1. Imię i Nazwisko

Paweł Kostyła

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

- 1998-1999, **Studium podyplomowe Business Studies**, Centrum Kształcenia Ustawicznego Politechniki Wrocławskiej i Central Connecticut State University, New Britain, Connecticut
- 1998, **doktor nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika**
  Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny
  Tytuł rozprawy: *Adaptacyjne sieci neuronowe w zastosowaniu do identyfikacji stanu układów elektrycznych* (promotor: prof. dr hab. inż. Tadeusz Łobos)
- 1992, **dyplom magistra inżyniera elektryka**
  Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, kierunek Elektrotechnika, specjalność elektroenergetyka i automatyka stosowana

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

- 2019-obecnie adiunkt badawczo-dydaktyczny, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny,
- 1999-2019 adiunkt naukowo-dydaktyczny, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny,
- 1992-1999 asystent naukowo-dydaktyczny, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny,

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy

Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 219 ust. 2 ustawy: Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 r., poz. 1668).

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Badania jakości energii w nowoczesnym systemie elektroenergetycznym

Osiągnięcie habilitacyjne stanowi cykl połączonych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopismach naukowych lub w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowych, które w roku opublikowania artykułu w ostatecznej formie były ujęte w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust. 2 pkt 2 lit. b, przedstawionych dalej w kolejności chronologicznej:

4.2. Wykaz publikacji zaliczonych do cyklu

[H1] Tomasz Sikorski, Michał M. Jasiński, Edyta Ropuszyńska-Surma, Magdalena Węglarz, Dominika N. Kaczorowska, **Paweł Kostyła**, Zbigniew Leonowicz, Robert Lis, Jacek Rezmer, Wilhelm Rojewski, Marian Sobierajski, Jarosław Szymańda, Daniel Bejmert, Przemysław Janik, Beata Solak: A Case Study on Distributed Energy Resources and Energy-Storage Systems in a Virtual Power Plant Concept: Technical Aspects, Energies 2020, vol. 13, no. 12, s. 1-30
/**JCR**, IF - 02.702, MNiSW: 140/
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał między innymi na: współuczestnictwie w opracowaniu koncepcji powstania platformy umożliwiającej regulację pracy rozproszonych źródeł energii i zasobników energii z systemem wytwarzania i dystrybucji na rynku sprzedaży energii elektrycznej; przeprowadzeniu badań terenowych; przetwarzaniu, weryfikacji i agregacji danych z systemu pomiarowego oraz współpracy przy redagowaniu wniosków i zaleceń w raportach dla inwestora podmiotu gospodarczego.

[H2] Michał M. Jasiński, Tomasz Sikorski, **Paweł Kostyła**, Zbigniew Leonowicz, Klaudiusz Borkowski: Combined cluster analysis and global power quality indices for the qualitative assessment of the time-varying condition of power quality in an electrical power network with distributed generation, Energies. 2020, vol. 13, no. 8, s. 1-21
/**JCR**, IF - 02.702, MNiSW: 140/
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał między innymi na: opracowaniu ram badawczych dla koncepcji połączenia analizy klastrowej oraz zdefiniowania globalnego wskaźnika jakości energii w ocenie wielopunktowego systemu pomiarowego sieci kopalnianej; przeprowadzeniu badań terenowych; zdefiniowaniu zakresu pomiarowego; przetwarzaniu, weryfikacji i agregacji danych z systemu pomiarowego oraz współpracy przy redagowaniu wniosków.

[H3] Tomasz Sikorski, Michał M. Jasiński, Edyta Ropuszyńska-Surma, Magdalena Węglarz, Dominika N. Kaczorowska, **Paweł Kostyła**, Zbigniew Leonowicz, Robert Lis, Jacek Rezmer, Wilhelm Rojewski, Marian Sobierajski, Jarosław Szymańda, Daniel Bejmert, Przemysław Janik: A Case Study on Distributed Energy Resources and Energy-Storage Systems in a Virtual Power Plant Concept: Economic Aspects, Energies 2019, vol. 12, no. 23, s. 1-21
/**JCR**, IF - 02.702, MNiSW: 140/
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał między innymi na: przeprowadzeniu badań terenowych; przetwarzaniu, weryfikacji i agregacji danych w aspekcie technicznym w celu określenia warunków brzegowych dla modelu ekonomicznego planowanej platformy gospodarczej rzeczywistej wirtualnej elektrowni VPP.

[H4] Michał Jasiński, Tomasz Sikorski, **Paweł Kostyła**, Dominika Kaczorowska, Zbigniew Leonowicz, Jacek Rezmer, Jarosław Szymańda, Przemysław Janik, Daniel Bejmert, Marek Rybiański, Elżbieta Jasińska: Influence of measurement aggregation algorithms on power quality assessment and correlation analysis in electrical power network with PV power plant, Energies 2019, vol. 12, nr 18, s. 1-18
/**JCR**, IF - 02.702, MNiSW: 140/
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał między innymi na opracowaniu metodologii dodatkowego rozszerzenia klasycznej oceny jakości energii o analizę korelacji między parametrami jakości energii, a wskaźnikami zewnętrznymi (warunki pogodowe, zapotrzebowanie na energię) jako wyjście naprzeciw ostatnio wprowadzonych zmian w poprawce do normy EN 50160.
Mój wkład to także analiza literaturowa, przygotowanie zakresu badań, analiza oraz interpretacja wyników badań porównawczych zastosowania czasów agregacji 1 i 10 minutowych w ocenie jakości energii, a także w analizie korelacji parametrów jakości energii i warunków pogodowych oraz produkcji energii fotowoltaicznej elektrowni o mocy 100kW włączonej do sieci niskiego napięcia, opracowanie wniosków i współredakcja manuskryptu.

[H5] Gopinath Subramani, Vigna K. Ramachandaramurthy, P. Sanjeevikumar, Jens Bo Holm-Nielsen, Frede Blaabjerg, Leonowicz Zbigniew and **Pawel Kostyla**: Techno-Economic Optimization of Grid-Connected Photovoltaic (PV) and Battery Systems Based on Maximum Demand Reduction (MDRed) Modelling in Malaysia, Energies 2019, vol. 12, nr 18, s. 1-20
/**JCR**, IF - 02.702, MNiSW: 140/
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu zakresu merytorycznego oraz planu badań nad wykorzystaniem algorytmu genetycznego w modelu maksymalnej redukcji popytu (MDRed – maximum demand reduction model) jako narzędzia optymalizującego pracę systemu fotowoltaicznych ogniw słonecznych, analizie literaturowej, analizie i interpretacji wyników badań, opracowaniu wniosków i współredakcji manuskryptu.

[H6] Luisa Alfieri, Antonio Bracale, Pietro Varilone, Zbigniew Leonowicz, **Paweł Kostyła**, Tomasz Sikorski, Marek Wąsowski: Methods for assessment of supraharmonics in power systems. Part 1, Theoretical Issues, 7th International Conference on CLEAN ELECTRICAL POWER, ICCEP 2019, 2-4 July 2019, Puglia, Italy
/**WoS**, MNiSW: 20/
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji merytorycznej całego rozdziału oraz zakresu prac naukowo-badawczych dotyczących zastosowania zaawansowanych metod analizy sygnału takich jak: SWDFT - sliding-window discrete Fourier transform, SWWMEM- sliding-window wavelet-modified ESPRIT-based method do wykrywania wysokoczęstotliwościowych zaburzeń jakości energii w systemie fotowoltaicznym z miernikami energii elektrycznej wykorzystującymi technologię szerokopasmowej komunikacji PLC, analizie literaturowej, przygotowaniu oraz współredakcji manuskryptu.

[H7] Luisa Alfieri, Antonio Bracale, Pietro Varilone, Zbigniew Leonowicz, **Paweł Kostyła**, Tomasz Sikorski, Marek Wąsowski: Methods for assessment of supraharmonics in power systems. Part 2, Numerical applications, 7th International Conference on CLEAN ELECTRICAL POWER, ICCEP 2019, 2-4 July 2019, Puglia, Italy
/**WoS**, MNiSW: 20/
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji badań dotyczącym zastosowania zaawansowanych metod analizy sygnału do wykrywania wysokoczęstotliwościowych zaburzeń jakości energii w systemie fotowoltaicznym z miernikami energii elektrycznej wykorzystującymi technologię szerokopasmowej komunikacji PLC, wykonaniu niezbędnych badań, współudziale w analizie i interpretacji wyników badań, opracowaniu wniosków i współredakcji artykułu.

[H8] Turgay Yalcin, Muammer Ozdemir, **Paweł Kostyła**, Zbigniew Leonowicz: Discrete wavelet analysis of supra-harmonic emissions in smart grid, 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe), 12-15 June 2018, Palermo, Italy: conference proceedings. Danvers, MA : IEEE, cop. 2018.
/**WoS**, MNiSW: 20/
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu zakresu merytorycznego i szczegółowego planu badań dotyczących zastosowania dyskretnej transformaty falkowej do analizy sygnałów supraharmonicznych w sieci inteligentnej, budowy niezbędnej infrastruktury badawczej, zaplanowaniu i wykonaniu badań, współpracy przy analizie i interpretacji wyników oraz redakcji tekstu manuskryptu.

[H9] Michał M. Jasiński, Tomasz Sikorski, **Paweł Kostyła**, Klaudiusz Borkowski: Cluster analysis for long-term power quality data in mining electrical power network, 2018 Progress in Applied Electrical Engineering (PAEE), Kościelisko (Zakopane), Poland, June 18-22, 2018. Danvers, MA : IEEE, cop. 2018.
/**WoS**, MNiSW: 20/
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale w przygotowaniu zakresu merytorycznego i szczegółowego planu badań nad zastosowaniem analizy klastrowej do przetwarzania długoterminowych danych parametrów jakości energii elektrycznej w sieciach kopalnianych, analizie literaturowej, analizie oraz interpretacji wyników badań.

[H10] Michał M. Jasiński, Tomasz Sikorski, **Paweł Kostyła**, Klaudiusz Borkowski: Global power quality indices for assessment of multipoint power quality measurements, Proceedings of the 10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence - ECAI 2018, 28 June - 30 June 2018. Danvers : IEEE, cop. 2018.
/**WoS, Core**, MNiSW: 140/
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na zaproponowaniu zastosowania metod taksonomicznych do zdefiniowania globalnego wskaźnika jakości energii w ocenie wielopunktowego systemu pomiarowego sieci kopalnianej, analizie literaturowej oraz redakcji manuskryptu.

[H11] Turgay Yalcin, Muammer Ozdemir, **Paweł Kostyła**, Zbigniew Leonowicz: Analysis of supra-harmonics in smart grids, 2017 IEEE 17th International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, 6-9 June 2017, Milan, Italy : conference proceedings. Danvers, MA : IEEE, cop. 2017.
/**WoS**, MNiSW: 20/
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu zakresu merytorycznego i szczegółowego planu badań zastosowania zaawansowanych metod (EEMD) do

wykrywania i analizy zakłóceń supraharmonicznych w sygnałach z sieci inteligentnej z technologią PLC, budowy niezbędnej infrastruktury badawczej, zaplanowaniu i wykonaniu badań, wykonaniu pomiarów sygnałów napięć w szerokim paśmie częstotliwości, analizie i interpretacji wyników badań, współudziale w pisaniu manuskryptu, opracowaniu wniosków, opracowaniu redakcyjnym artykułu.

[H12] Adam Gubański, **Paweł Kostyła**, Jacek Rezmer, Jarosław Szymańda: Syntetyczne wskaźniki oceny jakości energii elektrycznej dla systemów generacji rozproszonej, Przegląd Elektrotechniczny, 2017, R. 93, nr 10.
/MNiSW: 14/
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji merytorycznej całego rozdziału oraz zakresu prac naukowo-badawczych dotyczących:
- propozycji oceny jakości energii elektrycznej w oparciu o wskaźniki syntetyczne: globalne i obszarowe,
- wykorzystaniu pomiarów synchronicznych w rzeczywistej sieci dystrybucyjnej.
Mój wkład to także przygotowanie planu i zakresu badań, analiza i interpretacja wyników badań, opracowanie wniosków, współpraca przy napisaniu i opracowaniu redakcyjnym manuskryptu.

[H13] Adam Gubański, **Paweł Kostyła**, Jacek Rezmer, Jarosław Szymańda: Logistyka identyfikacji i lokalizacji zdarzeń awaryjnych w systemie elektroenergetycznym, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering. 2016, nr 86.
/MNiSW: 09/
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu zakresu prac naukowo-badawczych w artykule dotyczącym:
- możliwości identyfikacji zdarzeń awaryjnych występujących w systemie elektroenergetycznym oraz propagacji zaburzeń na podstawie rejestracji synchronicznych w wybranym obszarze sieci,
- opracowaniu procedury monitorowania zaburzeń jako uzupełnienie algorytmów związanych z systemami sieci inteligentnych (smart grid).
Mój wkład to także monitoring i diagnostyka infrastruktury badawczej, analiza i interpretacja wyników badań, opracowanie wniosków, współpraca przy napisaniu i opracowaniu redakcyjnym manuskryptu.

[H14] Adam Gubański, **Paweł Kostyła**, Jarosław Szymańda: Analiza i ocena systemu monitorowania jakości energii w rozproszonych sieciach dystrybucyjnych, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering. 2015, nr 82.
/MNiSW: 09/
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na przygotowaniu koncepcji merytorycznej artykułu dotyczącej prezentacji stanowiska badawczego wraz z infrastrukturą teleinformatyczną, współpracy przy napisaniu i opracowaniu redakcyjnym manuskryptu.

[H15] Adam Gubański, **Paweł Kostyła**, Jarosław Szymańda: Logistyka systemów monitorowania jakości energii elektrycznej w instalacjach z udziałem generacji rozproszonej, Logistyka, 2015, nr 4.
/MNiSW: 10/
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale przygotowania koncepcji merytorycznej artykułu dotyczącej prezentacji wyników badań otrzymanych ze stanowiska badawczego jako propozycji połączenia logistyki dystrybucji zaburzeń występujących w systemie elektroenergetycznym z elementami analizy pomiarów synchronicznych dla zadanego obszaru monitorowania, współpracy przy napisaniu i opracowaniu redakcyjnym manuskryptu.

[H16] Tomasz Sikorski, Jacek Rezmer, **Paweł Kostyła**: Wpływ mikroinstalacji na parametry jakości energii elektrycznej w punkcie przyłączenia, Elektro Info. 2015, nr 12.
/MNiSW: 06/
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu zakresu merytorycznego artykułu dotyczącego:
- zastosowania obecnych norm i przepisów oraz zasad regulacji źródeł rozproszonych niskiego napięcia w celu określenia możliwego wpływu źródła rozproszonego na zaburzenia jakości energii elektrycznej w punkcie przyłączenia,
- wybranych relacji pomiędzy parametrami źródła oraz stosowanymi charakterystykami regulacyjnymi a możliwym wpływem na parametry jakościowe w punkcie przyłączenia,
- oszacowania wpływu systemu fotowoltaicznego o mocy 15 kVA, opartego na trzech jednofazowych systemach fotowoltaicznych wykorzystujących różne technologie paneli, na wybrane parametry jakościowe,
- weryfikację założeń na podstawie rzeczywistych pomiarów zaburzeń jakości energii w punkcie przyłączenia systemu fotowoltaicznego.
Mój wkład to także współudział w: przygotowaniu planu i zakresu badań, analizie wyników badań, opracowaniu wniosków i redakcji manuskryptu.

[H17] Adam Gubański, **Paweł Kostyła**, Beata Solak, Zbigniew Leonowicz, Jacek Rezmer, Tomasz Sikorski: Synchronized profiles of power quality parameters in assessment of disturbances in power systems with distributed generation, Modern Electric Power Systems, MEPS '15, July 06-09, 2015, Wrocław, Poland. Wrocław : Department of Electrical Power Engineering. Wroclaw University of Technology, cop. 2015.
/**WoS**: 15/
Mój udział polegał na realizacji harmonogramu zadań zawartych w projekcie naukowym, obejmującym badania opisane w tej pracy, agregacji danych z systemu pomiarowego oraz współpracy przy przygotowaniu tekstu.

[H18] Zbigniew Leonowicz, Jacek Rezmer, Tomasz Sikorski, Jarosław Szymańda, **Paweł Kostyła**: Wide-area system of registration and processing of power quality data in power grid with distributed generation. Pt. 2, Localization and tracking of the sources of disturbances, 2014 14th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Krakow, Poland, 10-12 May 2014, conference proceedings. Piscataway, NJ : IEEE, cop. 2014.
/**WoS**: 15/
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na realizacji zadań badawczych zawartych w harmonogramie projektu naukowego, obejmującego zagadnienia w niej opisane, przetwarzaniu i agregacji danych z systemu pomiarowego oraz współpracy przy przygotowaniu tekstu.

[H19] Zbigniew Leonowicz, Jacek Rezmer, Tomasz Sikorski, Jarosław Szymańda, **Paweł Kostyła**: Wide-area system of registration and processing of power quality data in power grid with distributed generation. Pt. 1, System description, functional tests and synchronous recordings, 2014 14th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Krakow, Poland, 10-12 May 2014, conference proceedings. Piscataway, NJ : IEEE, cop. 2014.
/**WoS**: 15/
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na realizacji zadań badawczych, przetwarzaniu i agregacji danych z systemu pomiarowego oraz współpracy przy redagowaniu tekstu.

[H20] Tomasz Sikorski, **Paweł Kostyła**: Detection of power system transients disturbances in distributed generation systems using Hilbert transform and signal decomposition, 18th Power Systems Computation Conference, PSCC 2014, August 18-22, 2014, Wroclaw, Poland, IEEE ; Wrocław : Institute of Electrical Power Engineering, cop. 2014.
/**WoS:** 15/
Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji merytorycznej całego rozdziału oraz zakresu prac naukowo-badawczych dotyczących zastosowania

zaawansowanych metod analizy sygnału takich jak: EMD- empirical mode decomposition, HT - Hilbert Transform, SPWVD – smoothed pseudo Wigner-Ville distribution, IDIN – instantaneous distortion index do wykrywania wysokoczęstotliwościowych zakłóceń jakości energii podczas prac łączeniowych w systemie elektroenergetycznym z małymi elektrowniami wodnymi na podstawie zarejestrowanych danych z obszarowego systemu monitorowania jakości energii elektrycznej.
Mój wkład to także analiza literaturowa, przygotowanie zakresu badań, analiza oraz interpretacja wyników badań, opracowanie wniosków i współredakcja manuskryptu.

4.3. Omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników wraz z ich ewentualnym wykorzystaniem

4.3.1. Wprowadzenie

Przedstawione osiągnięcie habilitacyjne składa się z cyklu powiązanych ze sobą tematycznie publikacji, poruszających kilka obszarów badawczych związanych z badaniami jakości energii w nowoczesnym systemie elektroenergetycznym. Cykl zawiera: pięć prac opublikowanym w czasopiśmie uwzględnianym w bazie Journal Citation Reports, dziesięć na konferencjach indeksowanych w Web of Science oraz pięć w czasopismach z listy ministerialnej. Sumaryczny Impact Factor cyklu wynosi: 13,510, a liczba punktów ministerialnych: 1048.

Od roku 2006 moje zainteresowania badawcze skupione są na zagadnieniach oceny jakości energii elektrycznej. Energia rozumiana również w sensie ekonomicznym jako towar o odpowiedniej jakości jest współcześnie jednym z najważniejszych tematów zarówno dla wytwórców energii, konsumentów energii, jak i producentów urządzeń elektrycznych.
Wychodząc naprzeciw tym oczekiwaniom byłem inicjatorem oraz aktywnym wykonawcą zadań badawczych zawartych w harmonogramie realizowanych projektów:

- Grant Komitetu Badań Naukowych (Nr 3 T10A 040 30), Nowe metody analizy i oceny jakości energii elektrycznej (2006-2009);
- Grant Narodowego Centrum Nauki (DEC-2011/01/B/ST8/02515), Nowe algorytmy przetwarzania sygnałów oraz globalne wskaźniki jakości energii w ocenie stanów pracy sieci z generacją rozproszoną (2011-2015);

- Projekt realizowany na zlecenie krajowego podmiotu gospodarczego (SWOZ 2017/UM/TD/CN GLZ/12412/L), Analiza wpływu zwarć i przełączeń ruchowych w sieciach SN na narażenia izolacji oraz parametry jakości energii elektrycznej (2017-2018),
- Projekt realizowany na zlecenie krajowego podmiotu gospodarczego (2018/UM/TD/CN_UZA/17200/L), Raport z występujących zakłóceń elektromagnetycznych w zakresie częstotliwości w paśmie 2-150 kHz w sieci elektroenergetycznej niskiego napięcia zasilającej urządzenia odbiorcze klientów końcowych (2018-2019);
- Program Badawczy Sektora Elektroenergetycznego „PBSE" (Działanie 1.2 „Sektorowe programy B+R" w ramach osi priorytetowej „Wsparcie prowadzenia prac B+R przez przedsiębiorstwa" Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014 – 2020) (U/0180/750/2017), Opracowanie platformy pozwalającej na zagregowanie potencjału wytwórczego i regulacyjnego rozproszonych źródeł energii odnawialnej i zasobników energii oraz wybranych kategorii odbiorów sterowalnych (2018-2020).

Prezentowane osiągnięcie habilitacyjne jest wynikiem prac prowadzonych w powyższych grantach. Prace badawcze prezentowane w ramach cyklu były próbą formułowania i rozwiązywania problemów badawczych w ramach ważnego i aktualnego nurtu zagadnień społeczno-gospodarczych związanych z funkcjonowaniem systemów elektroenergetycznych z generacją rozproszoną dotyczących: budowy i współpracy systemu dystrybucji z odnawialnymi źródłami energii [1-11], monitoringu i oceny parametrów jakości energii z wykorzystaniem nowoczesnych technik analizy sygnałów oraz narzędzi ekonometrycznych [12-24], propagacji zakłóceń pracy sieci w paśmie częstotliwości do 150 kHz [25-37].

Pierwszym obszarem badawczym był wybór sieci dystrybucyjnej z odnawialnymi źródłami energii oraz dobór optymalnego systemu dla monitorowania jej parametrów jakości energii elektrycznej. Dobór ten warunkowany był specyfiką jej pracy oraz faktem, że wybrany fragment sieci, stanowi reprezentatywną część pracy systemu elektroenergetycznego wyłonionego podczas dyskusji z partnerem przemysłowym. W pracach cyklu przedstawiłem i omówiłem system sieci energetycznej z odnawialnymi źródłami energii elektrycznej [H13] oraz zasadę działania systemu monitorowania parametrów jakości energii elektrycznej wraz z systemem akwizycji i agregacji danych [H14], [H15], [H19].

Drugim obszarem badawczym, poruszanym w ramach cyklu jest: opracowanie metod oceny zakłóceń [H16], [H17], [H18], [H20]; globalnych wskaźników jakości energii, dedykowanych monitoringowi pracy sieci elektroenergetycznych z udziałem generacji rozproszonej (również sieci kopalnianych) [H9], [H10], [H12], [H2]; opracowaniu i wykorzystaniu narzędzi optymalizacyjnych [H5] oraz korelacyjnych [H4] w ocenie pracy systemów fotowoltaicznych z siecią niskiego napięcia; przeanalizowanie pod względem ekonomicznym [H3] i technicznym [H1] możliwości integracji rozproszonych źródeł energii odnawialnej, systemu magazynowania energii oraz systemu elektroenergetycznego w ramach pracy wirtualnej elektrowni, która może stanowić platformę pozwalającą na

zagregowanie potencjału wytwórczego i regulacyjnego rozproszonych źródeł energii odnawialnej i zasobników energii oraz wybranych kategorii odbiorów sterowalnych. Wykorzystano nowoczesne techniki przetwarzania sygnałów oraz zaproponowano rozszerzenie definicji wskaźników jakości energii.

Laboratorium Cyfrowego Przetwarzania Sygnałów, którego byłem współinicjatorem powstania, wyposażone zostało w mobilne analizatory jakości energii, co umożliwiło przeprowadzenie badań terenowych. Aplikację oraz weryfikację opracowanych metod wykonałem na podstawie rzeczywistych danych, pochodzących z systemu monitoringu, składającego się z zainstalowanych w sieci energetycznej rejestratorów oraz z centrum analiz wykorzystujących zagregowane dane pomiarowe i nowo opracowane algorytmy.

Ostatnim obszarem moich zainteresowań naukowych w cyklu publikacji, jest przedstawienie współczesnych problemów związanych z propagacją zakłóceń w paśmie 2 – 150 kHz w sieci elektroenergetycznej (tzw. *supraharmonics*) [H6], [H7], [H8], [H11]. Brałem czynny udział w budowie Instytutowego Laboratorium Monitoringu Jakości Energii Elektrycznej, w skład którego wchodzą między innymi mobilne rejestratory napięć i prądów, które umożliwiają rejestrację sygnałów z częstotliwością próbkowania do 1 MHz. W pracach cyklu omówiłem wyniki badań analizy rzeczywistych zarejestrowanych sygnałów i propagacji zakłóceń w paśmie częstotliwości do 150 kHz w obwodach zasilających nN oraz w sieciach inteligentnych (smart grids). Zdobytą wiedzę z tej dziedziny wykorzystywałem w charakterze eksperta w kierowaniu pracami badawczo-projektowymi w ramach współpracy z podmiotem gospodarczym z branży elektrycznej (Załącznik 4.17).

O ważności poruszanej problematyki świadczy ogromne zainteresowanie ze strony podmiotów gospodarczych - dystrybutorów energii elektrycznej. W ramach tej współpracy biorę czynny udział w wykonywaniu badań nad propagacją zakłóceń elektromagnetycznych w obwodach wykorzystujących technologię PLC (raporty mają klauzulę poufności).

4.3.2. System monitorowania jakości energii elektrycznej SMJEE [H13], [H14], [H15], [H17], [H19]

Opracowanie nowoczesnego systemu monitorowania parametrów jakości energii elektrycznej sieci dystrybucyjnej z udziałem generacji rozproszonej, usystematyzowanie wiedzy na temat wskaźników oceny parametrów jakości energii elektrycznej oraz zaproponowanie nowych wskaźników jakościowych można uznać za zwieńczenie i podsumowanie badań prezentowanych w pracach niniejszego cyklu publikacji.

Głównym wkładem naukowym pracy [H13] jest budowa i prezentacja systemu monitorowania parametrów jakości energii elektrycznej SMJEE jako narzędzia badawczego w odniesieniu do oceny wskaźników parametrów jakościowych dla funkcjonującej rzeczywistej sieci dystrybucyjnej z udziałem generacji rozproszonej.

Generacja rozproszona (*Distributed Generation*) jest aktywnie rozwijaną obecnie gałęzią energetyki, zaś przyczyną tego stanu rzeczy jest rozwój ekologicznych technologii wytwarzania energii. Współpraca generacji rozproszonej z siecią elektroenergetyczną obejmuje obecnie wszystkie zagadnienia ruchu i eksploatacji sieci oraz jej wpływu na: warunki napięciowe, obciążalność torów prądowych, warunki zwarciowe, stabilność systemową, a także sposobu regulacji mocy w sytuacji zmian częstotliwości. Obecnie definicja „generacja rozproszona" jako pojęcie źródeł wytwarzania oparta jest na raporcie CIGRE [6-7], który za źródła rozproszone proponuje traktować jednostki niepodległe centralnemu dysponowaniu mocą oraz niezależne od scentralizowanego planowania rozwoju systemu, jednocześnie wprowadzając ograniczenie mocy do wartości w zakresie 50-100 MW. Polskie Prawo Energetyczne [10] wprowadza wartość 5 MW mocy źródła, które nie wymaga uzyskania koncesji w przypadku źródeł nie zaliczanych do odnawialnych źródeł energii oraz w przypadku odnawialnych źródeł energii jako jednostek zwolnionych z opłat koncesyjnych. Warto jednak podkreślić, że wspomnianą wartość 5 MW nie należy traktować jako granicznej mocy dedykowanej generacji rozproszonej. Ostatnie prace CIGRE nad generacją rozproszoną zaproponowały minimalizację definicji jednostek rozproszonych jako elementów wytwórczych przyłączonych do sieci dystrybucyjnej bądź zasilających bezpośrednio odbiorcę. Podejmując próbę unifikacji generacji rozproszonej w krajowym systemie elektroenergetycznym, podkreślono ograniczenie mocy zainstalowanej do 150 MW, usytuowanie w sieci dystrybucyjnej bądź sieci rozdzielczej odbiorcy oraz wyłączenie z centralnej dyspozycji mocy. Zaproponowano podział generacji rozproszonej ze względu na kryterium mocy na: mikrogenerację (1 kW - 5 kW), małą generację (5 kW - 5 MW), średnią generację (5 MW - 50 MW) oraz dużą generację (50 MW - 150 MW). Zgodnie z Ustawą o OZE [11] przyjmuje się następujące definicje i określenia:

- mała instalacja – instalacja odnawialnego źródła energii o łącznej mocy zainstalowanej elektrycznej większej niż 40 kW i nie większej niż 200 kW, przyłączona do sieci elektroenergetycznej o napięciu znamionowym niższym niż 110 kV lub o mocy osiągalnej cieplnej w skojarzeniu większej niż 120 kW i nie większej niż 600 kW;
- mikroinstalacja – instalacja odnawialnego źródła energii o łącznej mocy zainstalowanej elektrycznej nie większej niż 40 kW, przyłączona do sieci elektroenergetycznej o napięciu znamionowym niższym niż 110 kV lub o mocy osiągalnej cieplnej w skojarzeniu nie większej niż 120 kW.

Klasycznym przykładem generacji rozproszonej są tzw. małe elektrownie wodne (MEW). W Polsce dla obiektów hydroenergetyki MEW określono graniczną moc zainstalowaną na poziomie 5 MW, wprowadzając dodatkową klasyfikację na: mikroenergetykę - dla mocy do 70 kW, makroenergetykę - dla mocy do 100 kW oraz małą energetykę - dla mocy do 5 MW.

Zaproponowany system monitorowania jakości energii elektrycznej (SMJEE) zainstalowany jest na obiektach generacji rozproszonej, małych elektrowni wodnych o mocy do 1 MW.

Pojęcie jakości energii (*Power Quality* PQ) wprowadzono w latach siedemdziesiątych ubiegłego stulecia. Od lat dziewięćdziesiątych do dziś obserwuje się intensywny rozwój tego zakresu wiedzy, włączając opracowanie standardów, procedur i technik pomiarowych, wprowadzanie nowych algorytmów, czy rozszerzenie praktyk stosowania o nowe obszary pracy sieci elektroenergetycznych. Współczesne zagadnienia jakości energii elektrycznej oscylują wokół zagadnień z pogranicza stabilności pracy systemu, zagrożeń dla bezpiecznej pracy odbiorników i elementów sieci elektroenergetycznych, a także liberalizacji rynku energii oraz relacji odbiorca i dostawca energii. Jednak w ujęciu technicznym zakres tematyki jakości energii mieści się przede wszystkim w problematyce kompatybilności elektromagnetycznej (EMC-*Electromagnetic Compatibility*). Prace normalizacyjne IEC (*International Electrotechnical Commission*) klasyfikują zagadnienia jakości energii w kategorii zaburzeń kompatybilności elektromagnetycznej o niskiej częstotliwości tj. do 9 kHz. Mają one charakter głównie zaburzeń przewodzonych na skutek sprzężenia pomiędzy obwodami źródła zaburzenia i obiektu zakłócanego (sprzężenia galwaniczne, pojemnościowe i indukcyjne). W odróżnieniu od zaburzeń przewodzonych zaburzenia promieniowane docierają do obiektu w postaci fali elektromagnetycznej, która może spowodować indukowanie w obwodach zakłócanego obiektu sygnału stanowiącego zagrożenie jego pracy. Wyindukowane napięcia i prądy zaburzenia są zjawiskiem wtórnym, wywołane ekspozycją obiektu zakłócanego polem elektromagnetycznym, pochodzącym od pierwotnego źródła zakłóceń. W celu klasyfikacji zaburzeń elektromagnetycznych w tabelach 1 i 2 przytoczono ogólne klasy zaburzeń EMC (por. Tabela 1, Tabela 2 [H13]).

Współczesny monitoring jakości energii wpisuje się w szerszą strategię monitoringu jakości dostaw energii elektrycznej, w której wyróżnia się trzy aspekty: handlowy, ciągłości dostaw oraz jakości energii. Podane ujęcie przyjęto również w opublikowanych raportach Grupy Roboczej ds. Jakości Dostaw Energii Elektrycznej powołanej przez Radę Europejskich Regulatorów Energetyki (CEER), jak również w krajowym raporcie Urzędu Regulacji Energetyki (URE) z grudnia 2009 roku. Jakość handlowa związana jest ściśle z konsumencką relacją pomiędzy dostawcą energii a jej użytkownikiem. Ciągłość dostaw określa się przez liczbę i czas trwania przerw w dostawie energii. Jakość energii (napięcia) jest najbardziej technicznym z przywoływanych tu wymiarów jakości dostaw energii, określonym przez zbiór parametrów technicznych zapewniających prawidłową pracę urządzeń. Przyjęta powszechnie norma PN-EN 50160 *„Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych”* uznaje za podstawę oceny jakości energii następujący zbiór parametrów: częstotliwość, poziom napięcia i jego zmienność, nagłe spadki napięcia, okresowe lub przejściowe zwyżki napięcia, wyższe harmoniczne napięcia oraz wahania napięcia. Wspomniana norma obejmuje swoim zakresem napięcia niskie nN tj. do 1 kV oraz napięcia średnie SN do 35 kV, a w ostatniej aktualizacji z roku 2010 dodano również zapisy rekomendacji dla wysokich napięć WN do 150 kV. W zakresie najwyższych napięć 220 kV, 400kV obowiązujące są limity poziomów dopuszczalnych wskazanych w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Odniesienie do parametrów z tych grup napięciowych możemy

również znaleźć w normach IEC 61000-3-6, 3-7, 3-13. Wpływ źródła na pracę sieci elektroenergetycznej jest wypadkową kilku elementów:

- warunków panujących w punkcie przyłączenia, określonych przez moc zwarciową w punkcie przyłączenia S_{kPCC} oraz tzw. tło, czyli parametry jakościowe pracy sieci elektroenergetycznej;
- podstawowych parametrów i charakterystyk pracy źródła oraz cech kompatybilnościowych urządzeń składających się na instalację przyłączeniową źródła.

Efekt przyłączenia źródła może zostać oceniony na podstawie analizy wskaźników jakościowych. Do grupy ocenianych parametrów zaliczamy obecnie:

- częstotliwość zasilania, zmiany częstotliwości;
- zmiany amplitudy napięcia, powolne zmiany napięcia, poziom napięcia;
- wahania napięcia, wskaźnik migotania światła;
- nagłe zmiany napięcia;
- niesymetria (asymetria);
- harmoniczne, interharmoniczne, subharmoniczne, składowa stała;
- zdarzenia napięciowe (zapady, krótkie przerwy, długie przerwy, wzrost, szybkie stany przejściowe, oscylacyjne, impulsowe, załamanie komutacyjne);
- sygnały sterująco-kontrolne.

Techniki pomiarowe i obliczeniowe stosowane obecnie w klasycznej ocenie jakości energii elektrycznej opisane są w przywołanych normach umieszczonych w tabeli 3 (por. Tabela 3 [H13]). Przykłady wybranych przez habilitanta nowych wskaźników jakości energii elektrycznej:

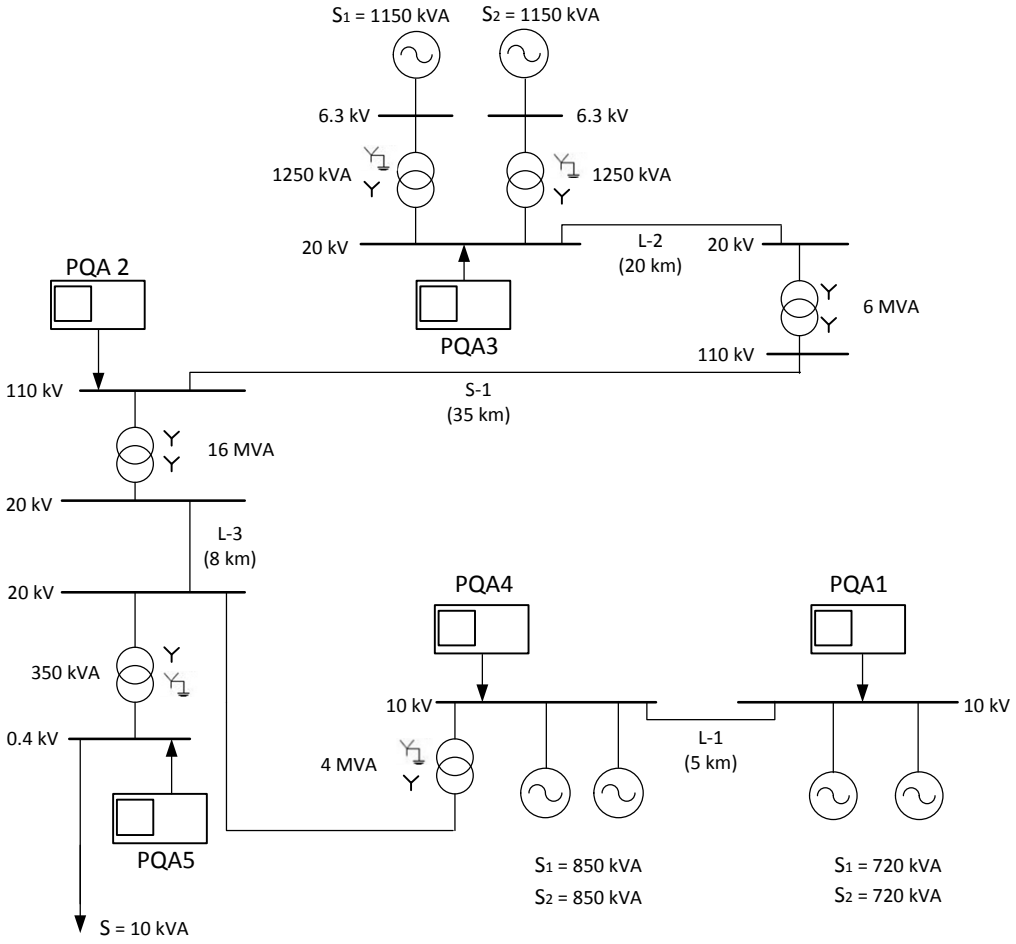
- chwilowy współczynnik zawartości harmonicznych (ITHD *Instantaneous Total Harmonic Distortion*, STHD *Short Term Harmonic Distortion*), który może być traktowany jako detektor zdarzenia na podstawie przekroczeń udziału harmonicznych wyznaczanych w przesuwnym oknie pomiarowym;
- chwilowy wskaźnik zawartości energii harmonicznych w sygnale (DIN – *Normalized Instantanous Distortion Energy Ratio*);
- chwilowa amplituda (IA – *Instantaneous Amplitude*) oraz chwilowa faza sygnału (IF – *Instantaneous Phase*);
- współczynnik odchyłki częstotliwości (FDR *Power Frequency Deviation Ratio*), współczynnik odchyłki od symetrii (SDR – *Symterical Components Deviation Ratio*);
- chwilowy współczynnik kształtu (IFF *Instantaneous Form Factor*) wyznaczany w dziedzinie czasu określany jako stosunek amplitudy wszystkich zakłóceń zawartych w sygnale do wartości średniej składowej podstawowej zawartej w sygnale (50 Hz);
- wskaźnik chwilowego wahania częstotliwości (IFI- *Instantaneous Frequency variation Index*) określany jest jako stosunek częstotliwości wyznaczanych za pomocą

transformaty S sygnału zakłóconego do częstotliwości składowej podstawowej wyznaczanej również za pomocą transformaty S;

- współczynnik charakterystyki obciążenia (LCI - *Load characterization Index*) wskazujący liniowy i nieliniowy udział w charakterze odbiornika. Współczynnik ten bazuje na rozkładzie prądu obciążenia na dwie składowe. Pierwsza wprowadza harmoniczne zniekształcenia do systemu natomiast druga składowa prądu posiada takie same harmoniczne zniekształcenia, które występują w napięciu;
- współczynnik asymetrii prądu (UCR - *Unbalance Current Ratio*). Bazuje na rozłożeniu prądu obciążenia na trzy składowe. Pierwsza składowa związana jest z niesymetrią liniowego obciążenia, druga z nieliniowym obciążeniem, trzecia składowa związana jest z symetrycznym obciążeniem liniowym.

Na podstawie przeprowadzonych konsultacji z partnerami przemysłowymi uzgodniono założenia projektowe, na podstawie których zbudowano kompleksowy system rejestracji, archiwizacji i przetwarzania danych jakości energii oparty na zsynchronizowanych czasowo analizatorach włączonych do ogólnej sieci komputerowej. Wydzielono fragment sieci elektroenergetycznej zawierający źródła rozproszone, który objęto logistyką identyfikacji i lokalizacji zdarzeń awaryjnych. Monitoring dotyczył wytwórców energii oraz znaczących bliskich węzłów sieci dystrybucyjnej. Obszar obejmuje elektrownie wodne o mocach rzędu 1 MW, linię WN 110 kV oraz odbiorców po stronie nN. W wybranym obszarze pracują elektrownie wodne w punktach pomiarowych: PQA1, PQA3 i PQA4. Monitorowane są także punkty: PQA2 na promieniowym ciągu linii WN S-1 oraz punkt PQA5 po stronie nN. Schemat na rysunku (Rys. 1) przedstawia lokalizację punktów pomiarowych w sieciach WN, SN i nN:

- PQA1: SN 10kV, pole liniowe L-1
- PQA2: WN 110kV, pole liniowe S-1
- PQA3: SN 20kV, pole liniowe L-2
- PQA4: SN 20kV, pole liniowe L-3
- PQA5: nN 0.4kV, stacja PT 20/0.4kV w ciągu liniowym L-3



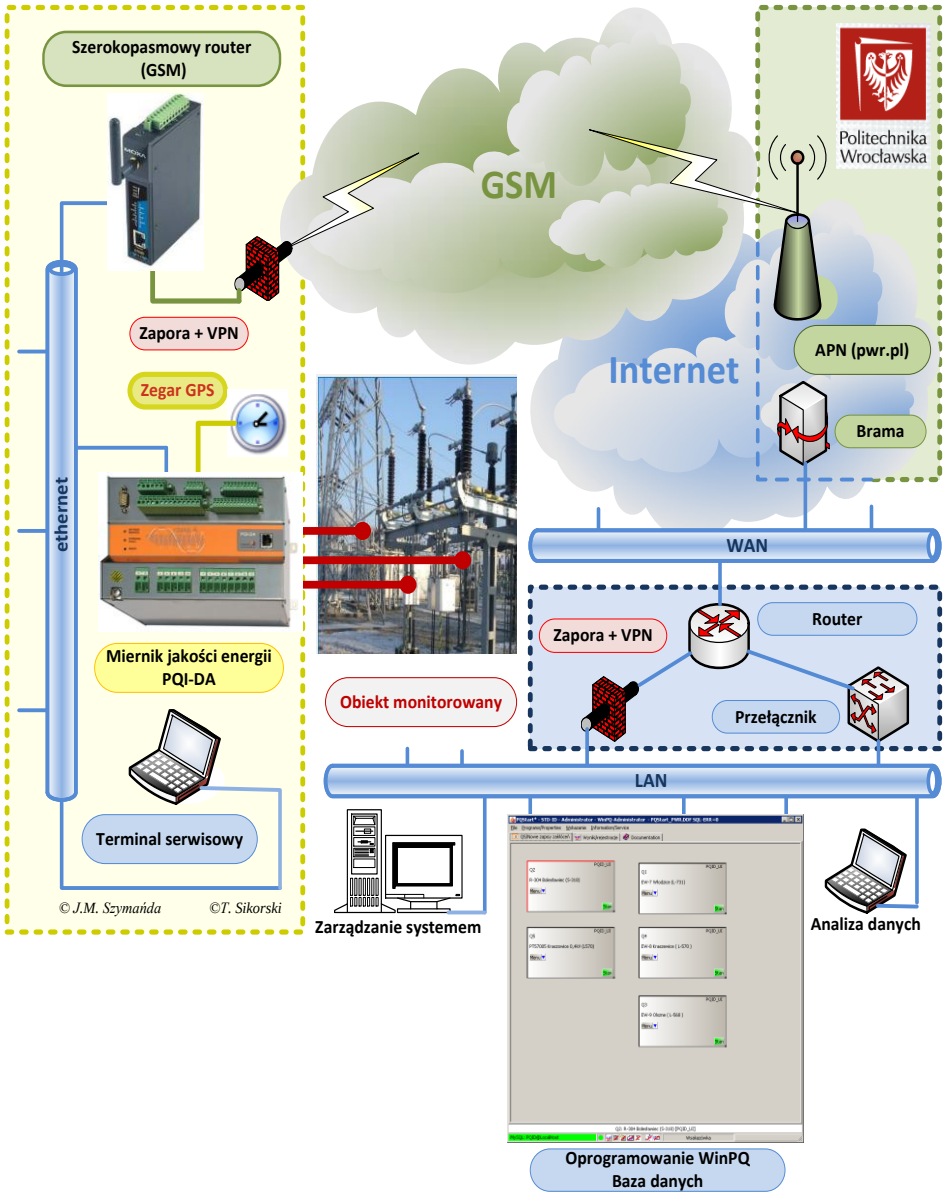
Rys. 1. Fragment sieci dystrybucyjnej z udziałem generacji rozproszonej objętych logistyką identyfikacji i lokalizacji zdarzeń awaryjnych [H13]

Tak wybrana lokalizacja umożliwia pomiar synchroniczny parametrów jakości energii elektrycznej w sieci dystrybucyjnej WN, SN i nN, pomiar zjawisk dynamicznych i na ich podstawie określanie logistyki identyfikacji i lokalizacji zdarzeń awaryjnych. Potwierdzono możliwość skutecznej identyfikacji zdarzeń awaryjnych na podstawie uzyskanych rejestracji w systemie monitorowania działającego od stycznia 2012 r. Analiza umożliwia lokalizację awarii w systemie elektroenergetycznym oraz określanie propagacji zaburzeń. Opracowana przeze mnie procedura monitorowania zaburzeń może stanowić uzupełnienie algorytmów związanych z systemami sieci inteligentnych (smart grid).

W artykułach [H14], [H15], [H19] przedstawiono wybrane zakresy pracy stanowiska badawczego wraz infrastrukturą teleinformatyczną, które zlokalizowane jest na terenie Politechniki Wrocławskiej oraz w stacjach elektroenergetycznych dystrybutorów oraz wytwórców energii: Tauron Dystrybucja S.A. oraz Tauron Ekoenergia Sp. z o.o. Systemem monitorowania i akwizycji danych objętych jest pięć punktów w sieciach dystrybucyjnych z udziałem generacji rozproszonej. Zabudowę analizatorów energii elektrycznej zlokalizowano w dwóch obiektach stacji elektroenergetycznych oznaczonych jako OBIEKT-2 i OBIEKT-5 oraz w trzech elektrowniach wodnych oznaczonych jako OBIEKT-1,

OBIEKT-3 i OBIEKT-4. Funkcjonalność serwera danych SMJEE opracowano na bazie systemu operacyjnego Microsoft Windows Server 2008 R2 +SP1. Oprogramowanie użytkowe rejestracji, akwizycji i archiwizacji danych zrealizowano przy wykorzystaniu pakietu aplikacji Power Quality (WinPQ) niemieckiej firmy „a-Eberle" (http://http://www.winpq.de) w wersji 1.8.1.1-2012-01-11.

W kontekście analizy i oceny stanowiska badawczego habilitant określił dwa kierunki badań. Pierwszy dla działań kontrolnych i dyspozytorskich wykorzystujący infrastrukturę komunikacyjną w trybach transmisji „online" oraz drugi w zakresie oceny możliwości analizy jakości i niezawodności systemu w trybie „offline" danych zarchiwizowanych w bazie danych. Przez „tryb offline" należy tutaj rozumieć możliwość importowania i aktualizacji danych w środowisku informatycznym użytkownika, które nie jest połączone zdalnie z serwerem SMJEE. Należy zaznaczyć, że wykorzystywana w projekcie procedura replikacji danych dotyczy wyłącznie struktury danych uprzednio zarejestrowanych w bazie danych Laboratorium Systemów Monitorowania Jakości Energii Elektrycznej (SMJEE) Politechniki Wrocławskiej. Diagram przepływu informacji w systemie stanowiska badawczego SMJEE.PWR przedstawia rysunek (Rys. 2).



Rys. 2. Diagram przepływu informacji w systemie stanowiska badawczego SMJEE.PWR [H14]

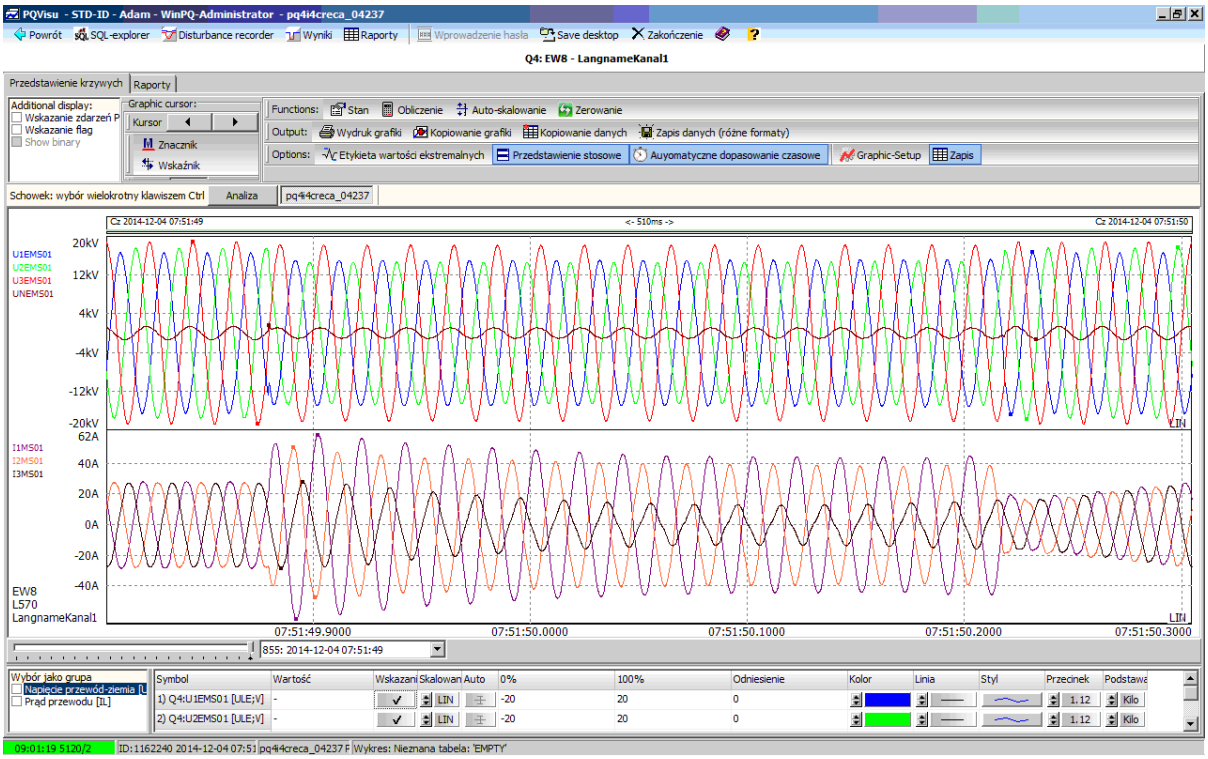
Dane rejestrowane w systemie SMJEE są systematycznie rozpakowywane na serwerze podstawowym oraz na niezależnym serwerze archiwizacji NAS-FTP. W katalogu podstawowym SMJEE znajdują się foldery odpowiadające miejscom zainstalowania analizatorów jakości energii elektrycznej w rozproszonym systemie monitoringu jakości energii, natomiast każdy z katalogów składa się z trzech podkatalogów zawierających pliki danych otrzymanych z analizatorów jakości energii elektrycznej z następujących rejestracji:

srednia_10min - rejestracja zdefiniowanych wybranych wielkości elektrycznych jako wartość średnia dla okresu czasowego 10 min.;

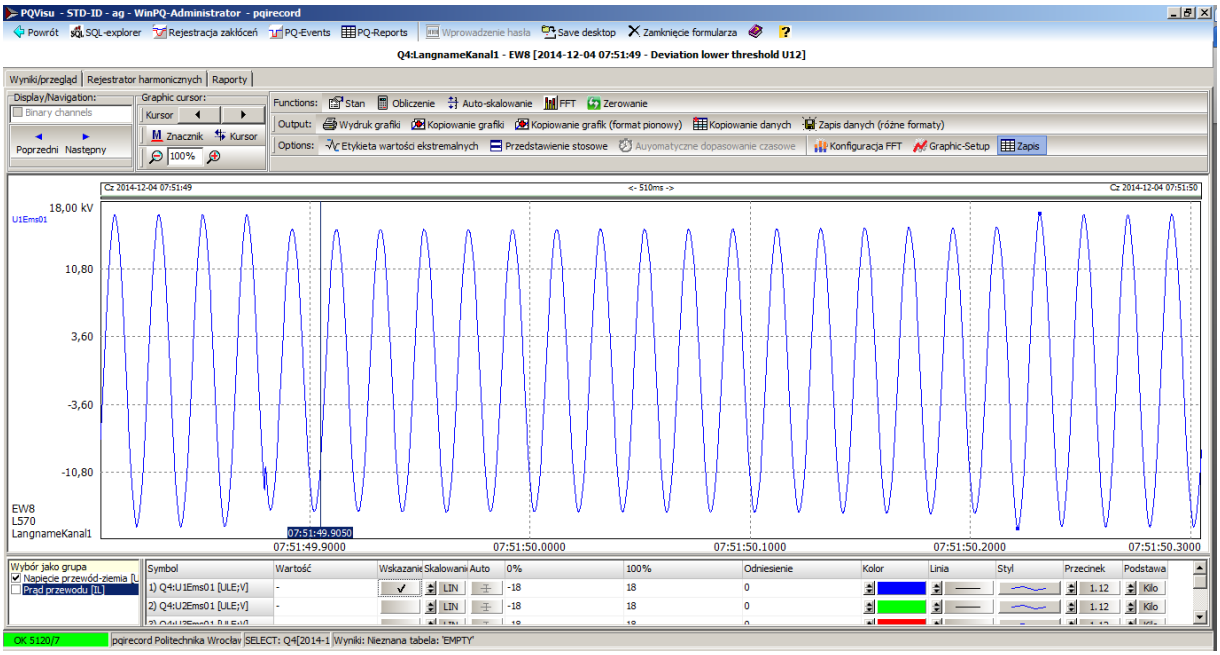
zdarzenia_RA - rejestracja oscyloskopowa zdefiniowanych zakłóceń wielkości elektrycznych z częstotliwością próbkowania fp = 10 kHz;

zdarzenia_RB - rejestracja wartości skutecznych RMS zdefiniowanych zakłóceń wielkości elektrycznych w okresie 10 ms.

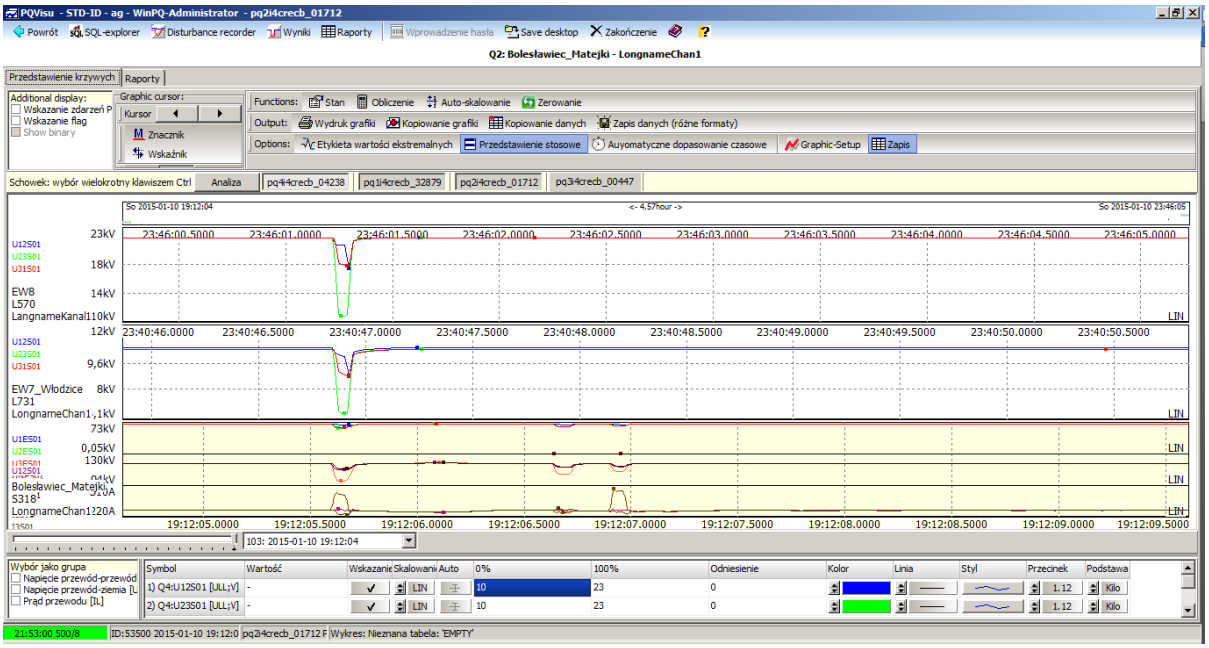
Po zakończeniu procedury aktualizacji danych, dostępny jest dla użytkownika moduł pakietu „PQVisu", który umożliwia przeglądanie oraz raportowanie zarejestrowanych przez analizatory energii pomiarów z punktów kontrolnych w sieciach dystrybucyjnych z udziałem generacji rozproszonej, a także wykonanie wspólnego przebiegu zarejestrowanych zdarzeń dla kilku wybranych obiektów w systemie SMJEE z możliwością **automatycznego dopasowania czasowego**. Pozwala to na obserwację propagacji zdarzenia w badanym systemie elektroenergetycznym. **Z punktu widzenia logistyki systemu elektroenergetycznego interesujące jest zbadanie, jak zdarzenia określające jakość energii elektrycznej, takie jak: wahania napięcia, zapad napięcia, przerwy w zasilaniu, przepięcia, propagują w wybranym systemie elektroenergetycznym. Badania te pozwalają na określenie czasu przejścia zdarzenia z wybranego obiektu do pozostałych obiektów znajdujących się w systemie elektroenergetycznym. Informacje te powstałe w wyniku prowadzenia badań w więcej niż jednej jednostce (Politechnika Wrocławska, Tauron Dystrybucja S. A. oraz Tauron Ekoenergia Sp. z o.o.) są istotne dla niezawodności działania systemu automatyki zabezpieczeniowej. Mimo, że Tauron Dystrybucja S. A. oraz Tauron Ekoenergia Sp. z o.o. nie są jednostkami naukowymi w rozumieniu ustawy, ale badania naukowe realizowane w tych firmach w ramach w/w projektu na zlecenie NCBiR miały znamiona działalności naukowej i konieczne było uzyskanie zgody Rektora Politechniki Wrocławskiej na dodatkowe zatrudnienie w tych firmach ze względu na zapisy Art. 125 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.** Fragment możliwości pracy systemu SMJEE przedstawiono na rysunkach (Rys. 3 – Rys. 9).



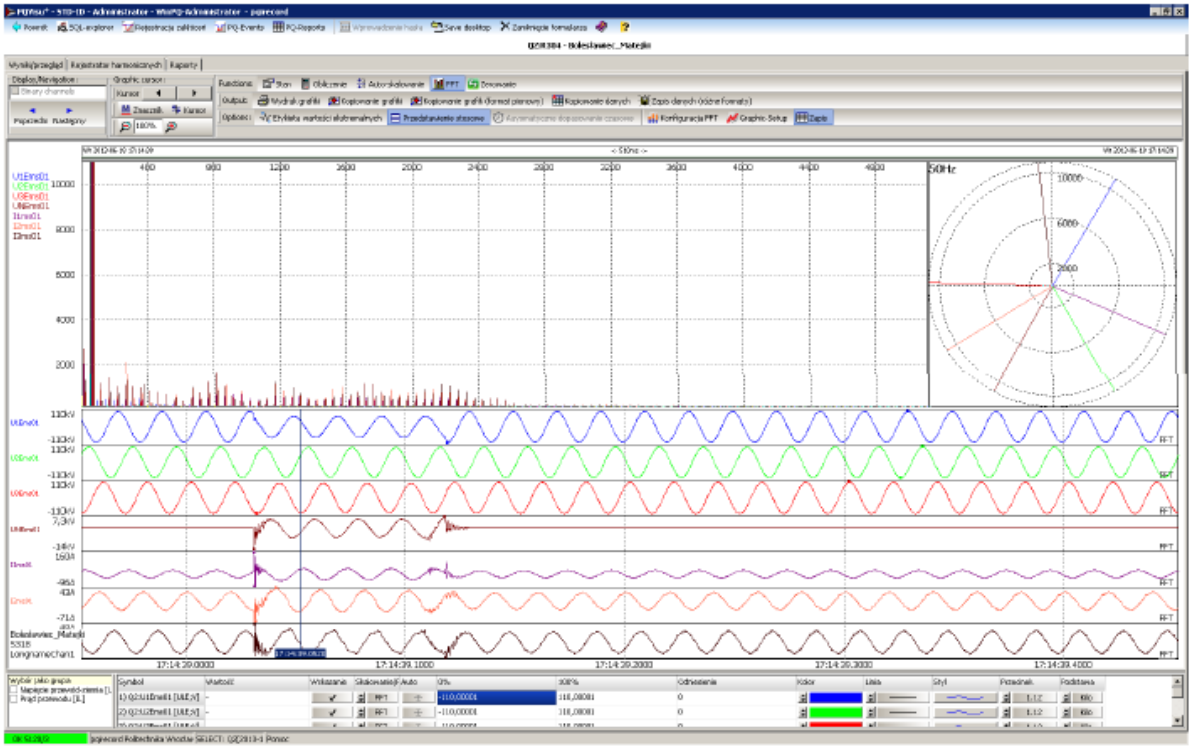
Rys. 3. Rejestracja oscyloskopowa zdarzenia RA z częstotliwością próbkowania 10 kHz [H15]



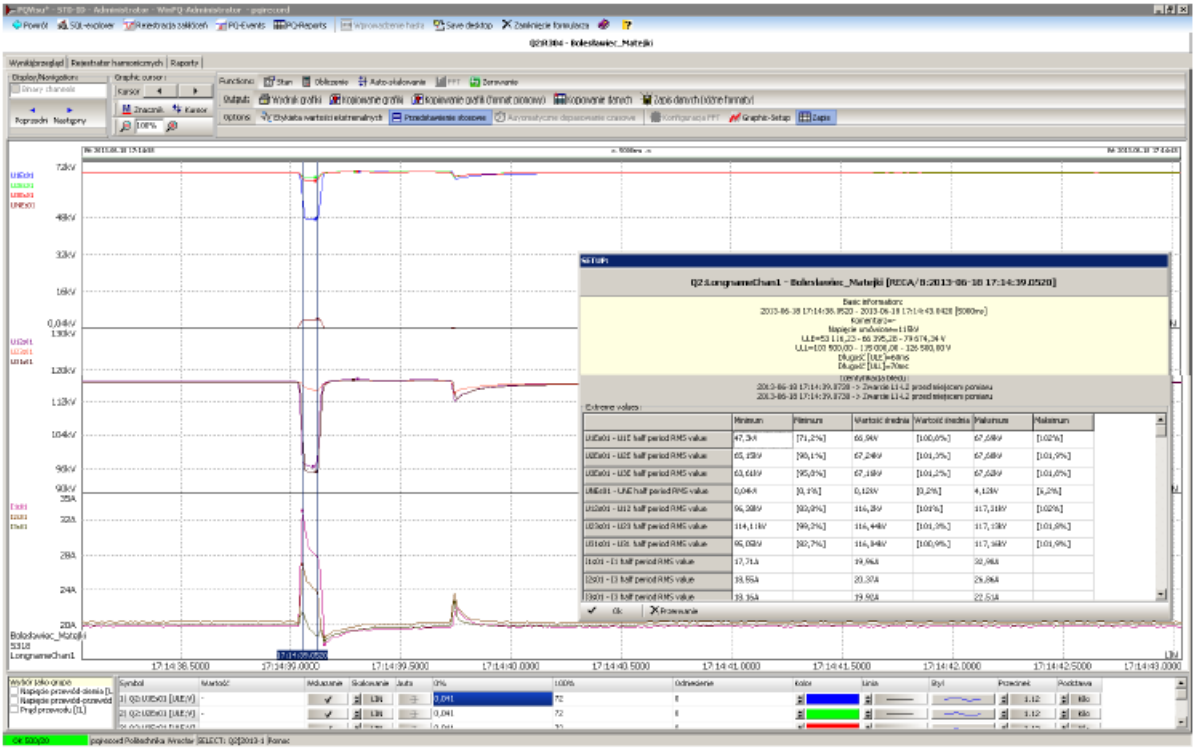
Rys. 4. Rejestracja oscyloskopowa zdarzenia RB w okresie 10 ms dla pojedynczego wybranego sygnału [12]



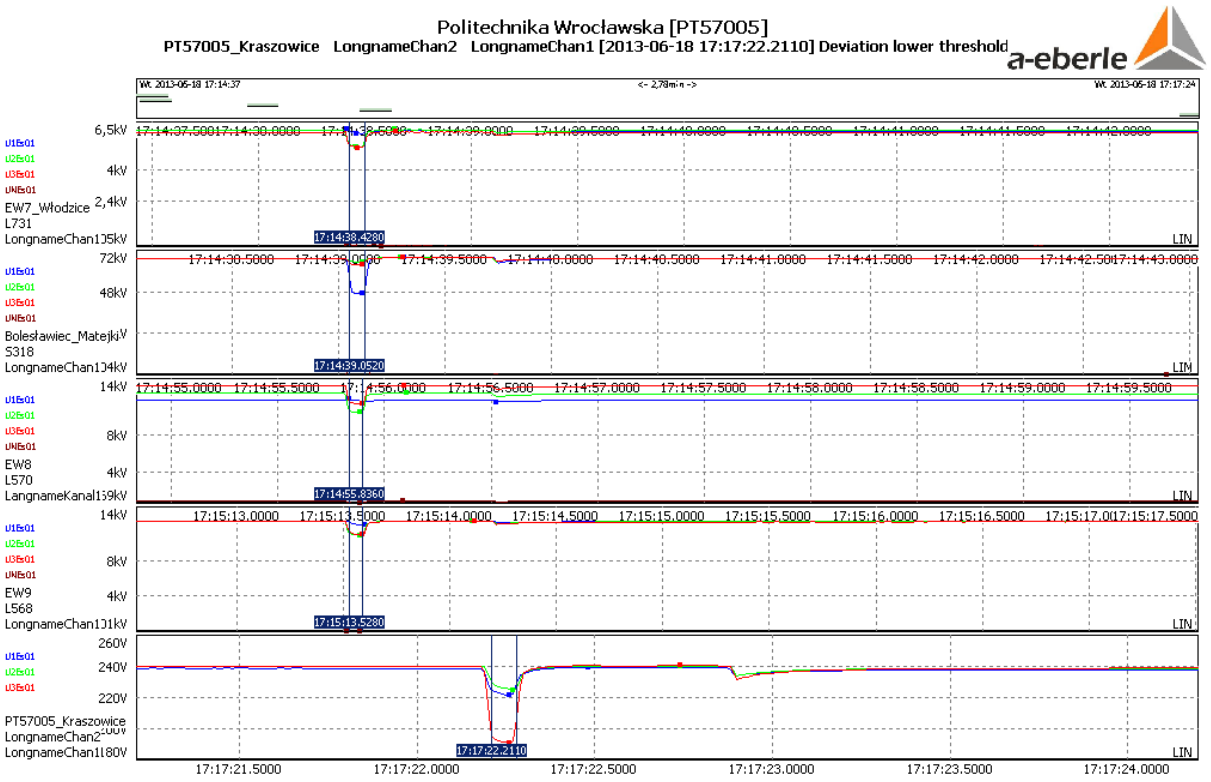
Rys. 5. Wspólny przebieg zdarzenia RB na trzech wybranych obiektach [H15]



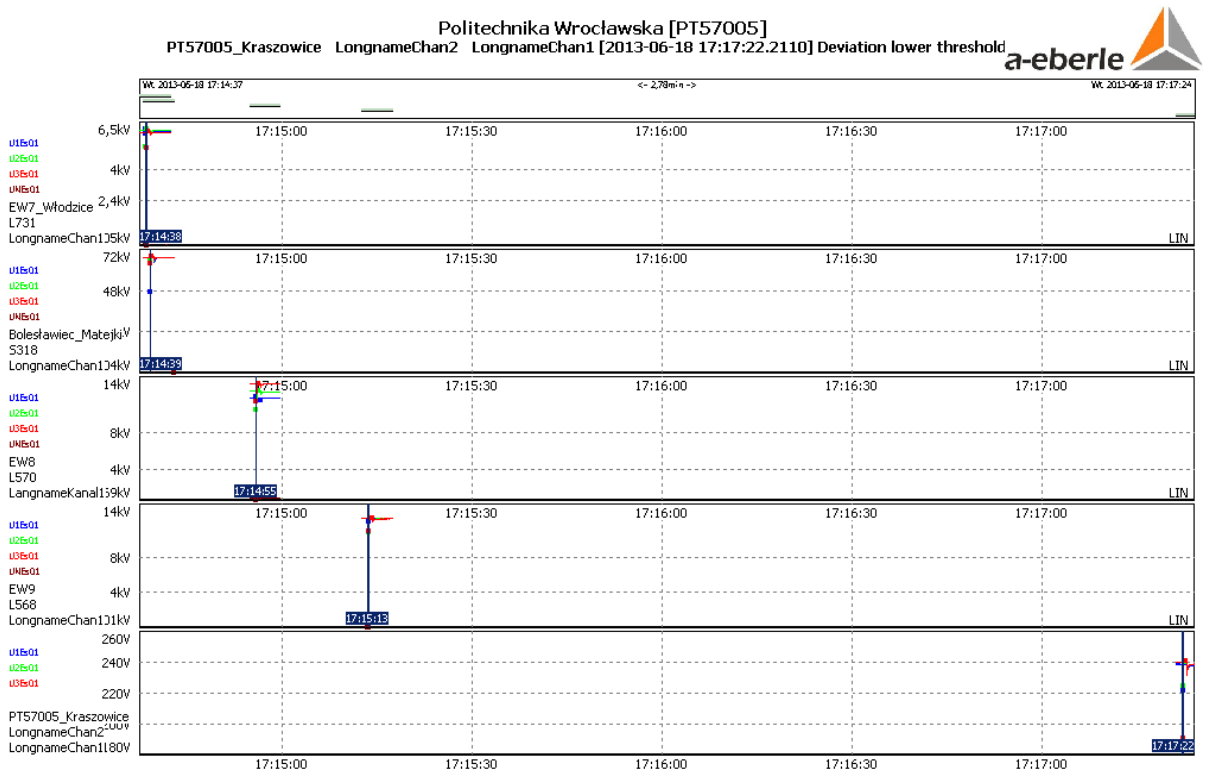
Rys. 6. Wybrany zapis RA zaburzeń jakości energii zarejestrowanych w punkcie testowym WN 110kV, analiza częstotliwości FFT oraz wykres fazorów [H19]



Rys. 7. Wspólny przebieg zdarzenia RB w punkcie testowym WN 110 kV z wyszczególnieniem wybranych parametrów [H19]



Rys.8. Rejestracje zdarzenia RB wybranego zaburzenia jakości energii elektrycznej widzianego synchronicznie w punktach pomiarowych systemu – zestawienie zbiorcze bez dopasowania czasowego [H15]



Rys. 9. Rejestracje zdarzenia RB wybranego zaburzenia jakości energii elektrycznej widzianego synchronicznie w punktach pomiarowych systemu – zestawienie zbiorcze z dopasowaniem czasowym [H15]

Wykonane prace wykazały, że zaprojektowany i wykonany według moich wytycznych system monitorowania jakości energii elektrycznej SMJEE spełnia swoje zadania użytkowe tj.:

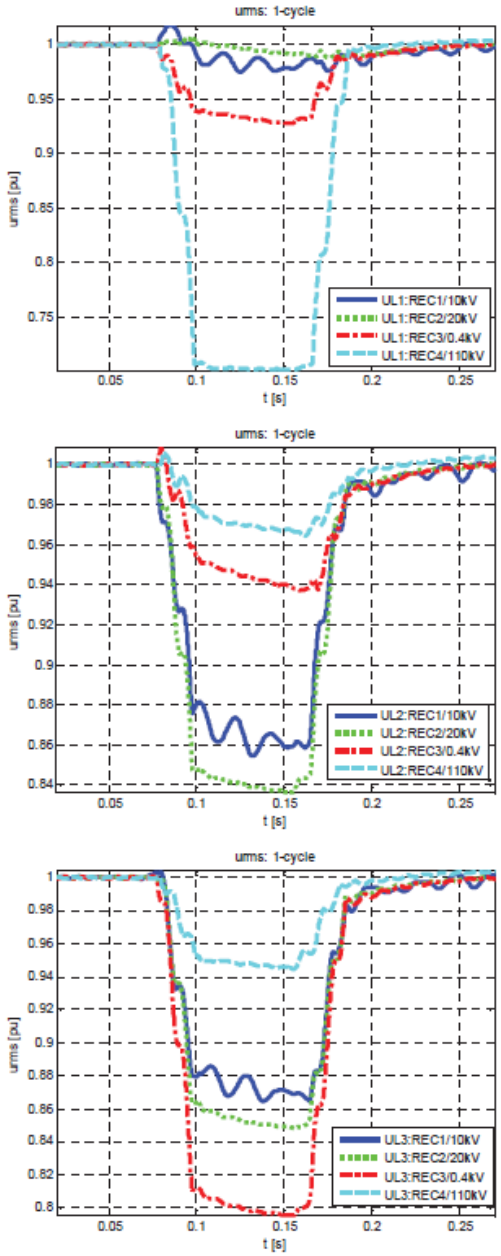
- monitoruje jakość energii w wybranych punktach pomiarowych badanego systemu elektroenergetycznego zgodnie z normą EN-50160;
- zapewnia integralność bazy danych, która stanowi podstawę wyznaczania wskaźników jakości energii elektrycznej z zadanego okresu pomiarowego;
- pozwala na szybką wizualizację stanu pracy badanego układu elektroenergetycznego w trybach: dyspozytorskim (*online*) oraz badawczym (*offline*);
- jest systemem bezpiecznym z zaimplementowanymi elementami rozproszonej archiwizacji i ochrony danych przed utratą informacji (RAID-5) oraz nieuprawnionym dostępem SAS (*security area system*).

4.3.3. Metody detekcji i analizy zakłóceń w sieciach dystrybucyjnych [H16], [H17], [H18], [H20]

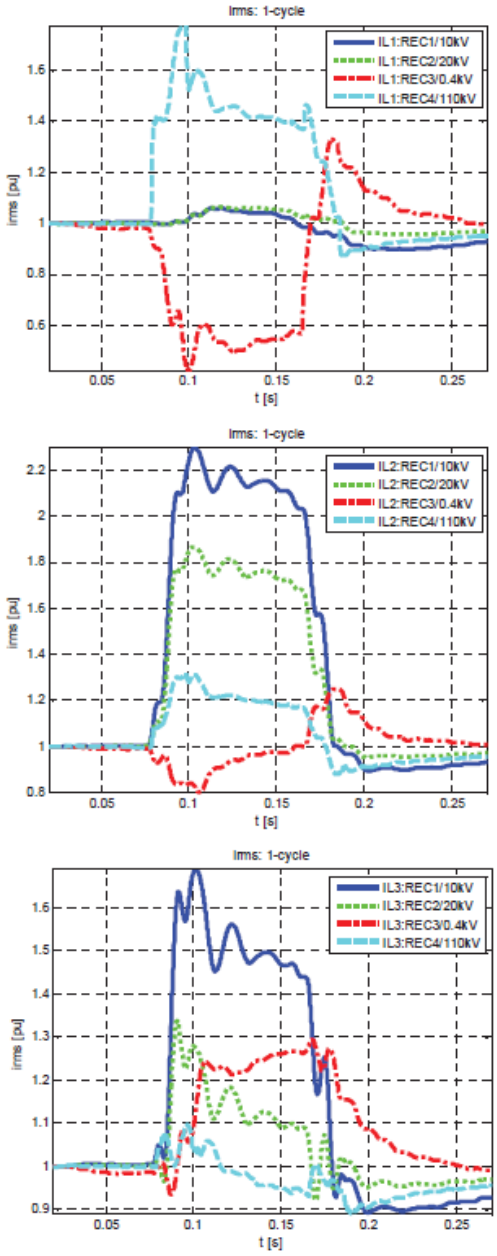
Budowa oraz implementacja systemu monitorowania jakości energii SMJEE (Rys. 1, rozdział 4.3.2) na wybranej części sieci energetycznej zawierającej rozproszone jednostki wytwórcze, **pozwala na wykonanie szeregu oryginalnych analiz pracy tego systemu w stanach zarówno bez- jak i awaryjnych. Zaletą systemu monitoringu jest synchroniczna rejestracja zdarzeń dynamicznych w różnych punktach monitorowanej sieci. Pozwala to nie tylko na detekcję stanu awaryjnego, ale również na określenie kierunku propagacji zakłócenia w systemie elektroenergetycznym w obszarze monitorowanej sieci, a więc pozwala określić czy zakłócenie pochodzi od wytwórcy czy od strony odbiorcy.**

Jednym z często występujących rodzajów zakłócenia w sieci z generacją rozproszoną jest zapad napięcia.

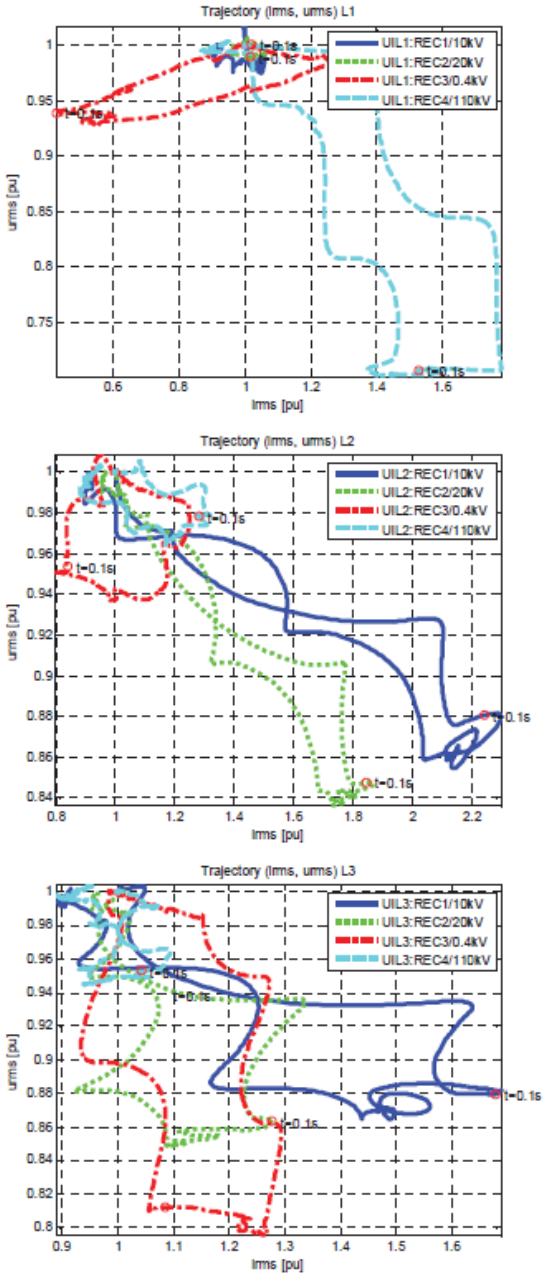
W pracach [H17], [H18] zaprezentowano metodę lokalizacji źródła oraz kierunku zapadu napięcia w sieci elektroenergetycznej z generacją rozproszoną, na podstawie zarejestrowanych synchronicznie pomiarów wielopunktowych w systemie SMJEE. Głównym celem przeprowadzonych badań jest ocena możliwości wykorzystania trajektorii przebiegów wartości skutecznej napięcia i prądu (I,U), jej linearyzacji oraz stopnia nachylenia do określenia kierunku propagacji zapadu napięcia. Rezultaty zaprezentowano na rysunkach (Rys. 10 – Rys. 17).



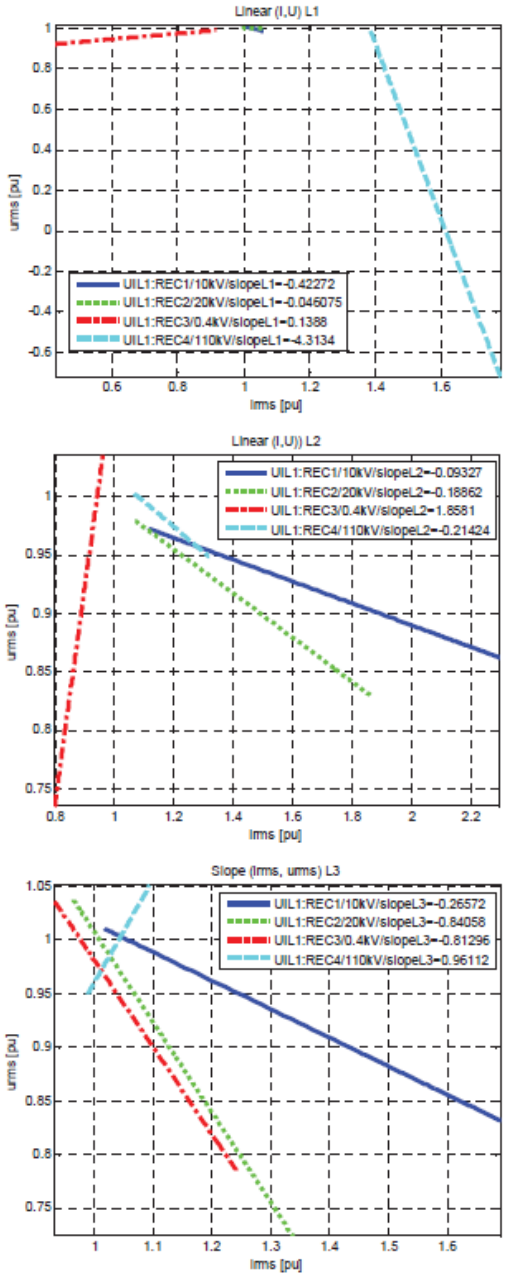
Rys. 10. Przebiegi rms napięcia faz L1, L2, L3, pomiary zsynchronizowane zapadu napięcia REC1 ÷ REC4 [H17]



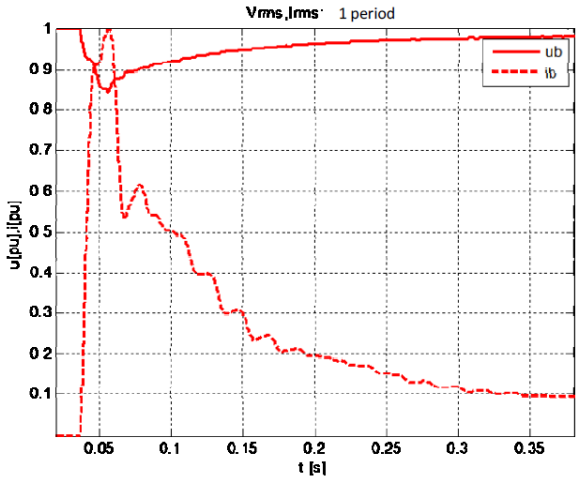
Rys. 11. Przebiegi rms prądu faz L1, L2, L3, pomiary zsynchronizowane zapadu napięcia REC1 ÷ REC4 [H17]



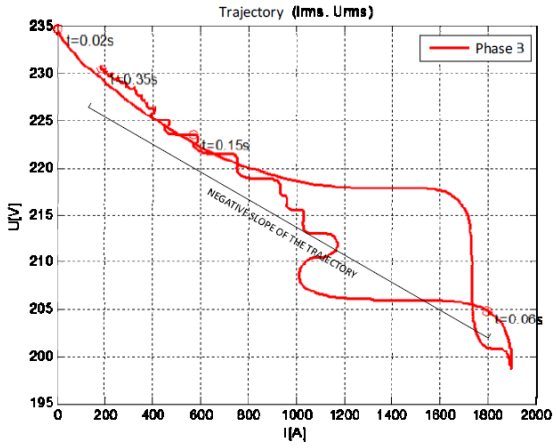
Rys. 12. Trajektoria (I,U) faz L1, L2, L3, pomiary zsynchronizowane zapadu napięcia REC1 ÷ REC4 [H17]



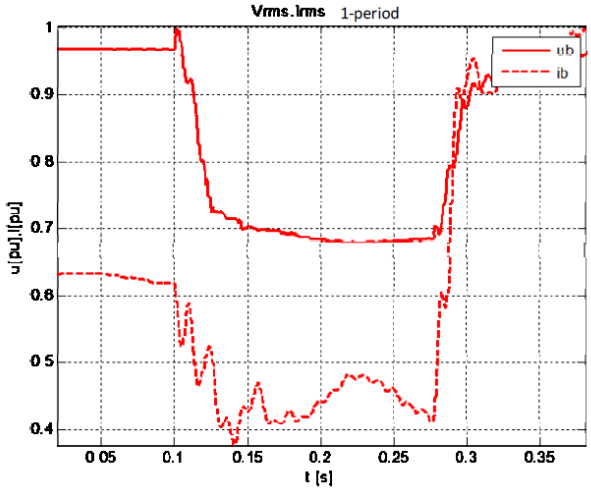
Rys. 13. Linearyzacja trajektorii (I,U) faz L1, L2, L3, pomiary zsynchronizowane zapadu napięcia REC1 ÷ REC4 [H17]



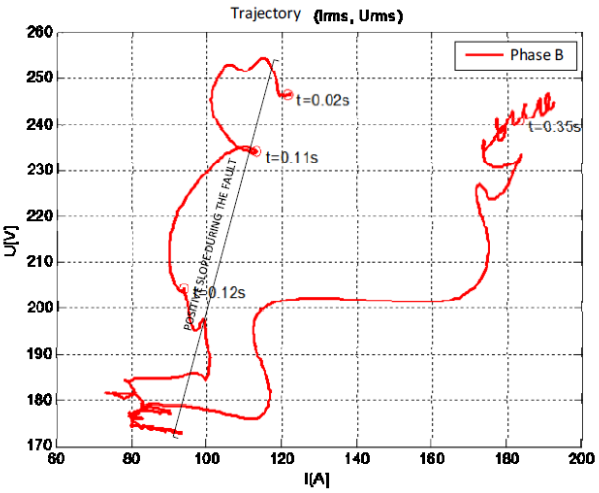
Rys. 14. Zmiany znormalizowanych 1-okresowych wartości rms napięć i prądów spowodowane włączeniem asynchronicznego generatora małej elektrowni wodnej MEW do sieci w czasie 0,05s [H18]



Rys. 15. Trajektoria (I,U) wybranej fazy L3 zapadu napięcia spowodowane włączeniem asynchronicznego generatora MEW do sieci [H18]



Rys. 16. Przebieg zmian wartości rms napięcia i prądu na zaciskach generatora asynchronicznego w MEW podłączonej do sieci nN podczas spadku napięcia spowodowanego powstałym incydentem od strony sieci w czasie 0,1s od początku rejestracji [H18]



Rys. 17. Trajektoria (I, U) dla wybranej fazy zapadu napięcia spowodowana uderzeniem pioruna [H18]

Przeprowadzone przeze mnie badania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

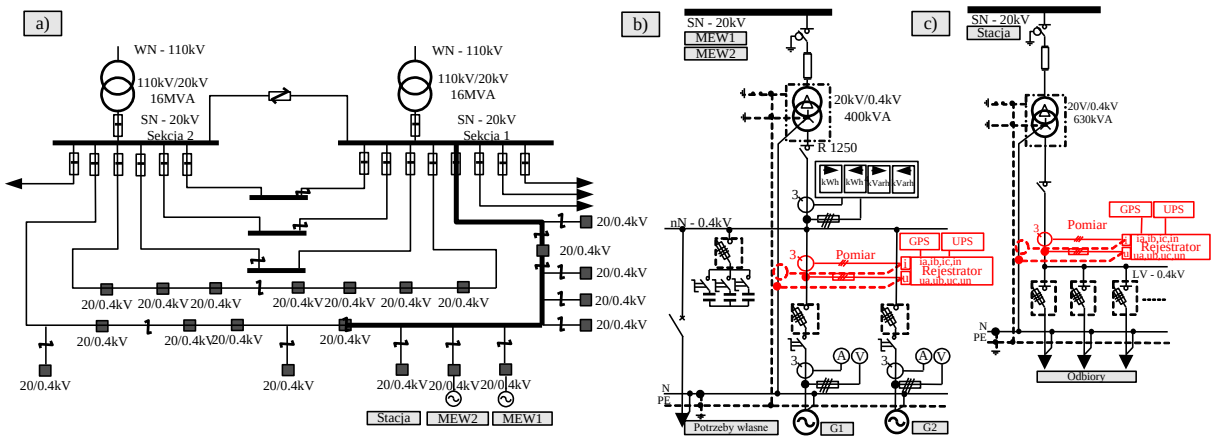
- bezpośrednie analiza przebiegu trajektorii (I,U) jest narzędziem dość skomplikowanym ze względu na nieliniowy kształt jej charakterystyki;
- propozycja linearyzacji charakterystyki ułatwia interpretację zarejestrowanych danych;
- proces linearyzacji jest wrażliwy na wybór okna czasowego w stosunku do początku wystąpienia zapadu;
- kąt nachylenia zlinearyzowanych trajektorii (I,U) może być informacją co do kierunku propagacji zakłócenia;

- dodatnie nachylenie zlinearyzowanej trajektorii (I,U) sugeruje propagację zapadu napięcia od strony systemu, zaś ujemne od strony generacji;
- należy zwrócić uwagę na to, że nachylenie nie zawsze ma ten sam znak dla każdej fazy w danym punkcie pomiarowym lub dla tej samej fazy we wszystkich punkach pomiarowych systemu i wynika to z różnych rodzajów występowania zwarcia w systemie oraz konstrukcji transformatorów;
- zaprezentowana metoda pozwala na lokalizację źródła oraz kierunku zapadu napięcia w sieci elektroenergetycznej z generacją rozproszoną na podstawie zarejestrowanych synchronicznie pomiarów wielopunktowych w systemie SMJEE.

Prace nad zastosowaniem nowych metod przetwarzania sygnałów w obszarze jakości energii elektrycznej nabierają coraz większego znaczenia w odniesieniu do zmian charakteru pracy współczesnych sieci elektroenergetycznych. Jednym z podstawowych elementów tych zmian jest znaczący wzrost udziału generacji rozproszonej i związany z tym faktem szereg zagadnień wokół procesu integracji jednostek generacji z siecią elektroenergetyczną, a w szczególności wpływu układów małej generacji na stabilność napięciową, wahania napięcia czy generację harmonicznych, jak również współpracę w procesie podtrzymania warunków stabilnościowych.

W artykule [H20] podjęto dyskusję w ocenie możliwości wykorzystania aparatu dekompozycji na mody empiryczne EMD oraz transformacji Hilberta w analizie stanów przejściowych charakterystycznych dla pracy układów generacji rozproszonej. Przedstawiono i omówiono nowoczesne techniki cyfrowego przetwarzania sygnałów (Rozdział II [H20]): transformata Hilberta (*Hilbert Transform* HT), rozkład w trybie empirycznym (*Empirical Mode Decomposition* EMD), dystrybucja Wignera-Ville (*Wigner-Ville Distribution* WVD), a także przekrój wygładzony pseudo rozkładu Wignera-Ville'a (*Smoothed Pseudo Wigner-Ville Distribution* SPWVD) i natychmiastowy wskaźnik zniekształceń (*Instantaneous Values of Distortion Index* IDIN) **jako detektora wykrywania zakłócenia parametrów jakości energii w stanach nieustalonych pracy sieci**. Kombinacja rozkładu na mody empiryczne (EMD) oraz transformacji Hilberta znana jest jako transformacja Hilberta-Huanga (HHT). Efektem końcowym transformacji Hilberta-Huanga może być reprezentacja czas-częstotliwość-energia, przy czym oś częstotliwości należy utożsamiać z chwilową częstotliwością, a energię z chwilową amplitudą.

Dla oceny możliwości zastosowania powyższych technik przebadałem zarejestrowane sygnały stanu pracy dynamicznej sieci dystrybucyjnej średniego napięcia, której fragment przedstawiono na rysunku (Rys. 18). W skład sieci SN wchodzą dwie podstacje małych elektrowni wodnych MEW1 i MEW2 oraz podstacja miejska.

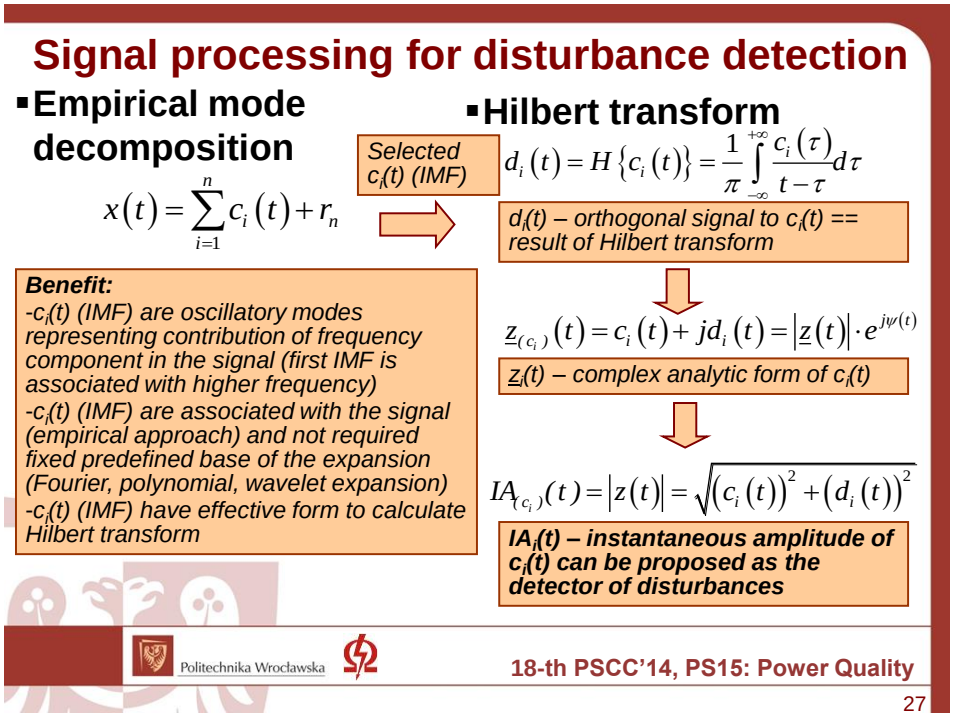


Rys. 18. Fragment sieci dystrybucyjnej średniego napięcia zawierającej badane elektrownie wodne oraz stację odbiorczą (a), lokalizację rejestratorów w obwodach elektrowni (b) i stacji (c) [H20]

Jako reprezentatywny, poddano analizie sygnały prądu podczas załączania baterii kondensatorów w MEW1 zarejestrowane odpowiednio w MEW1 oraz MEW2. Sygnały te różnią się znacząco pod względem klasy i charakteru zakłócenia, w związku z tym, stanowić będą reprezentatywne sygnały testowe dla metody detekcji zakłócenia. Zaproponowano następujący algorytm detekcji zakłócenia:

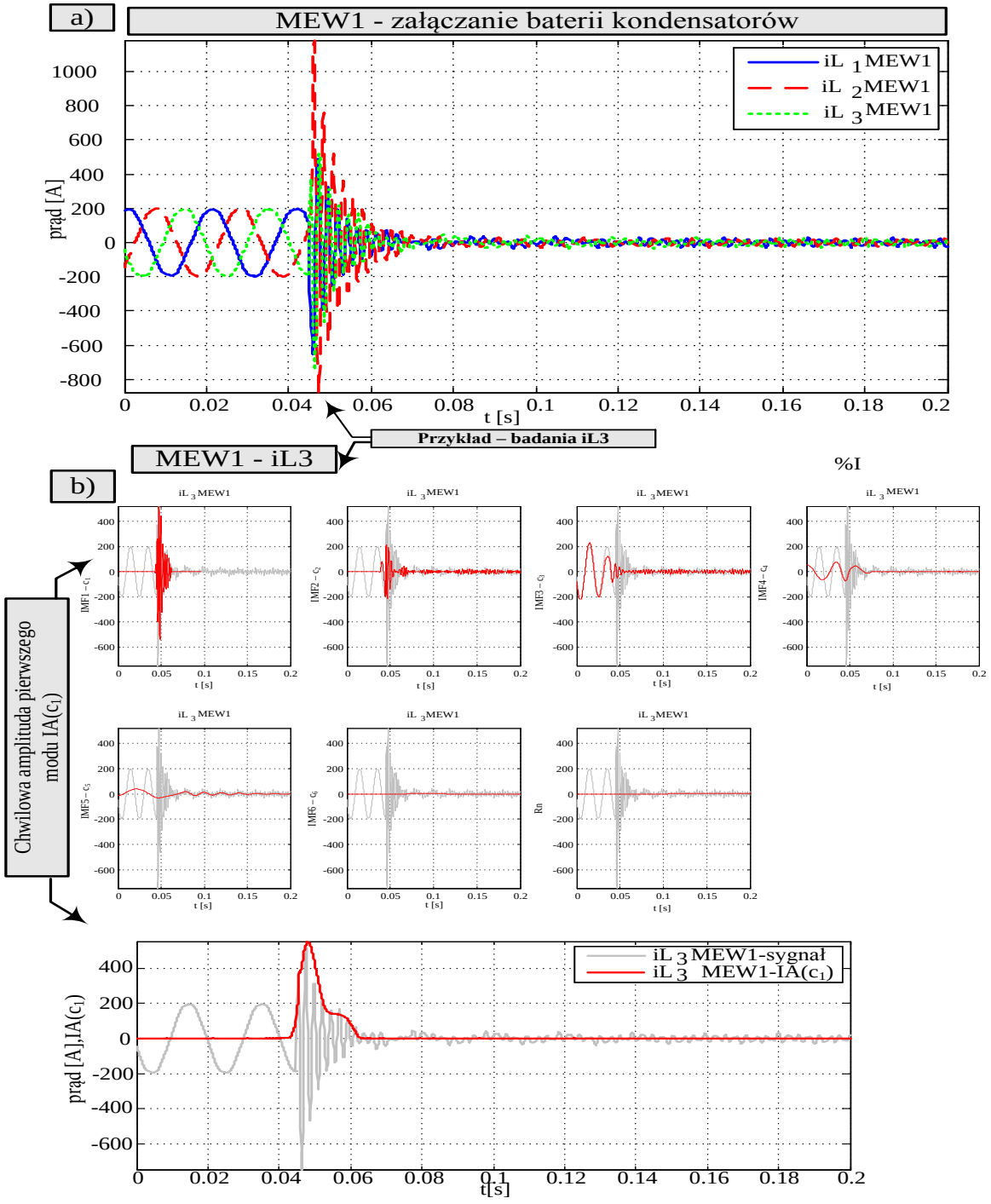
- wyznaczenie dekompozycji na mody empiryczne {c1, c2, ...,} oraz resztę rozkładu r_n sygnału prądu,
- wyznaczenie chwilowej amplitudy pierwszego modu IA(c1) rozkładu z wykorzystaniem transformaty Hilberta,
- detekcja zakłócenia na podstawie przebiegu chwilowej amplitudy pierwszego modu IA(c1).

Powyższy algorytm postępowania zaprezentowano na rysunku (Rys. 19):

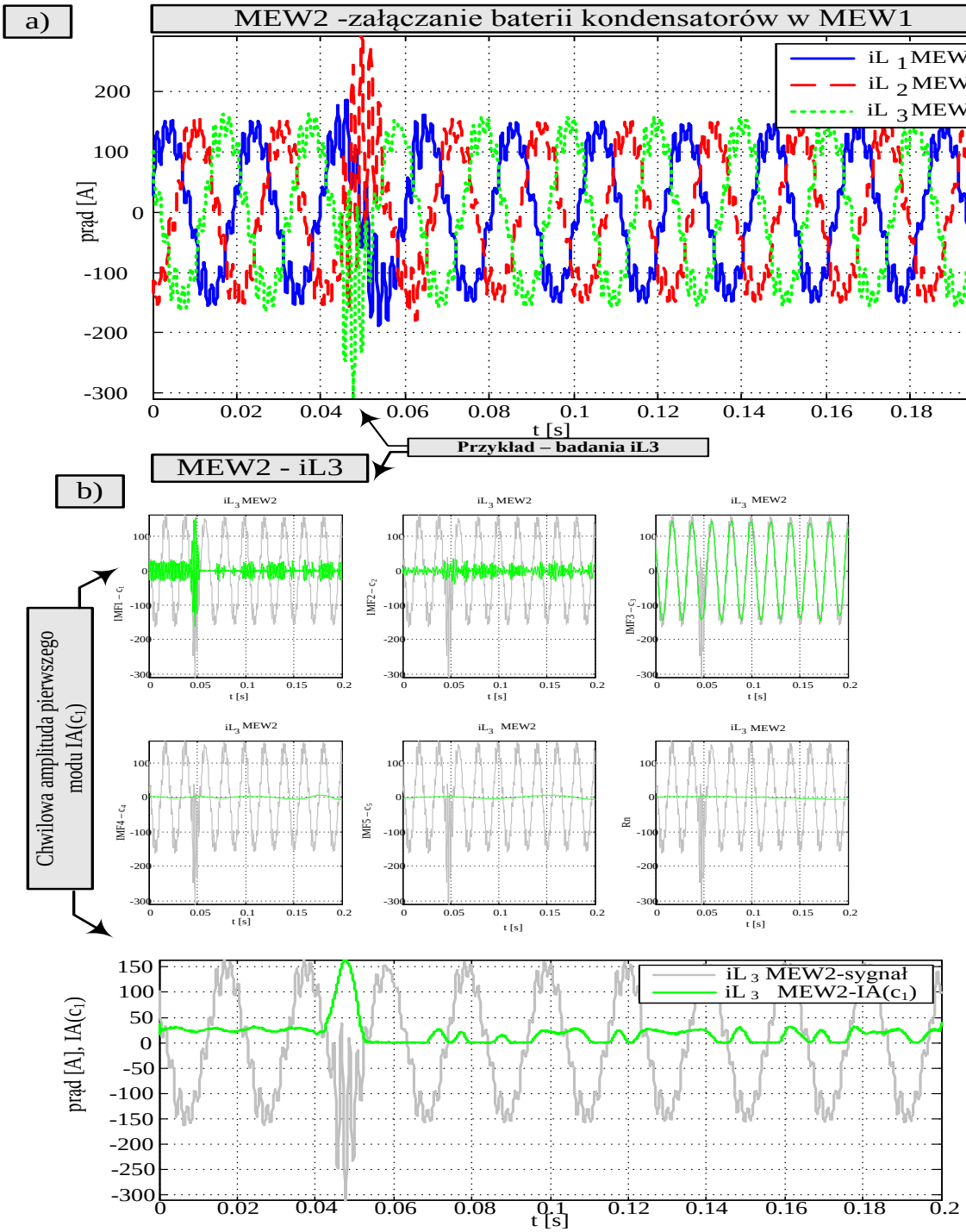


Rys. 19. Algorytm detekcji zakłócenia

Zilustrowane wyniki analizy sygnału prądu podczas załączania baterii kondensatorów w MEW1 zarejestrowane odpowiednio w MEW1 oraz MEW2 przedstawiono na rysunkach (Rys. 20 – Rys.21):



Rys. 20. Zastosowanie chwilowej amplitudy pierwszego modu rozkładu EMD do detekcji zakłócenia: przebieg prądów podczas załączania baterii kondensatorów w elektrowni MEW1 zarejestrowany w MEW1 (a) oraz jego dekompozycja na mody empiryczne wraz z wyznaczeniem chwilowej amplitudy pierwszego modu jako detektora zakłócenia (b) [H20]



Rys. 21. Zastosowanie chwilowej amplitudy pierwszego modu rozkładu EMD do detekcji zakłócenia: przebieg prądów podczas załączania baterii kondensatorów w elektrowni MEW1 zarejestrowany w MEW2 (a) oraz jego dekompozycja na mody empiryczne wraz z wyznaczeniem chwilowej amplitudy pierwszego modu jako detektora zakłócenia (b) [H20]

Przeprowadzone badania pozwoliły mi na sformułowanie następujących wniosków:

- **charakterystyka chwilowej amplitudy pierwszego modu rozkładu IA(c1) może zostać z powodzeniem wykorzystana jako detektor zakłócenia;**

- **wprowadzona charakterystyka wyraża się wrażliwością na pojawienie się zakłócenia oraz szybkością reakcji;**
- **na przykładzie sygnału zakłócenia o charakterze zanikających drgań wyższych harmonicznych zarejestrowanego w MEW1 podczas załączania baterii kondensatorów można stwierdzić, iż charakterystyka nadąża za zmianami w sygnale, co daje możliwości określenia początku i końca zakłócenia;**
- **dla wprowadzenia kontroli wrażliwości metody można dodatkowo zdefiniować poziom wyzwalania detekcji zakłócenia, jako poziom IA(c1), przy którym dane zakłócenie należy uznać za znaczące;**
- **warto również zwrócić uwagę na szybkość wyznaczania charakterystyki IA(c1). Metoda wykorzystuje działania bezpośrednio na sygnale, realizowane w dziedzinie czasu. Dekompozycja nie jest oparta o stały zbiór funkcji bazowych, lecz budowana jest w oparciu o sygnał. Nie ma zatem konieczności przeprowadzania operacji korelacji funkcji bazowych z sygnałem, gdyż funkcje bazowe rozkładu pochodzą z sygnału. Transformata Hilberta oraz wyznaczanie chwilowej amplitudy również należą do działań w dziedzinie czasu.**

Ostatnim obszarem zainteresowań naukowych omawianych w niniejszym podrozdziale jest analiza wpływu mikroinstalacji na parametry jakości energii elektrycznej w punkcie przyłączenia. Zagadnienie to szeroko omówiono w artykule [H16]. W artykule opisano zastosowania obecnych norm i przepisów oraz zasad regulacji źródeł rozproszonych niskiego napięcia w celu określenia możliwego wpływu źródła rozproszonego na zaburzenia jakości energii elektrycznej w punkcie przyłączenia.

Głównym wkładem naukowym pracy jest wykazanie zależności pomiędzy warunkami zwarciowymi panującymi w punkcie przyłączenia, a możliwym poziomem zmian parametrów jakościowych spowodowanych przyłączeniem źródła o zadanej charakterystyce. Praca przedstawia również przykładowe wyniki obliczeń oraz rejestracji i analiz wybranych parametrów jakości energii elektrycznej, wyznaczone w punkcie przyłączenia systemu generacji fotowoltaicznej o mocy 15 kVA (Rys. 22) składającego się z trzech jednostek generacji wykorzystujących różne technologie paneli fotowoltaicznych oraz różne układy przekształtnikowe skojarzenia z siecią.

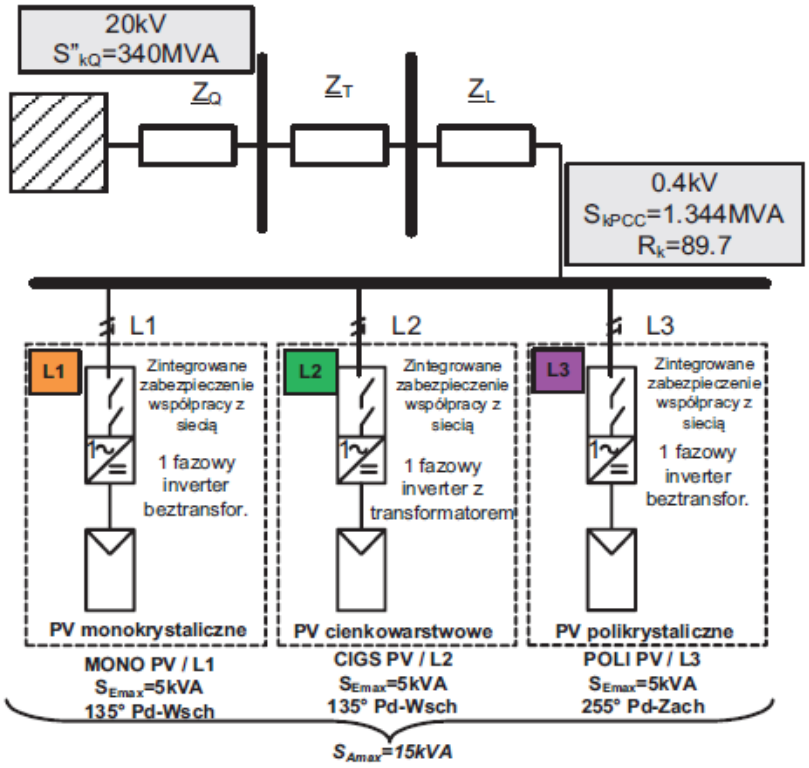
Prace badawcze prowadziłem dwutorowo:

1. Oszacowałem wpływ mikroinstalacji na parametry jakościowe w punkcie przyłączenia (Tabela 1);

2. Dokonałem analizy wpływu mikroinstalacji na parametry jakościowe w punkcie przyłączenia dotyczące:

- wpływu wyłączenia i włączenia systemu generacji na efekt nagłej zmiany napięcia w punkcie przyłączenia (por. Rys. 7 [H16]);
- wpływu nierównomiernego wytwarzania w jednofazowych jednostkach generacji na asymetrię napięcia w punkcie przyłączenia (por. Rys. 8 [H16]);

- wpływu poziomu wytwarzania na poziom harmonicznych w prądach źródeł THDI (por. Rys. 9 [H16]);
- analizy udziału harmonicznych w prądzie w odniesieniu do poziomów dopuszczalnych wyznaczonych na podstawie norm VDE-AR-N 4105 oraz IEC 61000-3-2/12 (por. Rys. 10 [H16]).



Rys. 22. Obwód zwarciowy skojarzony z siecią badanego systemu fotowoltaicznego [H16]

Tabela 1. Oszacowanie wpływu badanego systemu fotowoltaicznego o mocy S_{Amax} = 15 kVA przyłączonego do sieci nN w punkcie przyłączenia o mocy zwarciowej S_{kPCC} = 1,344 MVA, współczynnik zwarciowy R_k = 89,7 [H16]

Parametr JEE	Charakterystyka pracy systemu	Oszacowanie zmian parametru JEE
Zmiana poziomu napięcia (Δu_a)	$\cos\varphi = 1$	1,01%
	$\cos\varphi_{poj} = 0{,}95$	0,95%
Nagłe zmiany napięcia ($\Delta u_{max.}$)	k=1,2	1,22%
Asymetria (k_{U2})	$S_{Emax.L1} = S_{Emax.L2} = S_{Emax.L3}$	0,37%
Składowa stała prądu I_{DC}	I_{rE}=21,7 A	108,7 mA

Do najważniejszych moich osiągnięć przedstawionych w tej pracy należy:

- **wskazanie braków w spójnej normalizacji poświęconej wymaganiom przyłączania mikroinstalacji do sieci rozdzielczej niskiego napięcia;**
- **wykazanie, że metody badań emisji zaburzeń jakości energii stosowane dla odbiorników są niewystarczające w przypadku układów generacji;**

- **wykonanie reprezentatywnej analizy współpracy z siecią nN systemu generacji opartego na trzech systemach fotowoltaicznych różnego typu, który wskazuje na realne zależności pomiędzy parametrami jakości energii w punkcie połączenia a poziomem generacji oraz zastosowanymi charakterystykami regulacji (kluczowe zależności wnosi realizacja w układach przekształtnikowych charakterystyki kontroli współczynnika mocy, a także typ stosowanych rozwiązań przekształtnikowych, determinowanych nierzadko przez technologie uzyskania energii pierwotnej, jak na przykład typ paneli fotowoltaicznych);**
- **wskazanie możliwości oszacowania wpływu rozważanej mikroinstalacji na warunki jakościowe w punkcie przyłączenia, przy założeniu dostępu do parametrów zwarciowych w punkcie przyłączenia (różne warunki zwarciowe w rozważanych punktach przyłączenia mikroinstalacji otwierają szerszą dyskusję na temat określenia dopuszczalnych zmian parametrów jakościowych w zależności od warunków zwarciowych w punkcie przyłączenia); - przedstawienie jako przykładu odniesienia wartości dopuszczalnych do warunków zwarciowych w punkcie przyłączenia oceny udziału harmonicznych w prądzie.**

Przedstawiona analiza tych problemów może stanowić wkład w rozwój badań nad niezawodnością nowoczesnych systemów elektroenergetycznych, a tym samym przez poprawę jakości energii elektrycznej przyczynić się do rozwoju badań z tego zakresu w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika.

4.3.4. Wskaźniki oceny jakości energii elektrycznej w systemach z udziałem generacji rozproszonej [H1], [H2], [H3], [H4], [H5], [H9], [H10], [H12]

Współczesne zagadnienia jakości energii elektrycznej oscylują wokół zagadnień z pogranicza stabilności pracy systemu, zagrożeń dla bezpiecznej pracy odbiorników i elementów sieci elektroenergetycznych, a także liberalizacji rynku energii oraz relacji odbiorca i dostawca energii. Jednak w ujęciu technicznym zakres tematyki jakości energii mieści się przede wszystkim w problematyce kompatybilności elektromagnetycznej.
W artykule [H12] przedstawiono nowe podejście do oceny jakości energii elektrycznej w oparciu o wskaźniki globalne i obszarowe (syntetyczne) w porównaniu do publikacji [H13], gdzie szeroko omówiono zarówno zagadnienia związane z generacją rozproszoną jako aktywnie rozwijaną obecnie gałęzią energetyki, jak i parametry oceny jakości energii elektrycznej, niezbędne do definiowania wskaźników dla systemu monitorowania jakości dostaw energii elektrycznej. Opracowanie obejmuje badania jakości energii w rozproszonych sieciach dystrybucyjnych. W pracy wykorzystano pomiary synchroniczne wykonywane w rzeczywistym układzie elektroenergetycznym współpracującym z elektrowniami wodnymi o mocach rzędu 1 MW. Parametry monitorowano w węzłach o różnym poziomie napięć w okresie pięciu lat od stycznia 2012 roku do grudnia 2017 roku. **Zaproponowane nowe**

wskaźniki syntetyczne mogą stanowić istotne uzupełnienie aktualnie prowadzonych badań naukowych w obszarze inteligentnych sieci współpracujących z generacją rozproszoną, gdyż pozwalają ocenić pracę sieci w danym jej obszarze strukturalnym, co ma szczególne znaczenie przy rozbudowanych systemach elektroenergetycznych w kontekście oceny niezawodności jej pracy. Dla przypomnienia - przyjęta powszechnie norma PN-EN 50160 parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych uznaje za podstawę oceny jakości energii. Do zbioru tych parametrów należą: częstotliwość, poziom napięcia i jego zmienność, nagłe spadki napięcia, okresowe lub przejściowe zwyżki napięcia, wyższe harmoniczne napięcia oraz wahania napięcia. Techniki pomiarowe i obliczeniowe stosowane obecnie w klasycznej ocenie jakości energii elektrycznej oraz wybrane normy mające bezpośredni lub pośredni wpływ na ocenę jakości energii źródeł ujęte są między innymi w: PN-EN 61000-2-2, PN-EN 61000-2-4, PN-EN 61000-3-2, PN-EN 61000-3-12, PN-EN 61000-3-3, PN-EN 61000-3-11, IEC/TR 61000-3-15, PN-EN 61800-3:2008, PN-EN 50160, PN-EN 50438.

Mając do dyspozycji rejestrowane synchronicznie wskaźniki jakości energii elektrycznej w wielu punktach sieci [H14], [H15] można poprzez odpowiednie skalowanie i łączenie wskaźników utworzyć wskaźniki syntetyczne. **Wskaźniki takie są łączone w puntach (wskaźniki globalne) lub w obszarach sieci (wskaźniki obszarowe). Dodatkowo takie podejście umożliwia prostą wizualizację zmian wybranych wskaźników, co może stanowić dla operatora systemu efektywne źródło informacji o aktualnym stanie pracy sieci, a dzięki temu umożliwiać przewidywanie zakłóceń i awarii w oparciu o obserwowane zmiany parametrów w czasie.** Jednym z podstawowych problemów przy konstruowaniu syntetycznych wskaźników jakości jest sprowadzenie wartości parametrów obiektu wyrażonych w różnych jednostkach miar do takiej samej skali względnej.

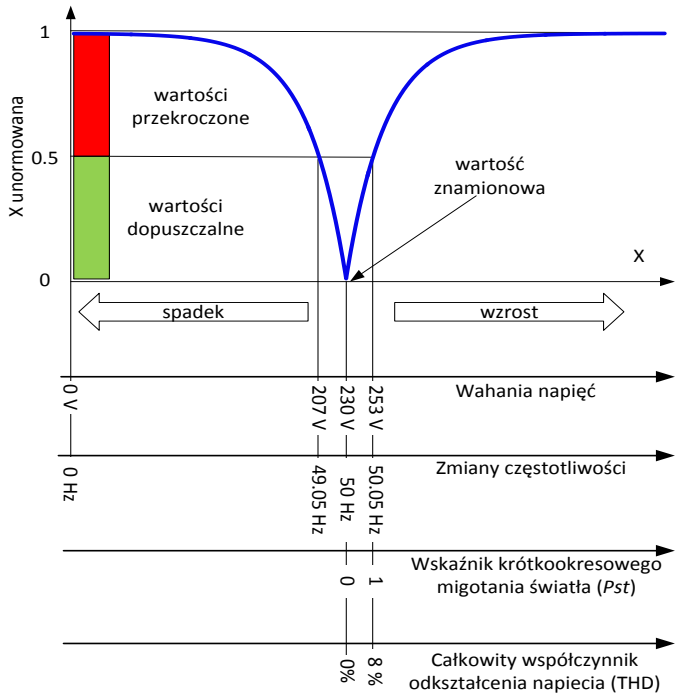
Postuluje się, aby syntetyczny wskaźnik opisywał jakość energii za pomocą jednej liczby pochodzącej z przedziału zmienności <0;1>, gdzie 0 oznacza pełną zgodność wartości parametrów napięcia z wymaganiami jakości (jakość idealna), zaś 1 zupełny brak zgodności. Wartości pośrednie oznaczają częściową zgodność z wymaganiami, tym większą im wskaźnik syntetyczny ma wartość bliższą 0.

Proponuje się wykładnicze skalowanie wskaźników jakości energii zgodnie z zależnością (1)[H12]:

$$\hat{x}_i = 1 - \exp\left(\frac{\ln(1-\Delta X)\cdot\left|(X_Z - x_i)\right|}{X_O}\right) \tag{1}$$

gdzie: $\hat{x}_i$ - unormowana wartość i-tego elementu parametru *X*, x_i - wartość i-tego elementu parametru *X* przed unormowaniem, X_Z - zakładana wartość idealna parametru *X* (np. wartość znamionowa napięcia), X_0 - dopuszczalne odchylenie od wartości idealnej parametru *X* (np. dopuszczalne odchylenie wartości skutecznej napięcia wg normy PN-EN 50160), ΔX - względne odchylenie od wartości granicznej rozdzielającej przedział wartości unormowanych na dopuszczalne i przekroczenia (np.: 0.5 w przedziale <0;1>).

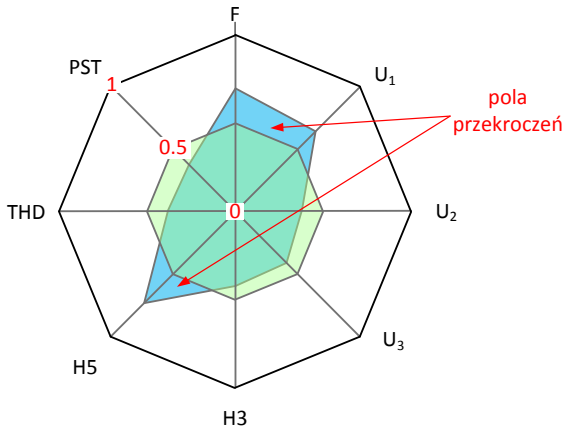
Skalowanie rejestrowanych lokalnych wskaźników jakości napięcia według zależności (1) zapewnia postulowaną zmienność wszystkich wskaźników w przedziale liczbowym <0;1>, przy czym wartość dokładna (znamionowa) przyjmuje wartość 0. Wybrano wartość graniczną 0.5, która rozdziela przedział <0;1> na wartości dopuszczalne <0;0.5> oraz przekraczające wartości dopuszczalne (0.5;1>. Tak przyjęta zależność skalująca ma dodatkowe zalety. Ciekawą właściwością funkcji skalującej jest asymptota pozioma równa 1, dzięki której żadne wartości po unitaryzacji nie przekroczą 1, ale będą mogły być dowolnie bliskie jedności. Dzięki temu skalowanie zmniejszy wpływ zbyt dużych przekroczeń np. błędnych rejestracji. Inna własność skalowania dotyczy tzw. „efektu lupy" dla wartości bliskich granicznym. Nieliniowy charakter skalowania powoduje, że nawet zmiany parametrów na granicy wartości dopuszczalnych będą uwydatnione. Ma to szczególne znaczenie w przypadkach gdy analizuje się zmienność wskaźników jakościowych w czasie w celu określenia zmian jakości obserwowanych punktów lub obszarów. Na rysunku (Rys. 23) przedstawiono zasadę skalowania wybranych wskaźników zgodnie z zależnością (1). Na wykresie oznaczono przyjętą wartość graniczną w przedziale <0;1> równą 0.5 oraz oznaczono przedziały dopuszczalne oraz przekroczenia wskaźników. Należy zaznaczyć, że wartości graniczne dla poszczególnych wskaźników jakości regulują normy, jednak prowadząc analizy jakości napięcia wartości te nie muszą być obligatoryjne. W przypadkach gdy analizy mają na celu obserwowanie zmian w czasie, należy wybierać wartości graniczne bliskie aktualnie osiąganym przez poszczególne wskaźniki.



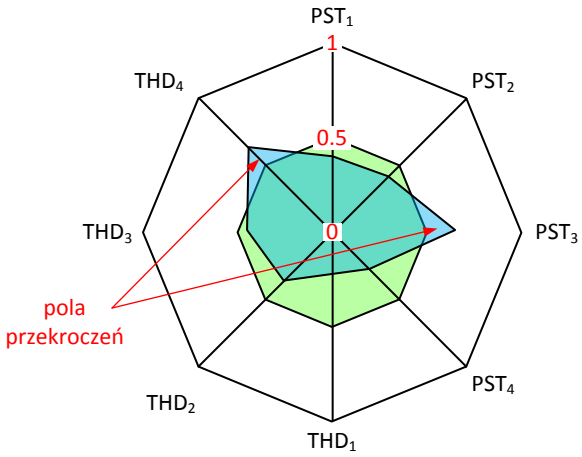
Rys. 23. Przykład skalowania wskaźników oceny jakości energii elektrycznej [H12]

Dzięki skalowaniu parametrów napięcia możliwe jest łączenie różnych wskaźników rejestrowanych w punktach pomiarowych. Dzięki temu otrzymuje się jeden wskaźnik syntetyczny opisujący jakość energii w punkcie lub w obszarze sieci. Proponowane łączenie wskaźników wykorzystuje metodę graficzną opartą na tzw. wykresach radarowych. Jako

łączony wskaźnik oceny jakości w punkcie pomiarowym (wskaźnik globalny) przyjęto sumę pól powierzchni definiowanych jako pola przekroczeń. Na rysunku (Rys. 24) pokazano metodę wyznaczenia wskaźnika syntetycznego dla wybranych wskaźników rejestrowanych w jednym punkcie pomiarowym. Na rysunku (Rys. 25) przedstawiono przykładowy wykres radarowy skonstruowany dla syntetycznego wskaźnika obszarowego śledzącego zmiany współczynnika zniekształceń i migotania światła w czterech punktach pomiarowych. Suma pól trójkątów lub czworoboków jakie powstają w wyniku przecięć wieloboków (wartości granicznych i opisujących aktualne mierzonych wskaźników) określa jakość energii w wybranym obszarze sieci.

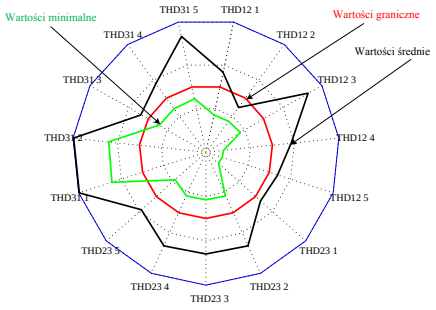


Rys.24. Łączenie różnych wskaźników jakości rejestrowanych w jednym w punkcie pomiarowym

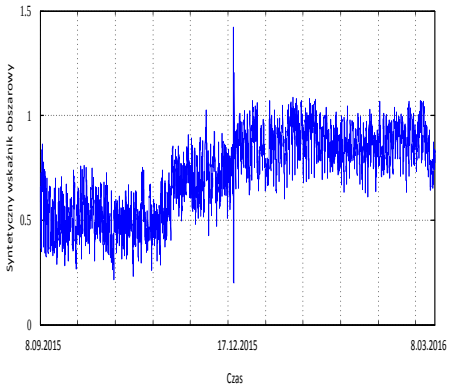


Rys.25. Łączenie różnych wskaźników jakości rejestrowanych w wielu punktach pomiarowych

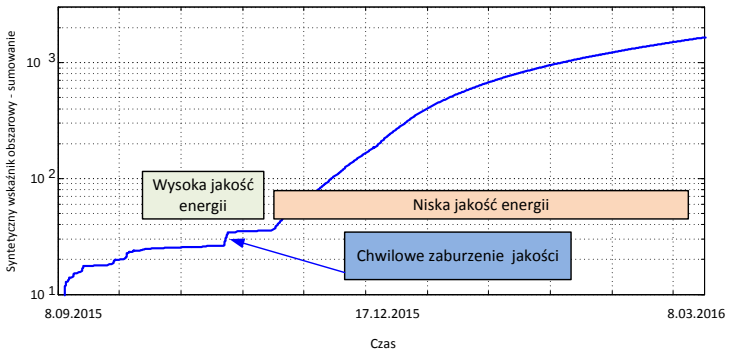
W oparciu o zsynchronizowane dane rejestrowane w rzeczywistym systemie elektro-energetycznym z udziałem generacji rozproszonej przeprowadzono badania jakości energii elektrycznej wykorzystując opracowane wskaźniki syntetyczne. Przykładowo na rysunkach (Rys. 26 - Rys. 28) zilustrowano analizę zniekształceń napięcia w badanym obszarze sieci na podstawie rejestrowanych wskaźników THD.



Rys. 26. Łączenie skalowanych wskaźników THD w puntach i w obszarze sieci



Rys. 27. Zmiana syntetycznego wskaźnika opartego na pomiarach THD (pola przekroczeń) w okresie 6 miesięcy



Rys. 28. Dynamika wzrostu wskaźnika syntetycznego opartego na pomiarach THD w badanym obszarze sieci w okresie 6 miesięcy [H12]

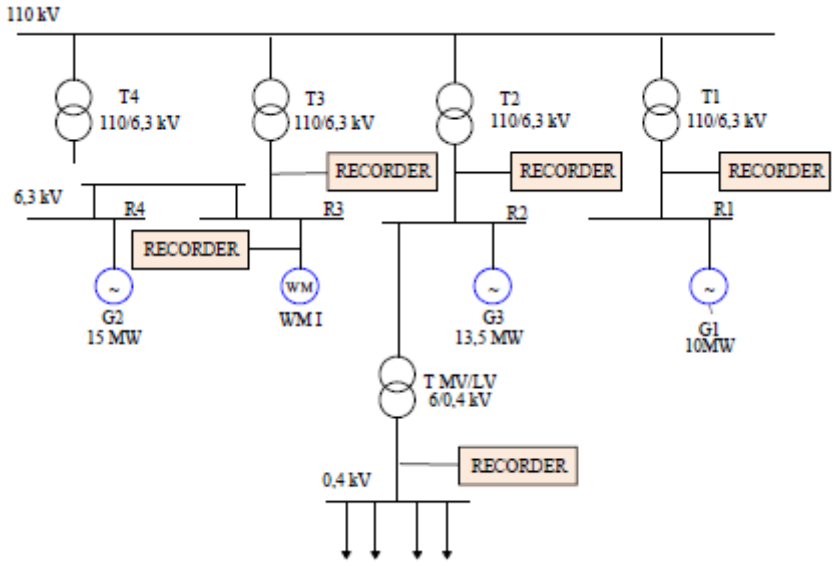
Wszystkie przekroczenia wartości dopuszczalnych generowały niezerowe wartości tego wskaźnika. Ocena dotyczy monitorowanego obszaru sieci. Można zauważyć, że zmiana wartości wskaźnika wskazuje na znaczne pogorszenie jakości napięć w analizowanym obszarze. Inny sposób obserwacji zmian wskaźników syntetycznych pokazano na rysunku (Rys. 28). W skali logarytmicznej przedstawiono dynamikę wzrostu pól przekroczeń. Na wykresie można wyszczególnić obszary bez wzrostu wartości wskaźnika świadczące o braku przekroczeń wartości granicznych, czyli dopuszczalnej (wysokiej) jakości energii, skokowe zmiany, które są wynikiem chwilowych, przemijających zaburzeń jakości oraz obszary ciągłego wzrostu informujące o permanentnym przekraczaniu przez parametry napięcia wymaganych norm jakościowych. Innym przykładem omówionym w pracy [H12] jest analiza niesymetrii w obszarze sieci, gdzie wskaźnik syntetyczny oparto na pomiarach współczynników niesymetrii w kilku punktach systemu elektroenergetycznego.

Do najważniejszych moich osiągnięć należy:

- **przedstawienie nowej propozycji oceny jakości energii elektrycznej w oparciu o syntetyczne wskaźniki określane jako globalne, gdy są konstruowane w jednym punkcie pomiarowym oraz syntetyczne wskaźniki obszarowe konstruowane na podstawie rejestracji w wielu punktach pomiarowych systemu elektroenergetycznego;**
- **weryfikację proponowanej koncepcji na wynikach rejestracji sygnałów w rzeczywistej sieci dystrybucyjnej zawierającej źródła rozproszone;**
- **stwierdzeniu, że zaproponowane wskaźniki globalne i obszarowe łączące wiele różnych wskaźników jakości opisanych w normie, mogą stanowić uzupełnienie analiz zaburzeń zachodzących systemach generacji rozproszonej.**

W latach 2015 – 2019 brałem aktywny udział we współpracy badawczej z dużym podmiotem gospodarczym branży wydobywczej na terenie Dolnego Śląska. Celem zainteresowań badawczych było nowe podejście w zastosowaniu metod taksonomicznych w analizie dużego zbioru baz danych parametrów jakości energii elektrycznej zarejestrowanych, zarówno w systemie informatycznym służb sieci kopalnianej, jak i zarejestrowanych w terenie przez mobilne rejestratory umieszczone w wybranych węzłach

sieci (Rys. 29). Przeprowadzone badania pozwoliły na uzyskanie danych pomiarowych, które reprezentowały różne stany pracy sieci górniczych, a w szczególności włączonej i wyłączonej generacji rozproszonej (jednostki wytwórcze sieci kopalnianej w obszarze jej specyficznej pracy można traktować jako generację rozproszoną), okresu wydobycia czy okresu rewizji maszyn i urządzeń górniczych. **Trudnością dla operatora z punktu widzenia monitorowania pracy sieci kopalnianej jest ogromny długoterminowy zbiór informacji. Celowym wydaje się zaproponowanie takich metod analizy danych, które pozwolą na szybką identyfikację wpływu jednostek generacji rozproszonej na pracę całego systemu wydobywczego kopalni. Efektem przeprowadzonych prac jest propozycja zastosowania w eksploatacji danych zbioru skupień oraz globalnego wskaźnika jakości energii elektrycznej do analizy długoterminowych danych parametrów jakości energii. Uzyskano dzięki temu możliwość identyfikacji i oceny różnych stanów pracy badanej sieci elektroenergetycznej pod kątem jakości energii elektrycznej, co może stanowić efektywne źródło informacji dla jednostek wytwórczych sieci kopalnianej o aktualnym stanie pracy sieci, a dzięki temu umożliwiać przewidywanie zakłóceń i awarii, co przyczyni się do poprawy efektywności pracy a przede wszystkim wzrostu bezpieczeństwa.**



Rys. 29. Miejsca zainstalowania mobilnych rejestratorów parametrów jakości energii elektrycznej w sieci kopalnianej [H9]

Artykuł [H9] poświęcony jest zastosowaniu analizy skupień do identyfikacji i oceny różnych stanów pracy elektroenergetycznych sieci górniczych w aspekcie jakości energii elektrycznej. Wyniki przeprowadzonych badań jednoznacznie wskazują, że:

- analiza skupień (*Cluster Analysis*) jest przydatnym narzędziem do analizy długoterminowych danych parametrów jakości energii;
– istnieje możliwość zastosowania algorytmu K-średniej (*K-mean algorithm*) z odległością Czebyszewa do wykrywania danych zawierających zdarzenia napięciowe;

- analiza skupień może być stosowana do oznaczania danych jakości energii (*Power Quality* PQ) jako proces automatyczny oraz do automatycznego wyboru danych PQ, które odpowiadają różnym warunkom pracy sieci elektrycznej;
- zastosowany algorytm Warda pozwolił zidentyfikować skupiska danych, które charakteryzują się różnymi wartościami wskaźnika THD lub nasilenia migotania;
- odkryte zbiory skupień (klastry) można powiązać ze stanem generacji lokalnej;
- obliczenie statystyki parametrów PQ dla poszczególnych klastrów daje możliwość analizy porównawczej między klastrami co, de facto **prowadzi do porównania stanu parametrów PQ pomiędzy różnymi warunkami pracy systemu elektroenergetycznego identyfikowanymi przez klastry.**

Inną propozycją opisaną w artykule [H10] jest propozycja zastosowania rozszerzonej definicji globalnych wskaźników jakości energii elektrycznej (*Global Power Quality Indices* GPQIs). **Zastosowanie globalnego wskaźnika JEE upraszcza ocenę warunków jakościowych pracy sieci we wskazanych przez analizę skupień okresach, poprzez odejście od wieloparametrycznej oceny, na rzecz jednego parametru liczbowego (wskaźnika globalnego). Uzyskuje się w ten sposób ułatwienie w interpretacji porównania wpływu uwarunkowań na warunki pracy sieci, a w szczególności wpływu jej generacji rozproszonej.**
Rozszerzenie definicji wskaźników GPQIs oparte jest na dwóch wskaźnikach: wskaźniku zagregowanych danych (*Aggregated Data Index* ADI) oraz wskaźniku danych oznaczonych (*Flagged Data Index* FDI). Definicja wskaźnika ADI bazuje na odpowiednio wybranych klasycznych parametrach PQ takich jak: częstotliwość, poziom wartości RMS, współczynniku migotania, składowych harmonicznych. Czas agregacji danych poszczególnych parametrów wynosi 10 minut zaś oflagowane dane są wyodrębniane.
Jako wsparcie dla ADI zaleca się zastosować wskaźnik FDI, który uzupełnia informacje o ilości zakłóceń jakości energii (nienormalny stan pracy systemu) nie uwzględnianych w klasycznej ocenie jakości definiowanej według danych oznaczonych.
Analiza zastosowania wskaźników ADI oraz FDI na wynikach przeprowadzonych badań pracy sieci kopalnianej z generacją rozproszoną (por. Rys. 29) pozwala stwierdzić, że:

- analiza poziomu wartości wskaźnika ADI umożliwia wykrycie zmian we wskaźnikach jakościowych stanu pracy danej sieci kopalnianej;
- wykorzystane dane z rzeczywistych pomiarów potwierdziły zasadność stosowania wskaźników GPQIs jako narzędzie wpierające operatora w analizie wpływu generacji rozproszonej na lokalne warunki pracy systemu;
- propozycja stosowania wskaźnika FDI jako flagowania zniekształceń dynamicznych, może być traktowane jako rozszerzone podejście do klasycznej analizy jakości energii, w której to dane oflagowane są pomijane;
- analiza obu zaproponowanych wskaźników ADI oraz FDI jest źródłem istotnych informacji o jakości energii w podejściu globalnym do pracy systemu elektroenergetycznego kopalni;

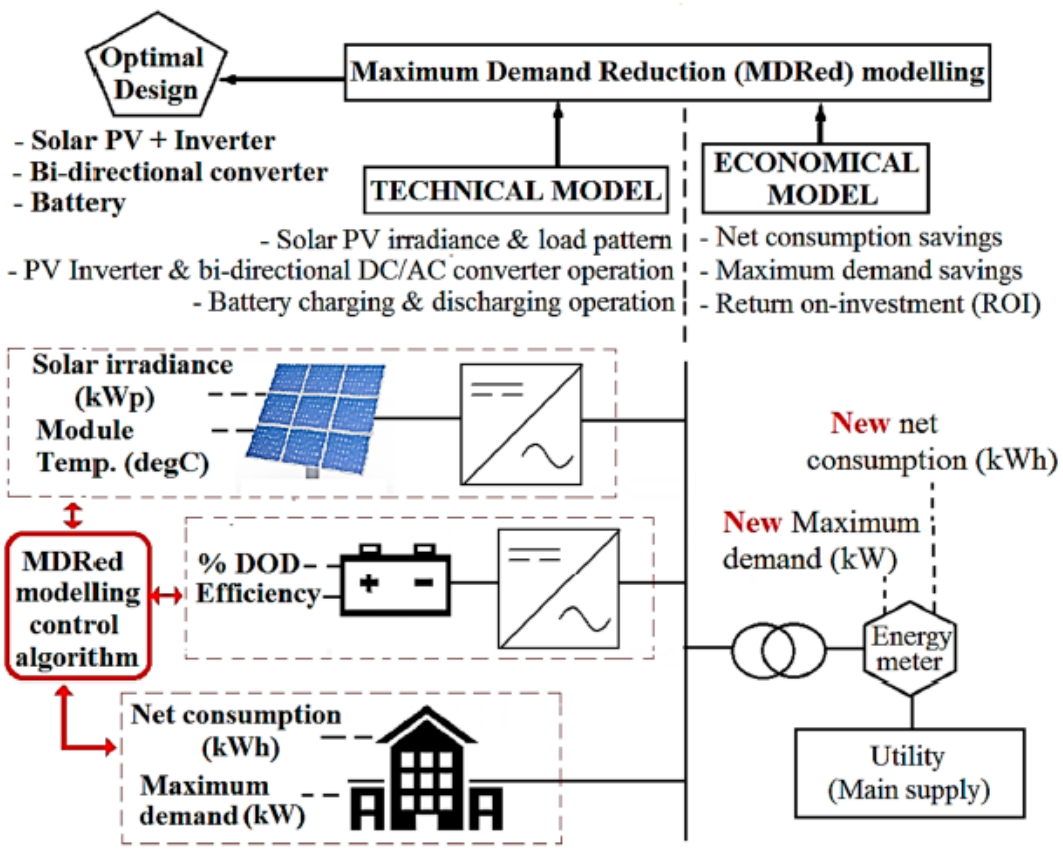
- zastosowanie globalnych wskaźników wprowadza pewien poziom uogólnienia jednak przy analizie długoterminowych i wielopunktowych danych jest elementem pożądanym.

Końcowym efektem prac omówionych powyżej jest przedstawiona w najnowszym artykule [H2] idea **połączenia razem** metody analizy skupień (CA) oraz globalnych wskaźników jakości energii (GPQI) do jakościowej oceny zmieniających się w czasie długoterminowych danych parametrów jakości energii w sieci elektroenergetycznej z wytwarzaniem rozproszonym. Celem proponowanej metody (omówionej z partnerem gospodarczym, w których brałem czynny udział), było zaproponowanie narzędzia do automatycznej identyfikacji i oceny różnych poziomów stanu jakości (parametrów) energii, adekwatnych do zmieniających się warunków pracy obserwowanej kopalnianej sieci elektroenergetycznej. Wiedza ta ma ogromne znaczenie dla operatora sieci z punktu widzenia zapewnienia niezawodności zasilania i bezpieczeństwa osób w niej zatrudnionych.
Reasumując, wyniki przeprowadzonych badań pozwalają stwierdzić, że:

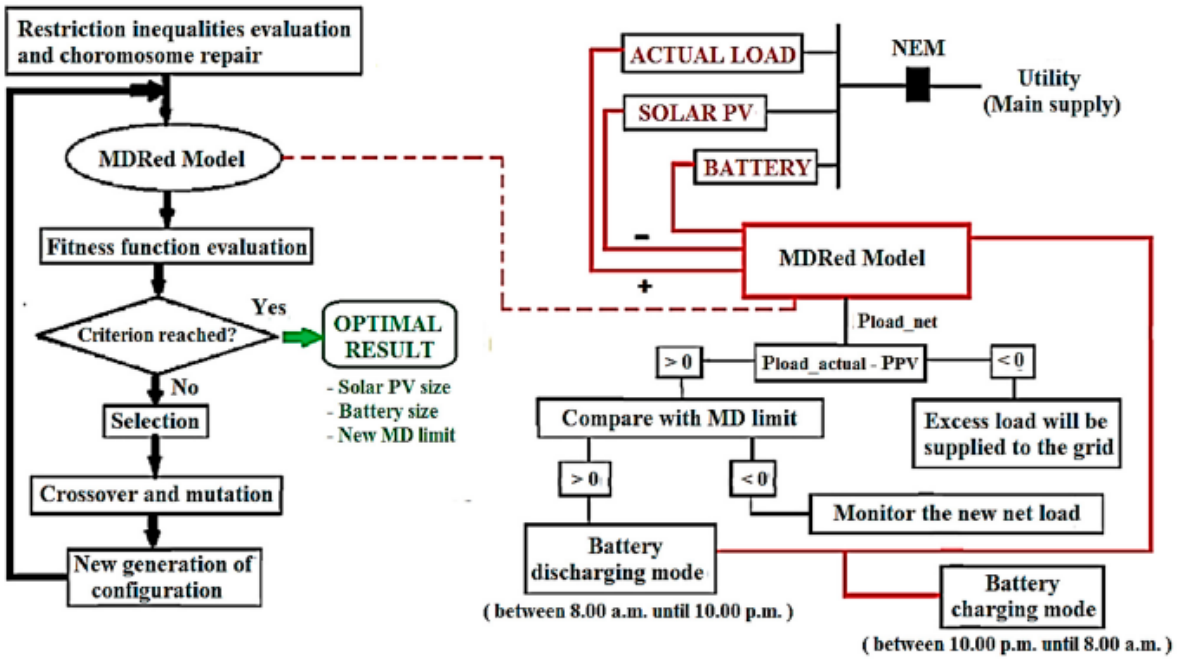
- analiza skupień (*Cluster Analysis*) jest pierwszym krokiem proponowanej metody i jest przydatnym narzędziem do analizy długoterminowych danych parametrów jakości energii, które pozwala na identyfikację części danych PQ związanych z wpływem generacji rozproszonej (włączonej i wyłączonej) oraz zmian w konfiguracji sieci;
- analiza skupień może być stosowana do oznaczania danych jakości energii (*Power Quality* PQ) jako proces automatyczny oraz do automatycznego wyboru danych PQ, które odpowiadają różnym warunkom pracy sieci elektrycznej;
- rozszerzenie wspomnianej metody i jej nowość polega na zastosowaniu globalnych wskaźników jakości energii (min. zagregowany indeks danych ADI oraz oznaczony indeks danych FDI) do jakościowej oceny otrzymanych klastrów po uprzednio przeprowadzonej analizie skupień;
- proponowany zagregowany indeks danych ma wzór syntetyczny i opiera się na pięciu klasycznych 10-minutowych zagregowanych parametrach jakości energii oraz dwóch parametrach 200 ms, w tym obwiednia zmian napięcia i maksimum całkowitego zniekształcenia harmonicznego napięcia;
- proponowana metoda jest odpowiednim narzędziem do szybkiego porównania zebranych danych w zidentyfikowanych klastrach oraz jest wdrażana dla gromadzonych jednocześnie i w sposób synchroniczny danych z wielu punktów pomiarowych obserwowanego obszaru sieci;
- zaproponowana dodatkowo analiza wrażliwości indeksu danych agregacji syntetycznej pozwala stwierdzić, że obniżenie wartości parametrów GPQI może wpływać na wyniki oceny, było to zauważalne w sytuacji, gdy różnice między warunkami zasilania w porównywanych klastrach były nieznaczne.
- zaprezentowane podejście można potraktować jako skuteczne narzędzie porównawcze (nie tylko związane z jakością energii) oceny długoterminowych pomiarów wielopunktowych, a zaletą proponowanej metody jest automatyczna klasyfikacja

danych na klastry i ich parametryczna ocena stanu związana z bieżącą pracą badanej sieci.

Ogromnym problemem dla dynamicznie rozwijającej się gospodarki światowej jest rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną o określonych parametrach jakościowych. Priorytetem dla systemu dystrybucyjnego jest zapewnienie dostaw energii o wysokich parametrach w okresie jej zwiększonego zużycia tzw. zużycia szczytowego. Badania naukowe nad poprawą jakości energii były prowadzone z punktu widzenia poprawy jej zużycia, szczególnie w okresie zużycia szczytowego w ośrodkach naukowych w Danii i Malezji.
Do współpracy zaproszono z Polski zespół badawczy prof. Zbigniewa Leonowicza, którego byłem członkiem. Efektem prowadzenia badań w więcej niż jednej jednostce naukowej nad danymi ekonomicznymi otrzymanymi od partnerów z Malezji było opracowanie i wykorzystanie narzędzi optymalizacyjnych oraz korelacyjnych w ocenie pracy systemów fotowoltaicznych z siecią niskiego napięcia, opisane w przedostatnim artykule z cyklu [H5].
Zaproponowałem w nim **wykorzystanie systemów fotowoltaicznych i akumulatorowych do zarządzania zużyciem energii elektrycznej w okresie zapotrzebowania szczytowego**. Modelowanie maksymalnej redukcji popytu (*Maximum Demand Reduction* MDRed) oparte jest na zastosowaniu zarówno modelu technicznego jak i ekonomicznego (Rys. 30). Posiadając informacje dotyczące rozkładu obciążenia, cech techniczno-ekonomicznych pracy elementów sieci oraz jej schemat, można dobrać odpowiednie rozmiary systemu PV w celu redukcji maksymalnego zapotrzebowania na energię ze strony systemu elektroenergetycznego. Do optymalizacji zarządzania pracą oraz optymalnej symulacji modelu MDRed zastosowano algorytm genetyczny. Schemat blokowy modelu MDRed dla optymalnej symulacji wymiarowania za pomocą algorytmu genetycznego przedstawiono na rysunku (Rys. 31).



Rys. 30. Koncepcja modelu maksymalnego ograniczenia popytu (MDRed) [H5]



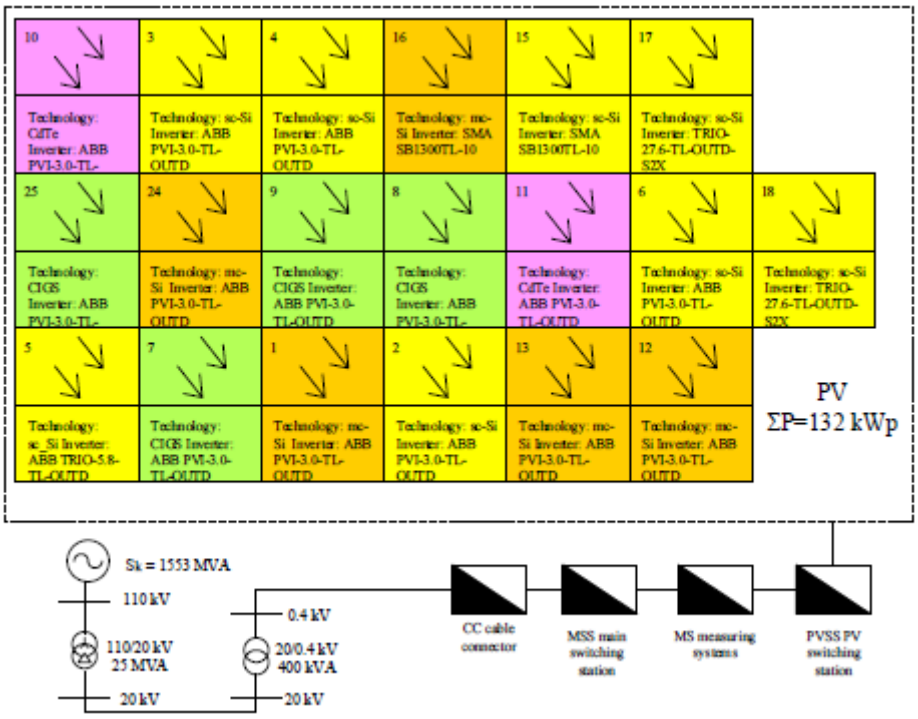
Rys. 31. Schemat blokowy modelu MDRed dla optymalnej symulacji wymiarowania za pomocą algorytmu genetycznego [H5]

Wyniki przeprowadzonych badań jednoznacznie wskazują, że:

- proponowany schemat modelowania MDRed działa jako model optymalnej redukcji (ścinania szczytów) maksymalnego zapotrzebowania na energię dzięki korzystaniu z systemów fotowoltaicznych i akumulatorów, co zmniejsza maksymalny popyt i koszty zużycia energii netto;
- zastosowanie algorytmu genetycznego w modelowaniu MDRed przyczynia się do oszczędności rachunków za energię elektryczną nawet do 20% przez wykorzystanie energii słonecznej, 3% przez redukcję maksymalnego zapotrzebowania (MD) oraz 2% jako nadwyżki energii dostarczonej do sieci w odniesieniu do krajowego schematu taryfowego energii elektrycznej i kosztu całego systemu;
- jedynym ograniczeniem zastosowania proponowanego modelu są obecnie ceny akumulatorowych zasobników energii.

Zastosowanie w praktyce zaproponowanego przeze mnie rozwiązania naukowego w gospodarce Malezji przyczynić się może do wzrostu jej efektywności w obszarze dostaw energii w okresie zapotrzebowania szczytowego.

Najnowszy artykuł [H4] proponuje nowe podejście do oceny jakości energii wykorzystując szereg zmian wprowadzonych aneksem do poprawki normy EN 50160, w tym 1-minutowe interwały agregacji oraz obowiązek uwzględniania 100% danych zmierzonych w sieciach niskiego napięcia. Klasyczną ocenę jakości energii można rozszerzyć wykorzystują analizę korelacji w stosunku do wzajemnych relacji pomiędzy parametrami jakości energii a wskaźnikami zewnętrznymi, takimi jak: warunki pogodowe lub zapotrzebowanie na energię elektryczną. W pracy przedstawiono wyniki badania porównawczego zastosowanie czasów agregacji 1 i 10 minutowych w ocenie jakości energii, a także analizę korelacji parametrów jakości energii i warunków pogodowych oraz produkcji energii 100 kW fotowoltaicznej elektrowni (PV) podłączonej do sieci niskiego napięcia (Rys. 32).



Rys. 32. Schemat badanej elektrowni fotowoltaicznej z przypisaniem mocy znamionowej oraz technologii fotowoltaicznej związanej z poszczególnymi systemami PV [H4]

W tabelach (por. Tabela 5 i Tabela 6, [H4]) przedstawiono macierze korelacji parametrów jakości energii elektrycznej oraz parametrów pogodowych dla zagregowanych czasów odpowiednio: 10- i 1-minutowych.

Przedstawione wyniki wskazują, że:

- ogólne wyniki analizy dla agregacji 1- i 10-minutowych są do siebie zbliżone;
- w sytuacji, gdzie wymagania dotyczące parametrów muszą zostać spełnione w pełnym czasie obserwacji, zauważono, że 1-minutowa agregacja powoduje obserwowalność obiektu bardziej ograniczoną;
- ocena wyników jakości energii z wykorzystaniem agregacji 1-minutowej może zależeć od współpracy obserwowanego obiektu z systemem elektroenergetycznym, stosowanym systemem regulacji i integracji, a także wartością mocy systemu w punkcie połączenia;
- agregacja 1-minutowa stanowi dokładniejsze narzędzie do obserwacji zmian wartości parametrów (np. zmian wartości napięcia);
- dynamika zmian wartości parametrów jakości energii w punkcie przyłączenia elektrowni fotowoltaicznej podczas wystąpienia zachmurzenia lub zmiennych warunków eksploatacji sieci niskiego napięcia, charakteryzuje się nieco wyższym stopniem w przypadku stosowania 1-minutowego interwału agregacji niż w przypadku 10-minutowego, co pozwala na wysunięcie wniosku, że **zastosowanie agregacji 1-minutowej zwiększa czułość oceny jakości energii, która może być pożądana w przyszłości, gdy sieci elektroenergetyczne będą charakteryzowały się wysoką**

koncentracją rozproszonych zasobów energetycznych, mikrosieci lub sieci pracujących w warunkach wyspowych.

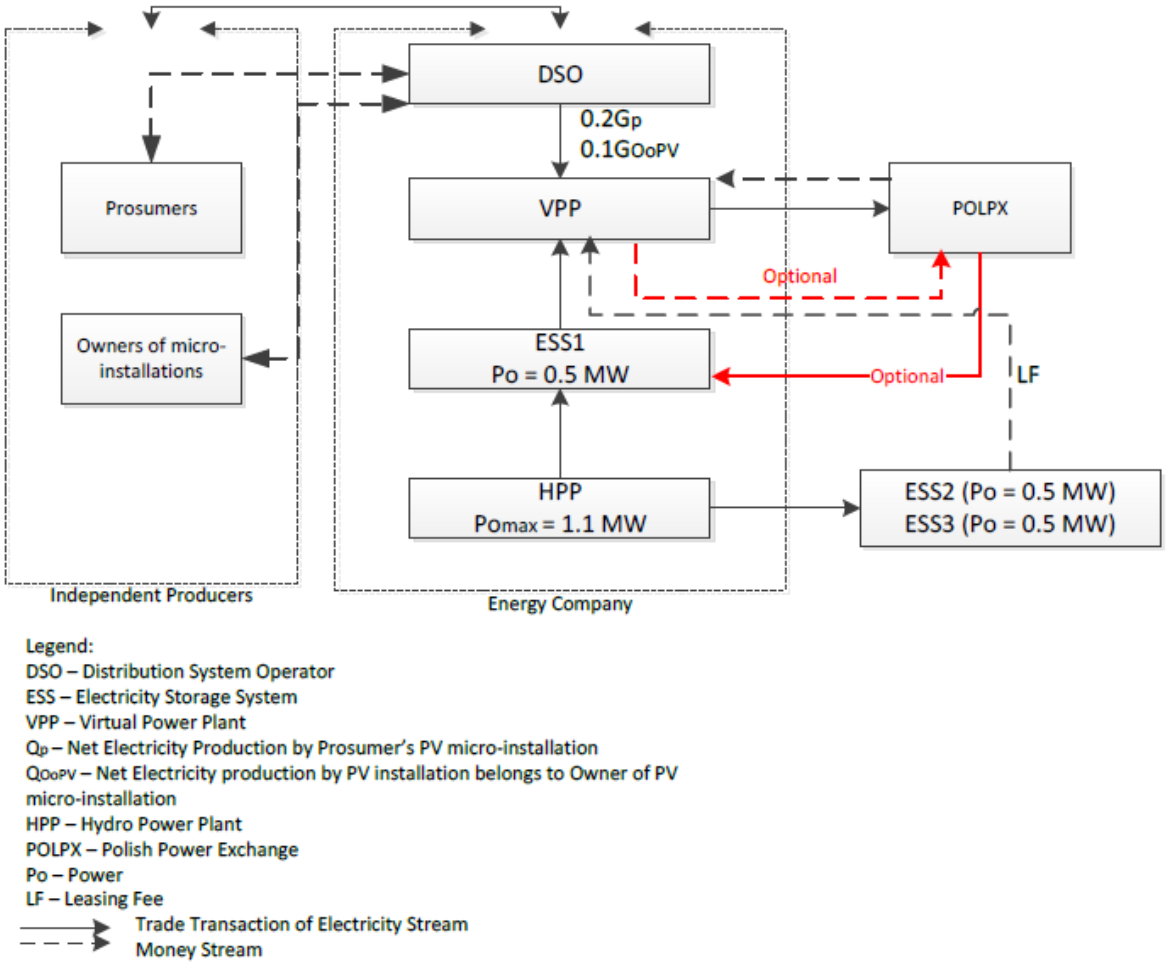
Zastosowanie agregacji 1-minutowej, zamiast 10-minutowej ma znaczenie dla badania parametrów jakości energii ze źródeł odnawialnych, ponieważ pozwala na bardziej precyzyjne monitorowanie pracy elektrowni fotowoltaicznej podczas zmiennych warunków pogodowych.

Od 2018 roku biorę czynny udział w programie badawczym sektora elektroenergetycznego: **U/0180/750/2017 Program Badawczy Sektora Elektro-energetycznego „PBSE" (Działanie 1.2 „Sektorowe programy B+R" w ramach osi priorytetowej „Wsparcie prowadzenia prac B+R przez przedsiębiorstwa" Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014 – 2020), Opracowanie platformy pozwalającej na zagregowanie potencjału wytwórczego i regulacyjnego rozproszonych źródeł energii odnawialnej i zasobników energii oraz wybranych kategorii odbiorów sterowalnych.** Do moich zadań jako członka zespołu badawczego należało współuczestnictwo w opracowaniu koncepcji powstania platformy umożliwiającej regulację pracy rozproszonych źródeł energii i zasobników energii z systemem wytwarzania i dystrybucji na rynku sprzedaży energii elektrycznej. Ponadto do moich zadań należy przeprowadzenie badań terenowych, przetwarzanie i agregacja danych z systemu pomiarowego oraz współpracy przy redagowaniu wniosków i zaleceń w raportach dla inwestora podmiotu gospodarczego.

Prace badawcze dotyczą zaobserwowanych zmian zachodzących we współczesnych nowoczesnych sieciach elektroenergetycznych. Jednym z podstawowych elementów tych zmian jest znaczący wzrost udziału generacji rozproszonej i związany z tym faktem szereg zagadnień wokół procesu integracji jednostek generacji z siecią elektroenergetyczną, a w szczególności wpływu układów małej generacji na stabilność napięciową, wahania napięcia czy generację harmonicznych, jak również współpracę w procesie podtrzymania warunków stabilnościowych, a także opracowaniu platformy pozwalającej na zagregowanie potencjału wytwórczego i regulacyjnego rozproszonych źródeł energii odnawialnej i zasobników energii oraz odbiorów sterowalnych. Opierając się na informacjach jawnych (dane nie posiadające w projekcie klauzuli poufne) przeanalizowano pod względem ekonomicznym [H3] i technicznym [H1] możliwość integracji rozproszonych źródeł energii odnawialnej, systemu magazynowania energii oraz systemu elektroenergetycznego w ramach pracy wirtualnej elektrowni, która jest praktyczną realizacją celu niniejszego projektu badawczego.

W artykule [H3] omówiono, w sensie ekonomicznym, ramy współpracy wirtualnej elektrowni (VPP) rozumianej jako platforma kooperacji pomiędzy prosumentami, właścicielami odnawialnych źródeł energii, operatorem sieci dystrybucyjnej oraz systemu magazynowania energii (Rys. 33). Przygotowano i przeanalizowano dziesięć scenariuszy dla VPP na podstawie danych zainstalowanych mocy elektrowni wodnej (HPP), instalacji fotowoltaicznej (PV) i systemu magazynowania energii (ESS), a także uwzględniając warunki pogodowe w Polsce. Celem badania była ocena efektywności ekonomicznej modelu VPP, na

który wpływ ma kilka czynników, takich jak: cena energii, jej produkcja wraz z ograniczeniami technicznymi.

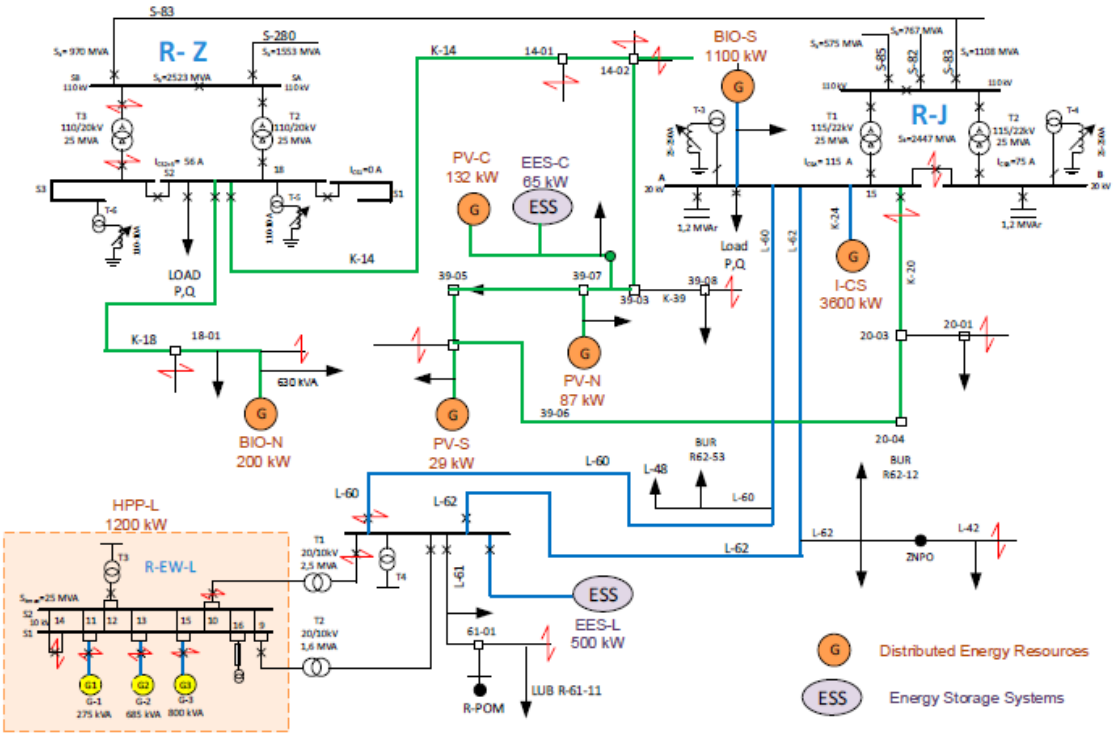


Rys. 33. Partnerzy VPP oraz fizyczne i finansowe strumienie przepływu między nimi [H3]

W artykule [H1] zaprezentowano podejście techniczne. Artykuł przedstawia obliczenia i przepływ mocy rzeczywistej wirtualnej elektrowni (VPP), której struktura (Rys. 34) składa się między innymi z: fragmentu sieci rozdzielczej niskiego i średniego napięcia, elektrowni wodnej (HPP), systemów fotowoltaicznych (PV) oraz systemów magazynowania energii (ESS). W tabelach (por. Tabela 2 i Tabela 3, [H1]) przedstawiono podstawowe informacje o źródłach energii odnawialnej planowanej elektrowni oraz zintegrowanych z nią systemów magazynowania energii, zaś głównym celem artykułu jest podsumowanie spełnienia niezbędnych wymagań dotyczących podłączenia jednostek wytwórczych do projektowanego klastra. W artykule zawarto informacje dotyczące między innymi:

- wpływu wymagań maksymalnej wydajności zainstalowanych systemów rozproszonych zasobów energetycznych (DER) i związane z nimi parametry jednostek magazynowania energii;
- rewizji definicji, celów i cech VPP rozumianej jako studium przypadku projektu VPP;

- ochrony i integracji DER oraz ESS z systemami elektroenergetycznymi w świetle obowiązujących przepisów prawa;
- wpływu DER i ESS na stan pracy sieci elektroenergetycznej;
- zaprezentowania metodę identyfikacji maksymalnej mocy DER i ESS zgodnie z technicznymi wymaganiami sieci;
- określenia wpływu warunków pracy poszczególnych DER i ESS na przepływ energii i ustaleniu maksymalnego poziomu mocy systemu ESS przeznaczonego dla planowanej VPP;
- uwzględniania wdrożonych scenariuszy kontroli mocy w elektrowni fotowoltaicznej jako potencjalnego źródła energii odnawialnej z punktu widzenia dostępnego zasobu do planowania i kontroli pracy VPP.



Rys. 34. Schemat planowanej rzeczywistej elektrowni wirtualnej VPP [H1]

Przeprowadzone w aspekcie ekonomicznym i technicznym badania dla proponowanego studium przypadku planowanej rzeczywistej struktury elektrowni VPP pozwoliły habilitantowi i współautorom na sformułowanie następujących wniosków:

- ze względu na warunki techniczne (por. [H1]) maksymalna moc zainstalowanych systemów magazynowania energii ESS rozumiana jako warunek brzegowy do analiz ekonomicznych VPP nie może przekroczyć wartości 1,5 MW;
- analiza efektywności ekonomicznej wykazała siedmioletni okres osiągnięcia dodatniej bieżącej wartości netto (NPV) inwestycji VPP, dla założonego przez inwestora scenariusza

(moc zainstalowanego zasobnika akumulatorowego: 0,5 MW, deszczowe lata, liczba prosumentów 1000, liczba właścicieli mikroinstalacji 20);
- zmienna cenowa ma duży wpływ na wartość NPV dla wszystkich scenariuszy badawczych, stąd potrzeba współfinansowania tego rodzaju inwestycji z dotacji publicznych;
- VPP osiąga próg rentowności dla 1895 prosumentów z fotowoltaicznym ogniwem o mocy 5 kWp lub 220 właścicieli mikroinstalacji o mocy 100 kWp PV;
- w odniesieniu do scenariuszy: scenariusz pierwszy S1 charakteryzuje się dużą czułością, która zmniejszała się wraz ze wzrostem pojemności ESS (S2 i S3). Zmienna produkcyjna elektrowni wodnej HPP charakteryzuje się niewielką czułością natomiast zmienna cenowa ma znaczący wpływ na wartość NPV (dla S1 elastyczność jest równa 4,4). Oznacza to, że zmiana ceny o 10% dla S1 powoduje 44% zmianę wartości bieżącej netto. Elastyczność cenowa dla scenariusz S10 była najniższa i była równa 2,5%. W przypadku różnicy między cenami w szczycie i poza godzinami szczytu czułość spadała wraz ze wzrostem pojemności baterii;
- aspekty techniczne związane z integracją DER z systemami elektroenergetycznymi można traktować jako warunki brzegowe dla planowania i strategii operacyjnych VPP;
- przedstawiona metoda oceny, metodologia badań i badania [H1], można dostosować i zastosować do innej topologii VPP.
- zaproponowane i zdefiniowane ograniczenia zasobów dla VPP sformułowane na podstawie aspektów technicznych, mogą być wykorzystane jako warunki wyjściowe do planowania niezbędnych przedsięwzięć ekonomicznych w obszarach społeczno-gospodarczych (energetyka), tak, aby uniknąć błędów inwestycyjnych i związanych z nim kosztów;
- wykazano, że uwarunkowania techniczne istniejącej sieci, dają możliwość zwiększenia mocy zasobnika akumulatorowego w sieci objętej VPP w zakresie od 0.5 MW do 1 MW, co w konsekwencji, pozwoliło na zbadanie wpływu wielkości system magazynowania energii w celu zapewniania wydajności ekonomicznej modelu w powiązanej pracy [H3].

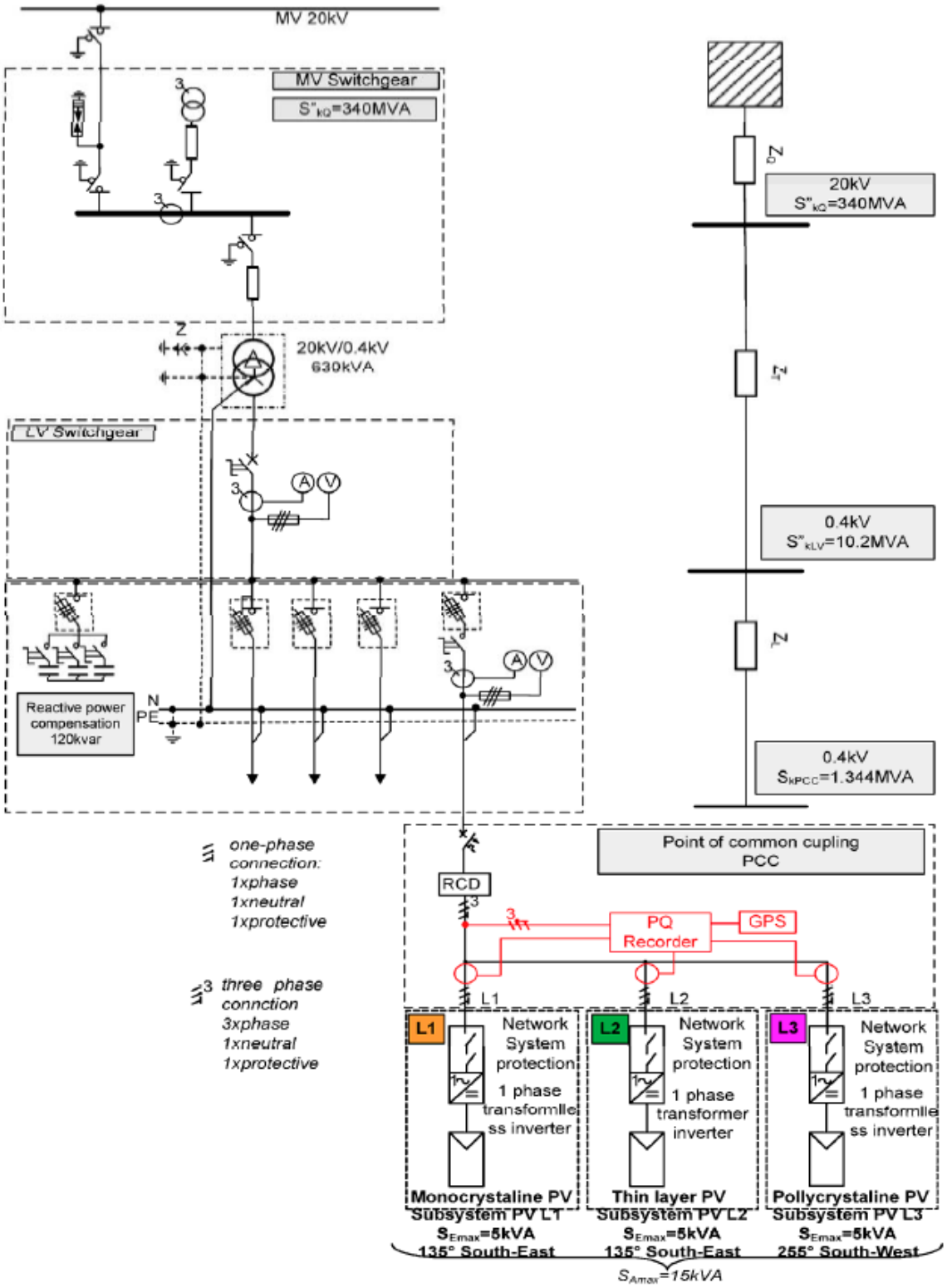
4.3.5. Metody analizy i oceny propagacji supraharmonicznych w paśmie 2 – 150 kHz w sieciach elektroenergetycznych [H6], [H7], [H8], [H11]

Prawidłowa praca wielu gałęzi gospodarki jest w dzisiejszych czasach nieodłącznie związana z jakością pracy systemów elektroenergetycznych. Dostarczanie energii elektrycznej o właściwych parametrach do odbiorców jest jednym z podstawowych priorytetów pracy systemów elektroenergetycznych. Wśród szerokiej grupy zaburzeń jakości energii elektrycznej, poziom odkształcenia przebiegu napięcia zasilającego od przebiegu sinusoidalnego, wyrażany poprzez określenie udziału wyższych częstotliwości, jest jednym z podstawowych parametrów definiujących jakość energii elektrycznej. Istnieją standardy definiujące limity dopuszczalne zaburzeń jakości energii elektrycznej w publicznych i przemysłowych sieciach zasilających. Jednocześnie prowadzi się kontrolę nad emisją zaburzeń jakości energii wprowadzanych przez odbiorniki do sieci elektroenergetycznej

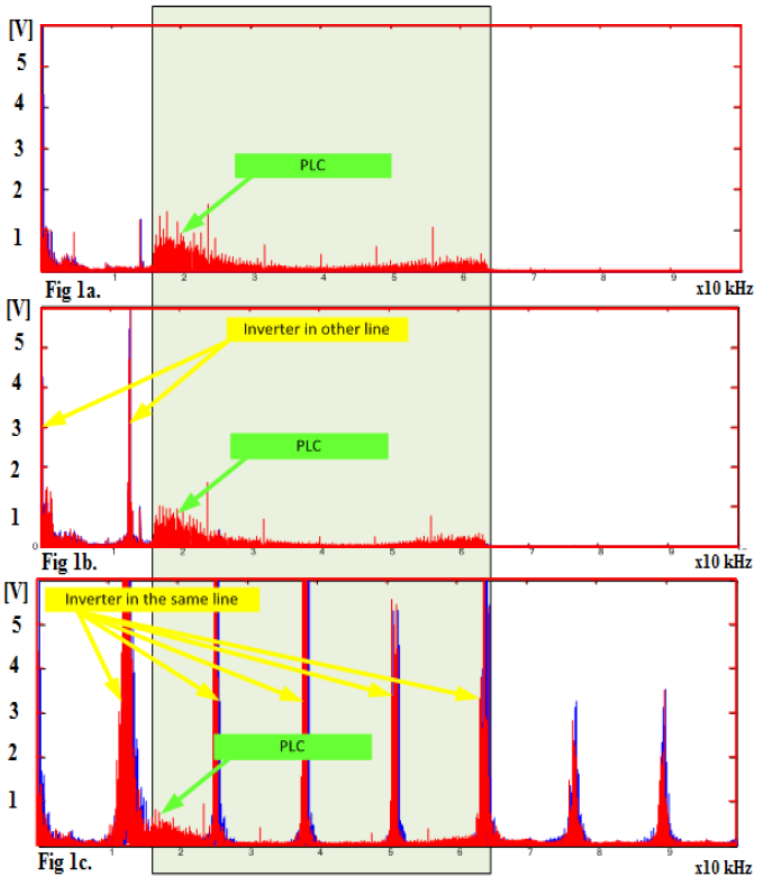
poprzez wprowadzanie limitów dopuszczalnych poziomów emisji zaburzeń wedle zasad kompatybilności elektromagnetycznej. Ściśle z pojęciem jakości energii elektrycznej związany jest obszar kompatybilności elektromagnetycznej, który wprowadza między innymi emisyjność zaburzeń oraz odporność odbiornika na zaburzenia.

Zaburzenia w zakresie do 150 kHz można podzielić na kilka zasadniczych przedziałów. W zależności od zakresu częstotliwości obowiązują inne normy oraz występują różne zaburzenia. Najobszerniej opracowane zostały zaburzenia w zakresie częstotliwości do 2 kHz. Częstotliwość równa 2 kHz uznawana jest za maksymalną wartość występowania zaburzeń harmonicznych, gdzie harmoniczne oznaczają całkowitą wielokrotność podstawowej częstotliwości napięcia zasilającego, 50Hz lub 60Hz. W normach określono sposoby pomiarów tych zaburzeń, a także obowiązujące limity, których w zależności od wartości znamionowych urządzeń muszą przestrzegać producenci. Odkształcenia sygnałów dla częstotliwości do 9kHz charakteryzują głównie harmoniczne, interharmoniczne oraz parametry od nich zależne. **Obecnie najsłabiej zbadanym i najmniej znormalizowanym przedziałem częstotliwości jest zakres od 2kHz do 150kHz**. Spektrum to jednak można podzielić na dwa główne elementy w zależności od pochodzenia. Pierwszym źródłem jest technologia PLC polegająca na generacji sygnału wysokiej częstotliwości oraz wykorzystaniu go do transmisji danych linii elektroenergetycznych. Za drugie zaś źródło uznawane są zaburzenia wynikające z załączania sprzętu elektronicznego. W literaturze zaburzenia z tego zakresu określane są jako supraharmoniczne [24]. Należy zwrócić uwagę, że wraz z rozwojem energetyki odnawialnej, energoelektroniki oraz urządzeń energooszczędnych również wzrasta ilość zaburzeń w sieci elektroenergetycznej, a co za tym idzie konieczność ich detekcji, analizy oraz oceny.

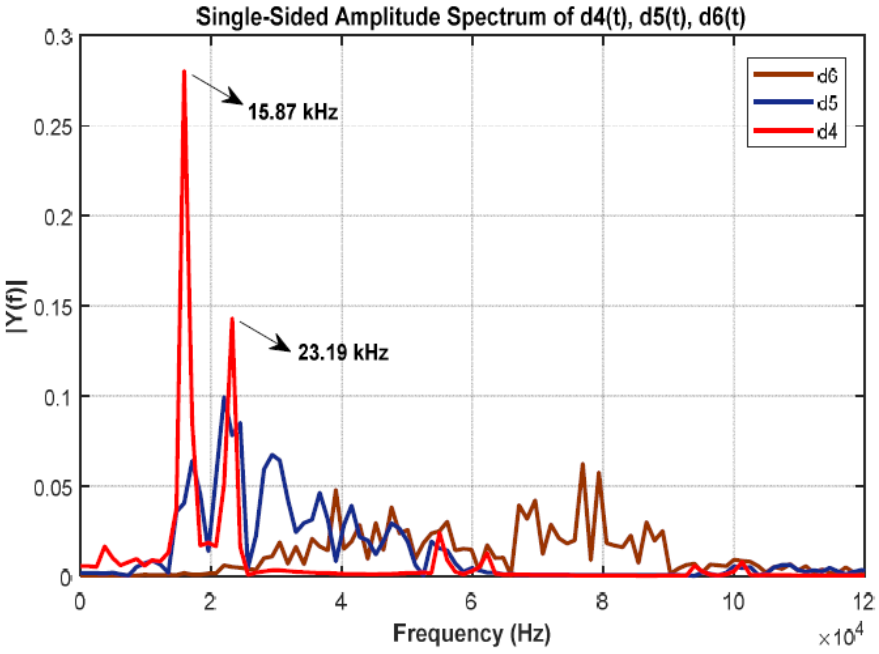
Artykuły [H8], [H11], zawierają wyniki przeprowadzonych przez habilitanta badań wykorzystania dyskretnej transformacji falkowej (*Discrete Wavelet Transform* DWT) oraz zespołu dekompozycji w trybie empirycznym (*Ensamble Empirical Mode Decomposition* EEMD) do analizy i detekcji supraharmonicznych w sieci inteligentnej z falownikiem PV oraz komunikacją PLC. Prace są efektem współpracy z ośrodkiem naukowym Ondokuz Mayis University w Turcji. Schemat sieci energetycznej z systemem generacji fotowoltaicznej PV wraz z infrastrukturą pomiarową przedstawia rysunek (Rys. 35). Przykład rejestracji sygnału pracy systemu przedstawia rysunek (Rys. 36). Na rysunkach (Rys. 37 oraz Rys. 38) zilustrowano analizę spektralną (DWT) zarejestrowanego sygnału prądowego odpowiednio dla przypadku pracy sieci: bez i z falownikiem PV. Rysunek (Rys. 39) przedstawia algorytm metody EEMD i przykładowy wynik analizy sygnału prądowego z pracą falownika PV (Rys. 40).



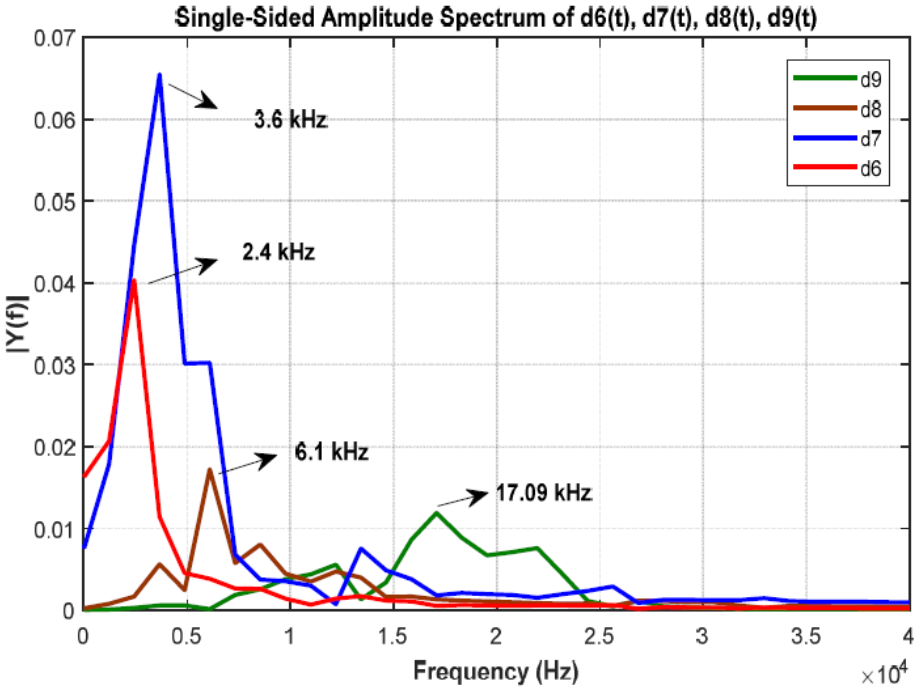
Rys. 35. Schemat sieci z instalacją PV [H8]



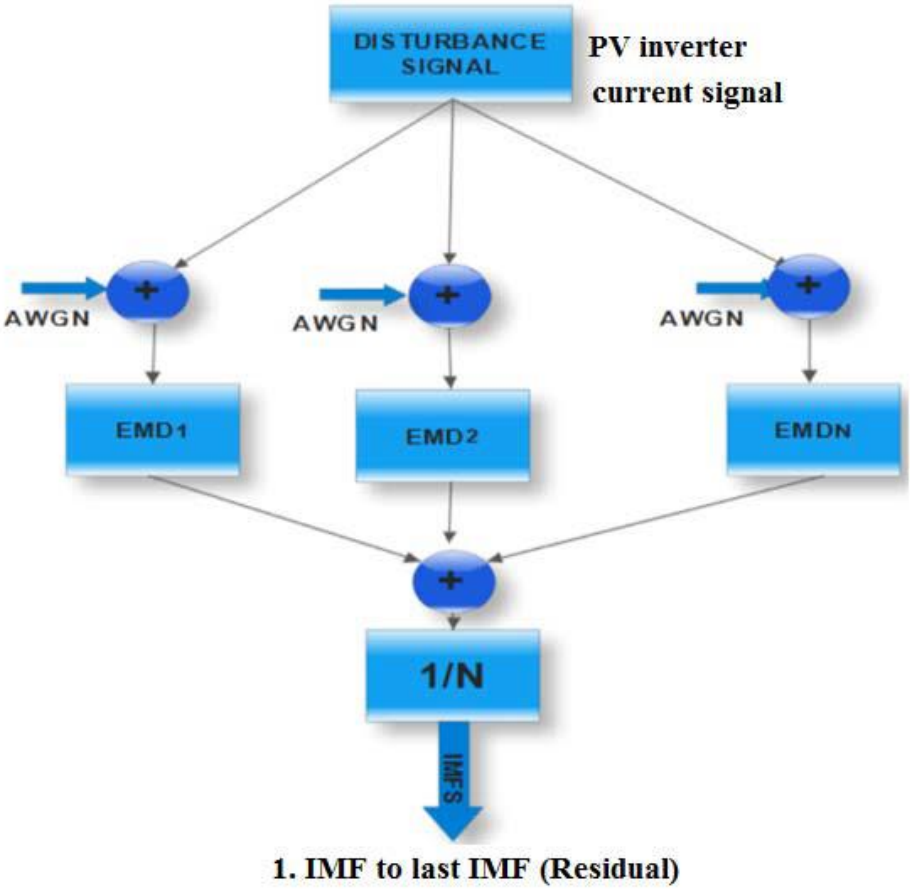
Rys. 36. Przykład rejestracji sygnału napięcia podczas pracy inwertera PV oraz komunikacji PLC [H8]



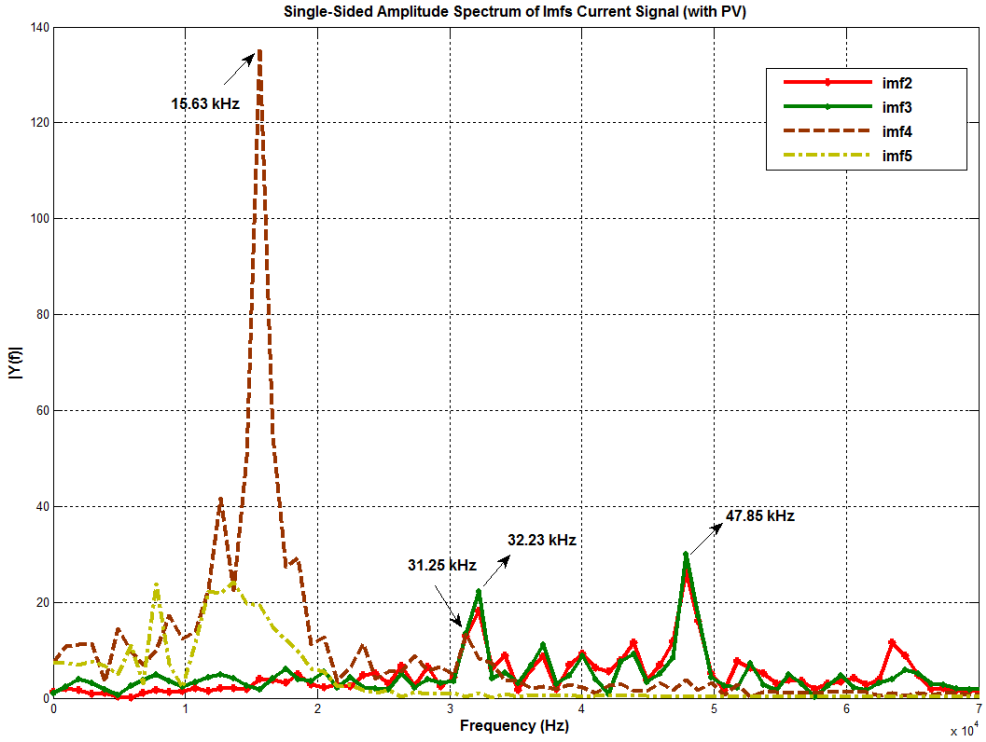
Rys. 37. Wynik analizy spektralnej (DWT) sygnału prądu bez pracy falownika PV [H8]



Rys. 38. Wynik analizy spektralnej (DWT) sygnału prądu z pracą falownika PV [H8]



Rys. 39. Schemat algorytmu EEDM [H11]



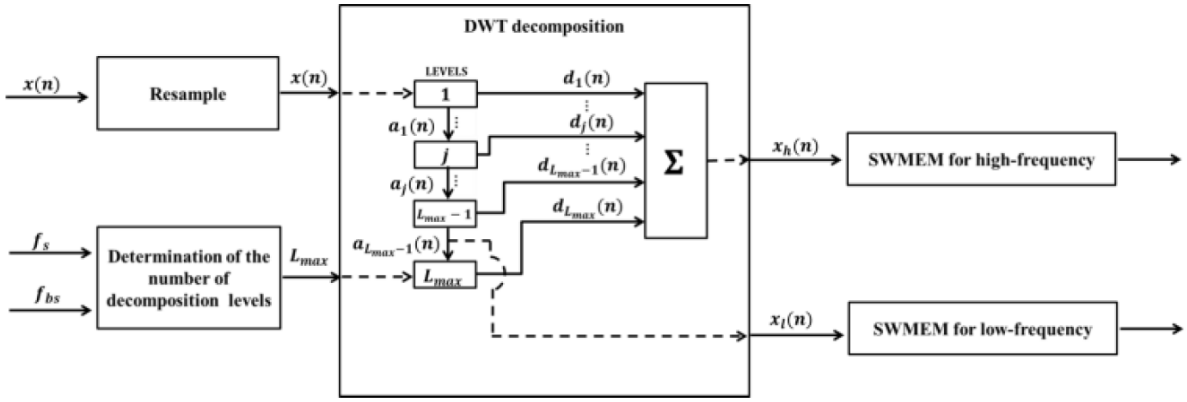
Rys. 40. Wynik analizy spektralnej (EEDM) sygnału prądu z pracą falownika PV [H11]

Głównym moim wkładem naukowym prac jest wykazanie, że:

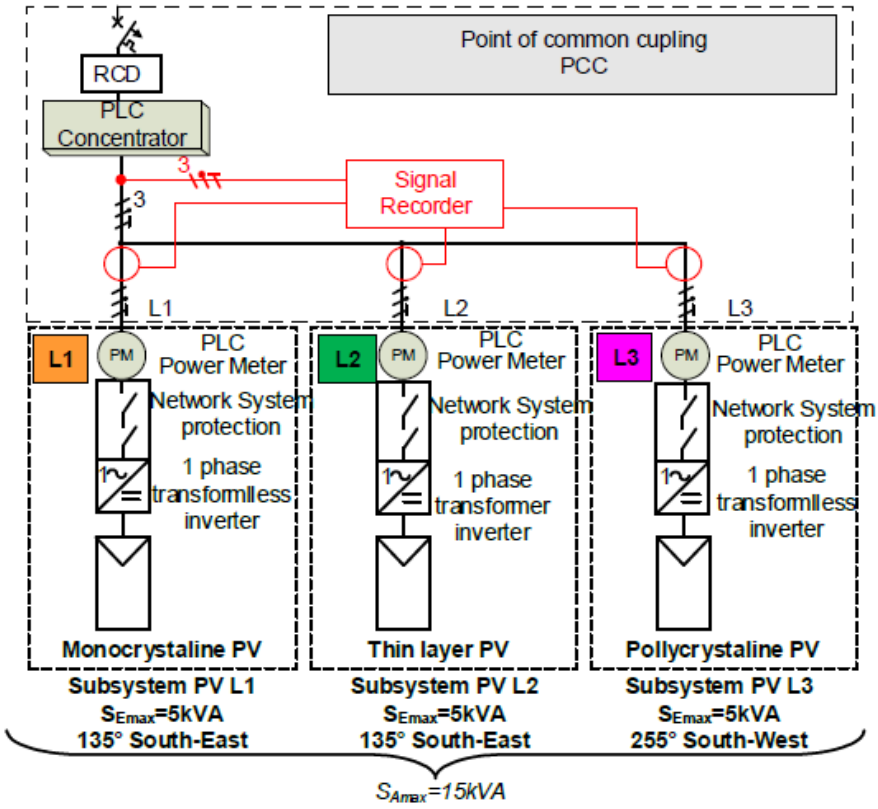
- **zastosowanie metod DWT oraz EEDM w analizie występowania zakłóceń w paśmie częstotliwości 2-150 kHz jest lepszym rozwiązaniem w porównaniu do tradycyjnej metody krótko czasowej transformaty Fouriera STFT;**
- **dyskretna transformata falkowa DWT precyzyjnie wykrywa w badanym sygnale prądowym pracę systemu falownika PV i może być brana pod uwagę w projektowaniu filtrów dla redukcji szumów w pasmach wysokiej częstotliwości;**
- **spektrum amplitudowe dekompozycji EEDM w paśmie supraharmonicznych zawiera szczegółowe informacje o pracy falownika oraz komunikacji PLC w stosunku do spektrum STFT;**
- **metodę EEMD można zastosować do analizy spektralnej supraharmonicznych i do rozpoznawania wzorców supraharmonicznych w inteligentnych sieciach z systemami fotowoltaicznymi.**

Ostatnim aspektem badań dotyczących metod analizy i oceny propagacji supraharmonicznych w paśmie 2 – 150 kHz, prowadzonych we współpracy z Department of Engineering, University of Naples Parthenope, Naples, jest zaprezentowana w artykułach [H6], [H7] krytyczna analiza oraz porównanie dwóch metod zaproponowanych w najnowszej literaturze, które wydają się szczególnie odpowiednie do analizy spektralnej przebiegów o szerokich widmach. Jedna z metod opiera się na dyskretnej transformacie Fouriera (SWDFT) z przesuwnym oknem (*Sliding-Window Discrete Fourier Transform* SWDFT) odnosząca się do standardowej oceny harmonicznych wg IEC. Druga metoda wykorzystuje metodę opartą na

ESPRIT zmodyfikowaną falką o przesuwnym oknie (*Sliding-Window Wavelet-Modified ESPRIT-Based Method* SWWMEM), której algorytm przedstawiono na rysunku (Rys. 41). Oba artykuły tworzą całość, przy czym w artykule [H6] omówiono podstawy teoretyczne zastosowania powyższych narzędzi badawczych, zaś w artykule [H7] opisano i zilustrowano wyniki badań ich zastosowania do analizy spektralnej. Przetestowano i oceniono je pod względem dokładności i wydajności obliczeniowej na podstawie uzyskanych wyników numerycznych analizujących zarówno przebiegi symulacyjne, jak i zmierzone. Zmierzony i zarejestrowany kształt fali przebiegu sygnału napięcia pochodzi z systemu fotowoltaicznego z miernikami energii elektrycznej z technologią szerokopasmowej komunikacji PLC (Rys. 42).

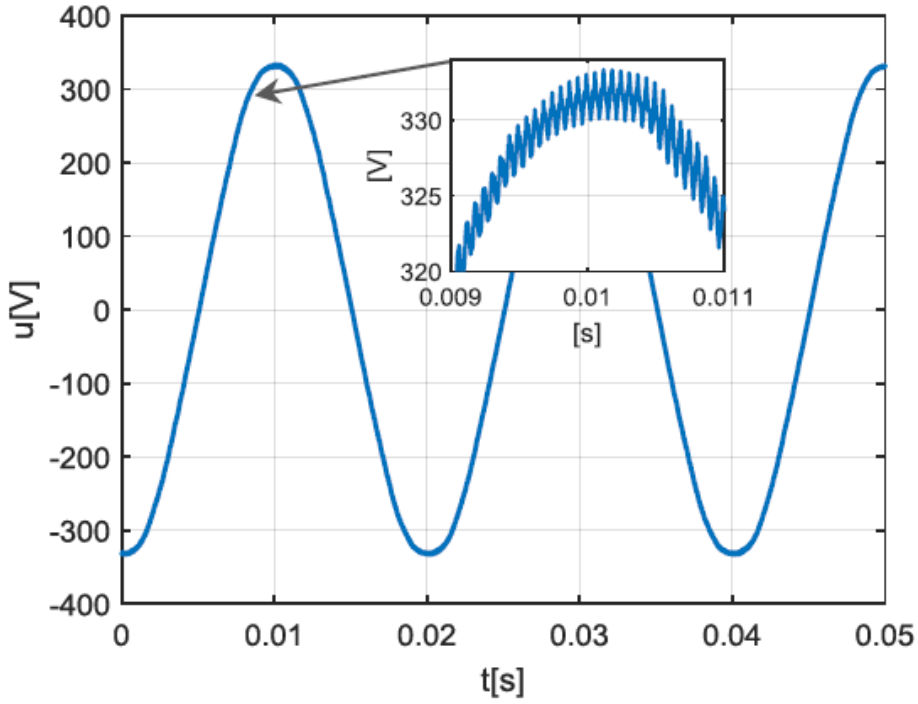


Rys. 41. Schemat algorytmu metody SWWMEM [H6]

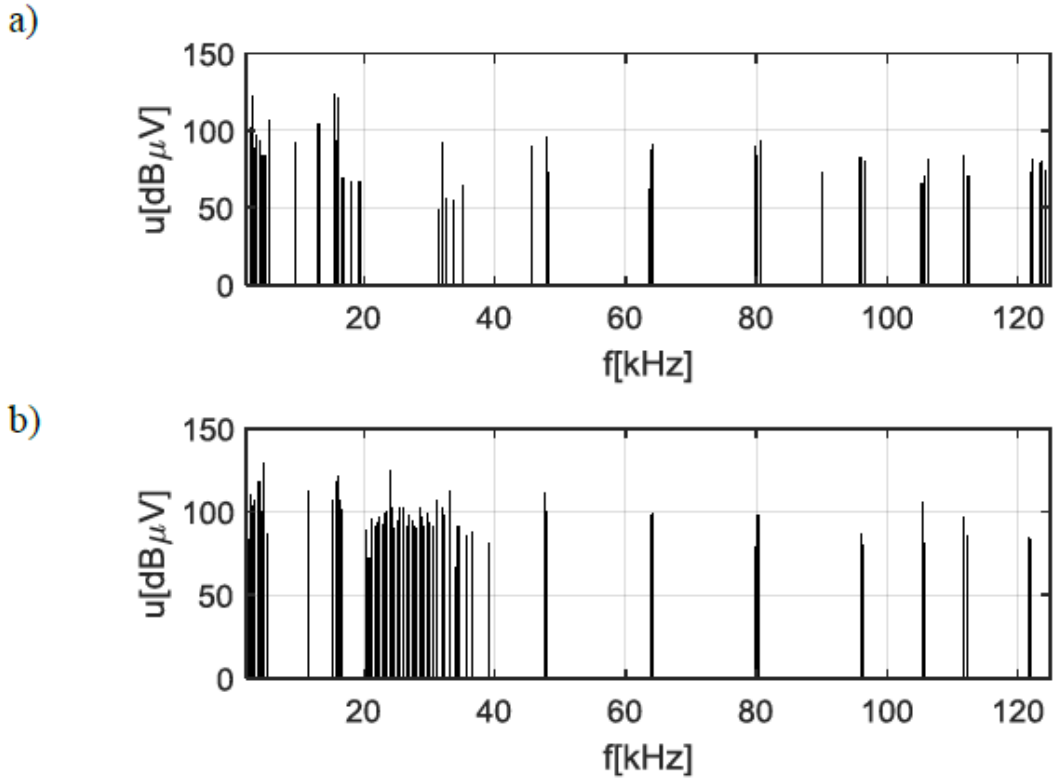


Rys. 42. Diagram podłączenia systemu PV do sieci nN z infrastrukturą PLC [H7]

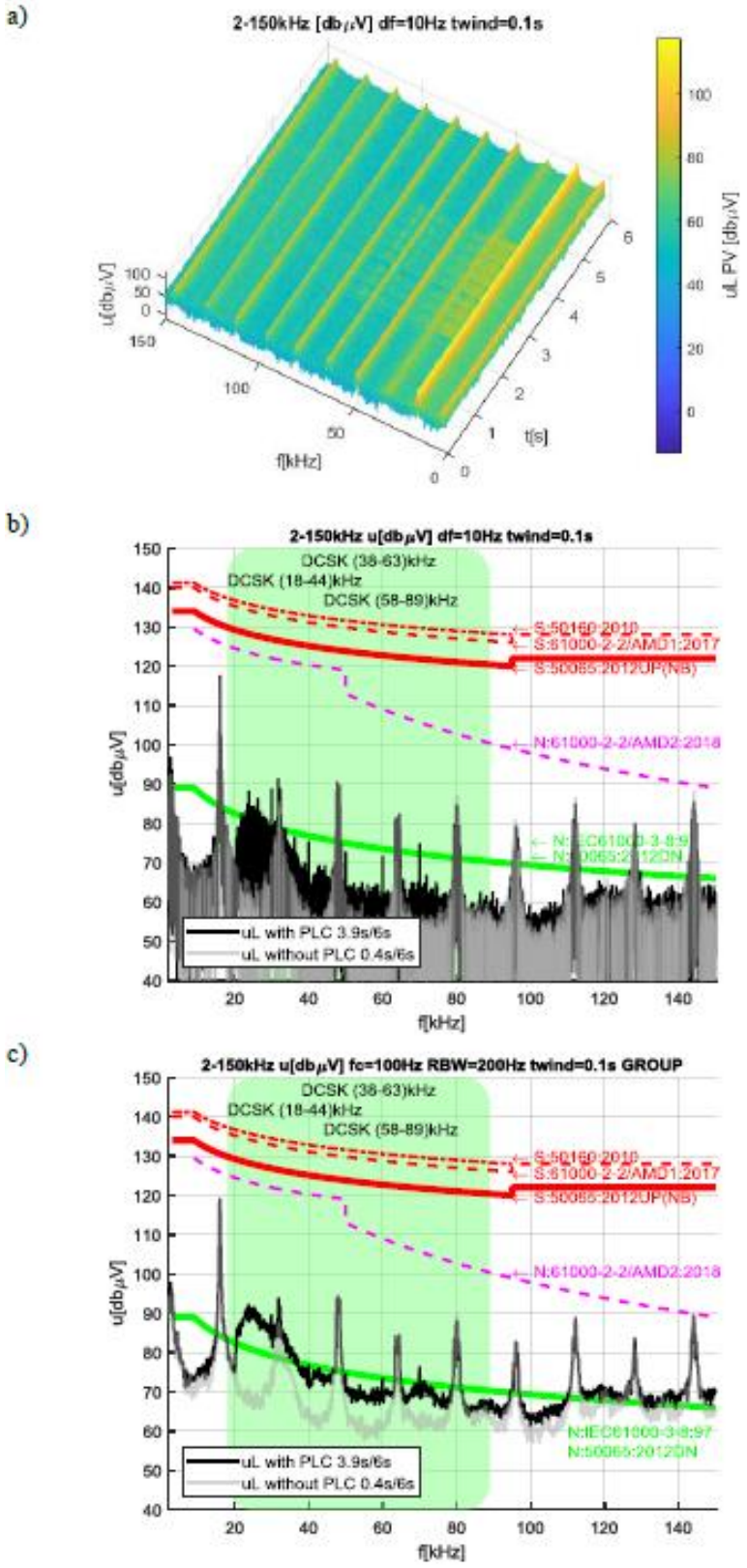
Przykładowo, na rysunkach (Rys. 43 – Rys. 45), w celu sformułowania wniosków przedstawiono wyniki zastosowania obu metod SWWMEM oraz SWDFT do analizy spektralnej widma zarejestrowanego sygnału napięcia w systemie PV z technologią PLC.



Rys. 43. Kształt chwilowego przebiegu napięcia zarejestrowanego w układzie pomiarowym wg rysunku Rys. 42



Rys. 44. SWWMEM: dBµV widma zawartości składowych wysokiej częstotliwości w zmierzonym napięciu: chwila t = 0,4 s reprezentuje napięcie bez PLC (a), chwila t = 3,9 s przy transmisji PLC (b) [H7]



Rys. 45. Widok czasowo-częstotliwościowy SWDFT (a) i porównanie tymczasowych widm napięcia sieciowego z transmisją DCSK i bez transmisji w rozdzielczości 10 Hz (b) oraz koncepcja grupowania z centralną częstotliwością 100 Hz (c) [H7]

Warto zauważyć, że SWWMEM i SWDFT wyodrębniają taką samą zawartość spektralną w analizowanym kształcie chwilowym przebiegu sygnału napięcia. Jednak w porównaniu do SWDFT metoda SWWMEM pozwala na osobną identyfikację widma związanego z działaniem systemu fotowoltaicznego oraz pracą urządzeń z technologią PLC (DCSK).

Przeprowadzone przez habilitanta oraz skonsultowane przez współautorów wyniki badań prowadzą do następujących uwag oraz wniosków:

- **w nowym kontekście pracy sieci inteligentnej, zakłócenia jej parametrów jakościowych, a zwłaszcza zniekształcenia składowymi o wysokiej częstotliwości, często nazywane supraharmonicznymi, wpływają na pojawienie się obecnie w sieciach dystrybucyjnych takich zdarzeń jak: wzrostu liczby zakłóceń, wzrostu podatności klientów końcowych na zakłócenia parametrów JEE, zagłuszanie transmisji danych;**
- **brak jest badań dotyczących oceny supraharmonicznych i analizy ich wpływu na komponenty systemu dystrybucji;**
- **oba te trendy mogą być przedmiotem przyszłych działań badawczych habilitanta w dziedzinie zniekształceń o wysokiej częstotliwości;**
- **należy opracować nowe metody wykrywania, klasyfikowania i oceny rzeczywistego udziału supraharmonicznych w napięciach i prądach w systemach elektroenergetycznych;**
- **interesującymi metodami są te, które pozwalają wskazać nie tylko widma wysokiej częstotliwości z dokładnością wysokiej częstotliwości, ale także wskazują zmienny w czasie charakter składników widma o dobrej rozdzielczości czasowej;**
- **główną zaletą SWWMEM w stosunku do SWDFT jest zachowanie rozdzielczości wysokiej częstotliwości nawet w krótkim oknie;**
- **wykazano, że zastosowanie okna 6 ms pozwala zidentyfikować składowe widmowe wysokich częstotliwości z ich zmianami czasowymi w związku z tym SWWMEM jest w stanie śledzić zmiany modulowanych komponentów, których nie można osiągnąć metodą SWDFT z powodu niezsynchronizowanej częstotliwości mierzonego komponentu z rozdzielczością częstotliwości;**
- **ze względu na przydatność badanych technik, obie metody umożliwiają identyfikację komponentów wysokiej częstotliwości wprowadzanych do napięcia sieciowego przez falowniki fotowoltaiczne, a także systemy PLC;**
- **zastosowanie metod umożliwia zobrazowanie wpływu pracy falowników PV na transmisję DCSK;**
- **dodatkowo, przedstawione w pracy studium przypadku dało możliwość porównania rzeczywistych zarejestrowanych poziomów zamierzonych i niezamierzonych zniekształceń w sieci elektrycznej z transmisją PV i PLC w porównaniu do wymagań normatywnych.**

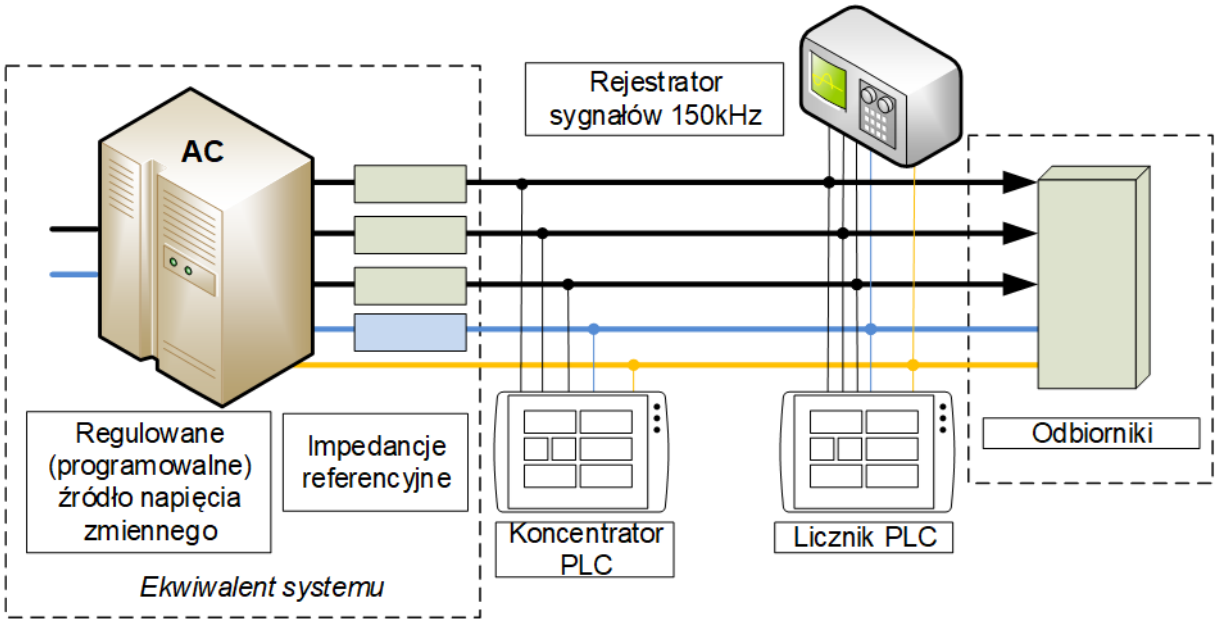
4.3.6. Wpływ odkształcenia napięcia zasilającego na zawartość harmonicznych częstotliwości w paśmie 2 - 150 kHz [raporty] ([4] załącznik 7)

W niniejszym podrozdziale przedstawiono wyniki badań własnych Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej, które są próbą odejścia od rozważań dotyczących wpływu liczby i rodzaju odbiorników, długości przewodów, na rzecz badań bezpośredniego wpływu zawartości harmonicznych w napięciu zasilającym 0-2 kHz na zaburzenia 2-150 kHz. W tym celu wykonałem dedykowane stanowisko laboratoryjne wydzielonej sieci niskiego napięcia zbudowanej w oparciu o zasilacz programowalny, zlokalizowane w Laboratorium Systemów Monitorowania Jakości Energii Elektrycznej przy Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej. Zasilacz programowalny pozwala na dowolne kształtowanie krzywej napięcia zasilającego, co daje możliwość skonfigurowania scenariuszy badań w odniesieniu do zaleceń normatywnych. Do analiz spectrum napięcia w punkcie przyłączenia wykorzystano utworzony w Laboratorium Systemów Monitorowania Jakości Energii Elektrycznej program w środowisku Matlab do obliczeń dyskretnej transformaty Fouriera zgodnie z normą 61000-4-7 z zastosowaniem grupowania z pasmem 200 Hz co 100 Hz dla zakresu częstotliwości 2 - 150 kHz.

Stanowisko laboratoryjne tworzy układ trójfazowy zasilaczy programowalnych, które wraz z impedancjami referencyjnymi tworzą ekwiwalent standardowego punktu przyłączenia sieci niskiego napięcia. Uproszczony schemat stanowiska pomiarowego przedstawia rysunek (Rys. 46). Impedancje referencyjne są zgodne z wytycznymi norm dotyczących kompatybilności elektromagnetycznych dla przewodu fazowego Z_A=(0.24+j0.15) Ω oraz dla przewodu neutralnego Z_N=(0.16+j0.1) Ω. Zastosowane zasilacze KIKUSUI PCR500LA mają moc 500 VA na fazę, stąd układ przeznaczony jest do badań odbiorników małej mocy. Zadaniem zasilaczy jest wytworzenie przebiegów napięcia zasilających trójfazowych o zadanych parametrach udziału harmonicznych. Jednocześnie pełnią funkcję odizolowania od publicznej sieci elektroenergetycznej.

Do konstrukcji udziału harmonicznych w napięciu zasilającym zastosowano oprogramowanie utworzone w Katedrze Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii w ramach platformy Centrum Monitorowania i Akwizycji Danych (CMAD) [38]. Aplikacja CMAD-PCR500LA realizuje komunikacje z zasilaczem programowalnym i pozwala na tworzenie przez użytkownika zestawów konfiguracyjnych dla udziału harmonicznych.

Kolejnym wymienionym elementem stanowiska pomiarowego są rejestratory przebiegów napięć, opartej na technologii National Instrument cRIO. Rejestratory te umożliwiają zapis danych jednocześnie z ośmiu kanałów napięciowych (±400 V z częstotliwością maksymalną 1 MHz na kanał). Rejestratory wyposażone są również w cewki Rogowskiego, wykorzystywane przy pomiarze prądu, które w prezentowanych badaniach nie zostały wykorzystane ze względu na ich zbyt duży zakres prądowy (250 A).



Rys. 46. Schemat zastępczy stanowiska laboratoryjnego do badań udziału wyższych częstotliwości 0-150 kHz

Ze względu na postawiony cel badań, którym była próba określenia wpływu stopnia zniekształcenia napięcia zasilającego na emisję zaburzeń przewodzonych wybranych odbiorników w odniesieniu do transmisji PLC, stanowisko wyposażono w przykładową technologię PLC typu PRIME (42-89 kHz). Należy zaznaczyć, iż wykorzystana w badaniach technologia PLC PRIME (42-89) kHz zbudowana jest w postaci zwartej makiety laboratoryjnej, która zawiera koncentrator oraz dwa liczniki 3-fazowe i 1 licznik 1-fazowy.
Pomiary polegały na rejestracji z częstotliwością próbkowania 1 MHz sygnałów napięcia na odbiornikach LED przy omówionych poniżej scenariuszach napięcia zasilającego. Czas rejestracji wynosił 20 sekund. Następnie zarejestrowany sygnał analizowano w oknach czasowych o szerokości 100 ms. W każdym oknie wykonywano analizę widmową zgodnie z normą 61000-4-7 z rozdzielczością 10 Hz i wprowadzając grupowanie w paśmie 200 Hz co 100 Hz. Uzyskiwano zatem możliwość obserwacji w następnych oknach pomiarowych zmian widma w trakcie pracy odbiornika w trybie okno po oknie. Miało to znaczenie, ze względu na próbę uchwycenia widm napięcia na odbiorniku bez i z komunikacją PLC PRIME (42-89 kHz).
Czynnikiem zmiennym dla przeprowadzanych badań był różny stopień zniekształcenia napięcia zasilającego, określony przez 3 następujące scenariusze:

Scenariusz 1: fazowe napięcie zasilające jako przebieg sinusoidalny.

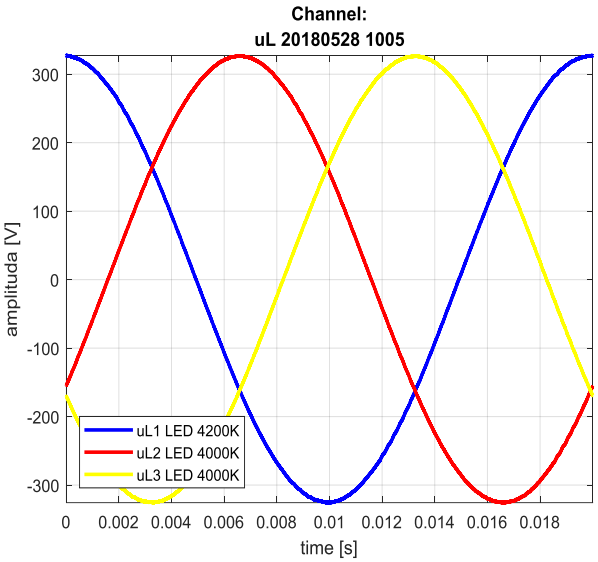
Scenariusz 2: fazowe napięcie zasilające jako suma dopuszczalnych poziomów harmonicznych w napięciu według normy PN-EN 50160. Uwzględniono również aktualizację normy z roku 2015 dla harmonicznych rzędów wyższych niż 25. Dla wszystkich harmonicznych przyjęto zerową fazę początkową.

Scenariusz 3: fazowe napięcia zasilające kształtowane zostały według zawartości harmonicznych stosowanych dla badań odporności odbiorników wg normy PN-EN 61000-4-13 dla odbiorników klasy 3 odporności.

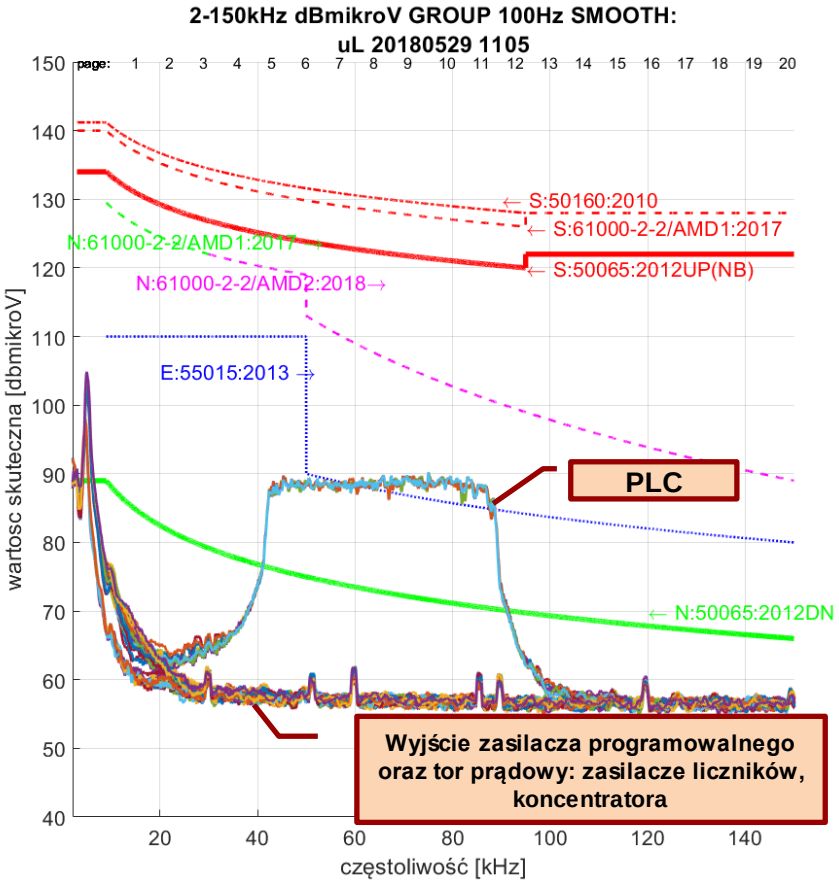
Niezmienna w eksperymencie pozostawała liczba i rodzaj odbiorników oraz długość przewodów zasilających. Należy zaznaczyć, że sygnał transmisji PLC jest jedynym sygnałem addytywnie dodawanym do obwiedniej sygnału napięcia zasilającego i nie ma w układzie żadnego innego źródła napięcia wysokiej częstotliwości. W związku z wykluczeniem wpływu długości przewodów zastosowanych w makiecie można powiedzieć, że poziom tego sygnału jest niezależny, w każdym punkcie instalacji stanowiska laboratoryjnego. Jako zagrożenie dla sygnału transmisji należy rozumieć „zakrycie" widma transmisji widmem pochodzącym od odbiorników. Przy czym precyzyjnie ujmując, widma odbiorników oznaczają widma emisji zniekształconego prądu, który przepływając przez impedancje przewodów oraz impedancje referencyjne (ekwiwalent sieci nN) do źródła zasilania powoduje na nich spadek napięć o charakterze wysokich częstotliwości. Należy zaznaczyć, że ze względu na prace laboratoryjne impedancje referencyjne przewodu fazowego $Z_A=(0.24+j0.15)\Omega$ oraz przewodu neutralnego $Z_N=(0.16+j0.1)\Omega$, traktowane jak ekwiwalent sieci nN, dominują w badanym układzie

w porównaniu do impedancji przewodów użytych w makiecie. Wtedy napięcie mierzone w punkcie przyłączenia odbiornika jako różnica napięcia źródłowego niskiej częstotliwości oraz spadków napięć wyższych częstotliwości na impedancjach zawiera również wyższe częstotliwości. Można powiedzieć, że napięcie w punkcie przyłączenia odbiornika (w modelu również odpowiadające punktowi przyłączenia licznika) jest „zainfekowane" wyższymi częstotliwościami pochodzącymi z obciążenia impedancji toru prądowego prądami odbiorników o emisji prądów wyższej częstotliwości. Co ważne, zaburzenia pochodzące od toru prądowego należy traktować jako tło dla sygnału transmisji (w literaturze podaje się nawet, jako zakłócenie sygnału transmisji). Zaburzenia pochodzące od toru prądowego nie dodają się do sygnału transmisji. Gdyby tak było, zaburzenia mogłyby wpływać korzystnie na podniesienie poziomu transmisji. Zaburzenia te mają charakter tła, który może „zakryć" widmo użytecznego sygnału transmisji. Dla zobrazowania powyższych relacji na rysunku (Rys. 47) przedstawiono widmo napięcia w punkcie przyłączenia odbiornika w stanie jałowym tj. bez obciążenia.

a)



b)



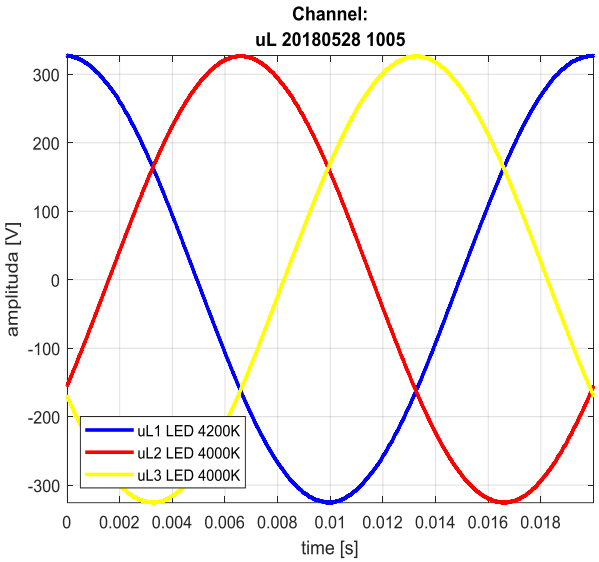
Rys. 47. Przebieg napięć zasilających wg. scenariusza 1 tj. przebieg sinusoidalny (a) oraz odpowiadające im widmo napięcia w paśmie 2-150 kHz bez transmisji PLC z uwzględnieniem dokładności kształtowania krzywej napięcia zasilacza programowalnego oraz wpływu zasilaczy liczników i koncentratora (oznaczenie wyjście zasilacza programowalnego oraz tor prądowy: zasilacze liczników i koncentratora) oraz sygnał transmisji PLC PRIME (42-89 kHz) (oznaczenie PLC) (b)

Jedyny wpływ na tło napięcia przed włączeniem komunikacji PLC mają prądy zasilaczy koncentratora oraz zasilaczy układów i wyświetlaczy liczników. Trzeba też powiedzieć o możliwym wpływie odkształcenia krzywej napięcia zasilającego, które zgodnie ze specyfikacją zastosowanego zasilacza programowalnego może wynieść do 0.3%. Widoczny jest praktycznie stały sygnał tła w zakresie wyższych częstotliwości nie przekraczający 60 dBµV z wąskopasmowymi składnikami wyższych częstotliwości. Sygnał PLC PRIME dominuje na poziomie 90 dBµV.

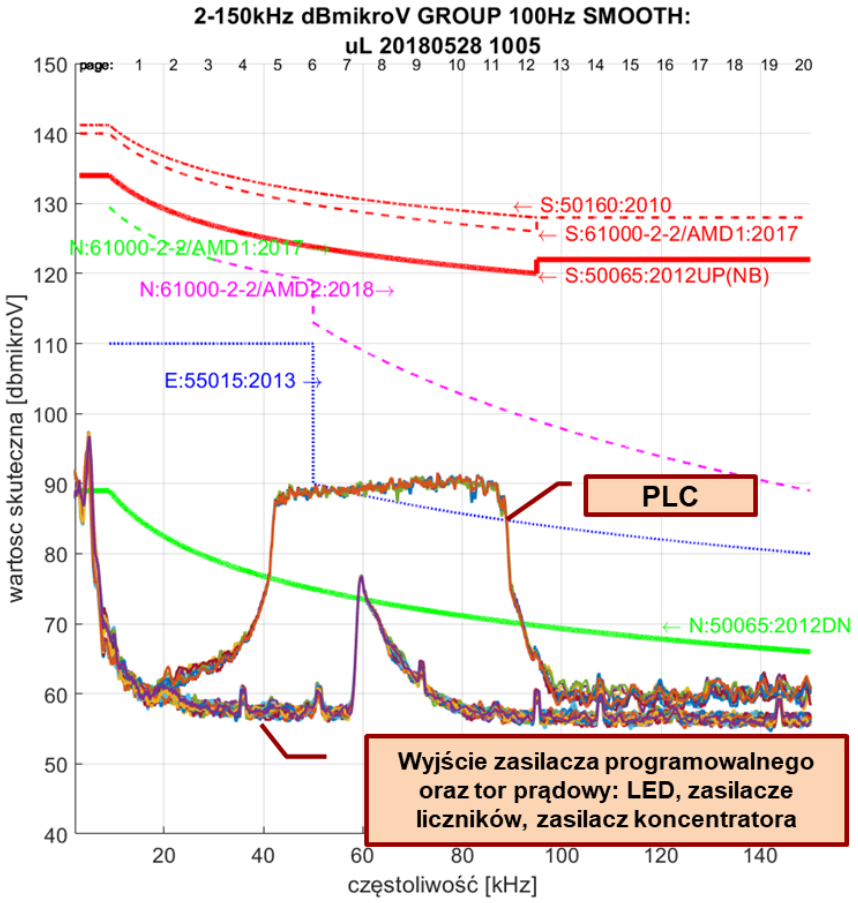
W następnym kroku tor prądowy obciążono omówionymi odbiornikami LED. Widmo zaburzenia napięcia w punkcie przyłączenia odbiorników od toru prądowego z porównaniem do transmisji PLC PRIME przedstawiono na rysunku (Rys. 46). Widoczna jest zmiana w widmie tła, ale poziom transmisji PLC pozostaje niezmienny, tzn. można powiedzieć, że sygnał PLC „przeważa" nad widmem odbiorników LED.

W dalszych krokach badań zmieniano scenariusze zawartości harmonicznych w napięciu zasilającym. Rezultaty porównania widm napięć w punkcie przyłączenia odbiornika dla wyżej wymienionych scenariuszy napięcia zasilającego przedstawiono odpowiednio na rysunkach (Rys. 48 - Rys. 50). Poziom PLC pozostaje bez zmian, lecz poziom widma tła znacząco rośnie w kierunku poziomu transmisji PLC. **Na podstawie przeprowadzonych przez habilitanta eksperymentów można stwierdzić, iż zawartość harmonicznych w paśmie 0-2 kHz w napięciu zasilającym zwiększa poziom zaburzeń 2-150 kHz występujących w sieci z odbiornikami typu LED**. W prezentowanym granicznym przykładzie zaburzenia napięcia zasilającego z udziałem harmonicznych o poziomie stosowanym w badaniach odporności odbiorników klasy 3, odnotowano poziom emisji zaburzeń 2-150 kHz w badanej sieci laboratoryjnej bliski poziomowi transmisji użytej technologii PLC PRIME (42-89 kHz), przy jednoczesnym przekroczeniu dopuszczalnych poziomów zaburzeń w sieci elektroenergetycznej, zdefiniowanych przez krzywą PN-EN 50065, która jest zgodna z normą IEC 61000-3-8.

a)

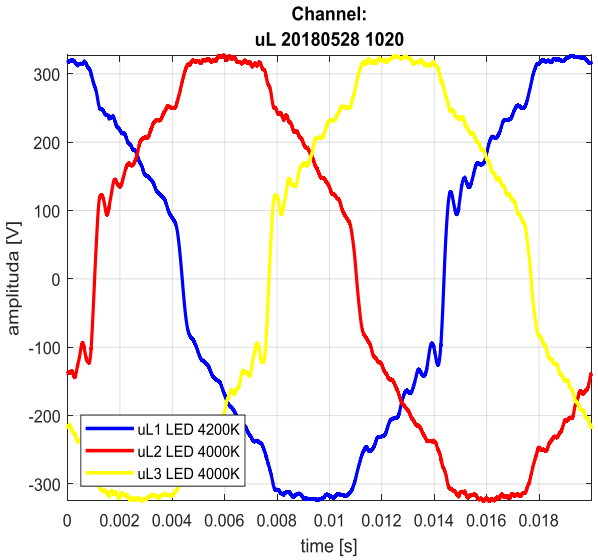


b)

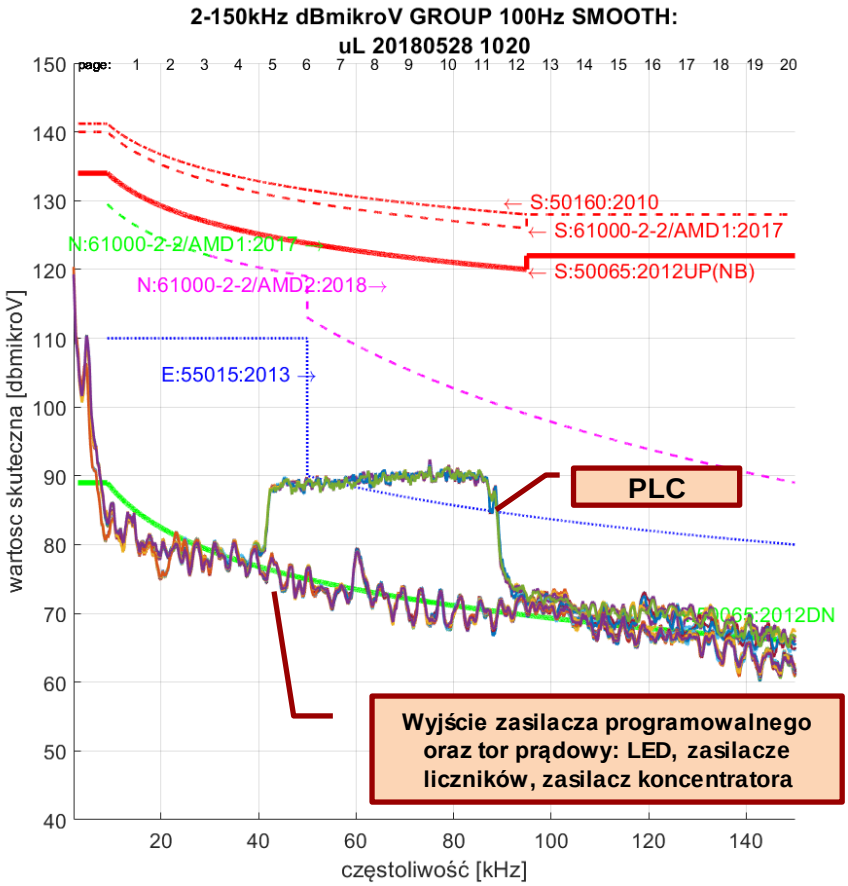


Rys. 48. Przebieg napięć zasilających wg. scenariusza 1 tj. przebieg sinusoidalny (a) oraz odpowiadające im widmo napięcia w paśmie 2-150 kHz bez transmisji PLC z uwzględnieniem dokładności kształtowania krzywej napięcia zasilacza programowalnego oraz wpływu zasilaczy liczników i koncentratora, a przede wszystkim odbiorników LED (oznaczenie wyjście zasilacza programowalnego oraz tor prądowy: LED, zasilacze liczników i koncentratora) oraz sygnał transmisji PLC PRIME (42-89 kHz) (oznaczenie PLC) (b)

a)

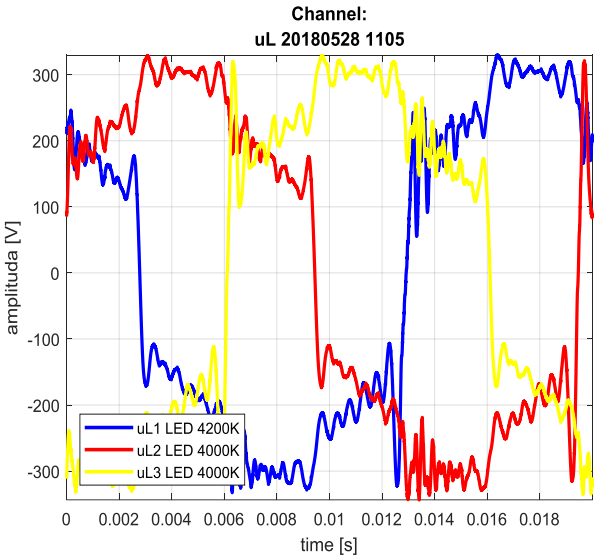


b)

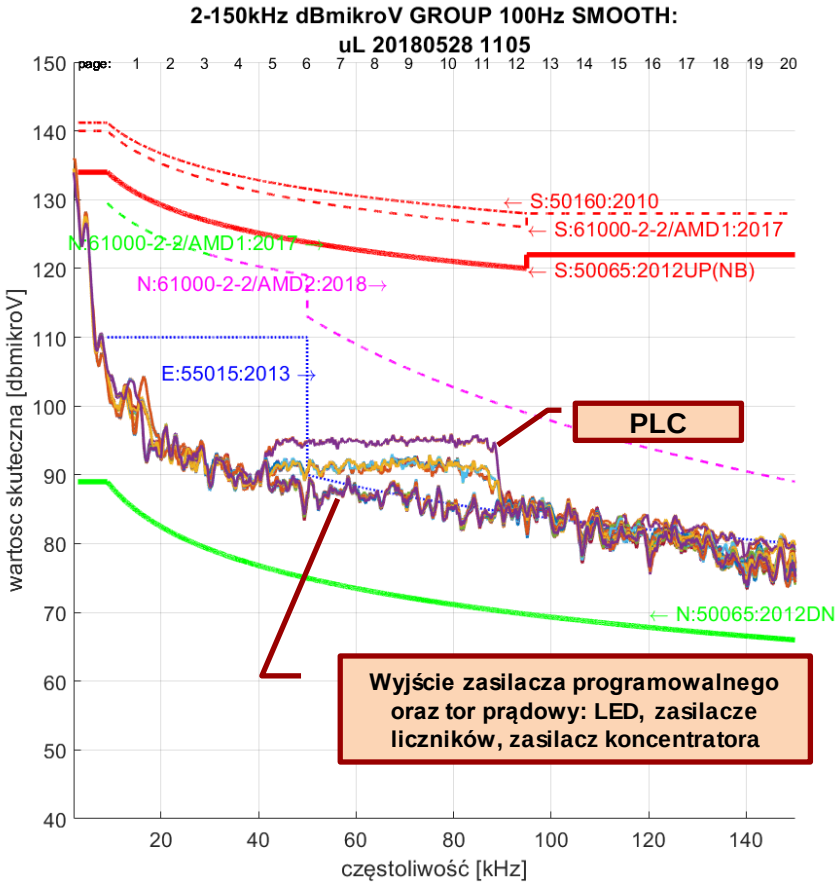


Rys.49. Przebieg napięć zasilających wg. scenariusza 2 tj. przebieg zawierający dopuszczalne harmoniczne wg. PN-EN 50160:2015 (a) oraz odpowiadające im widmo napięcia w paśmie 2-150 kHz bez transmisji PLC z uwzględnieniem dokładności kształtowania krzywej napięcia zasilacza programowalnego oraz wpływu zasilaczy liczników i koncentratora, a przede wszystkim odbiorników LED (oznaczenie wyjście zasilacza programowalnego oraz tor prądowy: LED, zasilacze liczników i koncentratora) oraz sygnał transmisji PLC PRIME (42-89 kHz) (oznaczenie PLC) (b)

a)



b)



Rys. 50. Przebieg napięć zasilających wg. scenariusza 3 tj. przebieg zawierający harmoniczne wg. normy PN-EN 61000-4-13 dla odbiorników klasy 3 odporności (a) oraz odpowiadające im widmo napięcia w paśmie 2-150 kHz bez transmisji PLC z uwzględnieniem dokładności kształtowania krzywej napięcia zasilacza programowalnego oraz wpływu zasilaczy liczników i koncentratora, a przede wszystkim odbiorników LED (oznaczenie wyjście zasilacza programowalnego oraz tor prądowy: LED, zasilacze liczników i koncentratora) oraz sygnał transmisji PLC PRIME (42-89 kHz) (oznaczenie PLC) (b)

Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej [por. 24-36] problemu wpływu zaburzeń niskich częstotliwości do 2 kHz w napięciu i prądzie zasilającym na poziom zaburzeń przewodzonych w paśmie 2 - 150 kHz można stwierdzić, iż ten wątek badań nie jest jeszcze obecnie szeroko badany. Dostrzega się dwa dominujące nurty badań w tym zakresie. Pierwszy dotyczy badań wpływu zaburzeń niskich częstotliwości w napięciu zasilającym na poziom emisji harmonicznych prądów, a więc również w zakresie niskich częstotliwości do 2 kHz. Drugi obszar badań obejmuje co prawda wyższe częstotliwości do 150 kHz, ale dotyczy głównie wpływu jednoczesnej pracy wielu odbiorników na poziom supraharmonicznych w prądach odbiorników oraz w prądzie wypadkowym w punkcie przyłączenia.

Za ważniejsze elementy badań literaturowych należy uznać:

- odniesienie się do zjawiska emisji pierwotnej i wtórnej w prądach odbiorników;
- stosowanie analiz widmowych impedancji sieci przy pracy pojedynczej i równoległej odbiorników oraz dla różnej długości przewodów zasilających, a także ze względu na wejściowych filtry EMC odbiorników, w tym wpływ powyższych elementów na częstotliwości rezonansowe układu;
- odniesienie się do stosowanych układów korekcji współczynnika mocy (PFC – power factor correction), zarówno pasywnych jak i aktywnych.

Biorąc pod uwagę powyższe aspekty, na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań opisanych w literaturze można stwierdzić następujące rezultaty w zakresie wpływu zaburzeń krzywej napięcia w zakresie 0-2 kHz na emisję zaburzeń 0-2 kHz oraz 2 - 150 kHz:

- Potwierdzono wpływ odkształcenia napięcia zasilającego na poziom emisji harmonicznych w prądzie do 2 kHz. Najczęściej stosowanym sposobem zniekształcenia krzywej napięcia zasilającego jest kształtowanie współczynnika szczytu (CF – crest factor) przez tzw. „spłaszczanie" szczytu napięcia (flat-top) oraz „podniesienia" szczytu (pointed-top). Realizuje się to przez udział np. 3-ciej harmonicznej w napięciu zasilającym przy różnym kącie fazowym. Na podstawie wyników badań przeprowadzonych w zakresie do 2 kHz z urządzeniami typu: świetlówka kompaktowa (CFL – compact fluoresecent lamp) z pasywnym lub aktywnym układem korekcji współczynnika mocy oraz bez układu korekcji PFC, lampy LED z pasywnym lub aktywnym układem PFC, a także zasilacz impulsowy (SMPS - Switch-Mode Power Supply), stwierdzono, iż układy korekcji współczynnika mocy (PFC) mają wpływ na zniekształcenie prądów w przypadku zasilania odkształconym napięciem charakteryzującym się spłaszczeniem szczytu. Dla przykładu odbiornika w postaci świetlówki kompaktowej bez układu PFC współczynnik zawartości harmonicznych w prądzie rośnie ze wzrostem współczynnika szczytu (zwiększanie poziomu zniekształcenia napięcia zasilającego), a stopień zniekształcenia prądów był powyżej 100% THD_I. Podobna obserwacja dotyczy zasilacza impulsowego z pasywnym układem PFC, choć różnice przyrostu współczynnika THDI są mniejsze niż w przypadku odbiornika bez układu korekcji PFC. Dla tego zasilacza impulsowego o takiej samej mocy lecz z aktywnym układem PFC obserwuje się ogólnie mniejszą

zawartość harmonicznych w prądzie na poziomie 30-40%. Zniekształcenie typu spłaszczanie" szczytu napięcia (flat-top) mniej wpływa na harmoniczne w prądzie odbiorników niż zniekształcenie typu „podniesienia" szczytu (pointed-top). Ponadto na emisję harmonicznych w prądzie wpływa stopień obciążenia układów zasilających odbiorniki. Brak jest obecnie zaleceń standaryzujących stosowanie układów PFC w odbiornikach. Zastosowanie pasywnych lub aktywnych układów korekcji współczynnika mocy pozostaje decyzją producenta urządzenia. Co do zasady wybór układu korekcji może wynikać z konieczności spełnienia wymogów emisyjności wyższych harmonicznych w prądzie.

- Zaobserwowano emisję wtórną w prądach odbiorników, rozumianą jako część prądu badanego odbiornika, która nie pochodzi od jego emisji pierwotnej, lecz przenosi się przez połączenia równoległe z innego odbiornika. W eksperymentach pomiarowych odnotowano, że w przypadku emisji supraharmonicznych powyżej 2 kHz niektóre składowe częstotliwościowe prądów zamykają się przez obwody wejściowe odbiorników sąsiadujących, a część składowych częstotliwościowych prądów zamyka się przez obwody zasilające i przewody neutralne. Stąd odnotowuje się sytuację, w których pewne komponenty częstotliwościowe występujące jednocześnie w obu odbiornikach, na skutek relacji kątowych, znoszą się w całkowitym prądzie w punkcie przyłączenia układu równoległego odbiorników. Wskazano charakterystyczny efekt zmniejszenia się udziału niskich częstotliwości 0-2 kHz w prądzie całkowitym przy zwiększaniu liczby badanych lamp fluorescencyjnych, a także przesuwanie się niektórych pasm zaburzeń wyższych częstotliwości w paśmie 2 - 150 kHz z niższych do wyższych częstotliwości wraz ze wzrostem liczby przyłączanych odbiorników. Udział częstotliwości podlegających zmniejszaniu na skutek pracy równoległej odbiorników jest cechą indywidualną badanego układu sieci elektrycznej i występujących w niej odbiorników.
- Stwierdzono, iż możliwa jest taka konfiguracja długości przewodów i doboru różnych odbiorników, dla której widmowa charakterystyka impedancji obwodu będzie przyjmować maksymalne wartości dla częstotliwości zbliżonych do częstotliwości transmisji wprowadzając tym samym efekt tłumienia szybciej niż wynikałoby z tłumienia pochodzącego od zwiększania długości przewodów. Innym problemem jest zagrożenie uszkodzenia filtrów wejściowych EMC urządzeń elektrycznych przy takiej konfiguracji obwodu, dla której częstotliwości rezonansowe wystąpią dla częstotliwości zbliżonej do częstotliwości filtra EMC. Jest to sprawa losowa, wynikająca z konfiguracji sieci, odbiorników, parametrów filtrów EMC. Powyższe wiąże się również z tworzeniem przez układy wejściowe odbiorników rezonansów równoległych o częstotliwościach rezonansowych zbliżonych do częstotliwości transmisji, na skutek czego następuje „zwieranie" sygnału transmisji do ziemi i tylko część sygnału użytecznego transmisji dociera do odbiornika transmisji.
- W zakresie bezpośredniego wpływu zniekształcenia napięcia zasilającego na emisję supraharmonicznych, wskazano wybrane rezultaty opublikowanych badań, w których

dla opraw oświetleniowych typu LED wykazano wzrost zawartości supraharmonicznych w prądzie w zakresie 30-95 kHz na skutek zniekształcenia napięcia zasilającego typu „podniesienie" szczytu (pointed), natomiast zmniejszenie udziału supraharmonicznnych w badanym zakresie 30-95 kHz przy zniekształceniu typu „spłaszczenie" szczytu.

Moim wkładem badawczym na ocenę wpływu zawartości wyższych harmonicznych w napięciu i prądzie do 2 kHz na poziom zaburzeń przewodzonych w paśmie 2-150 kHz, są zaprezentowane wyniki badań własnych, w których krzywą napięcia zasilającego kształtowano przez superpozycję harmonicznych o zadanych amplitudach. Za pomocą zasilaczy programowalnych ukształtowano napięcie zasilające w trzech scenariuszach: napięcie sinusoidalne, napięcie odkształcone o zawartości harmonicznych zgodnych z PN-EN 50160 dla sieci publicznych oraz napięcie odkształcone o zawartości harmonicznych stosowanych dla badań odporności odbiorników wg normy PN-EN 61000-4-13. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów można stwierdzić, iż zawartość harmonicznych w paśmie 0-2 kHz w napięciu zasilającym zwiększa poziom zaburzeń 2-150 kHz występujących w sieci z odbiornikami typu LED. W prezentowanym granicznym przykładzie zaburzenia napięcia zasilającego udziałem harmonicznych o poziomie stosowanym w badaniach odporności odbiorników klasy 3, odnotowano poziom emisji zaburzeń 2 - 150 kHz w badanej sieci laboratoryjnej bliski poziomowi transmisji użytej technologii PLC PRIME (42-89 kHz), przy jednoczesnym przekroczeniu dopuszczalnych poziomów zaburzeń w sieci elektroenergetycznej zdefiniowanych przez krzywą PN-EN 50065, która jest zgodna z normą IEC 61000-3-8.

4.3.7. Najważniejsze osiągnięcia badawcze

Do najważniejszych osiągnięć badawczych przedstawionych w cyklu publikacji [H1 – H20] zaliczam:

- aspekt praktyczny, związany z analizą zarejestrowanych danych rzeczywistych obiektów, oraz możliwością bezpośredniego wykorzystania wyników do analizy stanów pracy sieci dystrybucyjnych z generacją rozproszoną;
- stworzenie koncepcji budowy, nadzorowania oraz serwisowania sieci monitorowania parametrów jakości energii elektrycznej pracującej na rzeczywistym fragmencie sieci dystrybucyjnej z generacją rozproszoną;
- budowa centrum monitorowania i akwizycji danych CMAD jako źródła informacji do zastosowania nowoczesnych metod przetwarzania sygnałów do detekcji stanu pracy sieci elektroenergetycznej, w szczególności do analizy propagacji zakłóceń dzięki pomiarom synchronicznym ważnych węzłów sieci;
- długookresowa analiza stanu pracy SMJEE;

- zaawansowane algorytmy detekcji i analizy zjawisk zakłóceniowych w sieciach z udziałem generacji rozproszonej oraz sieci z ze źródłami odnawialnymi;
- przedstawienie nowej propozycji oceny jakości energii elektrycznej w oparciu o syntetyczne wskaźniki określane jako globalne, gdy są konstruowane w jednym punkcie pomiarowym oraz syntetyczne wskaźniki obszarowe konstruowane na podstawie rejestracji w wielu punktach pomiarowych systemu elektroenergetycznego;
- wykorzystanie metod taksonomicznych oraz narzędzi ekonomicznych do oceny pracy sieci inteligentnych;
- zaproponowanie modyfikacji metod do detekcji i analizy sygnałów supraharmonicznych w sieciach nN ze źródłami odnawialnymi;
- omówienie problemów z propagacji zakłóceń w paśmie 2-150 kHz;
- budowa stanowiska laboratoryjnego oraz zbadanie wpływu zniekształcenia napięcia zasilającego składowymi harmonicznymi do 2 kHz na propagację zakłóceń w paśmie częstotliwości do 150 kHz w obwodach wykorzystujących technologie transmisji sygnałów PLC;
- współpraca z podmiotem gospodarczym w zakresie zakłóceń elektromagnetycznych pracy urządzeń w paśmie 2-150 kHz (raporty mają klauzulę poufności);
- współpraca z podmiotem gospodarczym w zakresie budowy platformy wirtualnej elektrowni VPP.

4.3.8. Planowany zakres przyszłej pracy badawczej habilitanta:

1. Stwierdzam, że brak jest badań dotyczących oceny supraharmonicznych i analizy ich wpływu na komponenty systemu dystrybucji. Oba te trendy mogą być przedmiotem moich przyszłych działań badawczych we współpracy z innymi ośrodkami naukowymi (Włochy, Turcja, Indie) w dziedzinie zniekształceń o wysokiej częstotliwości.
2. Należy opracować nowe metody wykrywania, klasyfikowania i oceny rzeczywistego udziału supraharmonicznych w napięciach i prądach w systemach elektroenergetycznych. Interesującymi metodami są te, które pozwalają wskazać nie tylko widma wysokiej częstotliwości, ale także wskazują zmienny w czasie charakter składników widma o dobrej rozdzielczości czasowej.
3. Jako perspektywa przyszłych badań jest nowa wspólna metoda oparta na SWWMEM i SWDFT (por. [H6-H7]), w celu znalezienia najlepszego kompromisu między dokładnością a czasem obliczeniowym dla oceny zniekształceń w aplikacjach on-line. Pomysł może polegać na przeprowadzeniu dekompozycji DWT w pierwszym etapie, dzieląc pierwotną zawartość widmową na dwa lub więcej pasm częstotliwości. Następnie w drugim etapie, analiza spektralna różnych pasm częstotliwości jest uzyskiwana alternatywnie przez SWMEM lub przez SWDFT. W szczególności, zakładając dekompozycję fali tylko w dwóch pasmach częstotliwości (tj. niskiej i wysokiej częstotliwości), można przeanalizować zawartość niskiej częstotliwości (tj. do 2 kHz)

przez SWWMEM, podczas gdy zawartość wysokiej częstotliwości (tj. od 2 do 150 kHz) może być analizowana przez SWDFT.

4. Kolejnym, ważnym obecnie tematem badawczym jest poszerzenie zakresu badań analizy supraharmonicznych systemu elektroenergetycznego, ponieważ w ostatnich latach tylko analiza zniekształceń harmonicznych niskiej częstotliwości znacznie się rozwinęła. W rzeczywistości modele komponentów, metody symulacji i procedury analizy zostały szeroko opracowane tylko do prowadzenia systematycznych badań harmonicznych. Szczegółowe badania na te same tematy nie zostały jeszcze przeprowadzone w kontekście zniekształceń wysokiej częstotliwości, szczególnie w odniesieniu do natury i modelowania źródła supraharmonicznego oraz modelowania i symulacji obciążeń sieciowych.
5. Innym również ciekawym obszarem przyszłych zainteresowań może być dobór rozmiarów kabli do warunków ich pracy przy obciążeniu zniekształconym napięciem wynikającym z obecności supraharmonicznych – można oczekiwać niemałego wpływu dodatkowych strat Joule'a spowodowanych ich obecnością i uwzględnić ten fakt w obliczeniach doboru wielkości kabla, zarówno w kablach średniego napięcia, jak i kablach niskiego napięcia.
6. Właściwe badanie i ocena przebiegu napięcia i prądu zakłócone przez składowe o wysokiej częstotliwości jest również kluczową kwestią w sygnałach komunikacji szeroko stosowanych w inteligentnych systemach liczników energii. Ważnym wyzwaniem w systemach elektroenergetycznych jest utrzymanie wydajności technologii komunikacyjnych linii elektroenergetycznych. Obecnie obserwuje się dwa główne nurty dyskusji. Pierwszy wiąże się z możliwym wpływem różnych urządzeń elektrycznych na niezawodność transmisji z powodu emisji zniekształceń w zakresie 2-150 kHz, które mogą wpływać na pasma częstotliwości dedykowane dla transmisji. Druga grupa badań koncentruje się na zależności między stanem sieci a charakterem widm generowanych przez inną klasę urządzeń. Można wykazać, że różne urządzenia mogą wprowadzać różne zniekształcenia o różnych charakterystykach, w tym okresowe składowe wąskopasmowe, a także składowe szerokopasmowe.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej

1. 2019 - Department of Physics and Astronomy, University of Missouri-Kansas City, Kansas City, USA, współpraca naukowa (artykuł [9], Załącznik 7)
   Efektem badań prowadzonych we współpracy z Department of Physics and Astronomy, University of Missouri-Kansas City, USA, jest zaprezentowany w artykule [10] nowy czujnik elektretowy wykonany z folii politetrafluoroetylenowej (PTFE) do monitorowania

stężenia radonu w przestrzeniach zamkniętych. Rezultatem przeprowadzonych badań jest optymalizacja procesu tworzenia elektretów pod kątem maksymalnej wrażliwości na działanie cząstek alfa wynikających z rozpadu radioaktywnego radonu.

2. 2019 - Institute of Power Engineering, Department of Electrical Power Engineering, College of Engineering, Universiti Tenaga Nasional, Kajang 43000, Malaysia, współpraca naukowa (artykuł [H5])
   Współpraca badawcza z ośrodkami naukowymi z Danii i Malezji nad problemem zapewnienia dostaw energii o wysokich parametrach w okresie jej zwiększonego zużycia tzw. zużycia szczytowego zaowocowała opracowaniem i wykorzystaniem narzędzi optymalizacyjnych oraz korelacyjnych w ocenie pracy systemów fotowoltaicznych z siecią niskiego napięcia, opisane w przedostatnim artykule z cyklu [H5], co znacząco przyczyniło się do wzrostu efektywności gospodarki Malezji w obszarze dostaw energii w okresie zapotrzebowania szczytowego.

3. Department of Engineering, University of Naples Parthenope, Naples, Italy, współpraca naukowa (artykuły [H6], [H7])
   Efektem badań prowadzonych we współpracy z Department of Engineering, University of Naples Parthenope, Naples była zaprezentowana w artykułach [H6], [H7] krytyczna analiza oraz porównanie dwóch metod zaproponowanych w najnowszej literaturze, które wydają się szczególnie odpowiednie do analizy spektralnej przebiegów o szerokich widmach.

4. 01.06.2016 – obecnie, Ondokuz Mayis University, Turcja, staż oraz współpraca naukowa (Załącznik 3.20)
   Od czerwca 2016 nawiązałem aktywną współpracę naukową z ośrodkiem Ondokuz Mayis University w Turcji w zakresie zastosowania cyfrowych algorytmów przetwarzania sygnałów do analizy emisji sygnałów w paśmie do 150 kHz w sieci inteligentnej. Byłem inicjatorem i głównym wykonawcą zadań badawczych w projekcie polegającym między innymi na:
   - określeniu zakresu badań,
   - metodyki badań,
   - wykonania stanowiska badawczego,
   - nadzorowaniu i rejestracji pomiarów,
   - opieki nad doktorantem,
   - współpracy przy analizie wyników i redakcji trzech manuskryptów.
   Efektem tej współpracy były rozwiązania opisane w artykułach [H8] [H11].

5. 06.1997-08.1997, staż naukowy na Uniwersytecie Erlangen-Nurnberg w ramach projektu TEMPUS-PHARE

Przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora nauk technicznych odbyłem staż naukowy w Niemczech. Do moich obowiązków należały studia literaturowe w zakresie zastosowania cyfrowych algorytmów przetwarzania sygnałów, wykonanie badań symulacyjnych wykorzystania optymalizacyjnych sztucznych sieci neuronowych do analiz stanu pracy układów elektrycznych, analiza uzyskanych wyników oraz przygotowanie i redakcja materiałów do publikacji artykułów na arenie międzynarodowej.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę

6.1. Osiągnięcia dydaktyczne w zakresie popularyzacji nauki lub sztuki

1. Uroczystość upamiętniająca 110. rocznicę urodzin Profesora Romana Kurdziela

   Byłem członkiem komitetu organizacyjnego uroczystości upamiętniającej 110. rocznicę urodzin Profesora Romana Kurdziela. Było to unikatowe uroczyste spotkanie, dedykowane pamięci Pana prof. Romana Kurdziela z okazji 110. rocznicy urodzin.
   Do moich obowiązków jako współorganizatora należało opracowanie materiałów promocyjnych, przybliżających obecnemu pokoleniu studentów sylwetkę profesora, jego działalność oraz zasługi dla elektryki polskiej, a w szczególności elektryki wrocławskiej. Ponadto zajmowałem się organizacją uroczystości upamiętniających sylwetkę profesora oraz nadzór nad wykonaniem tablicy pamiątkowej w Laboratorium Podstaw Elektrotechniki, którego jestem kierownikiem. W uroczystościach wzięło udział ok. 70 osób, m.in. rodzina profesora, Jego współpracownicy, absolwenci Wydziału - byli i obecni studenci. (Załącznik 4.7)

2. Opracowanie materiałów dydaktycznych do zajęć laboratoryjnych w Laboratorium Podstaw Elektrotechniki oraz Laboratorium Cyfrowego Przetwarzania Sygnałów
3. Opracowanie kart przedmiotów w języku polskim i angielskim (ENG):

Lp.	Nazwa Kursu
1.	Teoria obwodów 1, ELR031301
2.	Teoria obwodów 1, ELR031301 (ENG)
3.	Teoria obwodów 1A, ELR031361
4.	Teoria obwodów 1A, ELR031361 (ENG)
5.	Teoria obwodów 1B, ELR031362
6.	Teoria obwodów 1B, ELR031362 (ENG)
7.	Projektowanie instalacji elektrycznych, ELR031307
8.	Projektowanie instalacji elektrycznych, ELR031307 (ENG)
9.	Projektowanie instalacji elektrycznych, ELR031370

10.	Projektowanie instalacji elektrycznych, ELR031370 (ENG)
11.	Ekologia przemysłowa – wybrane zagadnienia, ELR021314
12.	Ekologia przemysłowa – wybrane zagadnienia, ELR021314 (ENG)
13.	Ekologia przemysłowa – wybrane zagadnienia, ELR021338
14.	Ekologia przemysłowa – wybrane zagadnienia, ELR021338 (ENG)
15.	Teoria obwodów 2, ELR021368
16.	Teoria obwodów 2, ELR021368 (ENG)
17.	Teoria obwodów 1A, ELR021361
18.	Teoria obwodów 1A, ELR021361 (ENG)
19.	Teoria obwodów 1B, ELR021362
20.	Teoria obwodów 1B, ELR021362 (ENG)
21.	Projektowanie instalacji elektrycznych, ELR021307
22.	Projektowanie instalacji elektrycznych, ELR021307 (ENG)
23.	Projektowanie instalacji elektrycznych, ELR021370
24.	Projektowanie instalacji elektrycznych, ELR021370 (ENG)

4. Promocja Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej w ramach Dni Otwartych. Popularyzacja nauk technicznych oraz zachęcanie absolwentów szkół średnich do podjęcia studiów na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej. (Załącznik 4.18)
5. Promocja Wydziału Elektrycznego w ramach Targów Edukacyjnych Wrocławski Indeks. (Załącznik 4.18)
6. Członek komisji egzaminów dyplomowych Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej
7. Członek komisji hospitacyjnej Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej
8. Popularyzacja nauki w ramach Klubu Dyskusyjnego SEP przy Oddziale Wrocławskim Stowarzyszenia Elektryków Polskich. (Załącznik 4.22)

6.2. Opieka naukowa nad studentami

1. Promotor prac dyplomowych w latach 1999-2020:
   - prace inżynierskie: 37
   - prace magisterskie: 15

2. Zajęcia w języku polskim i angielskim (ENG) w Politechnice Wrocławskiej w latach 2007-2020

Lp.	Nazwa Kursu	Godziny w semestrze	Forma dydaktyczna
1.	Teoria obwodów 1 ELR021301 ELR031301 ELR041301	30/30	wykład/ćwiczenia
2.	Teoria obwodów 1A ELR021361	20/10	wykład/ćwiczenia

	ELR031361 ELR041361		
3.	Teoria obwodów 1B ELR021362 ELR031362 ELR041362	20/20	wykład/ćwiczenia
4.	Teoria obwodów 2 ELR021368	20/20/20	wykład/ćwiczenia/laboratorium
5.	Teoria obwodów 2 ELR031368 ELR041368	20/20	wykład/ćwiczenia
6.	Teoria obwodów 2 ELR031303 ELR041303	30	laboratorium
7.	Projektowanie instalacji elektrycznych ELR021307 ELR031307	15/30	wykład/projekt
8	Projektowanie instalacji elektrycznych ELR021370 ELR031370	10/20	wykład/projekt
9.	Podstawy elektrotechniki ARR031301 ARR021301	15	ćwiczenia
10.	Podstawy elektrotechniki ARR041312	15	ćwiczenia
11.	Obwody elektryczne ARR041302	30	ćwiczenia
12.	Obwody elektryczne i magnetyczne ARR021304	15	ćwiczenia
13.	Teoria obwodów 1B ELR001362	30	wykład
14.	Teoria obwodów 2 ELR001365	10	laboratoium
15.	Podstawy elektrotechniki MCR003105	15	ćwiczenia
16.	Teoria obwodów 1 ELR001326	30/15	ćwiczenia/laboratorium
17.	Teoria obwodów 1A ELR001361	20/10	wykład/ćwiczenia
18.	Teoria obwodów 1B ELR001362	20	wykład
19.	Teoria obwodów 2 ELR001365	20/10	wykład/laboratorium
20.	Teoria obwodów 2 ELR001304	15	laboratorium
21.	Industrial Ecology – Selected Issues **ENG** ELR001324	15/15	wykład/seminarium
22.	Podstawy elektrotechniki MCR032002 MCR032102 MCR001203	15/15	wykład/ćwiczenia
23.	Teoria obwodów 2 ELR021303	30/30	ćwiczenia/laboratorium
24.	Obwody liniowe	30	ćwiczenia
25.	Podstawy elektrotechniki I ELF7101	30/30	wykład/ćwiczenia

26.	Podstawy elektrotechniki II ELF7102	30	laboratorium
27.	Podstawy elektrotechniki III ELF7103	30	ćwiczenia
28.	Techniki optymalizacji ELR1319	30	laboratorium
29.	Cyfrowe przetwarzanie sygnałów MCR036103	30	laboratorium
30.	Metody matematyczne w elektrotechnice ELR031304	30	ćwiczenia

6.3. Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego

Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze **promotora pomocniczego**:

1. Michał Jasiński, Zastosowanie analizy skupień oraz globalnego wskaźnika jakości energii do identyfikacji i oceny różnych stanów pracy elektroenergetycznych sieci górniczych w aspekcie jakości energii elektrycznej, Wydział Elektryczny Politechniki Wrocławskiej, 19.06.2017-28.03.2019
2. Navid Torabpourshiraz, Control for hybrid energy systems, Wydział Elektryczny Politechniki Wrocławskiej, 30.01.2017-obecnie

6.4. Osiągnięcia organizacyjne w zakresie badań naukowych

1. Kierownik Laboratorium Elektrotechniki Teoretycznej, 08.06.2009 – 30.09.2012 (Załącznik 4.8)
2. Kierownik Laboratorium Podstaw Elektrotechniki Teoretycznej, 01.10.2012 – obecnie (Załącznik 4.9, 4.10)
3. Członek Komisji ds. Rozwoju i Integracji Europejskiej powołanej przez Radę Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej 2002 - 2005 (Załącznik 4.11)
4. Członek komisji weryfikującej spełnienie wymagań przepisów techniczno-budowlanych, ogólnych i branżowych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy, zgodnych z funkcją i przeznaczeniem w pomieszczeń dydaktycznych Katedry Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii.
5. Inicjator i koordynator remontu oraz modernizacji głównej linii zasilającej laboratoria: Laboratorium Elektrotechniki Teoretycznej, Laboratorium Cyfrowego Przetwarzania Sygnałów na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej (2009)

   Zakres prac:
   - *wnioskowanie aparatury oraz jej specyfikacji,*
   - *przygotowanie specyfikacji istotnych warunków zamówienia dla przeprowadzenia przetargu,*
   - *udział w komisji przetargowej,*

- nadzór nad realizacją prac remontowych i modernizacyjnych.

6. Inicjator i koordynator remontu oraz modernizacji zasilania stanowisk badawczych i dydaktycznych w Laboratorium Elektrotechniki Teoretycznej oraz Laboratorium Cyfrowego Przetwarzania Sygnałów na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej (2010)

Zakres prac:
- wnioskowanie aparatury oraz jej specyfikacji,
- przygotowanie specyfikacji istotnych warunków zamówienia dla przeprowadzenia przetargu,
- udział w komisji przetargowej,
- nadzór nad realizacją prac remontowych i modernizacyjnych,
- nadzór nad realizacją dostawy, montażu i uruchomienia stanowisk.

7. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo–badawczych

7.1. Informacja o osiągnięciach naukowych przed doktoratem

Studia magisterskie ukończyłem w 1992 roku. Pracę dyplomową na temat wykorzystania metod taksonomicznych do analizy energochłonności procesów produkcyjnych wykonałem pod kierunkiem Pani dr hab. inż. Bogumiły Wnukowskiej. Po zakończeniu studiów podjąłem pracę na stanowisku asystenta naukowo-dydaktycznego w Zakładzie Elektrotechniki Teoretycznej Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej pod kierownictwem Pana prof. Tadeusza Łobosa.

Rozprawę doktorską pt. „Adaptacyjne sieci neuronowe w zastosowaniu do identyfikacji stanu układów elektrycznych" napisałem pod kierunkiem prof. Tadeusza Łobosa. Obroniłem ją w 1998 roku na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej.

W okresie do uzyskania stopnia naukowego doktora nauk technicznych, mój dorobek naukowy stanowią: 1 publikacja, 21 referatów konferencyjnych (w tym 8 zagranicznych), 3 prace niepublikowane. W tym okresie brałem udział w 4 grantach badawczych finansowanych przez KBN. Za całokształt działalności naukowo-dydaktycznej w tym okresie otrzymałem Nagrodę Rektora (Załącznik 4.12) oraz Nagrodę Dziekana (Załącznik 4.13).

7.2. Informacja o osiągnięciach naukowych po doktoracie

Mój dorobek naukowy obejmuje ogółem 113 pozycji zarejestrowanych w bazie DONA w tym 102 prac publicznie dostępnych. Dorobek naukowy po doktoracie obejmuje 25 artykuły (w tym publikacje: 8 na Liście Filadelfijskiej, 7 z Impact Factor, 19 na Liście MNiSW,

11 punktowanych na Web of Science CC, 10 Open Access), 30 referatów konferencyjnych, 1 komunikat konferencyjny, 1 rozdział w monografii, 25 sprawozdań z badań.

Osiągniecia naukowo-badawcze, nie włączone do cyklu, można generalnie podzielić na trzy obszary tematyczne dotyczące: zastosowania adaptacyjnych sztucznych sieci neuronowych do analizy stanu pracy urządzeń w systemie elektroenergetycznym; wykorzystaniu zaawansowanych metod cyfrowego przetwarzania sygnałów w elektrotechnice; budowy analitycznego modelu warystora ZnO odwzorowującego jego mikrostrukturę fizyczną w celu interpretowania zmian w strukturze warystora wywołanych oddziaływaniem różnego rodzaju narażeń eksploatacyjnych. Zbiór publikacji, streszczony poniżej, przedstawia na przestrzeni lat moje zainteresowania naukowe, które w szerszym sensie uzupełniają zagadnienia przedstawione jako osiągnięcie habilitacyjne. Wyszczególniono wybrane artykuły reprezentujące dany blok tematyczny, których numeracja odpowiada załącznikowi z pełną listą artykułów (Załącznik 7).

7.2.1. Zastosowania adaptacyjnych sztucznych sieci neuronowych do analizy stanu pracy urządzeń w systemie elektroenergetycznym

Pod tym tematem kryje się zbiór artykułów omawiających wyniki badań realizowanych w końcowym etapie prac nad doktoratem i po jego obronie.

W automatyce i technikach zabezpieczeń energetycznych, istnieje konieczność identyfikacji stanu pracy, separacji i estymacji parametrów sygnałów elektrycznych, np.: wydzielanie z sygnału podstawowej harmonicznej, filtracja szumu, separacja wyższych harmonicznych, ocena zawartości wyższych harmonicznych, czy estymacja częstotliwości, amplitudy i fazy. Często konieczne jest wyznaczenie tych parametrów i ich śledzenie w czasie rzeczywistym przy zmieniających się w trakcie pomiarów szumach i zakłóceniach. Większość prezentowanych w literaturze i stosowanych metod estymacji i identyfikacji bazuje na wykonaniu serii pomiarów, a następnie przetworzeniu danych pomiarowych przy zastosowaniu algorytmów numerycznych. Algorytmy przetwarzania cyfrowego, chociaż bardzo efektywne, nie są przeznaczone do przetwarzania równoległego i nie zawsze umożliwiają estymację i identyfikację w czasie rzeczywistym stąd propozycja rozwiązania tego typu problemów przy użyciu techniki sztucznych sieci neuronowych.

Przedstawione układy - oparte na teorii optymalizacyjnych sieci neuronowych - zaprojektowano z myślą o ewentualnym zastosowaniu do estymacji parametrów sygnałów prądów i napięć w elektrotechnice oraz identyfikacji wybranych zakłóceń stanu pracy niektórych urządzeń. Jak już wspomniano, w układach automatyki i zabezpieczeń, celem rozpoznania stanu chronionego obiektu, konieczne jest określenie wartości niektórych wielkości elektrycznych. Należą do nich przede wszystkim parametry podstawowej składowej prądów i napięć, moc czynna i bierna, impedancja. Dla układów sterowania przekształtników energoelektronicznych zasadnicze znaczenie ma dokładna znajomość parametrów podstawowej składowej napięcia. Z drugiej strony, przekształtniki wywołują znaczne zniekształcenia przebiegów prądów i napięć. Szereg innych układów automatyki

wykorzystuje także parametry podstawowej harmonicznej napięć i prądów. Przedstawione sieci neuronowe dokonują, w czasie rzeczywistym, estymacji amplitudy składowych ortogonalnych sygnału prądu lub napięcia. Znając te wielkości można łatwo obliczyć amplitudę i fazę podstawowej składowej, moce oraz impedancję. Przedstawione sieci neuronowe są układami analogowymi. Sygnały dostarczane do układu estymującego są próbkowane, podobnie jak w przypadku stosowanych obecnie powszechnie układów cyfrowych. Jednak wartości dyskretne sygnału nie są przekształcane do postaci cyfrowej, lecz bezpośrednio przetwarzane przez sieć neuronową. Sygnał wyjściowy odpowiadający estymowanym parametrom jest ciągły - może być jednak, w razie potrzeby, przetworzony na sygnał dyskretny lub cyfrowy [40], [57].

Zaproponowano układy sieci z przeznaczeniem do wykrywania stanu asynchronicznej pracy maszyny synchronicznej, których algorytm działania oparty jest na standardowym kryterium najmniejszego błędu kwadratowego i metodzie najmniejszego spadku. Identyfikacja stanu asynchronicznego polega na analizie przebiegu prądu stojana. Opracowane sieci wyznaczają amplitudy poszczególnych składowych prądu stojana, których wartość w wyniku utraty synchronizmu zależy od wartości poślizgu wirnika [32], [35].

Zaprezentowano metodę umożliwiającą zapobieganie załączaniu linii elektroenergetycznej na zwarcie trwałe w ramach cyklu SPZ. Metoda opiera się na estymacji w czasie rzeczywistym parametrów sygnałów oraz na analizie błędów estymacji. W celu rozpoznania zwarcia łukowego proponuje się użyć stopień zniekształcenia krzywej napięcia na początku linii oraz rodzaj zmian tego zniekształcenia w miarę upływu czasu palenia się łuku. Zaproponowana rekurencyjna sieć neuronowa wyznacza parametry podstawowej harmonicznej napięcia oraz błędy estymacji tych parametrów. Na ich podstawie określa się następnie stopień zniekształcenia napięcia. Pod wpływem ruchów powietrza łuk ma tendencję do wydłużania się. Wydłużanie się łuku wpływa na wzrost wartości błędów estymacji. Wzrost ten proponuje się zastosować jako kryterium dla rozróżniania zwarć łukowych od zwarć trwałych. Zaproponowana sieć neuronowa umożliwia rozwiązywanie postawionego zagadnienia w czasie rzeczywistym [31], [34], [42].

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że ([31], [32], [34], [35], [40], [42], [57]):

- sieci neuronowe mogą być zastosowane do estymacji parametrów sygnałów w czasie rzeczywistym,
- sieci neuronowe optymalizujące mogą być projektowane na podstawie różnych kryteriów estymacji,
- podczas asynchronicznej pracy maszyny synchronicznej prąd w uzwojeniach stojana może być rozłożony na składowe o różnych częstotliwościach, zależnych od poślizgu wirnika. Dla identyfikacji stanu asynchronicznego możemy założyć pewną wartość poślizgu, która będzie osiągnięta podczas jego wzrostu i pojawienie się dodatkowych składowych prądu stojana oznacza stan asynchroniczny maszyny,
- podczas zwarcia łukowego w linii elektroenergetycznej długość łuku może ulec zmianie. Wydłużaniu się łuku towarzyszy wzrost napięcia łuku, a tym samym stopień

zniekształcenia napięcia linii. Prosta rekurencyjna sieć neuronowa umożliwia wyznaczanie parametrów podstawowej składowej napięcia i równocześnie stwarza możliwość odczytywania błędów estymacji tych parametrów. Wzrost wartości zniekształcenia napięcia linii podczas trwania awarii wskazuje na zwarcie łukowe. W przypadku nie wydłużania się łuku pierwotnego należy wziąć pod uwagę łuk wtórny.

Moim celem była szeroka popularyzacja zaproponowanych struktur sieci neuronowych na cyklicznych sympozjach i konferencjach międzynarodowych m.in.: International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Ogólnopolskie Sympozjum Inżynieria Wysokich Napięć.

7.2.2. Model analityczny struktury warystora ZnO do diagnostyki wysokonapięciowych ograniczników przepięć

W latach 2002 – 2005 w ramach uzyskanego z Komitetu Badań Naukowych grantu badawczego 4T10B03722 "Procesy degradacji i metody diagnozowania wysokonapięciowych ograniczników przepięć z warystorami z tlenków metali dla sieci elektroenergetycznych", byłem odpowiedzialny za wykonanie niezbędnych badań symulacyjnych w dziedzinie cyfrowego przetwarzania sygnałów do analizy zachowania się warystorów ZnO w diagnostyce wysokonapięciowych ograniczników przepięć. Prace te były przeprowadzane równolegle z badaniami laboratoryjnymi zmian starzeniowych warystorów ZnO wysokonapięciowych ograniczników przepięć pod wpływem narażeń eksploatacyjnych i poszukiwaniu czułych wskaźników do wykrywania tych zmian.

Do symulacji cyfrowych ([37], [39], [41], [46], [52], [53], [54], [55], [56]) zaproponowano model fizyczny warystora, odwzorowujący jego mikrostrukturę. Na tej podstawie wykonałem matematyczny model analityczny z elementem o nieliniowej charakterystyce napięciowo-prądowej. Obliczenia wykonywane były za pomocą opracowanego programu aplikacyjnego pracującego w środowisku MATLAB. Model został następnie zweryfikowany na podstawie porównania rzeczywistych przebiegów chwilowych prądu warystora ZnO z przebiegami uzyskanymi z modelu. Na podstawie zweryfikowanego modelu, wykonane zostały badania wpływu parametrów modelu warystora na jego odpowiedź prądową, pozwalające na interpretację zmian w strukturze warystora wywołanych oddziaływaniem różnego rodzaju narażeń. Za pomocą modelu zweryfikowano wpływ zawartości harmonicznych w napięciu zasilającym na wyniki diagnostyki ograniczników przepięć. Udowodniono bardzo silny wpływ zawartości harmonicznych w napięciu pracy ogranicznika na wartość trzeciej harmonicznej prądu, wykorzystywanej do wyznaczenia przez przyrządy diagnostyczne składowej rezystancyjnej prądu przewodzenia stosu warystorowego. Jak wynika z wyników symulacji, wzrost zawartości harmonicznych w napięciu zasilającym jest równoznaczny ze wzrostem wartości trzeciej harmonicznej prądu przewodzenia warystora. Bardzo istotnym aspektem poznawczym i aplikacyjnym wynikającym z tego faktu jest to, że wyniki badań diagnostycznych wskazujące na znaczący

wzrost składowej rezystancyjnej (wyznaczanej z trzeciej harmonicznej) nie muszą oznaczać zmian degradacyjnych w warystorach ZnO.

7.2.3. Metody cyfrowego przetwarzania sygnałów w elektrotechnice

Równolegle, na przestrzeni lat 1999 – 2015 moje zainteresowania badawcze, oprócz tematyki opisanej powyżej, koncentrowały się wokół obszarów badawczych dotyczących: metod analizy sygnałów elektrycznych z zastosowaniem przekształcenia falkowego, metod analizy i oceny jakości energii elektrycznej, nowych algorytmów przetwarzania sygnałów oraz globalnych wskaźników jakości energii w ocenie stanu pracy sieci z generacją rozproszoną [28], [30], [36], [38], [43], [44], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [58].

W latach 1999-2001 moje badania skupiły się na wykorzystaniu transformacji falkowych (*Wavelet Transform* WT) do analizy zwarć w liniach elektroenergetycznych. Badania wykazały, że zastosowanie falek zespolonych, zamiast dotąd stosowanego przekształcenia Fouriera, do wyznaczanie trajektorii zmian impedancji linii w czasie zwarcia, ma lepsze właściwości ze względu na monotoniczność obliczanej krzywej. Pozwalało to wykorzystać przekształcenie falkowe do szybkiego algorytmu zabezpieczenia odległościowego wprowadzając także elementy predykcji przebiegu krzywej impedancji. Na konferencjach naukowych [43], [58] przedstawiono wyniki obszernych badań symulacyjnych oraz przeprowadzono analizę jakościową metody w zależności od typu stosowanych falek i ich parametrów.

Głównym problemem poruszanym w pracach [36], [38], [44], [45], [47], [51] jest obecność w napięciach przekształtników charakterystycznych zakłóceń oraz związane z nimi trudności cyfrowego przetwarzania sygnałów. Podstawowym celem badań było wyznaczenie częstotliwości składowej podstawowej napięcia, jako parametru niezbędnego do prawidłowego sterowania pracą urządzeń, szczególnie w przypadkach skoordynowanego sterowania kilku oddzielnie zasilanych napędów lub w sytuacji, gdy ze względu na dokładność pomiaru, częstotliwość nie może być wielkością wejściową dla dalszych procesów obliczeniowych. Z tego punktu widzenia celowym było opracowanie algorytmu cyfrowego do pomiaru częstotliwości składowej podstawowej napięcia w czasie rzeczywistym, uwzględniając najczęściej stosowane zakresy pracy układów zasilania silników asynchronicznych. W pracach przedstawiono założenia metody, która wykorzystuje model Pron'ego pierwszego rzędu, zarówno do filtracji sygnału, jak i obliczeń częstotliwości. Algorytm badano z udziałem zarejestrowanych sygnałów na wyjściu rzeczywistych urządzeń energoelektronicznych oraz wykazano wystarczającą dokładność i szybkość obliczeniową proponowanej metody.

Innym negatywnym zjawiskiem zagadnieniem z punktu widzenia jakości zasilania oraz pracy urządzeń elektrycznych jest występowanie wyższych harmonicznych prądu w obwodach elektrycznych. Filtracja wyższych harmonicznych prądu w obwodach elektrycznych jest skutecznym sposobem poprawy jakości zasilania. Przedstawiono

praktyczne podejście do projektowania układów filtracji, przedstawiając precyzyjnie założenia teoretyczne i podano praktyczne przykłady projektowe [48], [49], [50].

Praca systemu fotowoltaicznego charakteryzuje się dużą zmiennością produkcji energii elektrycznej. Z punktu widzenia niezawodności zasilania, monitoring instalacji PV jest kluczowy dla zapewnienia ciągłości produkcji energii i szybkiego wykrywania awaryjnych stanów pracy. Prostym sposobem oceny chwilowego poziomu generacji jest porównanie wartości irradiancji i mocy wyjściowej systemu PV. W pracy [28] zaprezentowano pomysł wykorzystania kierunkowego pomiaru irradiancji do modelowania i oceny pracy systemu fotowoltaicznego opartym na układzie pomiarowym wykorzystującym 33 komórki referencyjne, rozmieszczone równomiernie na powierzchni półsfery. Zadaniem układu jest otrzymanie współczynnika (metodą optymalizacyjną minimalizacji błędu średniokwadratowego) dopasowującego wartość referencyjnej irradiancji do produkcji energii generatora PV, który wykorzystuje się w monitoringu instalacji.

Jak już wspomniano, praca generatora fotowoltaicznego cechuje się dużą zmiennością wynikającą bezpośrednio z warunków środowiskowych. W związku z tym, przeprowadzono liczne analizy rzeczywistych danych pomiarowych różnych instalacji, a następnie, zaproponowano nowe podejście do opisu charakterystyki zmienności produkcji generatora PV z wykorzystaniem transformaty falkowej [30].

7.2.4. Zastosowanie elektretów w czujniku promieniowania alfa do pomiaru stężenia radonu w wybranych warunkach otoczenia

Od 2015 roku współpracowałem z zespołem dr. inż. Adama Gubańskiego nad układem pomiarowym sensora promieniowania alfa. Efektem przeprowadzonych prac we współpracy z zagranicznym ośrodkiem naukowym (Department of Physics and Astronomy, University of Missouri-Kansas City, USA), jest zaprezentowany w artykule [10] nowy czujnik elektretowy do monitorowania stężenia radonu w przestrzeniach zamkniętych. Rezultatem przeprowadzonych badań jest optymalizacja procesu tworzenia elektretów pod kątem maksymalnej wrażliwości na działanie cząstek alfa wynikających z rozpadu radioaktywnego radonu.

7.3. Informacje o nagrodach za działalność naukową albo artystyczną

1. **Nagroda Rektora indywidualna II stopnia za rozprawę doktorską** - (1999) (Załącznik 4.1)
   W nagrodzonej rozprawie doktorskiej przedstawiono oryginalne rozwiązania adaptacyjnych sieci neuronowych do wyznaczania parametrów sygnałów oraz wskazano propozycje aplikacyjne. Zostały one opracowane w oparciu o kryteria TLS (Total Least Squares - totalne kryterium najmniejszych kwadratów) oraz RTLS (Robust TLS - odporne TLS). Zastosowanie tych kryteriów gwarantuje optymalną estymację, parametrów w przypadkach, gdy nie tylko pomiary są obarczone błędem, lecz także model sygnału.

Przykładem takiej sytuacji mogą być wahania częstotliwości podstawowej składowej sygnału. W pracy przedstawiono ponadto dwie nowe metody wykrywania szczególnych stanów pracy układu elektroenergetycznego:
- metodę, wykrywania stanu asynchronicznego maszyn synchronicznych;
- metodą wykrywania zwarć łukowych w liniach wysokiego napięcia.
Przeprowadzono badania tych metod z wykorzystaniem rzeczywistych przebiegów prądów i napięć. Obydwie metody mają szanse zastosowania w praktyce, po przeprowadzeniu dalszych badań wdrożeniowych.

2. **Nagroda Rektora I stopnia zespołowa za osiągnięcie naukowe** - (2000) (Załącznik 4.2)
Nagrodę zespołową przyznano za cykl artykułów pt. „Zaawansowane metody analizy widmowej do wyznaczania parametrów sygnałów elektrycznych oraz identyfikacji stanu układów elektrycznych". Przeprowadzono obszerne badania możliwości zastosowań metod statystycznych wyższego rzędu. Celem tych badań było określenie zakresu zastosowań oraz wybór optymalnych parametrów tych metod. Wykazano, że mogą one być z powodzeniem stosowane do diagnostyki napędów przekształtnikowych.
Opracowano nową metodę wykrywania zwarć łukowych z zastosowaniem adaptacyjnych sieci neuronowych. Opracowano dwa monograficzne referaty na zaproszenie organizatorów konferencji na temat możliwości zastosowania sztucznych sieci neuronowych w elektroenergetycznej automatyce zabezpieczeniowej.

3. **Medal Brązowy za Długoletnią Służbę** – (2010) (Załącznik 4.3, Załącznik 4.4)
***Działalność naukowa**: autor i współautor 41 publikacji: 3 w zagranicznych oraz 6 w krajowych czasopismach naukowych, a także w materiałach konferencji międzynarodowych (17 publikacji) i krajowych (16 publikacji); udział w realizacji krajowych projektów badawczych (3 projekty zrealizowane), doświadczenia badawcze zdobyte w czasie staży zagranicznych (Uniwersytet Erlangen-Nuremberg), prace naukowe z zakresu przetwarzania sygnałów, zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych w automatyce i elektrotechnice, badania i oceny algorytmów pomiarowych w diagnostyce ograniczników napięć oraz metod analiz numerycznych w układach ogranicznikowych.*
***Działalność dydaktyczna**: aktywny wykładowca; opracowanie wykładu "Teoria obwodów 1" na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej oraz ćwiczeń audytoryjnych i laboratoryjnych z tego przedmiotu; realizacja zajęć w zakresie wykładów, ćwiczeń audytoryjnych i laboratoryjnych z elektrotechniki, cyfrowego przetwarzania sygnałów, techniki optymalizacji w ramach studiów stacjonarnych oraz niestacjonarnych na Politechnice Wrocławskiej, aktywny udział w unowocześnianiu zaplecza dydaktycznego.*
***Działalność organizacyjna**: pełnienie obowiązków Kierownika Laboratorium Podstaw Elektrotechniki i Obwodów Elektrycznych w Instytucie Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej.*

4. **Konkurs o Nagrodę Siemensa** wysoka ocena przez Jury pracy doktorskiej *Adaptacyjne sieci neuronowe w zastosowaniu do identyfikacji stanu układów elektrycznych* (1999) (Załącznik 4.14)

Literatura:

[1] Ackerman T., Knyazkin V.: Interaction between distributed generation and the distribution network: operation aspects, Transmission and Distribution Conference, s. 1357-1362, 2002.

[2] Barker P.P., De Mollo R.W.: Determining the impact of distributed generation on power system: I. Radial distribution systems, Power Engineering Society Meeting, vol. 3, s. 1645-1656, 2000.

[3] Bollen M.H.J.: Understanding Power Quality Problems. Voltage sags and interruptions, IEE Press Series on Power Engineering, 2000.

[4] Bollen M.H.J, Gu Y.H.I.: Signal processing of power quality disturbances, John Wiley&Sons, 2006.

[5] Bollen M., Hassan F.: Integration of distributed generation in the power systems, Wiley and IEEE Press, 2011.

[6] CIGRE: Influence enhanced distributed generation on power system, TF 37.23 Report, Paris 1998.

[7] CIGRE: Task Force C6.04.01: Connection criteria at the distribution network for distributed generation, Brochure 313, February 2007.

[8] Dugan R.C., Walling R.A. et al: Summary of Distributed Resources Impact on Power Delivery Systems, IEEE Transactions on power delivery, vol.23, no 3, 2008.

[9] Freris L., Infield D.: Renewable energy in power systems, John Wiley & Sons, 2010.

[10] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. - Prawo energetyczne (Dz. U. z 1997, nr 54, poz. 348) z późniejszymi zmianami (jednolity tekst ustawy - Dz. U. 2006 nr 89 poz. 625, oraz ostatnie zmiany: Dz. U. z 2007 r. Nr 21, poz. 124, Dz. U. z 2007 r. Nr 52, poz. 343, Dz. U. z 2007r. Nr 115, poz. 790, Dz. U. z 2007 r. Nr 130, poz. 905).

[11] Ustawa o odnawialnych źródłach energii z dnia 20 lutego 2015 r. (jednolity tekst ustawy - Dz. U. z dnia 3.04.2015r., poz. 478).

[12] Parsons A.C., Grady W.M., Powers E.J., Soward J.C., Direction Finder for Power Quality Disturbances Based Upon Disturbance Power and Energy, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 15, no. 3, 2000, pp. 1081-1086.

[13] Li C., Tayjasanant T., Xu W., Liu X., Method for voltage-sag-source detection by investigating slope of the system trajectory, IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, vol. 150, issue 3, 2003, pp. 367-372.

[14] Tayjasanant T., Li C., Xu W., A Resistance Sign-Based Method for Voltage Sag Source Detection, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 20, no 4, 2005, pp. 2544-2551.

[15] Hamzah N., Mohamed A., Hussain A., A new approach to locate the voltage sag source using real current component, Electric Power Systems Research, Volume 72, Issue 2, December 2004, pp. 113-123.

[16] Bedrosian E., A product theorem for Hilbert transforms, Proceedings of the IEEE, 1963, pp. 868-869.

[17] Huang N. E., Shen S. S., Hilbert-Huang transform and its applications, World Scientific Publishing, 2005.

[18] Masoum, M.A.S., Jamali, S., Ghaffarzadeh, N., Detection and classification of power quality disturbances using discrete wavelet transform and wavelet networks, IET Science Measurement & Technology, Vol. 4, No.4, Jul., 2010, pp. 193-205.

[19] Grzegorz Grela: Normowanie wartości właściwości inherentnych w konstruowaniu syntetycznych wskaźników jakości, Annales Universitatis Maria E Curie-Skłodowska, Lublin – Polonia, Vol. XIV, Sectio H, 2011.

[20] Zbigniew Hanzelka, Andrzej Firlit, Grzegorz Błajszczak: Syntetyczne miary jakości napięcia Automatyka, Elektryka, Zakłócenia, Vol. 3, Nr 4 (10) 2012.

[21] Yonghai Xu,Lei Chen, Xiangning Xiao: Synthetic quantitative assessment of power quality in competition market environment, 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific, Dalian, China.

[22] J. Morais, Y. Pires, C. Cardoso, and A. Klautau, "An Overview of Data Mining Technique Applied to Power Systems", in Data Mining and Knowledge Discovery in Real Life Applications, 2009, 2011, pp. 1-7,

[23] L. P. Singh, S. S. Deswal, R. . Bhatia, and D. K. Jain, "A New Approach for Analysing Voltage Sag Severity Based on Power Quality Indices," Int. J. Emerg. Technol., vol. 4, no. October, pp. 1–5, 2004.

[24] S. Nourollah and M. Moallem, "A Data Mining Method for Obtaining Global Power Quality Index," in 2011 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2011, pp. 1–7.

[25] Bollen Math, Olofsson Magnus, Larsson Anders, Rönnberg Sarah, Standards for Supraharmonics (2 to 150 kHz), IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 2014

[26] Bollen Math, Rönnberg Sarah, Wahlberg Mats, Interaction Between Narrowband Power-Line Communication and End-User Equipment, IEEE Transactions On Power Delivery, 2011

[27] Rönnberg Sarah, Power Line Communication and Customer Equipment, Luleĺ University of Technology, Luleĺ 2011

[28] Rönnberg Sarah, Bollen Math, Measurements of High-Frequency (2-150 kHz) Distortion in Low- Voltage Networks, 2010

[29] Alfieri L., Bracale A. Carpinelli G., Larsson A., *Accurate assessment of waveform distortions up to 150 kHz due to fluorescent lamps*, 2017 6th International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP).

[30] Andersson M.O.J., Rönnberg S.K., Lundmark C.M., Larsson E.O.A., Wahlberg M., Bollen M.H.J., *Interfering signals and attenuation – potential problems with communication via the power grid*, 2007, 19th International Conference on Electricity Distribution.

[31] Gil-de-Castro A.; Rönnberg S.K., Bollen M.H.J, *Harmonic interaction between an electric vehicle and different domestic equipment*, 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility.

[32] Gil-de-Castro A.; Rönnberg S.K., Bollen M.H.J, *A study about harmonic interaction between devices,* 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP).

[33] Ronnberg S.K.; Bollen H.H.J; Wahlberg M., *Interaction Between Narrowband Power-Line Communication and End-User Equipment*, IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, vol.26, pp. 20134-2039.

[34] Yanchenko S., Meyer J., Harmonic Emission of Household Devices in Presence of Typical Voltage Distortions, 2015 IEEE Eindhoven PowerTech.

[35] Blanco A.M., Gupta M., Gil de Castro A. Rönnberg S.K., Meyer J. *Impact of flat-top voltage waveform distortion on harmonic current emission and summation of electronic household appliances*, 2018, International Conference on Renewable Energies and Power Quality ICREPQ'18.

[36] Mansoor A., Grady W.M., Thallam R.S., Doyle M.T., Krein S.S., Samotyj M.J., *Effect of Supply Voltage Harmonics on the Input Current of Single-phase Diode Bridge Rectifier Loads*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.10, 1995.

[37] Gil-de-Castro A., Medina-Gracia R., Ronnberg S.K., Blanco A.M., Meyer J., *Differences in the performance between CFL and LED lamps under different voltage distortions*, 2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power ICHQP.

[38] Szymańda J. Instrukcja użytkowania aplikacji CMAD-PCRL500 do konfiguracji udziału harmonicznych w napięciu wytwarzanym przez zasilacze programowalne Kikusui, Katedra Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej

Paweł Kostyła

.....

(podpis wnioskodawcy)