

**Konferencja „Jakość Dostawy Energii Elektrycznej –
wspólna odpowiedzialność wytwórców, dystrybutorów, konsumentów i prosumentów”**

Częstochowa, 28-29 listopada 2019

doi: 10.32016/1.67.18

**PRACE BADAWCZO-ROZWOJOWE ENEA OPERATOR
I AKADEMII GÓRNICZO - HUTNICZEJ W OBSZARZE MONITOROWANIA JAKOŚCI
DOSTAWY ENERGII ELEKTRYCZNEJ ORAZ BILANSOWANIA MOCY I ENERGII**

**Andrzej FIRLIT, Krzysztof PIĄTEK, Szymon BARCZENIEWICZ, Krzysztof CHMIELOWIEC,
Mateusz DUTKA**

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

tel.: 12 617 28 36

e-mail: afirlit@agh.edu.pl

tel.: 12 617 35 93

e-mail: kchmielo@agh.edu.pl

tel.: 12 617 39 20

e-mail: kpiatek@agh.edu.pl

tel.: 12 617 39 20

e-mail: mdutka@agh.edu.pl

tel.: 12 617 28 57

e-mail: barcent@agh.edu.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono prace badawczo-rozwojowe w obszarze monitorowania jakości dostawy energii elektrycznej oraz bilansowania mocy i energii podjęte przez Enea Operator, we współpracy z Akademią Górniczo-Hutniczą. Działania realizowane są w ramach projektu NCBR. Obecnie realizacji podlega etap I projektu. Dotyczy pomiarów i rejestracji oraz analizy jakości dostawy energii elektrycznej z uwzględnieniem rozszerzonego pasma do 150 kHz oraz z wykorzystaniem techniki synchronizacji w sieciach dystrybucyjnych. Końcowym rezultatem projektu jest opracowanie i zbudowanie nadrzędnego systemu, którego zadaniem będzie integracja danych z mobilnych i stacjonarnych analizatorów, synchronizatorów, systemów prognozowania produkcji energii z rozproszonych źródeł w celu ich analizowania, raportowania oraz bilansowania mocy i energii.

Słowa kluczowe: jakość energii elektrycznej, rozproszone systemy monitorowania, pomiar supraharmonicznych w pasmie do 150 kHz, pomiar synchronizatorów PMU.

1. WSTĘP

Budowa systemów pomiarowych służących do monitorowania pracy sieci elektroenergetycznych jest jednym z istotnych filarów wdrażania koncepcji inteligentnych sieci elektroenergetycznych *smart grids*. Jednym z elementów tych sieci jest system pozwalający na ciągłe monitorowanie wskaźników jakości dostawy energii elektrycznej (W-JDEE). Z koncepcją *smart grids* związane jest wykorzystanie rozproszonych, a w tym odnawialnych źródeł energii (RZE, OZE), zasobników energii oraz tworzenie mikrosieci i klastrów energii. Przyłączanie coraz większej liczby RZE zmienia warunki pracy systemu elektroenergetycznego i wiąże się z występowaniem zjawisk, które mogą pogarszać jakość dostawy energii elektrycznej. Jednocześnie takie źródła mogą stanowić potencjalne środki do kompensacji zaburzeń elektromagnetycznych oraz poprawy bezpieczeństwa energetycznego.

Pojęcie bilansu energetycznego jest szerokie i wieloaspektowe w kontekście systemu elektroenergetycznego oraz rozwoju RZE. Charakterystyczną właściwością OZE jest zmienny, zależny np. od warunków atmosferycznych, poziom generacji energii elektrycznej.

Z tego powodu OZE mogą mieć wpływ na zmiany parametrów pracy sieci elektroenergetycznych, tym silniejszy im większy mają udział w sumarycznej generacji. W tego typu systemach zasilania mamy do czynienia z dwukierunkowym przepływem energii elektrycznej.

Wdrażanie koncepcji *smart grids* ma również na celu zwiększenie efektywności energetyki rozproszonej (popytowo-podażowej). Istotą kwestią jest m.in. przeniesienie akcentu w skali społecznej z wytwarzania energii na zarządzanie energią, zwłaszcza w dziedzinach użytkowania energii elektrycznej oraz jej transportu. Otwiera to możliwość tworzenia tzw. wirtualnych źródeł energii elektrycznej (ang. *virtual power plant*, VPP). W przypadku źródeł różnego typu otrzymujemy wirtualne hybrydowe (poligeneracyjne) źródło energii elektrycznej. Dzięki rozwojowi systemów pomiarowych tego typu źródła mogą być tworzone wirtualnie, za pomocą odpowiednich narzędzi software'owych [1].

Systemy ciągłego monitorowania (SCM) W-JDEE pozwalają na pozyskiwanie cennych informacji o rzeczywistym stanie pracy monitorowanego systemu elektroenergetycznego. Mogą stanowić podstawę decyzji związanych z modernizacją i rozbudową istniejącej infrastruktury elektroenergetycznej. Systemy te umożliwiają też prowadzenie badań o charakterze statystycznym oraz kompleksową analizę i ocenę jakości dostawy energii elektrycznej, i to w długim okresie.

Znaczenie SCM W-JDEE podkreślane jest w wielu publikacjach opracowanych w ostatnich latach przez międzynarodowe grono specjalistów. Przykładowo eksperci CEER (ang. *Council of European Energy Regulators*) rekomendują, aby urząd regulatora sektora energetycznego zachęcał operatorów do rozszerzania zakresu ciągłego monitorowania jakości napięcia. Monitoring powinien umożliwić m.in. weryfikację zgodności jakości napięcia z obowiązującymi wymaganiami, a odbiorcy powinni otrzymać informację o rzeczywistym i oczekiwanym poziomie jakości napięcia w sieci [2].

Eksperti CIGRE i CIRED powołali pod koniec 2010 roku grupę roboczą JWG C4.112. Prace tej grupy dotyczą opracowania spójnych wytycznych całego procesu, budowy systemów monitorowania jakości dostawy energii

elektrycznej. Podkreślono, że jest to proces złożony i wieloaspektowy [0],[4],[5]. Efektem prac jest raport [6], w którym opisano wiele istotnych aspektów związanych z monitorowaniem jakości dostawy energii. Jednoznacznie wskazano na konieczność prowadzenia dalszych prac w tym obszarze. Ich celem jest uzyskanie pogłębionej wiedzy i znalezienie odpowiednich rozwiązań wielu zaobserwowanych problemów oraz znalezienie odpowiedzi na wiele istotnych kwestii. Niektóre ze wskazanych obszarów prac to:

- określenie koncepcji systemu monitorowania,
- wybór punktów pomiarowych i przyrządów pomiarowych,
- dokładność przekładników,
- wybór zbioru wyznaczanych i rejestrowanych parametrów,
- transmisja i przechowywanie danych pomiarowych,
- analiza danych, raportowanie i prezentacja wyników pomiarów,
- wykrywanie i diagnozowanie problemów,
- prognozowanie,
- analiza efektywności,
- aktywne zarządzanie jakością dostawy energii elektrycznej,
- normalizacja i weryfikacja zgodności z obowiązującymi przepisami.

W I Krajowym raporcie benchmarkingowym nt. jakości dostawy energii elektrycznej [7] podkreślono, że proces budowy rozproszonych systemów monitorowania jest procesem nieuniknionym. Prace nad budową takich systemów należy podjąć jak najwcześniej, zaczynając w pierwszej kolejności od opracowania koncepcji i bilansu potrzeb sprzętowych.

W raporcie grupy roboczej JWG C4.24 [8] zwrócono uwagę m.in. na zagadnienia związane z monitorowaniem i analizą nowych typów zaburzeń związanych z pasmem od 2 kHz do 150 kHz, tj. supraharmonicznych. Natomiast w raporcie WG C4.34 [9],[10] podkreślono rozwój systemów pomiarów synchronizacyjnych w sieciach dystrybucyjnych ze znaczącym nasyceniem rozproszonej generacji w celu obserwacji i kontroli tych sieci w czasie rzeczywistym.

2. PRACE OSD – ENEA OPERATOR

Enea Operator podjął prace w obszarze SCM W-JDEE we współpracy z Akademią Górniczo-Hutniczą z Krakowa (AGH). W tym celu opracowany i uruchomiony został projekt pt. „System bilansowania i monitorowania jakości dostawy energii elektrycznej rozproszonych źródeł i zasobników energii – MoBiSys”. Projekt realizowany jest w ramach II konkursu Programu Badawczego Sektora Elektroenergetycznego „PBSE”, NCBR

W ramach projektu wykonanie zostaną prace i badania przemysłowe oraz eksperymentalne prace rozwojowe w obszarach:

- zad. 1. analizy jakości dostawy energii elektrycznej z uwzględnieniem rozszerzonego pasma do 150 kHz,
- zad. 2. wykorzystania techniki synchronizacyjnej w monitorowaniu i analizie jakości dostawy energii elektrycznej dla potrzeb sieci dystrybucyjnych,
- zad. 3. opracowania koncepcji i budowy instalacji pilotażowej SCM W-JDEE oraz ciągłego bilansowania mocy i energii wprowadzanej

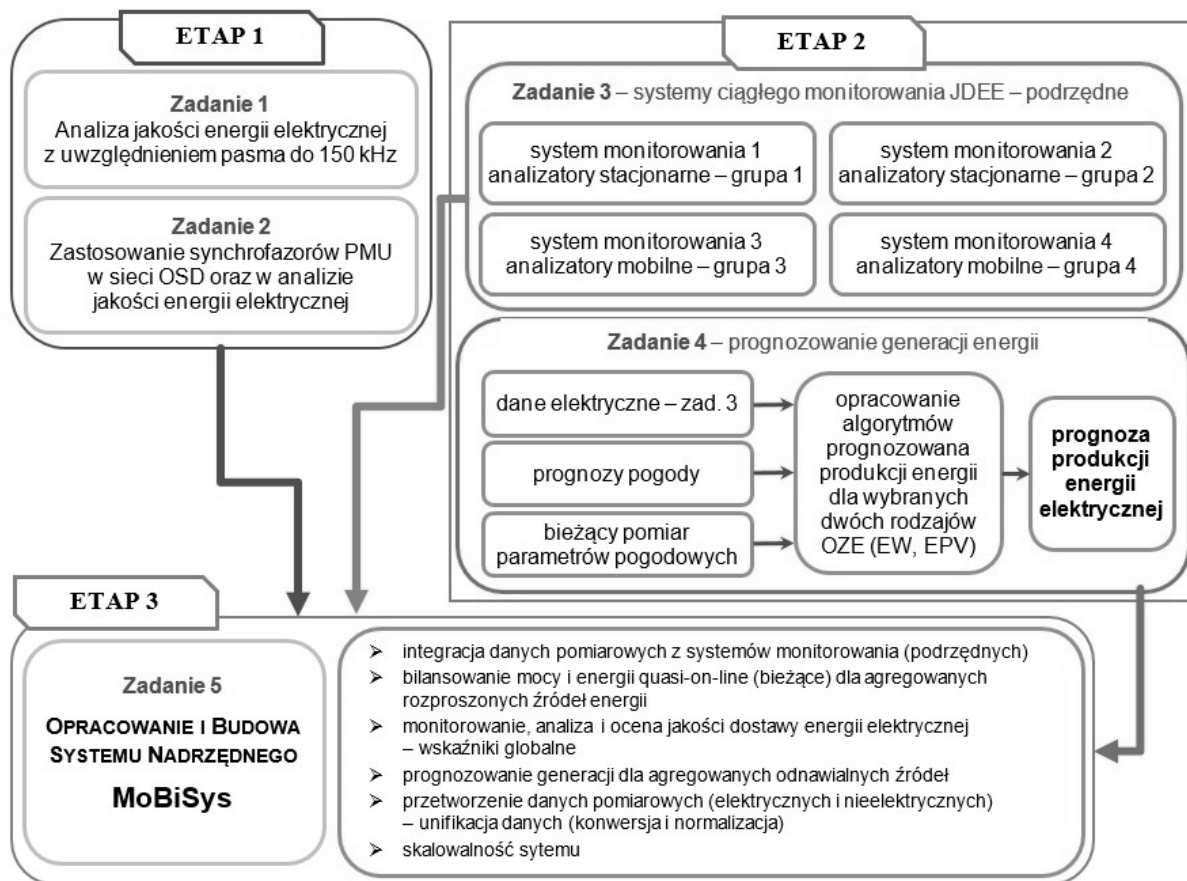
- do systemu elektroenergetycznego OSD przez wybrane RZE oraz zasobniki energii elektrycznej,
- zad. 4. opracowania systemu prognozowania generacji energii ze źródeł odnawialnych dla elektrowni wiatrowej EW i elektrowni fotowoltaicznej EPV,
- zad. 5. budowa demonstratora (pilotaż) nadrzędnego systemu informatycznego przeznaczonego do integracji i przetwarzania danych pomiarowych oraz do bilansowania mocy i energii przez wybrane RZE i zasobniki energii elektrycznej.

Realizację projektu podzielono na trzy etapy. Na rysunku 1 pokazano diagram prezentujący strukturę projektu. W ramach etapu I przeprowadzone zostaną pomiary z wykorzystaniem sześciu analizatorów JEE z poszerzonym pasmem do 150 Hz (zadanie 1). Uruchomiony zostanie pilotażowy system pomiarowy złożony z czterech jednostek synchronizacyjnych PMU (ang. phasor measurement unit) (zadanie 2). W ramach Etapu II przeprowadzony zostanie zakup i montaż 90 analizatorów JEE (stacjonarnych i mobilnych) oraz instalacja bazy danych i niezbędnego oprogramowania. Dzięki temu zbudowany zostanie SCM W-JDEE (zadanie 3). Opracowane zostaną pilotażowe systemy prognozowania generacji energii EW i EPV z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji (zadanie 4). Do tego celu niezbędne są dane dotyczące parametrów pogodowych, zarówno pomiary bieżące jak i historyczne). Pilotażem zostanie objętych kilka wybranych węzłów w sieci Enea Operator. Końcowym rezultatem projektu, zaplanowanym w etapie III, jest opracowanie i zbudowanie nadrzędnego systemu informatycznego MoBiSys, którego zadaniem będzie integracja danych (elektrycznych i nieelektrycznych) z mobilnych i stacjonarnych analizatorów, synchronizacyjnych, systemów prognozowania produkcji energii z OZE. W chwili obecnej projekt jest w trakcie realizacji etapu 1.

2.1. Zaburzenia w paśmie od 2 kHz do 150 kHz

Zaburzenia w paśmie 2 do 150 kHz są obecnie tematem intensywnych prac badawczych [8]. W literaturze opisano przypadki zakłócenia działania pracy różnych urządzeń. Szczególnie zakłócenia komunikacji PLC są istotne, gdyż jest ona wykorzystywana do komunikacji z „inteligentnymi” licznikami (typu *smart*). Jednym z czynników utrudniających komunikację są zaburzenia napięcia w paśmie powyżej 2 kHz. Normy poziomów i emisji zaburzeń dotyczą w znacznym stopniu pasma poniżej 9 kHz. Dla wyższych częstotliwości istnieją jedynie normy emisji: IEC 62578, CISPR 15, EN 50065 (wszystkie dla emisji szerokopasmowej) i EN 50160 (dla emisji w paśmie skupionym). Dodatkowo istnieje norma definiująca poziomy kompatybilności dla zastosowań PLC: IEC 61000-2-2 lecz pokrywa ona zakres do 9 kHz. Trwają prace grupy TC77 nad rozszerzeniem zakresu częstotliwości tej normy do 150 kHz. W tej sytuacji badania nad propagacją, oddziaływaniem, standaryzacją mają istotne znaczenie dla rozwoju infrastruktury PLC i liczników typu *smart*.

Potencjalnym źródłem zaburzeń przewodzonych w rozważanym paśmie częstotliwości są elektrownie fotowoltaiczne EPV. Dotyczy to zarówno elektrowni skupionych przyłączonych do sieci SN, jak i paneli PV instalowanych przez odbiorców indywidualnych przyłączonych do sieci nN. Rysunek 2 przedstawia analizę czasowo-częstotliwościową wyników pomiarów napięcia wybranej fazy w punkcie przyłączenia EPV o mocy 1500 kW. Analiza obejmuje dwa przykładowe dni gdzie

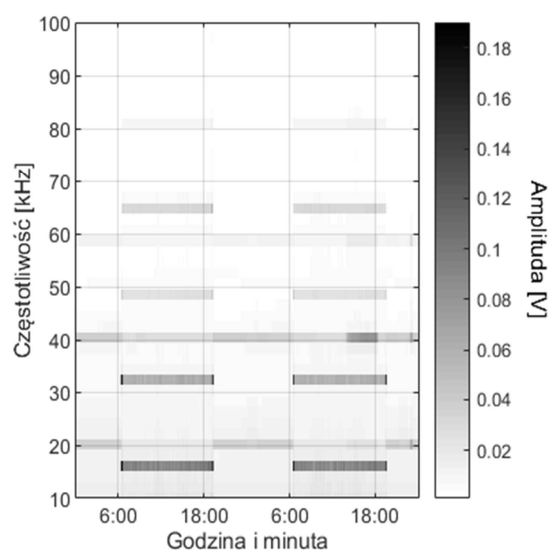


Rys. 1. Struktura projektu pt. „System bilansowania i monitorowania jakości dostawy energii elektrycznej rozproszonych źródeł i zasobników energii – MoBiSys”

maksymalna moc generowana jest zbliżona do mocy nominalnej. Zaciemnione obszary oznaczają obecność danej składowej widmowej. Widać wyraźnie, że w momentach generacji pojawiają się zaburzenia będące wielokrotnością 16 kHz o amplitudach sięgających 180 mV. Obecne są również składowe o częstotliwości 20 kHz i 40 kHz.

2.2. Wykorzystanie synchrofazorów w sieci dystrybucyjnej

W typowych SCM sieci elektroenergetycznych wykorzystuje się nadrzędne sterowanie i systemy SCADA. Dane z tych systemów są dostępne po kilku sekundach. Fizyczne zmienne stanu, tj. napięcia zespolone lub przesunięcia fazowe pomiędzy punktami pomiarowymi, nie są w tych systemach obserwowane bezpośrednio. Istnieje jednak możliwość estymacji tych wartości na podstawie modeli sieci. Takie rozwiązanie było wystarczająco dobre przez wiele lat. Niestety, złożoność systemów energetycznych ciągle wzrasta, co powoduje, że temu klasycznemu podejściu brakuje rozdzielczości czasowej i precyzji. Te niedoskonałości najwcześniej zostały zauważone przez operatorów sieci transmisyjnych. Głównym wyzwaniem w sieciach transmisyjnych było porównywanie wielu pomiarów wykonanych w odległych od siebie punktach pomiarowych. Systemy do pomiaru synchrofazora pozwoliły na takie pomiary zapewniając bardzo dokładną synchronizację pomiędzy punktami pomiarowymi. Pomiar fazora wykonywany jest za pomocą jednostek PMU zainstalowanych w sieci elektroenergetycznej. Fazor rejestrowany jest w czasie rzeczywistym oraz dokładnie zsynchronizowany z czasem absolutnym. Operatorzy sieci dystrybucyjnych dotychczas mieli ograniczone możliwości monitorowania.



Rys. 2. Analiza czasowo-częstotliwościowa napięcia wybranej fazy w punkcie przyłączenia elektrowni fotowoltaicznej

Pojawienie się w sieci analizatorów jakości energii oraz liczników energii AMI poszerzyło jednak obraz pracy sieci. Jednak w obu przypadkach informacja pochodząca z tych urządzeń jest to informacja zagregowana. Z powodu dynamicznego rozwoju rozproszonych źródeł energii oraz spodziewanego pojawienia się w systemie dużych obciążeń w postaci pojazdów elektrycznych, spowodowało że tradycyjna sieć dystrybucyjna w której przepływ energii odbywa się w jednym kierunku, nie jest już normą. W sposób naturalny nasuwa się więc rozwiązanie, problemu monitorowania takiej rozproszonej sieci, za pomocą

monitorowania wielu punktów sieci dystrybucyjnej w sposób synchroniczny. W literaturze naukowej istnieje wiele propozycji zastosowania technologii synchronizatorów w sieci dystrybucyjnej. Są to np. detekcja zdarzeń i ich klasyfikacja [11], detekcja topologii [12], walidacja modeli [13] lub wykrywanie pracy wyspowej. W dobie rozproszonej sieci z dwukierunkowym przepływem energii sprawny system pomiarowy zapewniający odpowiednią obserwowalność staje się niezbędny.

3. WNIOSKI KOŃCOWE

Przedstawiono koncepcję oraz podstawowe informacje dotyczące projektu realizowanego przez Enea Operator w ramach POIR prowadzonego przez NCBR. Podjęte działania dotyczą prac badawczo-rozwojowych w obszarze monitorowania jakości dostawy energii elektrycznej oraz bilansowania mocy i energii. Obecnie realizacji podlega etap I projektu (początkowy). Dotyczy pomiarów i rejestracji oraz analizy jakości dostawy energii elektrycznej z uwzględnieniem rozszerzonego pasma do 150 kHz oraz z wykorzystaniem techniki synchronizatorowej w sieciach dystrybucyjnych. W sieci Enea Operator obecnie realizowane są pomiary i rejestracje z wykorzystaniem analizatorów PQBox300 firmy AEberle i synchronizatorów RZ-40 PMU z firmy Energotest.

Prace prowadzone i finansowane są w ramach projektu pt. „System bilansowania mocy i energii oraz monitorowania jakości dostawy energii elektrycznej rozproszonych źródeł i zasobników energii” w ramach Działania 1.2: „Sektorowe programy B+R” Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.



4. BIBLIOGRAFIA

1. Hanzelka Z., Firlit A. i inni: Elektrownie ze źródłami odnawialnymi – zagadnienia wybrane, redakcja naukowa prof. Z. Hanzelka, dr inż. A. Firlit, Wydawnictwa AGH, ISBN 978-83-7464-817-2, 525 stron, 2015/2016
2. 5th Benchmarking Report on Quality of Electricity Supply, CEER, 12.2011 published in 2012, także: 2001, 2nd 2003, 3rd 2005, 4th 2008, 5th 2011, 6th 2016/6.1-2018
3. Bollen M.H.J., Milanović J.V., Čukalevski N.: CIGRE/CIRED JWG C4.112 – Power Quality Monitoring, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14), Cordoba Spain, Journal RE&PQJ, 12, April 2014
4. Kilter J., Meyer J., Howe B., Zavada F., et al.: Current practice and future challenges for power quality monitoring, CIGRE WG C4.112 Perspective, 2012 IEEE
5. Meyer J., Kilter J., Howe B., Zavada F., et al.: Contemporary and future aspects of cost effective power quality monitoring, Position Paper of CIGRE WG C4.112, 2012 IEEE
6. CIGRE/CIRED Guidelines For Power Quality Monitoring – Measurement Locations, Processing And Presentation of Data. Technical Brochure, 2014
7. I Krajowy raport benchmarkingowy nt. jakości dostaw energii elektrycznej do odbiorców przyłączonych do sieci przesyłowych i dystrybucyjnych, URE, 2009
8. Power quality and EMC issues with future electricity networks, JWG C4.24/CIRED, CIGRE, 03.2018
9. Application of phasor measurement units for monitoring power system dynamic performance, Working Group C4.34/CIGRE, wrzesień 2017
10. Synchrophasor Monitoring for Distribution Systems: Technical Foundations and Applications, A White Paper by the NASPI Distribution Task Team, NASPI-2018-TR-001, Editor: Alexandra von Meier - UC Berkeley, January 2018
11. M. Jamei, E. Stewart, S. Peisert, et al.: Micro Synchrophasor-Based Intrusion Detection in Automated Distribution Systems: Toward Critical Infrastructure Security. IEEE Internet Computing, 20(5), 18-27, 2016
12. G. Cavraro, R. Arghandeh, et al.: Distribution network topology detection with time-series measurements, Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2015 IEEE Power & Energy Society, 2015, pp. 1-5
13. Borkowski D., Wetula A., Bien A.: New method for noninvasive measurement of utility harmonic impedance, Power and Energy Society General Meeting, IEEE 2012

RESEARCH AND DEVELOPMENT WORKS OF ENEA OPERATOR AND AGH UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY IN THE AREA OF MONITORING THE POWER QUALITY AND BALANCING POWER AND ENERGY

The article presents research and development works in the area of monitoring the power quality and power and energy balancing carried out by Enea Operator, in cooperation with the AGH University of Science and Technology. The activities are implemented as part of the NCBR project. Currently, stage I of the project is being implemented. It concerns measurements and registration as well as analysis of the power quality, including the extended band up to 150 kHz and using synchrophasor technology in distribution networks. The final result of the project is the development and build of a superior system whose task will be the integration of data from mobile and stationary analyzers, synchrophasors, energy forecasting systems from distributed generation for their analysis and reporting as well as power and energy balancing.

Keywords: power quality, distributed power quality monitoring systems, supraharmonics measurement in the band 150 kHz, synchrophasor measurement PMU.