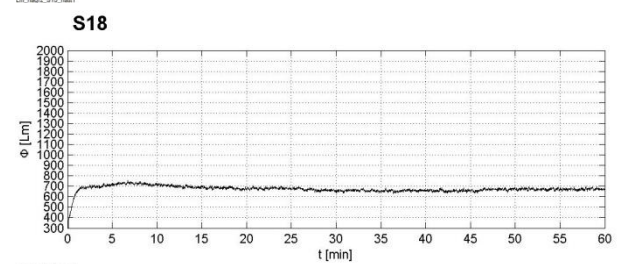
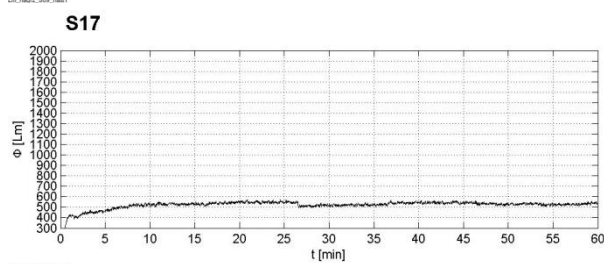
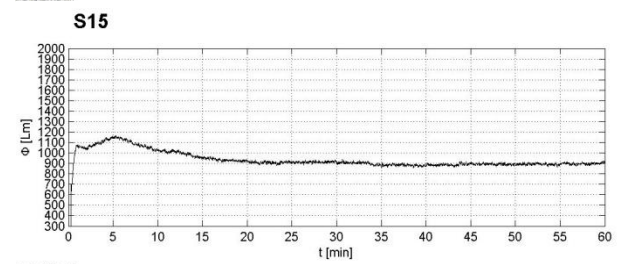
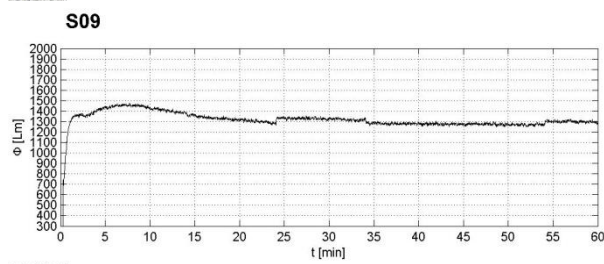
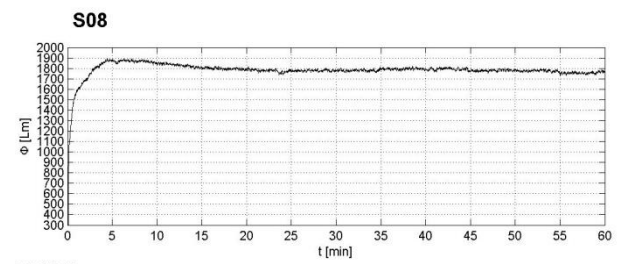
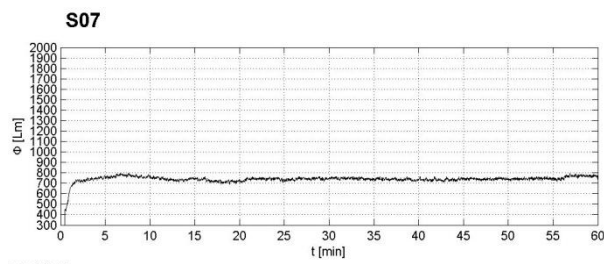
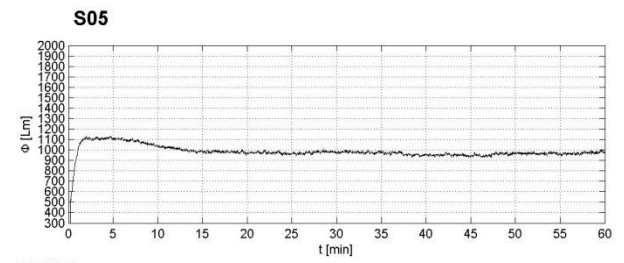
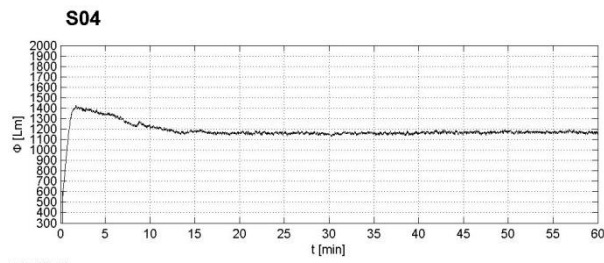
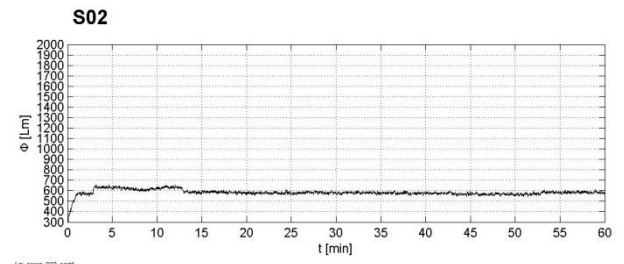
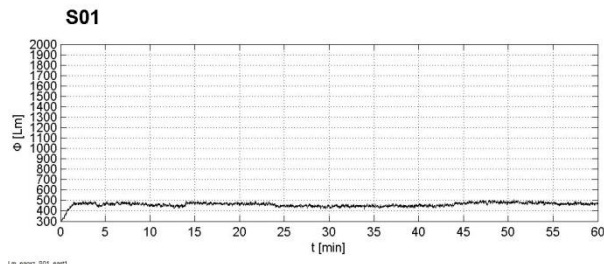
Z przebiegów mocy czynnej badanego zbioru lamp LED (rys. C.3) wynika, że ich praca w przeciwieństwie do świetlówki kompaktowej nie wymaga zwiększonej energii po załączeniu. Źródła te cechują się natychmiastowym osiągnięciem ustalonego poziomu mocy czynnej. Zaobserwowano natomiast, że pobierana moc czynna może różnić się od mocy deklarowanej przez producenta nawet o $\pm 15\%$ mocy znamionowej (np. L07, L10, L15).

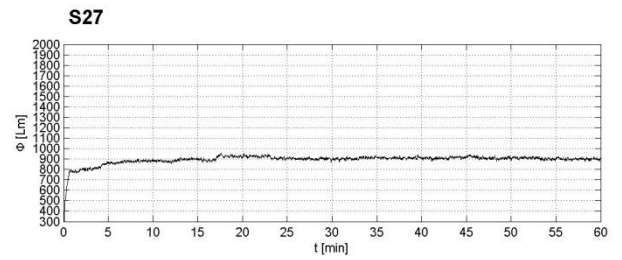
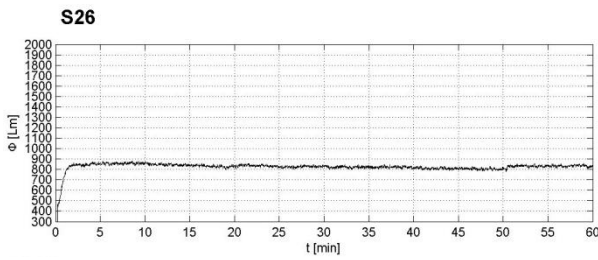


Rys. C.3. Przebiegi mocy czynnej badanych lamp LED

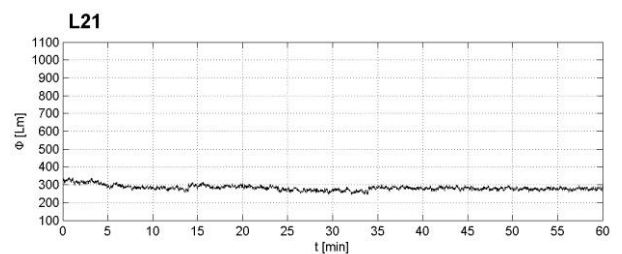
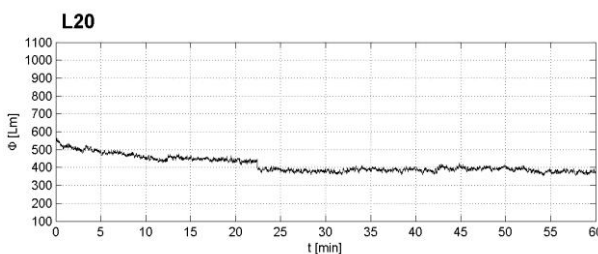
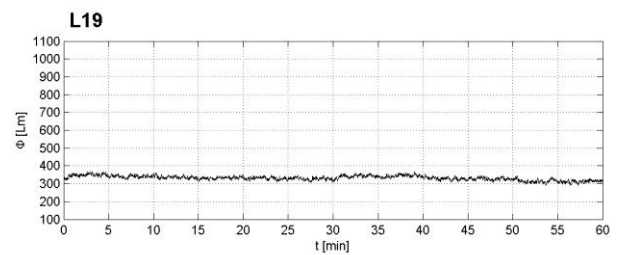
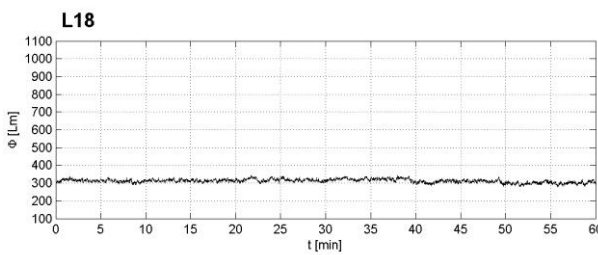
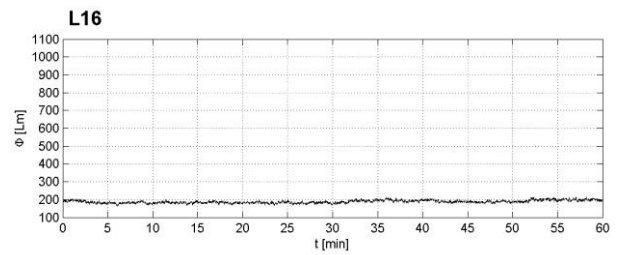
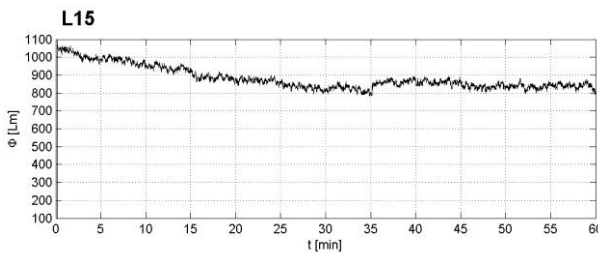
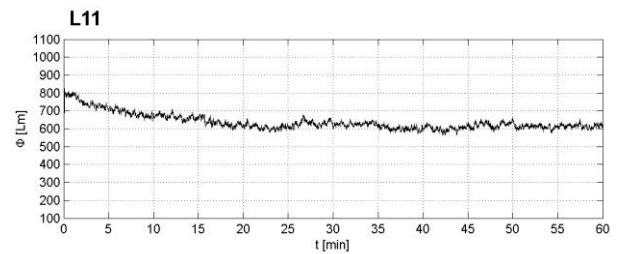
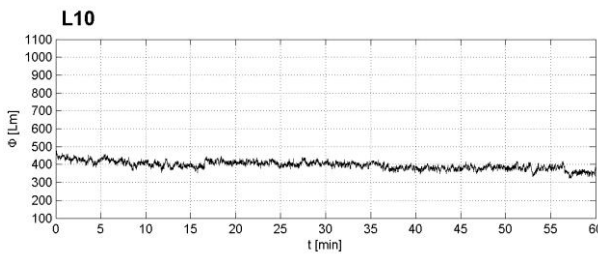
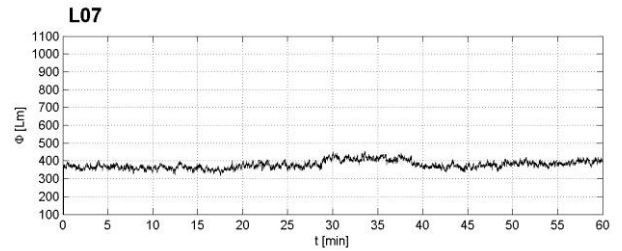
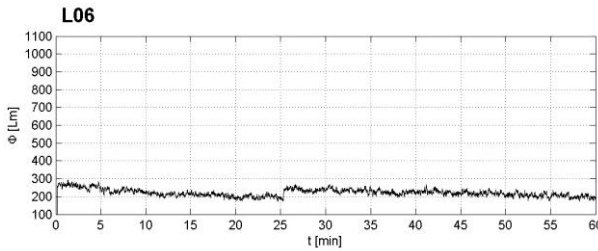
Całkowity strumień świetlny

Analizując przebiegi całkowitego strumienia świetlnego reprezentatywnego zbioru badanych źródeł światła (rys. C.4, rys. C.5) można stwierdzić, że w przypadku świetlówek kompaktowych ustalony strumień świetlny uzyskiwany jest z pewną zwłoką po podaniu zasilania. Średni czas uzyskania 90% strumienia świetlnego wyniósł 45 s (tab. C.3). W przypadku lamp LED znamionowa wartość strumienia świetlnego osiągniata była w czasie krótszym niż 1 s.





Rys. C.4. Całkowity strumień świetlny wybranych lamp CFL



Rys. C.5. Całkowity strumień świetlny wybranych lamp LED

Tab. C.3. Czas potrzebny do osiągnięcia 90% ustalonego strumienia świetlnego lamp CFL

Nr	$T_{90\%}$ [s]	Nr	$T_{90\%}$ [s]	Nr	$T_{90\%}$ [s]	Nr	$T_{90\%}$ [s]	Nr	$T_{90\%}$ [s]
S01	41	S06	1	S11	16	S16	25	S21	31
S02	46	S07	44	S12	40	S17	196	S22	1
S03	58	S08	65	S13	43	S18	41	S23	16
S04	35	S09	32	S14	114	S19	62	S24	1
S05	1	S10	1	S15	16	S20	164	S25	19

Skuteczność świetlna

Skuteczność świetlna jest jednym z podstawowych parametrów oceny pracy źródeł światła. Do jej wyznaczenia konieczna jest informacja o strumieniu świetlnym i mocy czynnej pobieranej przez badany obiekt. W tabelach C.4 oraz C.5 przedstawiono wyniki obliczeń skuteczności świetlnej (wyznaczonych dla ustalonego stanu pracy) wybranych świetlówek oraz lamp LED. Stwierdzono, że w grupie badanych źródeł światła, skuteczność świetlówek kompaktowych wyniosła średnio 61 lm/W, natomiast lamp LED 81 lm/W. Największą skuteczność świetlną równą 105 lm/W osiągnęła lampa L01, najmniejsza równą 45 lm/W osiągnęła lampa L20. Świadczy to o bardzo istotnych różnicach (rzędu 60 lm/W) w poziomie efektywności energetycznej pomiędzy różnymi modelami lamp LED.

Tab. C.4. Skuteczność świetlna badanych lamp CFL (ustalony stan pracy)

Nr	Ψ [lm/W]	Nr	Ψ [lm/W]	Nr	Ψ [lm/W]	Nr	Ψ [lm/W]	Nr	Ψ [lm/W]
S01	55	S06	62	S11	60	S16	62	S21	57
S02	58	S07	65	S12	60	S17	65	S22	60
S03	63	S08	66	S13	61	S18	60	S23	64
S04	59	S09	60	S14	63	S19	61	S24	54
S05	60	S10	60	S15	55	S20	65	S25	59

Wartość średnia: 61 lm/W, min 54 lm/W, max 66 lm/W.

Tab. C.5. Skuteczność świetlna badanych lamp LED (ustalony stan pracy)

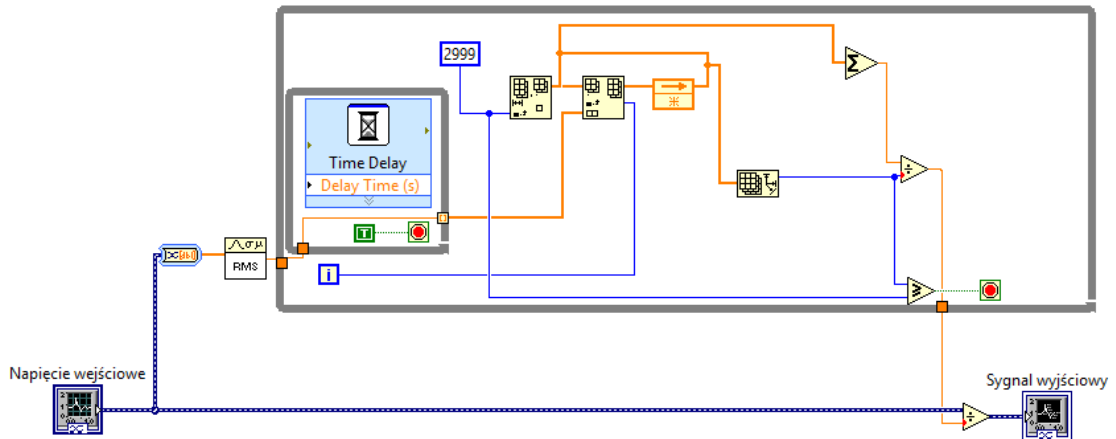
Nr	$T_{90\%}$ [s]	Nr	$T_{90\%}$ [s]	Nr	$T_{90\%}$ [s]	Nr	$T_{90\%}$ [s]
L01	105	L06	79	L11	64	L16	96
L02	90	L07	95	L12	97	L17	60
L03	86	L08	93	L13	92	L18	70
L04	93	L09	86	L14	84	L19	50
L05	81	L10	80	L15	65	L20	45

Wartość średnia: 81 lm/W, min 45 lm/W, max 105 lm/W.

Załącznik D. Realizacja programowa poszczególnych bloków modelu IEC miernika migotania światła

Blok 1 i 2 - Układ dopasowujący i demodulator

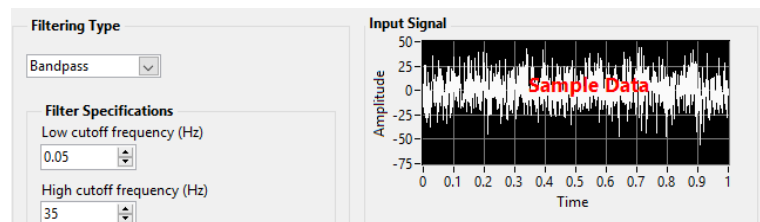
Obwód dopasowujący (rys. D.1) zawiera bufor kołowy typu FIFO (ang. *first in first out*) zbierający próbki *rms* (20 ms). Tworzą one wektor o maksymalnej długości N. W momencie osiągnięcia N próbek najstarsza próbka zostaje odrzucona, próbki przesunięte są o jeden indeks w dół, a nowa próbka zostaje zapisana, jako pierwsza (najnowsza). Co 1 minutę układ wyznacza średnią arytmetyczną elementów wektora, przez którą następnie dzielony jest sygnał wejściowy. Zadanie demodulatora realizowane jest przez funkcję podnoszenia do kwadratu.



Rys. D.1 Realizacja programowa układu dopasowującego

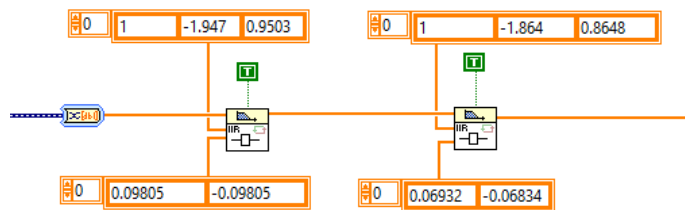
Blok 3 - Filtr pasmowo przepustowy i filtr ważony

Blok składa się z dwóch filtrów. Pierwszym z nich jest pasmowo przepustowy filtr 6. rzędu Butterwortha. Stosuję się go w celu wyeliminowania składowej stałej i składowych wyższych częstotliwości. Pasma przepustowości, wg zaleceń normy, to 0,05 Hz dla częstotliwości dolnej i 35 Hz dla częstotliwości górnej. Do realizacji tego elementu wykorzystany został dedykowany blok biblioteki *Signal Processing* środowiska LabVIEW (rys. D.2).



Rys. D.2 Realizacja programowa filtru pasmowo przepustowego

Drugim elementem jest filtr ważony (rys. D.3) zrealizowany w postaci dyskretnej.



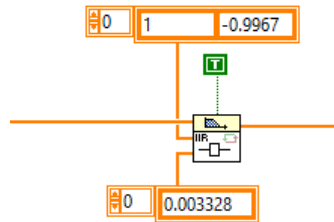
Rys. D.3 Realizacja programowa filtru ważonego

Blok 4 - Filtr dolnoprzepustowy, operator kwadratowy i wzmacniacz sygnału

Blok 4 składa się operatora podnoszącego do kwadratu, a także z filtra dolnoprzepustowego (rys. D4) o transmitancji:

$$F(s) = \frac{1}{1 + s\tau}$$

D.1

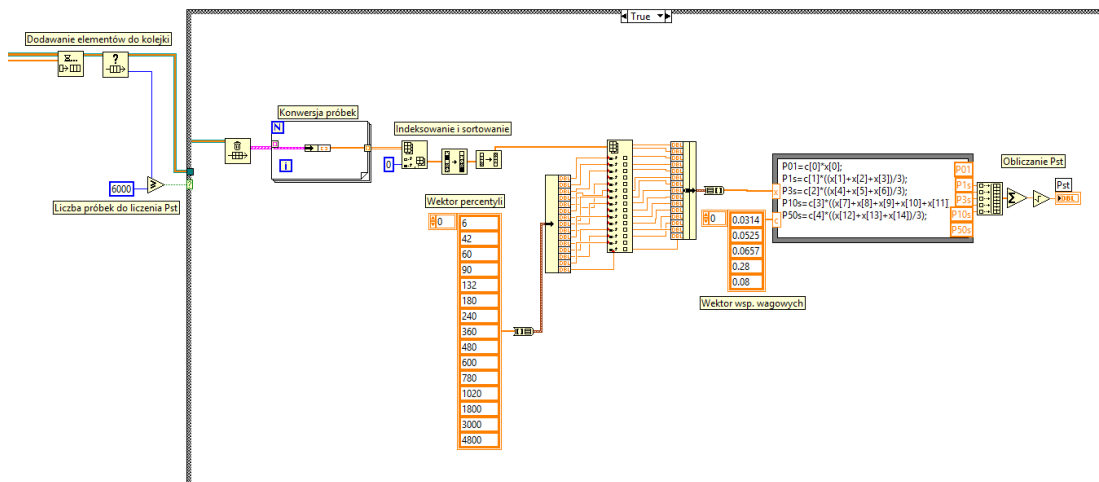


Rys. D.4 Realizacja programowa filtra dolnoprzepustowego

W skład bloku 4 wchodzi jeszcze wzmacniacz umożliwiający kalibrację miernika. Sygnałem wyjściowym bloku 4 jest współczynnik chwilowego migotania światła P_{inst} .

Blok 5 - Analiza statystyczna

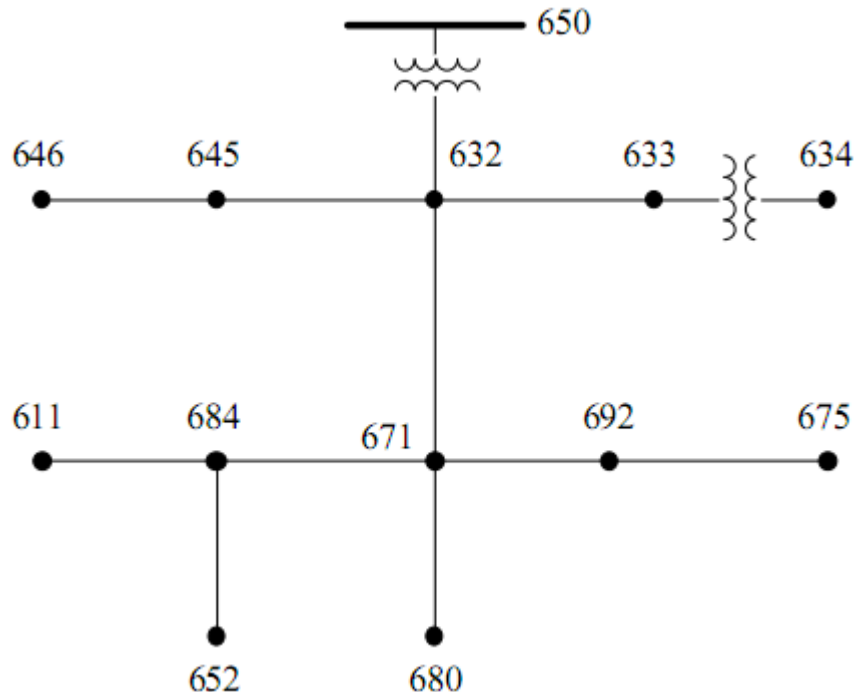
Analiza statystyczna pomiarów i wyznaczenie wartości P_{st} i P_{lt} stanowi ostatni element miernika. W tym celu tworzona jest kolejka z kolejnych próbek wartości średniej P_{inst} zbieranych co 0,1 sekundy. Jeśli ich liczba wyniesie 6000 (10 min) są one przetwarzane na wektor, sortowane, indeksowane, a następnie wykorzystywane do obliczenia wartości P_{st} . Wartość krótkookresowego migotania światła jest wyświetlana na panelu miernika dopiero po drugim pomiarze. Ze względu na czas stabilizacji filtrów pierwszy pomiar musi być odrzucony. Wartość współczynnika P_{lt} jest otrzymywana jako średnia arytmetyczna dwunastu próbek P_{st} .



Rys. D5 Realizacja programowa analizy statystycznej

Załącznik E. Model sieci testowej wykorzystanej do badań symulacyjnych lokalizacji źródeł wahań napięcia

Dla celów badań symulacyjnych wybrana została sieć dystrybucyjna średniego napięcia, składająca się z 13 węzłów bazująca na modelu IEEE 13 Node Test Feeder. Schemat ogólnej sieci IEEE 13 przedstawiono na rysunku E.1.



Rys. E.1 Schemat ogólnej sieci IEEE 13 Node Test Feeder

W skład modelu sieci wchodzi:

- Transformator zasilający 115/4,16kV,
- Linie kablowe i napowietrzne o określonych długościach i impedancjach,
- Transformator liniowy 4,16/0,48kV,
- Odbiorniki skupione w różnych konfiguracjach.

Sieć została odwzorowana za pomocą elementów biblioteki SimPowerSystem (Simulink). Budując model sieci zastosowano następujące zmiany względem [30]:

1. Z uwagi na brak dostępu do danych znamionowych amerykańskich transformatorów wykorzystano parametry schematu zastępczego dla urządzeń europejskich 115/6,3kV i 6,3/0,42kV;
2. Zastosowano głównie odbiorniki trójfazowe;
3. Pominięto wyłącznik pomiędzy węzłami 671-692 (pracuje jako zwarcie) gdyż zmiany konfiguracji sieci związane z jego działaniem nie były przedmiotem badań. Ponadto, model wyłącznika znacząco ogranicza bufor pamięci środowiska Simulink, niezbędnej do wykorzystania przy implementacji algorytmów lokalizacyjnych;
4. Dołączono dodatkowe odbiorniki o obciążeniu zmiennym;
5. Parametry odcinków linii zostały przeliczone z postaci macierzy impedancji własnych (\underline{Z}_{3ph}) na postać impedancji dla składowych symetrycznych ($\underline{Z}_{\theta 12}$) [33]. Zmiana była podyktowana wymogami modelu linii (typu π) dostępnym w pakiecie Simulink;

$$\underline{Z}_{012} = \underline{S}^{-1} \cdot \underline{Z}_{3ph} \cdot \underline{S} \quad (E.1)$$

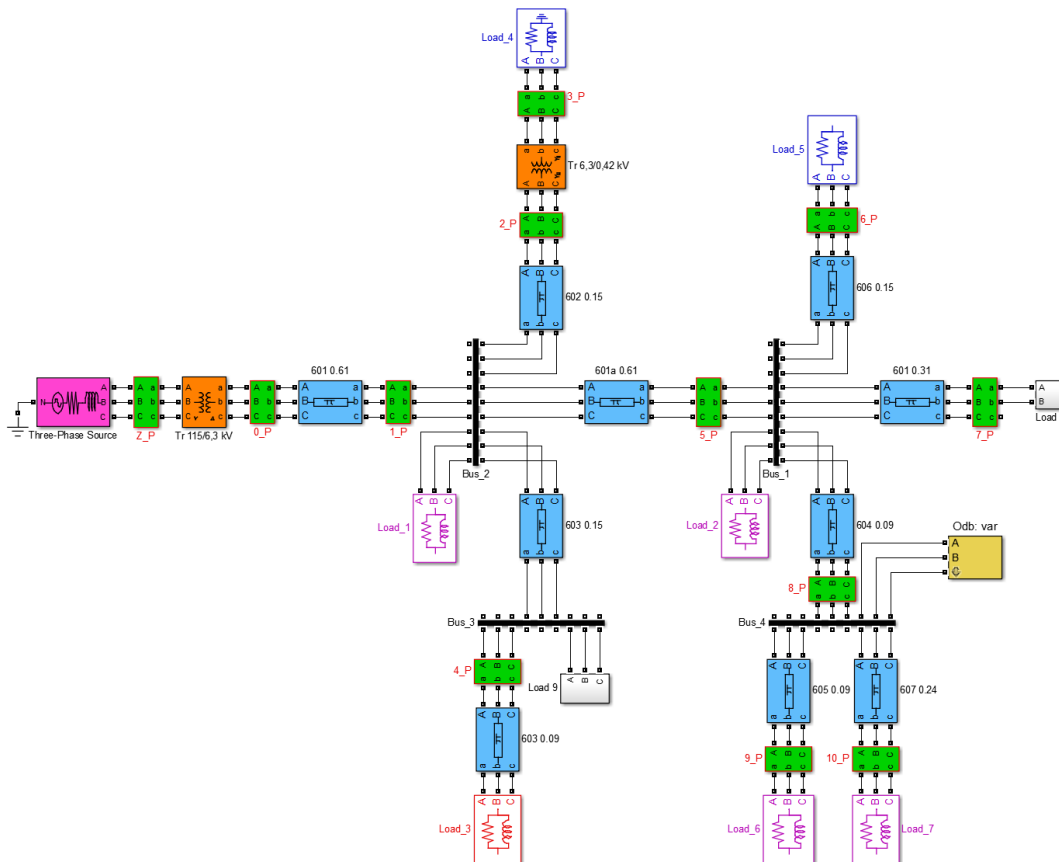
gdzie:

$$\underline{Z}_{3ph} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix}; \underline{S} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}; \underline{S}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}; a = e^{-j120^\circ}$$

Po zastosowaniu wymienionych przekształceń, otrzymuje się macierz diagonalną impedancji dla trzech składowych: zerowej (\underline{Z}_0), zgodnej (\underline{Z}_1) i przeciwnej (\underline{Z}_2):

$$\underline{Z}_{012} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_2 \end{bmatrix} \quad (E.2)$$

Schemat symulacyjny wykonany w Matlab/Simulink został przedstawiony na rysunku E.2.



Rys. E.2 Model sieci IEEE 13 Node Test Feeder w środowisku Matlab/Simulink

Listing parametrów obiektów zastosowanych w sieci IEEE 13

```

Parametry znamionowe sieci
f=50;
Un = 115e3;
UnSN=6300/sqrt(3);
UnnN=420/sqrt(3);
Parametry źródła Sk = 100e6; X/R = 10;
TRANSFORMATOR T1
Pn = 25e6;
napiecie strony GN
U1_1 = 115e3;
rezystancja GN
R1_1 = 1.43;
indukcyjnosc GN
L1_1 = 9.94e-2;
napiecie strony DN

```

```

U2_1 = 6.3e3;
rezystancja DN
R2_1 = 4.28e-3;
indukcyjnosc DN
L2_1 = 2.98e-4;
rezystancja magnetyzacji
Rm = 549896.05;
indukcyjnosc magnetyzacji
Im = 990.53;
TRANSFORMATOR T2
Pn_2 = 400e3;
napiecie strony GN
U1_2 = 6.3e3;
rezystancja GN
R1_2 = 0.57;

```

indukcyjność GN
 $L_{1_2} = 7.11e-3$;
 napięcie strony DN
 $U_{2_2} = 400$;
 rezystancja DN
 $R_{2_2} = 2.3e-3$;
 indukcyjność DN
 $L_{2_2} = 2.86e-5$;
 rezystancja magnetyzacji
 $R_{m_2} = 65065.57$;
 indukcyjność magnetyzacji
 $L_m = 52.64$;
 LINIE
 ODCINEK 650-632
 $L_{1_1} = 0.61$ km
 rezystancja dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $r_{1_1} = 0.1153$; $r_{0_1} = 0.4057$;
 indukcyjność dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $l_{1_1} = 0.001$; $l_{0_1} = 0.0031$;
 pojemność dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $c_{1_1} = 1.20e-8$ $c_{0_1} = 5.44e-9$
 ODCINEK 632-671
 $L_{1_2} = 0.61$ km
 rezystancja dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $r_{1_2} = 0.1153$; $r_{0_2} = 0.4057$;
 indukcyjność dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $l_{1_2} = 0.001$; $l_{0_2} = 0.0031$;
 pojemność dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $c_{1_2} = 1.20e-8$ $c_{0_2} = 5.44e-9$
 ODCINEK 671-680
 $L_{1_3} = 0.31$ km
 rezystancja dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $r_{1_3} = 0.1153$; $r_{0_3} = 0.4057$;
 indukcyjność dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $l_{1_3} = 0.001$; $l_{0_3} = 0.0031$;
 pojemność dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $c_{1_3} = 1.20e-8$; $c_{0_3} = 5.44e-9$;
 ODCINEK 632-633
 $L_{1_4} = 0.15$ km
 rezystancja dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $r_{1_4} = 0.3677$; $r_{0_4} = 0.6581$;
 indukcyjność dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $l_{1_4} = 0.00125$; $l_{0_4} = 0.00341$;
 pojemność dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $c_{1_4} = 0.11e-7$; $c_{0_4} = 0.05e-7$;
 ODCINEK 632-645
 $L_{1_5} = 0.15$ km
 rezystancja dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $r_{1_5} = 0.5065$; $r_{0_5} = 0.6349$;
 indukcyjność dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $l_{1_5} = 0.00123$; $l_{0_5} = 0.00199$;
 pojemność dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $c_{1_5} = 0.56e-8$; $c_{0_5} = 0.42e-8$;
 ODCINEK 645-646
 $L_{1_6} = 0.09$ km
 rezystancja dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $r_{1_6} = 0.5065$; $r_{0_6} = 0.6349$;

indukcyjność dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $l_{1_6} = 0.00123$; $l_{0_6} = 0.00199$;
 pojemność dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $c_{1_6} = 0.56e-8$; $c_{0_6} = 0.42e-8$;
 ODCINEK 671-675
 $L_{1_7} = 0.15$ km
 rezystancja dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $r_{1_7} = 0.3027$; $r_{0_7} = 0.8762$;
 indukcyjność dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $l_{1_7} = 0.68e-3$; $l_{0_7} = 0.77e-3$;
 pojemność dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $c_{1_7} = 0.16e-6$; $c_{0_7} = 0.16e-6$;
 ODCINEK 671-684
 $L_{1_8} = 0.09$ km;
 rezystancja dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $r_{1_8} = 0.5065$; $r_{0_8} = 0.6349$;
 indukcyjność dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $l_{1_8} = 0.00123$; $l_{0_8} = 0.00199$;
 pojemność dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $c_{1_8} = 0.9926e-7$; $c_{0_8} = 0.9926e-7$;
 ODCINEK 684-611
 $L_{1_9} = 0.09$ km;
 rezystancja dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $r_{1_9} = 0.2751$; $r_{0_9} = 0.2752$;
 indukcyjność dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $l_{1_9} = 0.74e-3$; $l_{0_9} = 0.74e-3$;
 pojemność dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $c_{1_9} = 0.25e-8$; $c_{0_9} = 0.25e-8$;
 ODCINEK 684-652
 $L_{1_10} = 152.4e-4$;
 rezystancja dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $r_{1_10} = 0.2779$; $r_{0_10} = 0.2779$;
 indukcyjność dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $l_{1_10} = 0.28e-3$; $l_{0_10} = 0.28e-3$;
 pojemność dla składowej zgodnej oraz
 zerowej
 $c_{1_10} = 0.49e-7$; $c_{0_10} = 0.49e-7$;
 %ODBIORNIKI
 %632
 $P=140e3$; $Q1=142.82e3$;
 %634
 $P=70e3$; $Q1=71.41e3$;
 %645
 $P_{L1} = 100e3$; $Q1_{L1} = 50e3$;
 $P_{L2} = 100e3$; $Q1_{L2} = 40e3$;
 $P_{L3} = 30e3$; $Q1_{L3} = 10e3$;
 %646
 $P = 44.1e3$; $Q1 = 44.99e3$;
 %671
 $P = 140e3$; $Q1 = 142.83e3$;
 %675
 $P = 70e3$; $Q1 = 71.41e3$;
 %680
 $P_{L1} = 200e3$; $Q1_{L1} = 100e3$;
 $P_{L2} = 100e3$; $Q1_{L2} = 50e3$;
 %611
 $P = 140e3$; $Q1 = 142.82e3$;
 %652
 $P = 70e3$; $Q1 = 71.41e3$;
 $P = 140e3$;
 $Q1 = 142.82e3$;

Załącznik F. Wniosek projektowy DERri wraz z oceną komitetu ewaluacyjnego

TEMPLATE FOR PROPOSAL UNDER DERri

User-Project Proposal:

User-Project Acronym	SPS-LPQDS
User-Project Title	Single Point System for Location of Power Quality Disturbance Sources
Main-scientific field	Power Engineering
Specific-Discipline	Power Quality

Project Leader of the Proposing Team:

Name	Krzysztof Chmielowiec
Organization name, web site and address	AGH – University of Science and Technology www.agh.edu.pl Mickiewicz av. 30, Krakow 30-059 Poland
Activity type and legal status of Organization	Higher Education Institution
Position in Organization	Research/Teaching Assistant

Summary of proposed research (about ½ page)

In recent years the preservation of adequate electrical quality has become a major problem when operating the electrical power grid as well as power distribution sources and loads. The reasons may include increase of requirements relating to the quality of power supply for susceptible groups of loads e.g. advanced power electronic drives and greater costs resulting from poor quality of power delivery. Nowadays industrial plants with highly automated production lines cannot operate properly without sustainable power supply with the precisely defined power quality parameters. This situation is going to be more difficult as power grid becomes no longer centralized, but with increasing saturation of energy sources and storage units classified as distributed energy resources (DER). On the one hand DER are experiencing the effect of poor power quality at the connection point, on the other, they themselves have a major impact on the supply parameters. An example is the wind farm, whose nature of electricity production has an impact on the level of voltage fluctuations. The same farm experiences adverse effects in case of e.g. voltage dip caused by short-circuit at another point in the grid.

Taking the above-mentioned issues into account there appear a need for fast and reliable method of location of power quality disturbances, in order to:

- a) point out and eliminate their sources from the power system e.g. by disconnecting them,
- b) determine who should bear the costs associated with particular disturbance,
- c) determine the need and place of deployment of compensation devices.

The proposed project aims this need by developing the reliable algorithms of localisation of power quality disturbances sources based on measurement in one point of common coupling (PWP). Such product could be used in distributed generation systems as a very useful tool to judge which side is responsible for

injecting disturbances into the grid, consumer or supplier. This task requires a number of computer simulations (whose part of them are already done), and laboratory tests on various power system topologies to confirm the correctness of the method and face the problems which can be encountered in real systems. Authors would like to focus on the topology of distributed energy systems as a future of the European smart grid.

The expected outcome is the single point localisation system ready to be adapted to power quality analyser Certan PQ-100 which was developed in collaboration with AGH – University of Science and Technology, one PhD thesis and four MSc theses.

The proposed project will be consulted on a regular basis with the power quality expert professor Zbigniew Hanzelka from AGH Kraków.

State-of-the-Art (about 1 ½ page)

Describe in brief (in about 1½ pages) the current knowledge on the subject, citing recent relevant references. Identify any knowledge gaps and their relevance.

Single point methods for localization of disturbances are algorithms which, based on entered information about the system parameters and known (measured) values of voltage and current at the measuring point, determine whether the disturbance source is “upstream” or “downstream” the measuring point. Such algorithms are to be implemented in the power quality analyser, expanding the scope of its functionality. The proposed project includes developing localization algorithms for the following: voltage dips, fluctuations and harmonics.

The procedure of locating a **voltage dip** source generally involves two stages. First part is related with determining the place of dip source in system (downstream or upstream of the measuring point). In the second stage, specified algorithm computes precisely the location. Currently available methods of dip location do not guarantee 100% reliability. There are some approximate ways in use. They are based on analysis of voltage and current waveforms, direction of power flow during short circuit [1, 3], analysis of voltage change [2], voltage asymmetry during a dip [4].

Identification the source of **voltage fluctuations** is easy as long as there exist only one dominant source in system – flicker level is depended only on working pattern of this dominant load. The situation, however, rarely occurs in distributed generation systems. Practically, in the most cases, there are several loads mutually influencing the voltage in a point of the system and therefore flicker level can be attenuated or amplified by mutual interaction of the loads. Consequently, the task of locating the dominant flicker source is much more complicated. Localisation of flicker sources involves e.g. time correlation of flicker severity and loads operation, correlation of voltage rms, current rms, active or reactive power with flicker severity [5], identification of interharmonic power direction or interhamonic source identification [6].

There are many methods to assist in the location of the dominant source of **voltage distortion**. The most popular are based on a study of active power flow direction [7, 8, 9, 10], while other methods are based on a study of reactive power flow [11], determining the relative value of the voltage and current [3, 8], test voltage indicator [13, 14, 8, 15], or so-called critical impedance determination [16]. These methods are technically complex and require precise information about the circuit and values of equivalent parameters of the analysed system. In most cases, information on these impedances are difficult or expensive to obtain.

Most of these methods have not been practically tested in a comprehensive manner so far. There are a little information about the possibility of their implementation and use in measurements of power quality. Authors of the proposal are familiar with most of the localisation methods – brief survey is presented in [17] and authors of the proposal took part in preparation of the chapter.

References

- [1] Li, C., Tayjasanant, T., Xu W., Liu X.: A method for voltage sag source detection by investigating slope of the system trajectory, *IEEE Proceedings on Generation Transmission & Distribution*, 150, 3, 2003 pp.367-372.
- [2] *The 12th ICHQP Tutorial*, Portugal, October 1, 2006.
- [3] Pyzalski T., Wilkosz K.: Critical analysis of approaches to localisation of harmonic generation, *Electrical Power Quality and Utilisation*, Cracow, Sep. 17-19.2003.
- [4] Pradhan A.K, Routray A., Madhan S.: Fault direction estimation in radial distribution system using phase change in sequence current, *IEEE Tran, on Power Delivery*, 22, 2007, pp. 2065-2071.
- [5] Nassif A., Nino E., Xu W.: A V-I slope based method for flicker source detection, *Annual North American Power Symposium*, Edmonton (Canada), October 2005, 0-7803-9255-8/2005 IEEE.
- [6] Nassif A., Zhang D., Xu W.: Flicker source identification by interharmonic power direction, *IEE CCECE/CCGEI'2005 International Conference*, Saskatoon (Canada), May 2005, 0-7803-8886-0/2005/IEEE.
- [7] Chang G. W., Chen C. I., Teng Y. F.:An application of radial basic function neural network for harmonic detection, 978-1-4244-1770-4 / 08,2008 IEEE.
- [8] Pyzalski T.: Localisation of harmonic sources in a power system, Ph.D. dissertation, Wroclaw University of Technology, 2006.
- [9] Xu W., Liu Y.: A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 15, 2, 2000.
- [10] Xu W., Liu X., Liu Y.: An investigation on the validity of power direction method for harmonic source determination, *IEEE Trans. Power Delivery*, 18, 1, 2003, pp. 214-219
- [11] Li C., Xu W., Tayjasanant T.: A critical impedance based method for identifying harmonic sources, *IEEE Transaction on Power Delivery*, 19, 1, April 2004.
- [12] Technical specification, 1133A Power Sentinel™, Arbiter Systems.
- [13] Pyzalski T., Wilkosz K.: Critical analysis of approaches to localisation of harmonic generation, *Electrical Power Quality and Utilisation*, Cracow, Sep. 17-19, 2003.
- [14] Pyzalski T., Wilkosz K.: New approach to localisation of harmonic sources in a power, *Electrical Power Quality and Utilisation*, Cracow, Sep. 17-19, 2003.
- [15] Wilkosz K.: A generalized approach to localisation of sources of harmonics in a power system, *13th ICHQP*, Australia, 2008.
- [16] Chen C., Liu X, Koval D., Xu W., Tayjasanant T.: Critical impedance method - a new detecting harmonic sources method in distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19, 1, January 2004.
- [17] Hanzelka Zbigniew, Piątek Krzysztof et al. "Single-Point Methods for Location of Distortion, Unbalance, Voltage Fluctuation and Dips Sources in a Power System", chapter in "Power Quality – Monitoring, Analysis and Enhancement," edited by Ahmed Zobaa, Mario Mañana Canteli and Ramesh Bansal, ISBN 978-953-307-330-9, InTech, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, available at www.intechopen.com

Detailed Description of proposed project : Objectives – Expected Outcome – Fundamental Scientific and Technical value and interest

Provide a detailed description of the objectives of the proposed activity, the way these objectives will be

fulfilled through the proposed work,

The research formulated in this proposal is supposed to be the part of a larger project aimed at building a new type power quality analyser equipped with additional features, unique in other measuring devices currently available on the European market. Among these new functionalities there are algorithms for detection and localisation of sources of power quality disturbances (voltage dips, fluctuations and harmonics) which can be applied in distributed generation systems. Hardware part and basic functionality of the measuring device Certan PQ-100 is already done by AGH in collaboration with Procom System company www.procomsystem.pl, current development is focused on implementing new functions.

To define the reliable methods for localisation of power quality disturbances it is necessary to conduct both simulation and practical tests. The first ones are currently under authors' investigation and show that methods presently available in publications can give different results when used in the same conditions. Some methods have their limitations i.e. operate properly within the specified range, while beyond do not. Some of them are simpler and base only on the voltage and current measurement information, while others need additional information about the system, e.g. impedance values.

Because of such differences of results between individual methods it is necessary to propose a new methodology which could take advantages from available solutions and in this way obtain the most reliable localisation result. For this purpose authors want to choose laboratory infrastructure from Centre for Development and Demonstration of DER technologies (TECNALIA-Lab) and use available there microgrid system to simulate power quality disturbances coming from different nodes and with presence of various types of distributed generation units and loads. The whole system will be monitored in integral points (their number will be dependent on how large the system is) by available on site measuring equipment including power quality analysers. Obtained data will be used as a learning set for artificial intelligence network in order to possible application in localisation system.

The sequence of research include measurements on 3-phase system with different levels of complexity, starting from simple Thevenin equivalent circuit, through introduction new generation units and various types of loads, to finally measurements on the microgrid with renewable energy sources connected. In described system voltage disturbances will be inducted using programmable power source, switching of large loads or planned short-circuits. Simultaneous data processing will be done to direct the way of changing system during each measuring session and to correct possible faults.

Authors want to hold three approx. 7 working days (see *time schedule*) measuring sessions separated by longer periods of time (approx. 1.5 month and 2.5 months before the second and third measuring session respectively) for data processing and possible modification of the next steps. The last visit to laboratory is intended for tests of already done localisation system.

as well as indications on the expected outcome and the fundamental scientific and technical value and interest of the proposal.

The expected outcomes of the research proposal are:

- a) localisation system with confirmed reliability in order to adapt in power quality analyser class A (main goal),
- b) comparison of available methods with determining the scope of appliance and estimating their reliability
- c) wide measuring database describing distributed system behaviour and propagation of power quality disturbances (used in further research in the optimal deployment of the PQ analysers).
- d) one PhD and four MSc theses

Authors work in the area of power quality and experienced a large market needs for this type of solutions which are one of the currently main priorities of the manufacturers of the power quality analysers.

Specify the type of TA infrastructure (distributed generation simulator; domestic house; etc.) and the test setup. With the understanding that these aspects will be discussed with the TA infrastructure after approval of the proposal and specified in the Agreement to be signed between the TA infrastructure and the User team, indicate the number of tests to be carried out and their sequence, the response quantities to be measured through the instrumentation, etc.

Proposed tests can be divided into two main parts – each focused on a different power system architecture. The main idea is to record system parameters and power quality parameters in measuring point when voltage disturbance occurs. This recording should be done in as many as possible system modifications made by using different voltage source parameters (i.e. levels of angles of individual harmonics, sinusoidal and rectangular voltage modulation), variable “supplier” and “customer” impedances, three or four-wire system, one or more generation units, etc.

The first set of tests is based on Thevenin equivalent circuit which is treated as a simplified model of power system. It was chosen due to the fact that the circuit is used in theoretical derivation and analysis of localisation methods. The model is also easy to build in laboratory environment and its behavior is easy to control and predict. The intention is to start tests with simplified model so the results could be easily compared with the computer simulation. In this test the supplier side will be simulated by programmable power source while customer side by programmable passive load or another programmable power source (if it is available). The number of this circuit combinations and measurements is difficult to estimate but it can be assumed as more than 100 for each disturbance type. The number of measuring points will depend on circuit complexity (number of grid impedance steps and measuring units) and will not be less than 3 points. In this part it will be possible to eliminate errors in the technique of research, measurements and check the correlation between simulation methods (which will be done simultaneously).

The second set of tests are intended to simulate behaviour of voltage disturbances in networks of different topologies which also contain DER. The main idea is to build physical network model using laboratory equipment and apply selected disturbance localisation method to determine the voltage disturbance source. Detailed topologies and test procedures will be proposed after finishing the first set of test and will take into account equipment capabilities and achieved results. Other possible topologies involve using a wind turbine model and programmable supply source to simulate voltage fluctuation in weak power network with DER. A localisation method in this case should distinguish impact of the wind turbine from a load on voltage fluctuation.

Describe any special requirements for equipment, standards, safety measures, etc. Point out any shortcomings, uncertainties and risks for the fulfillment of the project objectives, as well as the means to mitigate relevant risks.

Since some of the considered methods use impedance values in their calculations, it will be necessary to receive the information about impedances of every components of microgrid system installed in the laboratory. Authors do not plan to perform impedance measurements on site. These information are needed to be known in order to use them in computer simulations. Authors will also request for additional information about microgrid topologies, possible to built using the laboratory equipment.

As was observed there might be a problem with number of measuring devices. There are three PQ analysers listed while we could be need to use more than five in order to measure in different points simultaneously. Authors are aware that there might be necessary to bring their own measuring instruments.

One of the problems that might be faced is inaccuracy in measuring instruments readings, particularly in measurement of phase angles of voltage harmonics. Authors encountered such a problem in previous measurements when different PQ analysers shown different angle values. The way to detect this situation is to first of all make a measurement on a simple circuit and compare with simulation results.

Originality and Innovation of proposed research – Broader Impact

Demonstrate the originality and innovation of the proposed work and the impact the expected results will have on current and future research or practice, public safety, European standardization, competitiveness, integration and cohesion and on sustainable growth.

The issue raised in the present project is relatively new and has not been entirely recognized yet. However, it arouses the interest of scientists and especially power system engineers because recognizing the party responsible for emission of disruptions in the power system often causes disputes between a power supplier and a power consumer. It is an expensive and time-consuming process for both sides and this problem will arise when more distributed generation units will be connected to the power system. Fast localisation of disturbances, based on information from dispersed PQ analysers and power meters, may be the crucial factor in order to maintain grid stability.

This subject is innovative, since there is not any other such a comprehensive study concentrated on the issue of disturbances localisation. There are many methods described, which make possible to point the disturbance culprit, however the majority of them is only confirmed in simulation. Moreover there has never been any comparative analysis carried out. Therefore it would be a significant facilitation for the parties of dispute to use an instrument (power quality analyser), which would indicate the source of disruption on the basis of registered data. Such instrument with proposed algorithms would be a novelty on a world and European scale. What should be underlined is that this subject is now becoming a hot topic among the manufacturers of measuring equipment because actually there is a strong customer's need. Deregulation of the electricity market led both energy supplier and customer to be interested in energy unambiguous determination of responsibility for the quality of energy in the point of common coupling (reference point).

It should be also emphasised that the awareness of being localised and accused of generating grid interferences is the main driving force behind the development of technology aimed at improving power quality parameters in points of common coupling between energy supplier and customers.

Proposed Host TA Infrastructure/Installation – Justification

Specify the type of TA infrastructure (e.g. distributed generation simulator; domotic house; etc.) and if possible which one of the 13 TA Infrastructures in DERri may better serve the scope of the proposed research. Justifications should be provided on the grounds of the test set-up, testing method, equipment, past experience in relevant subject, etc. State whether the TA User team intends to deliver to the premises of the TA Infrastructure parts or components to be tested at the TA User's expense and responsibility, or to cover the whole or part of the construction/adaptation cost of the specimens to be tested.

After analysing equipment of the laboratories participating in DERri project authors want to propose **Centre for Development and Demonstration of DER technologies (TECNALIA-LAB)** as the place of execution of the project. This site fully complies with all technical and hardware requirements and allows to build each system topology specified in detailed description of the project.

The most important equipment from the standpoint of the proposed research include:

1. Programmable power source (Power electronics-based generating system for simulating the electrical network 62.5 kVa/50kW, 3-phase voltage 228/132 Vac, up to 500Hz, a step-up auto-transformer to output 456/264 Vac and a programmable controller (UPC32) for simulation of transients in voltage, frequency and waveform, harmonics, programmable output impedance, etc.),
2. Different types of loads (including programmable DC electronic load),

3. Grid and distribution line simulator,
4. Various energy generation units (diesel generators, photovoltaic installation, wind turbine, microturbine)
5. Power quality analysers



DERri
Distributed Energy Resources
Research Infrastructures

USER SELECTION COMMITTEE: PROPOSAL ASSESSMENT REPORT

IDENTIFICATION OF THE PROPOSAL:

Use-Project Acronym:	SPS-LPQDS
User-Project Title:	Single Point System for Location of Power Quality Disturbance Sources
Name of the Lead User:	Krzysztof Chmielowiec
Nationality:	Polish
Organization of the Lead User:	AGH – University of Science and Technology www.agh.edu.pl Mickiewicz av. 30, Krakow 30-059 Poland
Submission CALL:	January 31st, 2012
Proposal ID:	20120131-09

ASSESSMENT REPORT

Criterion-Description	Score	Justification notes of the reviewer
Scientific/Technical merit (score 0-5) Scientific and technical relevance – Originality and Innovation	4,5	Highly innovative proposal
Compliance with EU policies and priorities (score 0-5) Compliance with European RTD policies and priorities. Social impact. Impact on EU Industry (e.g. standardisation and competitiveness). Sustainable growth interest.	3,8	The impact on EU Industry competitiveness is of interest
Improve know-how and capacity of the RI (Score 0-5) Improvement of know how within the Research Infrastructures Enhancement of RI technologies and methods Synergies with other projects and cooperation with other infrastructures	4,3	The RI will get new knowledge in the field of power quality assessment methods
Feasibility – Access – Costs (score 0-5) Cost and feasibility (promise of success vs. risk of problems, amount of access requested, etc.)	4,1	High lab effort. It has to be agreed with the hosting facility.
Quality of the proposal (Score 0-5) Completeness and organisation of the proposal. Clear definition of the objectives and of expected results. Relevance of the proposed Dissemination actions New User, young Users and project led by women (to encourage gender equality in science).	4,3	Very complete and well developed proposal



IDENTIFICATION OF THE PROPOSAL:

Use-Project Acronym:	SPS-LPQDS
User-Project Title:	Single Point System for Location of Power Quality Disturbance Sources
Name of the Lead User:	Krzysztof Chmielowiec
Nationality:	Polish
Organization of the Lead User:	AGH – University of Science and Technology www.agh.edu.pl Mickiewicz av. 30, Krakow 30-059 Poland
Submission CALL:	January 31st, 2012
Proposal ID:	20120131-09

OVERALL SCORE	21,17	EXCELLENT
ASSIGNED TO RI	TECNALIA – Bilbao Sp	

Załącznik G. Lista publikacji autora pracy

Krzysztof Chmielowiec, mgr inż.

Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
WEAiIB-keaspe, Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii

- [1] Analiza pracy wybranych farm wiatrowych w Polsce. Cz. 1, Efektywność produkcji energii elektrycznej — Analysis of operation of selected wind farms in Poland. Pt. 1, Efficiency of generation of electric energy / Krzysztof CHMIELOWIEC, Andrzej FIRLIT, Krzysztof PIĄTEK // Wiadomości Elektrotechniczne : miesięcznik naukowo-techniczny Stowarzyszenia Elektryków Polskich ; ISSN 0043-5112. — 2012 R. 80 nr 2, s. 14–17. — Bibliogr. s. 17
- [2] Analiza pracy wybranych farm wiatrowych w Polsce.. Cz. 1, Efektywność produkcji energii elektrycznej — [Analysis of operation of selected wind farms in Poland. Pt. 1, Efficiency of power production] / Krzysztof CHMIELOWIEC, Andrzej FIRLIT, Krzysztof PIĄTEK // W: Jakość energii i efektywność energetyczna 2011 [Dokument elektroniczny] : II konferencja naukowo-techniczna : 17–18 listopada 2011, Trzebieiszowice. — Wersja do Windows. — Dane tekstowe. — [Polska : s.n.], [2011]. — 1 dysk optyczny. — S. 1–7. — Wymagania systemowe: Adobe Acrobat Reader ; napęd CD-ROM. — Bibliogr. s. 7. — Afiliacja Autorów: Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
- [3] Analiza pracy wybranych farm wiatrowych w Polsce.. Cz. 2, Jakość energii elektrycznej — [Analysis of operation of selected wind farms in Poland. Pt. 2, Power quality] / Krzysztof CHMIELOWIEC, Andrzej FIRLIT, Krzysztof PIĄTEK // W: Jakość energii i efektywność energetyczna 2011 [Dokument elektroniczny] : II konferencja naukowo-techniczna : 17–18 listopada 2011, Trzebieiszowice. — Wersja do Windows. — Dane tekstowe. — [Polska : s.n.], [2011]. — 1 dysk optyczny. — S. 1–8. — Wymagania systemowe: Adobe Acrobat Reader ; napęd CD-ROM. — Bibliogr. s. 8. — Afiliacja Autorów: Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
- [4] Analiza pracy wybranych farm wiatrowych w Polsce. Cz. 2, Jakość energii elektrycznej — Analysis of operation of selected wind farms in Poland. Pt. 2, Quality of electric energy / Krzysztof CHMIELOWIEC, Andrzej FIRLIT, Krzysztof PIĄTEK // Wiadomości Elektrotechniczne : miesięcznik naukowo-techniczny Stowarzyszenia Elektryków Polskich ; ISSN 0043-5112. — 2012 R. 80 nr 2, s. 23–26. — Bibliogr. s. 17
- [5] Comparative tests of power quality analyzers – harmonic distortion / K. CHMIELOWIEC, M. Ziętek, K. PIĄTEK, A. FIRLIT, R. Szkoda, P. Balawender // W: ICHQP 2012 [Dokument elektroniczny] : 2012 IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power : Hong Kong, 17–20 June 2012 / IEEE Power & Energy Society. — Wersja do Windows. — Dane tekstowe. — [Piscataway] : IEEE, 2012. — (Proceedings (International Conference on Harmonics and Quality of Power. Online) ; ISSN 2164-0610). — e-ISBN: 978-1-4673-1943-0. — S. [1–6]. — Tryb dostępu: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6381286> [2014-05-07]. — Bibliogr. s. [6], Abstr.
- [6] Energetyka wiatrowa w Danii — [Wind energy in Denmark] / Krzysztof CHMIELOWIEC // W: JAKOŚĆ ENERGII 2010 : jakość energii w sieciach elektroenergetycznych : I konferencja naukowo-techniczna : 25–26 listopada 2010 r., Piechowice. — [Polska : s.n.], [2010]. — S. 159–169. — Bibliogr. s. 169
- [7] Flicker effect of different types of light sources / Krzysztof CHMIELOWIEC // W: IEEE EPQU2011 [Dokument elektroniczny] : 11th international conference : Lisbon, 17 to 19 October 2011 : conference proceedings. — Wersja do Windows. — Dane tekstowe. — [Lisbon : IEEE], [2011]. — Dysk Flash. — S. [1–6]. — Wymagania systemowe: Adobe Acrobat Reader. — Bibliogr. s. [6], Abstr.. — Tyt. przejęto ze s. tyt. (po wybraniu opcji: Final Papers)

- [8] High performance FPGA-based digital real-time controller for electric power conversion applications / Tomasz DZIWIŃSKI, Krzysztof CHMIELOWIEC // W: 2014 IEEE Power and Energy Society General Meeting [Dokument elektroniczny] : National Harbor, MD, United States, July 27–31 2014 : student poster book of abstracts. — Wersja do Windows. — Dane tekstowe. — [Piscataway : IEEE], [2014]. — S. 120. — Wymagania systemowe: Adobe Reader. — Tryb dostępu: http://ewh.ieee.org/soc/pes/sasc/file/Book_of_Abstracts_Student_Poster_GM14.pdf [2014-09-03]. — Abstr.
- [9] Intelligent power conditioning and monitoring interface for smart grids prosumers (Prosumer Interface) / Krzysztof CHMIELOWIEC, Tomasz DZIWIŃSKI // W: 2014 IEEE Power and Energy Society General Meeting [Dokument elektroniczny] : National Harbor, MD, United States, July 27–31 2014 : student poster book of abstracts. — Wersja do Windows. — Dane tekstowe. — [Piscataway : IEEE], [2014]. — S. 193. — Wymagania systemowe: Adobe Reader. — Tryb dostępu: http://ewh.ieee.org/soc/pes/sasc/file/Book_of_Abstracts_Student_Poster_GM14.pdf [2014-09-03]. — Bibliogr. s. 193, Abstr.
- [10] Jednopunktowe metody lokalizacji źródeł wahań napięcia w systemie elektroenergetycznym — [Single-point methods for location voltage fluctuation sources in a power system] / Krzysztof CHMIELOWIEC, Rafał Kozieł, Zbigniew HANZELKA, Andrzej FIRLIT, Krzysztof PIĄTEK, Krzysztof WOŹNY // W: Jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych w Polsce : VI konferencja : Białka Tatrzańska, 9–10 czerwca 2015 r. / Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej. — [Poznań : PTPIREE], [2015]. — S. 55–70. — Bibliogr. s. 70. — Afiliacja: Akademia Górniczo-Hutnicza
- [11] Market approach to the concept of prosumer interface / Krzysztof CHMIELOWIEC, Tomasz DZIWIŃSKI // W: KIC InnoEnergy [Dokument elektroniczny] : 3rd scientist conference for young entrepreneurs in the energy sector : 28th, 29th, 30th of May, [Lisbon] : abstract's book. — Wersja do Windows. — Dane tekstowe. — [Lisbon : s.n.], [2014]. — S. 44–45. — Wymagania systemowe: Adobe Reader. — Tryb dostępu: <http://2014.kic-innoenergy-conference.com/wp-content/uploads/2014/10/KIC-abstract-book-WEB.pdf> [2014-10-13]
- [12] New challenges for voltage quality studies — Nowe wyzwania w dziedzinie jakości dostawy energii elektrycznej / Zbigniew HANZELKA, Krzysztof CHMIELOWIEC, Andrzej FIRLIT, Bogusław ŚWIĄTEK // Przegląd Elektrotechniczny = Electrical Review / Stowarzyszenie Elektryków Polskich ; ISSN 0033-2097. — 2013 R. 89 nr 6, s. 17–25. — Bibliogr. s. 24–25, Streszcz., Abstr.
- [13] Opracowanie wirtualnego hybrydowego źródła energii elektrycznej złożonego z rozproszonych i odnawialnych źródeł z zastosowaniem systemu ciągłego monitorowania jakości energii elektrycznej — [The development of a hybrid virtual power plant consisting of distributed and renewable energy sources using system of continuous power quality monitoring] / Andrzej FIRLIT, Zbigniew HANZELKA, Krzysztof CHMIELOWIEC, Krzysztof PIĄTEK, Bogusław ŚWIĄTEK, Krzysztof WOŹNY // W: Jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych w Polsce : VI konferencja : Białka Tatrzańska, 9–10 czerwca 2015 r. / Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej. — [Poznań : PTPIREE], [2015]. — S. 105–119. — Bibliogr. s. 118–119, Streszcz.. — Afiliacja: Akademia Górniczo-Hutnicza
- [14] Pomiary i analiza pracy farm wiatrowych — [Measurements and analysis of wind farms operation] / Krzysztof CHMIELOWIEC, Andrzej FIRLIT, Krzysztof PIĄTEK // W: Pomiary ochronne oraz diagnostyka urządzeń i instalacji elektrycznych : IX konferencja techniczna : 23–25.05.2012, Mikołajki. — [Świdnica : Sonel S. A.], [2012]. — Opis wg okł.. — S. 61–73. — Bibliogr. s. 73. — Afiliacja autorów: Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
- [15] Pomiary porównawcze analizatorów jakości energii elektrycznej – eksperyment pomiarowy w ramach Pikniku JEE — [Comparative measurement of power quality analysers – measurement experiment under

Power Quality Picnic] / Krzysztof CHMIELOWIEC, Zbigniew HANZELKA, Andrzej FIRLIT, Krzysztof PIĄTEK, Krzysztof WOŹNY, Marek Rogóż // Elektro Info ; ISSN 1642-8722. — 2015 nr 9, s. 72–75

- [16] Pomiar porównawczy analizatorów jakości energii elektrycznej - eksperyment pomiarowy w ramach Pikniku JEE — [Comparative tests of PQ analysers - measurement experiment during PQ Picnic] / Krzysztof CHMIELOWIEC, Zbigniew HANZELKA, Andrzej FIRLIT, Krzysztof PIĄTEK, Krzysztof WOŹNY, Marek Rogóż // W: Jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych w Polsce : VI konferencja : Białka Tatrzańska, 9–10 czerwca 2015 r. / Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej. — [Poznań : PTPiREE], [2015]. — S. 71–75. — K. Chmielowiec, Z. Hanzelka, A. Firlit, K. Piątek, K. Woźny – afiliacja: Akademia Górniczo-Hutnicza
- [17] Pomiar porównawczy rejestratorów jakości energii – wahania napięcia — [Comparative measurements of power quality recorders - voltage fluctuations] / Paweł Balawender, Krzysztof CHMIELOWIEC, Andrzej FIRLIT, Krzysztof PIĄTEK, Rafał Szkoła, Michał Ziętek // W: Jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych w Polsce oraz efektywność energetyczna : V konferencja : Lidzbark Warmiński, 25–26 kwietnia 2012 / Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej. — [Polska : PTPiREE], [2012] + Uzupełnienie mater. konf.. — S. 19-1–19-9. — Bibliogr. s. 19-8–19-9. — Publikacja w części: Uzupełnienie materiałów konferencyjnych. — Krzysztof Chmielowiec, Andrzej Firlit, Krzysztof Piątek - afiliacja: Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
- [18] Świetłówki kompaktowe – czy naprawdę energooszczędne? — [Compact lamps – are they really energy efficient?] / Krzysztof CHMIELOWIEC, Krzysztof Szałwia, Piotr Seredyński // W: JAKOŚĆ ENERGII 2010 : jakość energii w sieciach elektroenergetycznych : I konferencja naukowo-techniczna : 25–26 listopada 2010 r., Piechowice. — [Polska : s.n.], [2010]. — S. 181–192. — Bibliogr. s. 192
- [19] Świetłówki kompaktowe jako odbiorniki energii elektrycznej — [Compact fluorescent lamps as electric loads] / Krzysztof CHMIELOWIEC, Krzysztof Szałwia, Piotr Seredyński // Elektro Info ; ISSN 1642-8722. — 2011 nr 4, s. 82–87
- [20] Uniwersalna platforma pomiarowa parametrów elektrycznych i jakości energii elektrycznej — [Universal metering framework for power network and power quality measurements] / Krzysztof PIĄTEK, Krzysztof KOŁĘK, Andrzej FIRLIT, Krzysztof CHMIELOWIEC, Krzysztof WOŹNY // W: Jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych w Polsce : VI konferencja : Białka Tatrzańska, 9–10 czerwca 2015 r. / Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej. — [Poznań : PTPiREE], [2015]. — S. 77–86. — Bibliogr. s. 86. — Afiliacja: Akademia Górniczo-Hutnicza
- [21] Voltage fluctuations in networks with distributed power sources / Maciej Mróz, Krzysztof CHMIELOWIEC, Zbigniew HANZELKA // W: ICHQP 2012 [Dokument elektroniczny] : 2012 IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power : Hong Kong, 17–20 June 2012 / IEEE Power & Energy Society. — Wersja do Windows. — Dane tekstowe. — [Piscataway] : IEEE, 2012. — (Proceedings (International Conference on Harmonics and Quality of Power. Online) ; ISSN 2164-0610). — e-ISBN: 978-1-4673-1943-0. — S. [1–6]. — Tryb dostępu: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6381206> [2014-05-07]. — Bibliogr. s. [6], Abstr.
- [22] Voltage fluctuations in networks with distributed power sources — Wahania napięć w sieciach z rozproszonymi źródłami energii / Maciej Mróz, Zbigniew HANZELKA, Krzysztof CHMIELOWIEC // Przegląd Elektrotechniczny = Electrical Review / Stowarzyszenie Elektryków Polskich ; ISSN 0033-2097. — 2014 R. 90 nr 5, s. 222–228. — Bibliogr. s. 228, Abstr., Streszcz.
- [23] Voltage sags – methods for source localization and reduction of negative impact on industrial plants / Krzysztof CHMIELOWIEC, Michał Ziętek // W: 1st KIC InnoEnergy Scientist conference : Leuven, Belgium,

November 4–9, 2012 : book of abstracts / European Institute of Innovation & Technology. — [Leuven : EIT], [2012]. — S. 51

- [24] Warunki pracy baterii kondensatorów a zagrożenie pożarowe — [Operating conditions of capacitor banks and fire hazards] / Zbigniew HANZELKA, Krzysztof PIĄTEK, Krzysztof CHMIELOWIEC // Elektro Info ; ISSN 1642-8722. — 2011 nr 12, s. 24–27. — Bibliogr. s. 27. — Afiliacja Autorów: Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
- [25] Wpływ zmian napięcia na pracę różnych rodzajów źródeł światła — Influence of voltage variations on operation of different types of light sources / Krzysztof CHMIELOWIEC // Wiadomości Elektrotechniczne : miesięcznik naukowo-techniczny Stowarzyszenia Elektryków Polskich ; ISSN 0043-5112. — 2012 R. 80 nr 3, s. 20–23. — Bibliogr. s. 23
- [26] Wpływ zmian napięcia na pracę różnych rodzajów źródeł światła — [The impact of voltage fluctuations on the operation of various types of light sources] / Krzysztof CHMIELOWIEC // W: Jakość energii i efektywność energetyczna 2011 [Dokument elektroniczny] : II konferencja naukowo-techniczna : 17–18 listopada 2011, Trzebiezowice. — Wersja do Windows. — Dane tekstowe. — [Polska : s.n.], [2011]. — 1 dysk optyczny. — S. 1–7. — Wymagania systemowe: Adobe Acrobat Reader ; napęd CD-ROM. — Bibliogr. s. 7. — Tytuł przejęto z ekranu tyt.. — Afiliacja Autora: Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
- [27] Zapady napięcia oraz krótkie przerwy w zasilaniu – lokalizacja źródła oraz minimalizacja skutków w odniesieniu do pracy zakładu przemysłowego — [Voltage sags and short dips – source localization and minimization of the effects in relation to the industrial plant operation] / Krzysztof CHMIELOWIEC, Michał Ziętek // W: Jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych w Polsce oraz efektywność energetyczna : V konferencja : Lidzbark Warmiński, 25–26 kwietnia 2012 / Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej. — [Polska : PTPIREE], [2012] + Uzupełnienie mater. conf.. — S. 18-1–18-13. — Bibliogr. s. 18-13. — Uzupełnienie materiałów konferencyjnych. — Krzysztof Chmielowiec - afiliacja: Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
- [28] Zła jakość energii elektrycznej a zagrożenie pożarowe – analiza przypadku — [Poor power quality and fire threat – case study] / Zbigniew HANZELKA, Jerzy WARECKI, Krzysztof PIĄTEK, Krzysztof CHMIELOWIEC // W: Ochrona przeciwpożarowa w instalacjach elektrycznych : (zagadnienia wybrane) : praca zbiorowa / red. Julian Wiatr ; kier. projektu Anna Kuziemska. — Warszawa : Dom Wydawniczy MEDIUM, 2011. — (Elektro Info ; ISSN 1642-8722 ; wyd. jubil.) ; (Niezbędnik Elektryka). — S. 12–19. — Bibliogr. s. 19. — Afiliacja Autorów: Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
- [29] Zła jakość energii elektrycznej a zagrożenie pożarowe – analiza przypadku — [Poor power quality and fire threat – case study] / Zbigniew HANZELKA, Jerzy WARECKI, Krzysztof PIĄTEK, Krzysztof CHMIELOWIEC // Biuletyn Techniczny Oddziału Krakowskiego Stowarzyszenia Elektryków Polskich ; ISSN 1426-742X. — 2011 nr 4, s. 11–20. — Bibliogr. s. 20. — Afiliacja: Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

Załącznik H. Lista międzynarodowych szkoleń odbytych w ramach KIC InnoEnergy PhD School

- [1] *Teamwork and Leadership*, AGH University, Polska, Czerwiec 2015
- [2] *Energy System Integration*, KUL Leuven, Belgia, Maj 2015
- [3] *Energy Transition - China CO2 free by 2040*, Shanghai/Hangzhou, Chiny, Luty/Marzec 2015
- [4] *Renewables Boot Camp*, Polytechnic University of Catalonia, Hiszpania, Wrzesień 2014
- [5] *Smart Energy Systems*, University of Paris Sud 11, Francja, Październik 2012
- [6] *From Science to Business*, Esade Business School, Hiszpania, Wrzesień 2010

Załącznik I. Lista konferencji krajowych i międzynarodowych, na których autor prezentował wyniki badań

Konferencje krajowe:

- [1] Jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych w Polsce : VI konferencja : Białka Tatrzańska, 9–10 czerwca 2015 r.
- [2] Pomiary ochronne oraz diagnostyka urządzeń i instalacji elektrycznych : IX konferencja techniczna : 23–25.05.2012, Mikołajki.
- [3] Jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych w Polsce oraz efektywność energetyczna : V konferencja : Lidzbark Warmiński, 25–26 kwietnia 2012 / Polskie Towarzystwo Przesyłu i Rozdziału Energii Elektrycznej.
- [4] Jakość energii i efektywność energetyczna 2011 : II konferencja naukowo-techniczna : 17–18 listopada 2011, Trzebieiszowice.
- [5] JAKOŚĆ ENERGII 2010 : jakość energii w sieciach elektroenergetycznych : I konferencja naukowo-techniczna : 25–26 listopada 2010 r., Piechowice.

Konferencje międzynarodowe:

- [1] 2014 IEEE Power and Energy Society General Meeting : National Harbor, MD, United States, July 27–31 2014.
- [2] KIC InnoEnergy : 3rd scientist conference for young entrepreneurs in the energy sector : Lisbon, Portugal, 28–30 May 2014.
- [3] IEEE ISGT2013 Innovative Smart Grid Technologies : Copenhagen, Denmark, 6–9 October 2013.
- [4] 1st KIC InnoEnergy Scientist conference : Leuven, Belgium, November 4–9, 2012.
- [5] IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power : Hong Kong, 17–20 June 2012.
- [6] IEEE EPQU2011 Electrical Power Quality and Utilisation : 11 th international conference : Lisbon, 17 –19 October 2011.