

**Koordynator:** Zbigniew HANZELKA

Całość: Chamberlin Stephane AZEBAZE MBOVING, Szymon BARCZENTEWICZ, Krzysztof CHMIELOWIEC, Mateusz DUTKA, Andrzej FIRLIT, Zbigniew HANZELKA, Ryszard KLEMPKA, Tomasz SIOSTRZONEK

## VI. Wpływ rozproszonych źródeł energii na sieć zasilającą i jakość dostawy energii elektrycznej

**Abstrakt:** W artykule przedstawiono współczesne trendy i wyzwania w obszarze jakości dostawy energii elektrycznej w kontekście rozwoju „inteligentnych” systemów elektroenergetycznych (*smart grids*) oraz energetyki rozproszonej. Autorzy artykułu, członkowie Zespołu ds. Jakości i Efektywnego Użytkowania Energii Elektrycznej (JUEE) AGH, dzielą się doświadczeniami z prac naukowo-badawczych, eksperymentalno-rozwojowych oraz dydaktycznych wykonywanych w ramach krajowych i międzynarodowych projektów. Działania były realizowane w ścisłej współpracy z energetyką zawodową (z operatorami sieci przesyłowej – OSP i dystrybucyjnej – OSD), przemysłem oraz instytucjami działającymi na rzecz rynku energii. Rozdział prezentuje skrótowo przykładowe zagadnienia badawcze.

**Słowa kluczowe:** jakość dostawy energii elektrycznej, rozproszone zasoby energetyczne, inteligentne systemy elektroenergetyczne, systemy monitorowania, prognozowanie produkcji i zużycia energii

Na obecnym etapie transformacji energetycznej można z całą pewnością stwierdzić, że osiągnięcie wysokiego udziału rozproszonych źródeł energii (RZE), a w szczególności odnawialnych (OZE), w całkowitym bilansie generacji będzie wymagało zastosowania systemów elektroenergetycznych różniących się od istniejących. Konieczne będzie wzmocnienie ich elastyczności, responsywności i „inteligencji”, co wymaga wdrożenia wielu nowych rozwiązań technicznych. Rozwiązania te, w większości zaliczane do platformy technologicznej *smart grids* i warunkujące oczekiwany rozwój RZE, można podzielić na trzy kategorie: (a) technologie dojrzałe – w tym zwłaszcza systemy monitorowania pracy sieci, jej bilansowania i zarządzania zarówno stroną generacyjną, jak i popytową (DSM/DSR); (b) technologie

zaawansowane, tj. „inteligentne” falowniki (ogólnie układy energoelektroniczne w sieciach elektroenergetycznych) i algorytmy prognozowania generacji energii ze źródeł odnawialnych oraz (c) technologie „wschodzące”, tj. magazyny energii, mikrosieci i wirtualne elektrownie.

Zespół ds. Jakości i Efektywnego Użytkowania Energii Elektrycznej (Zespół JUEE) będący częścią Katedry Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii AGH od wielu lat prowadzi badania w tych obszarach i aktywnie uczestniczy w działaniach na rzecz transformacji energetycznej i rozwiązywania jej technicznych problemów. Czyżby to w ścisłej współpracy z energetyką zawodową (OSD, OSP), przemysłem oraz instytucjami związanymi z rynkiem energii. Realizowane prace wynikają z aktualnych trendów i wyzwań współczesnej elektrotechniki, elektroenergetyki, teleinformatyki i energoelektroniki. W kolejnych rozdziałach przedstawiono skrótowo wybrane obszary aktywności Zespołu JUEE, w szczególności te, które dotyczą:

- oceny jakości dostawy energii elektrycznej (Baggini 2008, Hanzelka 2013, 2021, Hanzelka et Fir-lit 2015, Hanzelka et Piątek 2024, Hanzelka et al. 2009a, 2013, Kołek et Firlit 2021);
- systemów efektywnego przetwarzania oraz kondycjonowania energii elektrycznej głównie energoelektronicznych;

- rozproszonych systemów pomiarowych przeznaczonych do ciągłego monitorowania parametrów pracy sieci zasilających (*smart metering*), wykorzystujących np. analizatory jakości dostawy energii elektrycznej (JDEE) i liczniki energii elektrycznej typu AMI (*advanced metering infrastructure*). W tej grupie mieści się także certyfikacja urządzeń pracujących w sieciach elektroenergetycznych i ocena poprawności ich działania;
- systemów prognozowania produkcji i konsumpcji energii elektrycznej.

## 1. Rozproszone systemy monitorowania jakości dostawy energii elektrycznej

Opracowanie i budowa systemu pomiarowego do monitorowania stanu pracy sieci zasilającej i bilansowania mocy/energii stanowi duże wyzwanie z punktu widzenia technicznego, ekonomicznego, społecznego i badawczego. Docelowo bardzo duża liczba urządzeń pomiarowych (liczonych – jak w przypadku liczników AMI – w milionach sztuk) oraz rozległy obszar, na którym są one instalowane, a także potrzeba zapewnienia niezawodnej transmisji danych, zdalnego zarządzania oraz wymóg ciągłej pracy – to czynniki, które jednoznacznie świadczą o skali przedsięwzięcia.

W Zespole JUEE od wielu lat prowadzone są prace badawcze dotyczące rozproszonych systemów monitorowania wskaźników jakości dostawy energii elektrycznej (RSM W-JDEE) (Chmielowiec et al. 2020, Firlit 2011, 2012, Firlit et al. 2020, Hanzelka et Firlit 2015, Hanzelka et al. 2009b, II Krajowy raport benchmarkingowy 2021, Piątek et Kołek 2015, Piątek et al. 2015). Zdobyte doświadczenie zaowocowało współpracą z praktycznie wszystkimi polskimi operatorami, w szczególności z PSE Operator SA, Enea Operator SA (projekt MOBISYS, finansowanie NCBiR), TAURON Dystrybucja SA (projekt SOPJEE, finansowanie NCBiR), w zakresie opracowania koncepcji i budowy RSM W-JDEE oraz opracowania

i wykonania nadrzędnych systemów informatycznych w celu długoterminowego gromadzenia danych, ich integracji, analizy i oceny zgodnie z przyjętymi kryteriami.

Wspomniane systemy mogą zawierać pośrednie systemy pomiarowe oraz środowiska bazodanowe przeznaczone do obsługi części analizatorów, liczników lub innych urządzeń pomiarowych. W przypadku systemu monitorowania obejmującego rozproszone i odnawialne źródła energii pojawiają się dodatkowe strumienie danych – oprócz danych elektrycznych również dane meteorologiczne (bieżące i prognozowane).

Poszczególne systemy pomiarowe, a także typy analizatorów, rejestratorów i mierników różnią się między sobą. Rozbieżności dotyczą m.in. liczby rejestrowanych parametrów, sposobu rejestracji zdarzeń, formy zapisu danych (relacyjna baza danych, własne formaty zapisu, formaty: COMTRADE, PQDIF, NeQual), metody dostępu do danych, postaci i zawartości generowanych raportów oraz zestawu oferowanych narzędzi do wizualizacji i analizy danych (Gmina Ochotnica Dolna 2022). Budowa systemu monitorowania jest więc procesem złożonym i wieloetapowym.

Znaczące wyzwanie stanowi opracowanie odpowiedniej koncepcji i założeń właściwych dla inwestora, szczególnie zważywszy na perspektywę wieloletniego użytkowania. W wyniku przeprowadzonych prac zbudowano pilotażową aplikację przeznaczoną do konwersji, normalizacji oraz integracji i analizy danych pomiarowych pochodzących z różnych systemów monitorowania, przyrządów pomiarowych, analizatorów oraz środowisk bazodanowych. W systemach zaaplikowano wiele oryginalnych funkcjonalności, przykładowo:

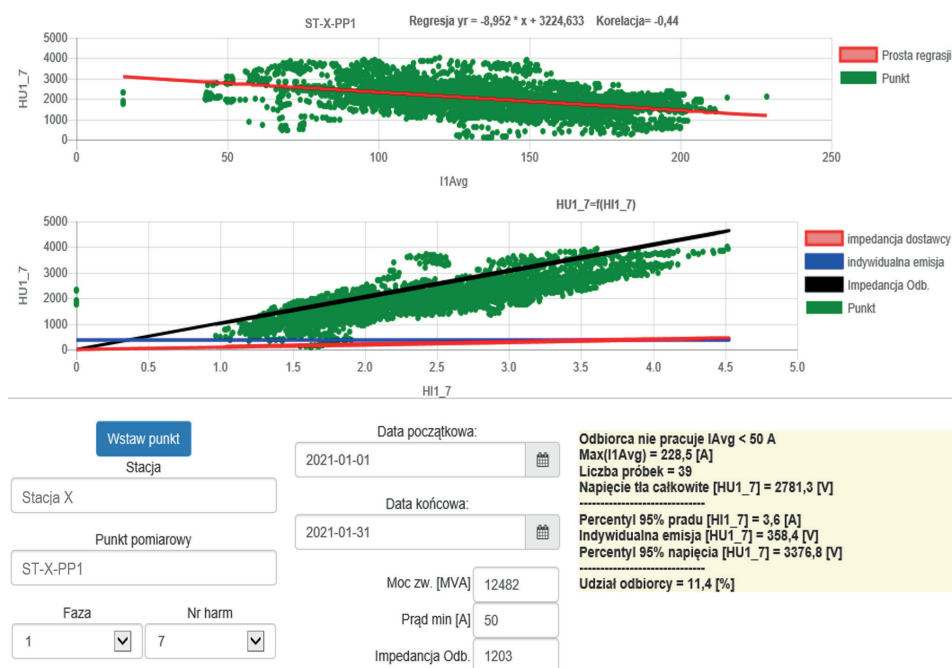
- obliczanie i wizualizacja wskaźników jakości zasilania dla każdego punktu pomiarowego w różnych okresach obliczeniowych (dobowym, tygodniowym, tygodniowo-kroczącym, miesięcznym), z uwzględnieniem lub bez uwzględniania odczytów flagowanych (zgodnie z normą PN EN 61000-4-30) oraz z kontrolą przekroczeń współczynnika  $\text{tg}(\varphi)$ ;

- obliczanie i wizualizacja zagregowanych wskaźników W1-W4 umożliwiających porównanie jakości napięcia na wybranych obszarach (dla grup punktów pomiarowych) (Hanzelka et al. 2012, Hanzelka 2013, Jurek et al. 2015);
- rozliczanie odbiorców i dostawców energii oraz kontrola poprawy JDEE na podstawie przyjętej tzw. ścieżki poprawy;
- lokalizacja dominującego źródła zaburzenia (wahań napięcia, asymetrii, harmoniczných napięć), a także analiza indywidualnej emisji sprawcy przekroczenia poziomów granicznych (Rys. 1) (Chmielowiec et al. 2020);
- wyznaczanie funkcji kosztów złej jakości dostawy energii jako podstawy systemu kar i bonifikat;
- rekonfigurowanie aplikacji przez dodawanie nowych punktów pomiarowych, definiowanie i przypisywanie do punktów szablonów zwierających właściwe miary statystyczne (percentyle) i wartości graniczne analizowanych parametrów, deklarowanie grup punktów pomiarowych i obszarów, dla których wyznaczany jest zagregowany wskaźnik JDEE oraz ścieżka poprawy.

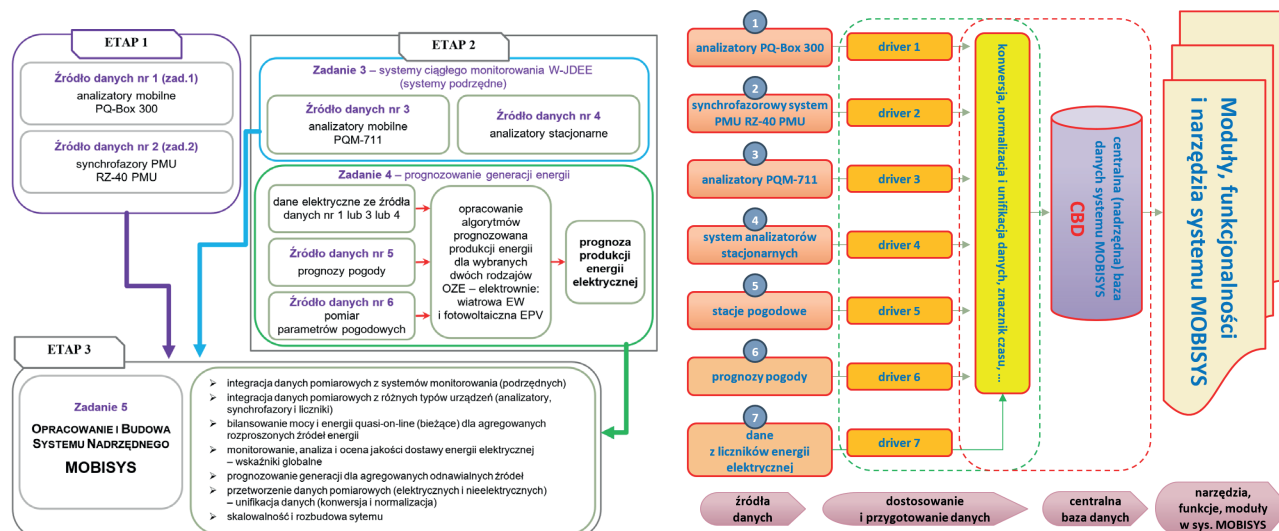
W bardziej rozbudowanych systemach monitorowania wdrożono także następujące elementy:

- analiza propagacji wskaźników JDEE i ich estymacja (predykcja) w nieopomiarowanych punktach na podstawie pomiarów realizowanych w sąsiednich punktach rozważanej linii zasilającej (Firlit et al. 2020b),
- analiza JDEE z uwzględnieniem rozszerzonego pasma częstotliwości – do 150 kHz (analiza supraharmoniczných) (Firlit et al. 2020a),
- techniki synchrofazorowe w monitorowaniu i analizie JDEE na potrzeby sieci dystrybucyjnych – zastosowanie układów PMU (*phasor measurement unit*) (Firlit et al. 2020b).

Końcowym etapem jest opracowanie nadrzędnego systemu informatycznego integrującego i przetwarzającego dane (elektryczne i nieelektryczne), a także bilansującego moc i energię wybranych RZE/OZE i magazynów energii elektrycznej z mobilnych i stacjonarnych analizatorów, synchrofazorów, liczników AMI, rynku energii, stacji pogodowych oraz z instytucji przekazujących prognozy wybranych parametrów pogodowych (Rys. 2).



Rys. 1. Przykładowe okno systemu monitorowania w aplikacji oceniającej indywidualną emisję źródła zaburzenia (Chmielowiec et al. 2020)



Rys. 2. Koncepcja, założenia i organizacja źródeł danych w ramach systemu MOBISYS służącego do bilansowania mocy i energii oraz monitorowania jakości dostawy energii elektrycznej rozproszonych źródeł i magazynów energii (Firlit et al. 2020a)

Opisane wyżej systemy monitorowania mogą być stosowane zarówno w sieciach elektroenergetycznych OSD/OSP, jak i w sieciach przemysłowych oraz klastrach i spółdzielniach energetycznych.

## 2. Elastyczne struktury produkcji i konsumpcji energii elektrycznej

Na podstawie obserwacji procesów występujących w Europie i na świecie można zauważyć, że ważnym elementem przyszłej energetyki będą mikrosieci ze źródłami rozproszonymi o dużej autonomii i zdolnościach samoregulacyjnych, mogące pracować zarówno w połączeniu z siecią zasilającą, jak i autonomicznie. Takie jednostki będą samoorganizujące i samobilansujące się oraz zwarte terytorialnie. Mikrosieci, a także wirtualne elektrownie (WE) to dwie koncepcje agregacji zasobów sieciowych. Ponieważ często ich moc zainstalowana jest wystarczająco duża, aby uzyskały dostęp do hurtowego rynku energii elektrycznej, mogą przekazywać w czasie rzeczywistym hurtowe sygnały cenowe do swoich wewnętrznych źródeł, odbiorów i magazynów, wywołując pożądaną reakcję (DSR) w dużej skali mocy/energii.

„Mikrosieć” to część systemu elektroenergetycznego (np. małe miasto, wydzielony geograficznie obszar, firma, kampus uniwersytecki, centrum handlowe), która

może odłączyć się od sieci publicznej i przez pewien czas funkcjonować autonomicznie (praca wyspowa), zasilając odbiory z własnych źródeł/magazynów energii<sup>1</sup>. Odłączenie może nastąpić na skutek awarii lub intencjonalnie, np. gdy jakość dostawy energii w sieci publicznej jest niska lub cena energii za wysoka. W ogromnej większości przypadków mikrosieć zawiera w swoich zasobach magazyn energii, szczególnie jeżeli jest zaprojektowana do przejścia w tryb wyspowy bez czasowej utraty dostawy energii do odbiorów wewnętrznych oraz w przypadku obecności OZE. Ważnym jej elementem jest centralny układ sterowania i optymalizacji przepływów energii, decydujący które RZE i w jakim stopniu mają być wykorzystane do zbilansowania obciążenia i generacji. W procesie optymalizacji układ może uwzględniać prognozy produkcji i konsumpcji energii oraz jej przewidywane ceny. Może także kontrolować tryby pracy RZE, zmieniać rozpyły mocy lub regulować charakterystyki napięcia i częstotliwości z zadaną pochodną. W tych systemach, w których koszt przerw w dostawie energii jest wysoki, budowa mikrosieci ma ekonomiczne uzasadnienie.

W ramach polsko-niemieckiego konsorcjum<sup>2</sup> Zespół JUEE uczestniczył w realizacji międzynarodowego

<sup>1</sup> Niekiedy terminem „mikrosieć” są obejmowane także systemy elektroenergetyczne, które nigdy nie są przyłączane do sieci publicznej.

<sup>2</sup> Niemieccy partnerzy to: Instytut Fraunhofera i Uniwersytet Techniczny w Magdeburgu oraz firma Arte Moebel GmbH.

projektu RELflex pt. *Renewable Energy and Load Flexibility in Industry* (program ERA-Net, finansowanie NCBiR) (Lombardi 2018–2021). Po polskiej stronie w działaniach uczestniczyły następujące podmioty: Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Europejski Instytut Miedzi oraz dwa hotele z Podhala – Bachledówka SA oraz Pokoje na Olczańskim Wierchu. Celem projektu było opracowanie, przetestowanie i ocena nowych innowacyjnych rozwiązań i aplikacji dla zwiększenia elastyczności systemów elektroenergetycznych w małych i średnich przedsiębiorstwach (MŚP). Badano mechanizmy dynamicznego zarządzania sterowanymi odbiornikami (DSR), układami generacji oraz magazynami energii. Niemiecka część projektu dotyczyła metodyki pozwalającej na zidentyfikowanie i skwantyfikowanie potencjalnych elastyczności podczas procesów produkcyjnych (koncepcja „produkcyjnego” magazynu energii). W polskiej części przeprowadzono analizę uwarunkowań rynkowych potencjału rozwoju DSM/DSR w Polsce opartego na agregacji rezerwowych źródeł zasilania wraz z przedstawieniem mechanizmów możliwych do zastosowania w infrastrukturze MŚP, przy uwzględnieniu specyfiki i charakterystyki rynku energii elektrycznej w Polsce. W projekcie opracowano różne modele systemu bilansowania mocy/energii generowanej przez rozproszone źródła i magazyny energii oraz konsumowanej przez partnerów projektu. Stworzono scenariusze i algorytmy użycia rezerwowych agregatów prądotwórczych, zarówno w przypadku pracy autonomicznej agregatów (na wyspę), jak i pracy synchronicznej z siecią publiczną. Określono korzyści wynikające z wykorzystywania energii produkowanej w agregatorach rezerwowych w celu obniżenia kosztów zakupu energii z sieci publicznej.

Zbudowana mikrosieć składa się z generatora synchronicznego, baterijnego magazynu energii, instalacji fotowoltaicznej z falownikiem hybrydowym i własnym magazynem energii, pompy ciepła oraz sterowalnych odbiorników. W hotelach będących partnerami projektu zainstalowano rezerwowe generatory prądotwórcze oraz interfejsy do ich zdalnego włączania i wyłączania (Rys. 3). Opracowano aplikację informatyczną do agregacji, sterowania i monitorowania pracy źródeł i odbiorników energii elektrycznej. Pełni ona rolę agregatora

i obsługuje transmisję danych z urządzeń pomiarowych zainstalowanych w miejscu przyłączenia generatorów rezerwowych i OZE, ich archiwizację, przetwarzanie i wizualizację. Zarówno aplikacja, jak i część sprzętowa są dostosowane do dalszej rozbudowy i dołączenia kolejnych elementów systemu.



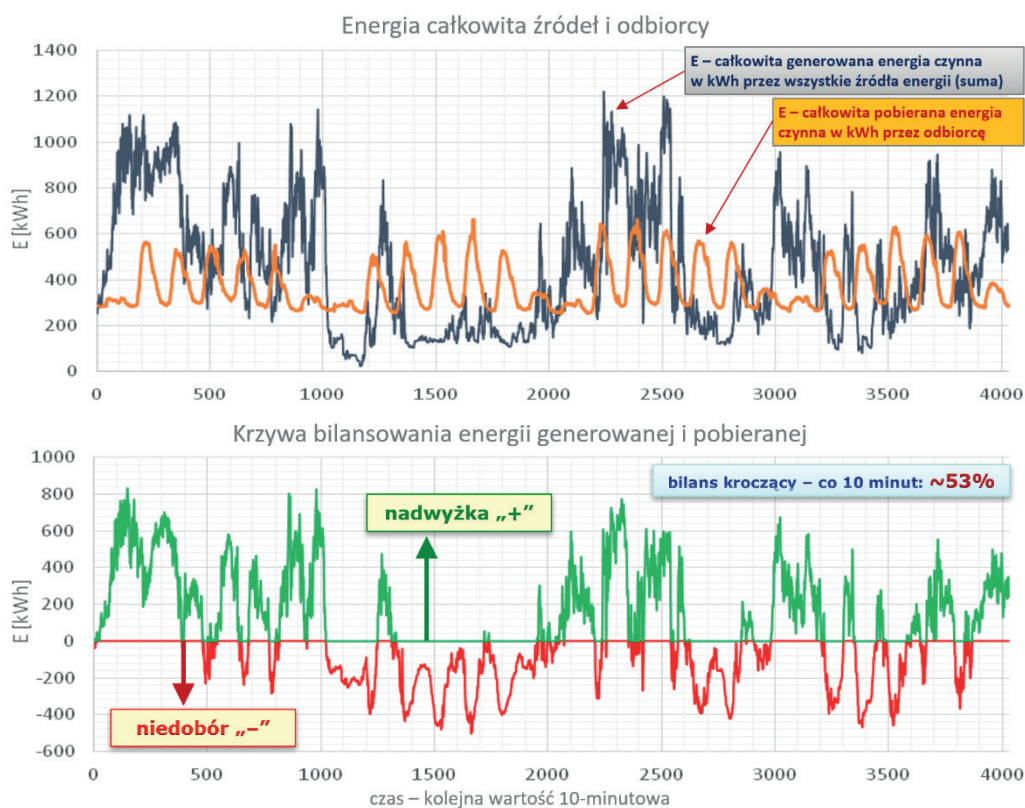
Rys. 3. Laboratoryjna mikrosieć Zespołu JUEE (zdjęcie własne autorów publikacji)

„Wirtualna elektrownia” oznacza dowolną kombinację odnawialnych i konwencjonalnych źródeł oraz magazynów energii, agregowanych tak, aby przez operatora sieci były traktowane jako jedno źródło energii. Agregacja zasobów WE realizowana jest na bazie danych o mocach/energii indywidualnych jednostek. Jeżeli zawiera sterowane źródła/magazyny ułatwiające bilansowanie energii z OZE, staje się „przewidywalnym” i sterowalnym źródłem. WE może także agregować wyłączenie OZE. Jeżeli są one zróżnicowane technologicznie i zlokalizowane w odległych węzłach sieci, wówczas, z uwagi na efekty agregacji, niezawodność generacji takiego zbioru jest znacznie większa, zmienność mniejsza, a zdolność prognozowania produkcji większa niż w przypadku każdego zasobu energetycznego traktowanego

oddzielnie. Ponieważ źródła mogą być niekiedy znacznie od siebie oddalone, praca WE zależy od niezawodnej infrastruktury teleinformatycznej. Tam, gdzie ten warunek jest spełniony, WE są wartościowymi narzędziami do zarządzania siecią w obecności RZE.

W ramach jednego z projektów (WindLipie, finansowanie NCBiR) zaprojektowany i zbudowany został rozproszony system ciągłego monitorowania parametrów pracy sieci elektroenergetycznych oraz wskaźników jakości dostawy energii elektrycznej w punktach przyłączenia rozproszonych i odnawialnych źródeł energii (Hanzelka et Firlit 2015). Do produkcji energii wykorzystano turbiny wiatrowe (łączna moc – 7 MW), panele fotowoltaiczne (łączna moc – 0,471 MWp) oraz dwa generatory synchroniczne współpracujące z turbiną wodną (0,44 MW) i silnikiem biogazowym (0,8 MW). Poszczególne jednostki wytwórcze znajdowały się w różnych rejonach Polski. Do integracji całego systemu wykorzystano system pomiarowy przeznaczony do ciągłego monitorowania parametrów pracy sieci elektroenergetycznych, w tym wskaźników

jakości dostawy energii. Przykładowe miesięczne przebiegi energii czynnej pobieranej przez dużego odbiorcę (Kampus AGH) i generowanej przez wirtualną hybrydową elektrownię oraz charakterystykę bilansowania przedstawiono na Rys. 4. Kolorem zielonym oznaczono nadwyżki produkcji, a kolorem czerwonym – jej niedobory. Na podstawie pomiarów w rozważanym przykładowo okresie wykazano, że skumulowane zapotrzebowanie Kampusu AGH na energię czynną wyniosło 1510 MWh. W tym samym czasie wirtualna hybrydowa elektrownia wytworzyła 1808 MWh energii elektrycznej. W bilansie energii między źródłami a odbiorcą wartość skumulowana nadwyżki energii wynosiła 298 MWh. Z porównania produkcji i konsumpcji energii w kolejnych następujących po sobie 10minutowych przedziałach czasu wynika, że przez 53% analizowanego okresu zapotrzebowanie na energię elektryczną było zaspokajane przez WE. W ramach projektu rozważano także kompensację mocy biernej turbin wiatrowych i instalacji fotowoltaicznych z wykorzystaniem kompensatorów statycznych (Hanzelka et Firlit 2015).



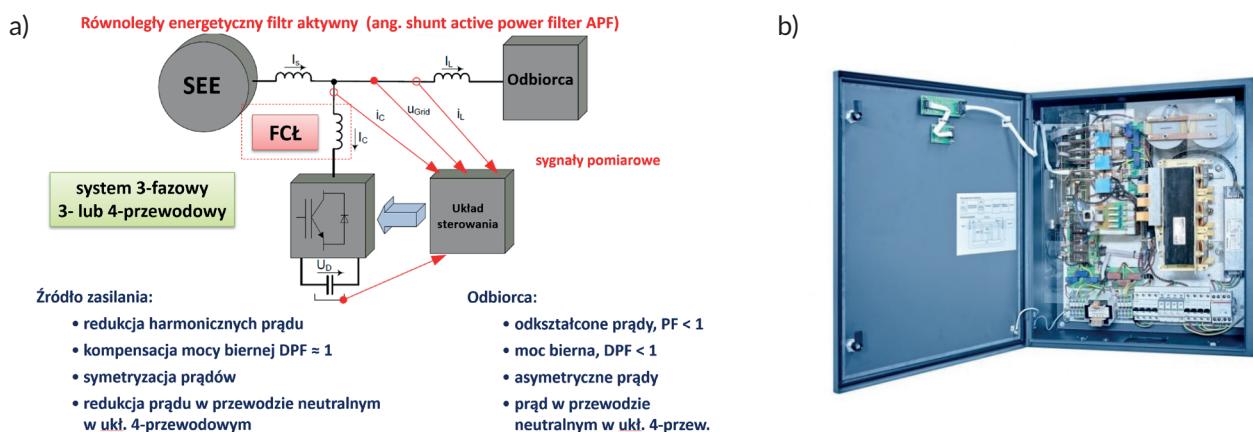
Rys. 4. Przykładowe charakterystyki generacji (WE) i konsumpcji energii (AGH) oraz charakterystyka bilansowania mocy czynnej opracowane w ramach projektu WindLipie (Firlit et al. 2025)

### 3. Kondycjonery jakości dostawy energii elektrycznej

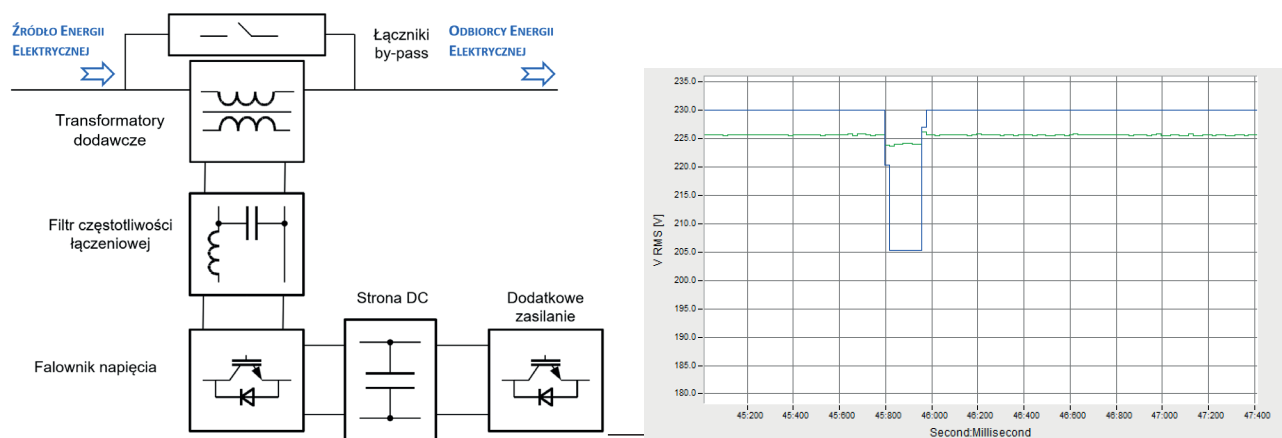
Prócz technologii związanych bezpośrednio ze źródłami/magazynami energii należy wspomnieć także o innowacyjnych rozwiązaniach energoelektronicznych przeznaczonych do wsparcia potrzeb technicznych sieci typu *smart*, w tym również zwiększających jej elastyczność i integrację RZE, tj. DVR, STATCOM, filtry aktywne, SVC czy synchrofazory (Firlit et al. 2020a).

Układy te są także przedmiotem działalności badawczej Zespołu JUEE. Celem projektu KIC ProInterface (konsorcjum: Akademia Górniczo-Hutnicza, ELSTA Elektronika, TAURON Dystrybucja, JES-Energia,

Technical University of Catalonia) było opracowanie koncepcji funkcjonalnej, wykonanie projektu technicznego, budowa, badania i wdrożenie rodziny energoelektronicznych interfejsów sieciowych integrujących instalacje prosumentów z elektroenergetyczną siecią dystrybucyjną niskiego napięcia (nN). Opracowano prototypy rodziny urządzeń energoelektronicznych o mocy od 15 do 50 kVA: równoległego energetycznego filtra aktywnego APF (*active power filter*, Rys. 5) i szeregowego stabilizatora napięcia DVR (*dynamic voltage restorer*, Rys. 6) (Firlit et al. 2017a, 2017b, Kołek et al. 2021). Wdrożenie i komercjalizacja zostały przeprowadzone przez polską firmę, a produkt został nagrodzony statuetką „Lwa” Fundacji im. Kazimierza Szpotkańskiego.



Rys. 5. Energetyczny równoległy filtr aktywny APF produkowany przez firmę ELSTA Elektronika: a) schemat ideowy; b) zdjęcie modelu fizycznego



Rys. 6. Schemat ideowy dynamicznego stabilizatora napięcia DVR oraz wartości skuteczne napięcia zarejestrowane podczas przykładowego zapadu napięcia: kolor niebieski – napięcie sieci zasilającej, kolor zielony – napięcie odbiornika

Do tej kategorii działań należą także prace badawcze dotyczące wykorzystania metod sztucznej inteligencji w projektowaniu pasywnych układów kompensacji mocy biernej i filtracji wyższych harmonicznych (Azebaze Mboving 2020).

Jeszcze do niedawna projektowanie grupy filtrów prostych odbywało się w wyniku arbitralnego podziału mocy biernej pomiędzy gałęzie filtrów. Podział ten mógł odbywać się według różnych założeń, jednak żaden przypadek nie dawał optymalnych efektów w kontekście maksymalizacji sumy wskaźników redukcji wskazanych harmonicznych. Osiągnięciem poznawczym zespołu uzyskanym w ramach badań własnych było wyprowadzenie złożonych równań matematycznych pozwalających na projektowanie optymalnej grupy filtrów (Klempka 2012, 2014, 2016, 2021a, Klempka et Świątek 2013).

Podobna optymalizacja dotyczyła filtru podwójnie nastrojonego, którego zadaniem jest kompensacja założonej mocy biernej oraz redukcja dwóch przyjętych harmonicznych. Założenie maksymalizacji wskaźników redukcji dwóch harmonicznych pozwoliło na wyprowadzenie wzorów na optymalne parametry tego filtru (Klempka 2016, 2021b).

Innym rodzajem filtru pasywnego jest instrument typu C, czyli filtr szerokopasmowy. Analiza jego struktury pozwoliła wyznaczyć zależności matematyczne dla projektowania filtru redukującego wskazaną harmoniczną do założonego poziomu, co pozwoliło na zachowanie jego naturalnych własności do redukcji wyższych harmonicznych (Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii b.r.).

Przyjęcie pojedynczego kryterium optymalizacji, choć trudne i czasochłonne, pozwala wyprowadzić zależności matematyczne projektujące daną strukturę filtrów pasywnych. Gdy jednak chce się uwzględnić większą liczbę parametrów i wskaźników jakościowych i ekonomicznych (zawartość harmonicznych, wskaźniki THD, moc bierna, spadki napięć, straty mocy, koszty produkcji energii o założonych parametrach, ograniczenia mocy produkcji energii, miejsce przyłączenia i wiele innych), a także ograniczenia

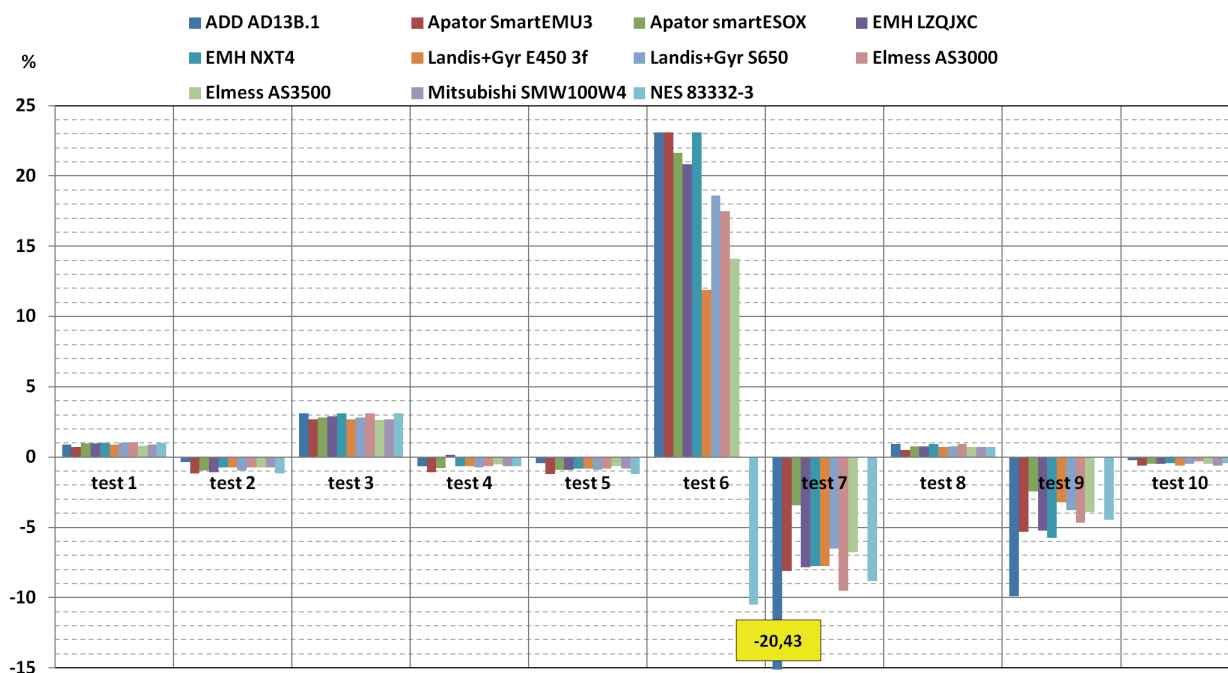
fizyczne systemu elektroenergetycznego, to określenie zależności matematycznych staje się wręcz niemożliwe. W takiej sytuacji można stosować inteligentne metody optymalizacyjne bazujące na tak zwanych metodach rojowych. Złożoność kryterium celu oraz wielkość przestrzeni poszukiwania uzasadnia użycie takich metod (Klempka 2012, 2016).

## 4. Certyfikacja produktowa

Urządzenia zaliczane do platformy technologicznej *smart grids* mają na celu taką przebudowę współczesnych systemów elektroenergetycznych, aby posiadały one dwie ważne cechy – obserwowalność oraz sterowalność. Potencjalny użytkownik istniejących na rynku rozwiązań nie zawsze ma gwarancję, że będą one poprawnie spełniały oczekiwane i deklarowane przez producenta funkcje użytkowe. Z tego względu Zespół JUEE we współpracy z TAURON Dystrybucja SA rozpoczął badania produktowe urządzeń o fundamentalnym znaczeniu dla rozwoju energetyki rozproszonej, m.in.: liczników AMI, analizatorów jakości dostawy energii elektrycznej, „inteligentnych” interfejsów energoelektronicznych źródeł fotowoltaicznych oraz magazynów energii.

### 4.1. Badania porównawcze liczników energii elektrycznej

Uruchomiony przez OSD na terenie całego kraju proces masowej instalacji liczników AMI u odbiorców końcowych oraz w stacjach SN/nN to podstawa technicznej transformacji sieci i radykalne zwiększenie poziomu jej obserwowalności. Wdrożenie systemu AMI daje możliwość kompleksowej przebudowy i udoskonalenia całego procesu rozliczeniowego i bilansowego. Takie działania jak skuteczne wpływanie na funkcjonowanie systemu elektroenergetycznego, sterowanie przepływami energii czy oferowanie odbiorcom nowych usług nie będą możliwe bez szczegółowej wiedzy o stanie pracy sieci zasilającej, a zatem bez odpowiedniego jej opomiarowania, np. przy użyciu liczników typu AMI.



Rys. 7. Testy liczników 3-fazowych – przykładowe różnice pomiarów energii czynnej (Lombardi 2018–2021, Tauron Dystrybucja 2025)

Wśród wielu aspektów związanych z budową systemu pomiarowego jednym z podstawowych jest poprawność pomiaru energii czynnej i biernej realizowanego przez liczniki dla celów rozliczeniowych i bilansowych. Jest to szczególnie istotne, gdy stan pracy sieci elektroenergetycznej odbiega od ideału, czyli w okresach pogorszonych wskaźników jakości dostawy energii elektrycznej. Odpowiedzi na pytanie o poprawność pomiarów dokonywanych w takich warunkach szukano w ramach zorganizowanego przez Akademię Górniczo-Hutniczą, TAURON Dystrybucja SA i Politechnikę Wrocławską eksperymentu pomiarowego. Piknik AMI (Lombardi 2018–2021, Tauron Dystrybucja 2025) – bo taką nazwę przyjęło przedsięwzięcie – miał na celu przeprowadzenie eksperymentalnych badań porównawczych liczników AMI (siedemnastu, 1- i 3-fazowych) stosowanych w polskich sieciach elektroenergetycznych. Testy zaprojektowano w taki sposób, aby dokonać oceny poprawności pomiaru energii czynnej i biernej różnych odbiorników w odmiennych zaburzonych stanach napięcia zasilającego. Na Rys. 7 przedstawiono przykładowe względne różnice zmierzonej energii czynnej podczas testów badanych liczników 3-fazowych.

#### 4.2. Badania porównawcze przekształtników fotowoltaicznych

Od energoelektronicznych interfejsów sprzęgających RZE z siecią zasilającą wymaga się, aby posiadały szereg funkcji użytkowych korzystnych dla OSD. Funkcjonalności te powinny być dostępne we wszystkich falownikach fotowoltaicznych (PV) instalowanych w Europie. Nie potwierdzają tego przeprowadzone testy, mimo że producenci są zobowiązani do przedstawienia stosownych certyfikatów. W celu sprawdzenia stopnia niespełnienia wymagań przeprowadzono eksperyment badawczy polegający na porównaniu pracy prosumenckich falowników PV (trzydziestu, 1-fazowych oraz 3-fazowych, Rys. 8) w warunkach laboratoryjnej sieci wydzielonej. Wydarzenie zorganizowane zostało przez AGH we współpracy z TAURON Dystrybucja SA oraz uczelniami współpracującymi w ramach Rady Naukowej – politechnikami: Wrocławską, Śląską, Opolską i Częstochowską (Tauron Dystrybucja 2021). Badania dotyczyły sprawności falowników, kompatybilności elektromagnetycznej, spełnienia wymagań kodeksu sieciowego NC RfG, Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej (Obserwatorium Transformacji Energetycznej 2023–2025) oraz stosownych norm (Chmielowiec et al. 2012, 2021).



Rys. 8. Falowniki fotowoltaiczne wykorzystane w badaniach porównawczych (Chmielowiec et al. 2021)

#### 4.3. Badania porównawcze analizatorów jakości dostawy energii elektrycznej

Jednym z istotnych wyzwań w obszarze analizy i oceny jakości dostawy energii elektrycznej jest opracowanie procedur weryfikacji poprawności pomiarów wykonywanych za pomocą specjalnych mierników. Poprawny pomiar wydaje się faktem oczywistym, w końcu analizatory JDEE są stosowane od ponad dwóch dekad, a ich udział w pomiarach wykonywanych w sieciach zasilających w ostatnich latach znacząco rośnie. W praktyce zdarza się jednak, że wartości wskaźników JDEE otrzymywane z różnych mierników (analizatorów, liczników, rejestratorów i in.) podłączonych do tego samego węzła sieci dają rozbieżne wyniki, przekraczające granice niepewności określone w odpowiednich normach. W celu weryfikacji poprawności pomiarów oraz algorytmów pomiarowych stosowanych w analizatorach jakości energii przeprowadzono badania porównawcze mierników oferowanych na europejskim rynku. Do udziału zaproszono producentów oraz dystrybutorów aparatury pomiarowej (Rys. 9), którzy mają w swojej ofercie analizatory spełniające wymagania klasy A (zgodnie z normą PN EN 61000-4-30). Analizatory biorące udział w eksperymencie (czternaście) mierzyły to samo trójfazowe napięcie zawierające zdefiniowaną serię zaburzeń ciągłych (zmiany wartości skutecznej oraz częstotliwości, wahania, odkształcenie, asymetria) i zdarzeń (zapady i wzrosty napięcia, przerwy w zasilaniu). Źródłem sygnałów testowych były wysokiej klasy

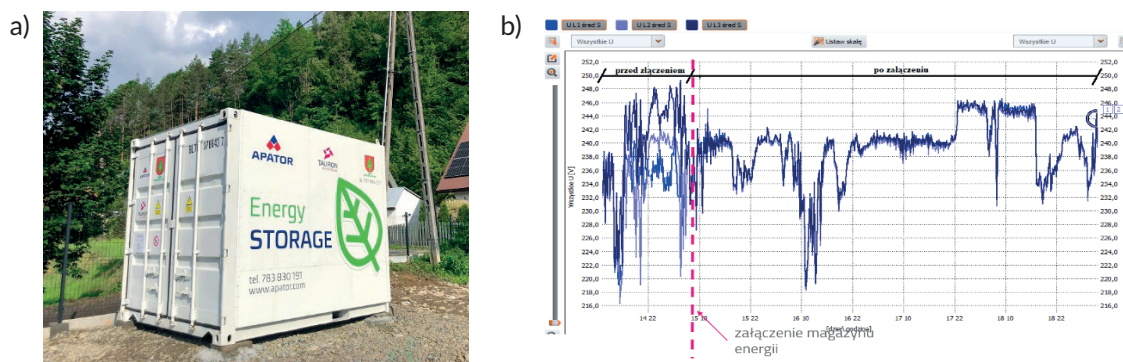
programowalne kalibratory laboratoryjne (niepewność/dokładność generowanych sygnałów wzorcowych była zgodna z wymaganiami zawartymi w normach). Testy zaprojektowano i wykonano w taki sposób, aby możliwa była ocena pomiaru wszystkich wskaźników JDEE. Analiza wyników wykazała, że w wielu przypadkach nie zawierały się one w przedziale dopuszczalnej niepewności pomiarowej (Chmielowiec et al. 2014).



Rys. 9. Badania porównawcze analizatorów jakości dostawy energii (Chmielowiec et al. 2014)

#### 4.4. Badania polowe magazynów energii

Magazynowanie energii jest podstawową technologią zwiększającą elastyczność sieci zasilających i ułatwiającą optymalne wykorzystanie jej zasobów. Dotyczy to zarówno magazynów instalowanych po stronie operatorów (OSD/OSP), jak i tych, które są stosowane przez odbiorcy energii (w tym także u prosumenta). Producentów/dostawców magazynów jest wielu, jednakże nie zawsze jakość oferowanego produktu może być źródłem satysfakcji nabywcy/użytkownika. W celu weryfikacji funkcjonalności i cech eksploatacyjnych magazynów we wsi Ochotnica Dolna na Podhalu, we współpracy z TAURON Dystrybucja SA rozpoczęto badania *in situ* oferowanych na polskim rynku magazynów przyłączonych do sieci dystrybucyjnej nN (Rys. 10). Celem przeprowadzanych testów jest ocena wpływu magazynów na JDEE i wskaźniki ekonomiczne pracy sieci (Firlit et al. 2022–2023, Gmina Ochotnica Dolna 2022, Seminarium 18 KlastER 2021). Takie badania przeprowadzono już dla czterech magazynów.



Rys. 10. Przykładowy magazyn badany w Ochotnicy Dolnej: a) wygląd obiektu; b) charakterystyka napięcia w punkcie jego przyłączenia dla wyłączonego i załączonego magazynu (Firlit et al. 2022–2023)

Skutkiem działań w obszarze certyfikacji produktowej jest oferowanie komercyjnej usługi w zakresie badań i testów kompatybilności elektromagnetycznej odbiorników, układów energoelektronicznych oraz źródeł i magazynów energii elektrycznej w zakresie odporności na zaburzenia i emisji zaburzeń, zgodnie z wymaganiami norm z serii PN EN 61000: -4-13, -4-14, -4-17, -4-28, -4-29, -3-2, -3-3, -3-11, -3-12, normy PN-EN 50549 oraz kodeksów sieciowych. Prowadzone są również następujące działania:

- kompleksowe testy analizatorów JDEE klasy A na zgodność z wymaganiami norm: PN-EN 61000-4-30, -4-15, -4-7, IEC 62586-1, IEC 62586-2,
- testy liczników energii elektrycznej, szczególnie z zaimplementowanymi algorytmami obliczania wskaźników JDEE oraz algorytmami obliczania zagregowanych wskaźników W1-W4, zgodnie z rekomendacjami URE – wskaźniki te wykorzystywane są przez OSD jako syntetyczne obszarowe miary JDEE w sieciach elektroenergetycznych,
- testy różnego typu przyrządów pomiarowych wykorzystywanych w obszarze JDEE,
- merytoryczne wsparcie w implementacji algorytmów obliczania wskaźników JDEE,
- badania polowe JDEE.

Zwieńczeniem tych działań było utworzenie Laboratorium Wzorcowania Mierników do Pomiaru Wskaźników Jakości Dostawy Energii Elektrycznej, które otrzymało akredytację Polskiego Centrum Akredytacji w Warszawie (Polskie Centrum Akredytacji b.r., Centrum Energetyki AGH b.r.).

#### 4.5. Prognozowanie produkcji i zużycia energii elektrycznej

Prognozy generacji z odnawialnych źródeł energii (OZE) mogą być wykorzystywane do wielu celów, zarówno przez operatorów systemów energetycznych, jak i przedsiębiorstwa czy instytucje publiczne. Na obszarach o wysokiej penetracji OZE stają się niezbędne – mogą skutecznie rozwiązywać wiele problemów eksploatacyjnych sieci oraz zwiększać zdolność przyłączeniową dla OZE (Hanzelka et Piątek 2024). Wśród obszarów ich zastosowań można wymienić:

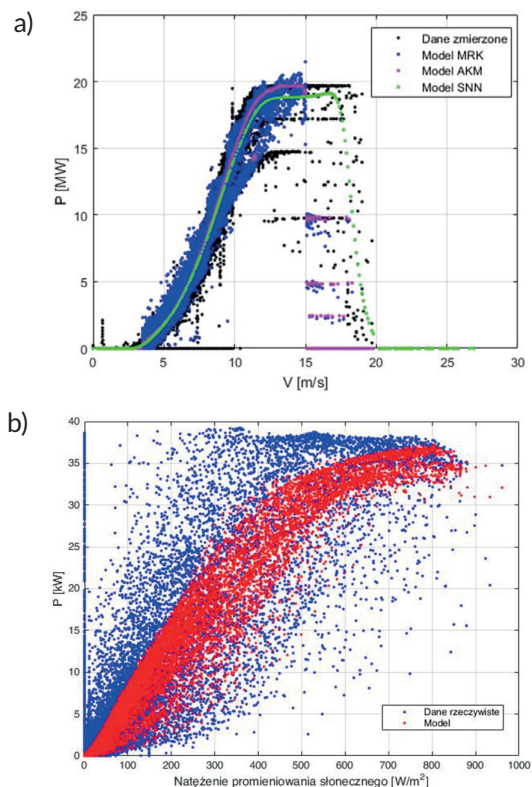
- handel energią na rynku energii (np. TGE) – dzięki swojej precyzji umożliwiają podejmowanie decyzji w zakresie kupna/sprzedaży energii;
- zarządzanie magazynami energii i elastycznością odbioru – pozwalają na efektywne zarządzanie poziomem naładowania magazynu energii lub mogą inicjować popyt,
- ocena opłacalności projektów OZE – pozwalają przewidywać przyszłe zyski z inwestycji w OZE,
- bilansowanie systemu energetycznego lub np. klastra energii – informacja o przyszłym stanie systemu umożliwia precyzyjniejsze dopasowanie podaży i popytu.

W zależności od czasu prognozy stosowane są dwie główne metody jej opracowania (Dutka 2021). Pierwszy przypadek stanowią prognozy długoterminowe z horyzontem 1–14 dni wspierane przez numeryczne prognozy pogody (*numerical weather prediction*, NWP) o rozdzielczości od dziesięciu minut do trzech

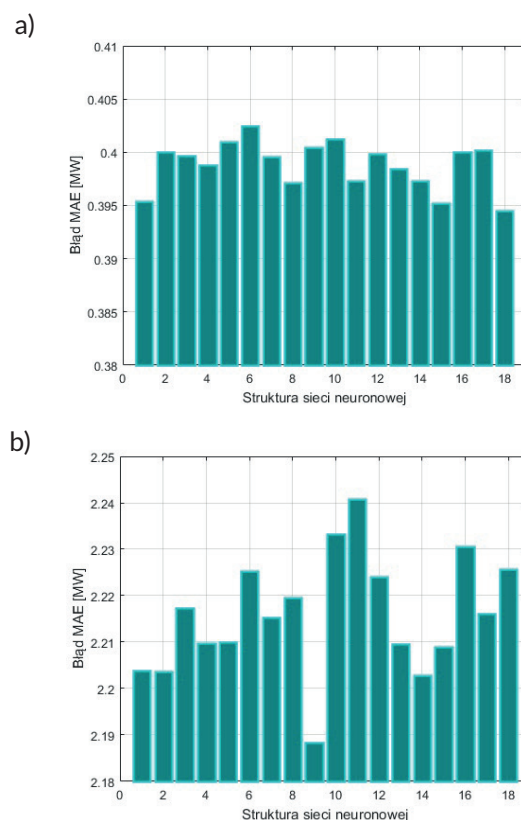
godzin. Wykorzystują one modele oparte o fizykę zjawisk meteorologicznych do przetwarzania bardzo dużej ilości danych i ekstrapolacji wskaźników pogodowych na podstawie aktualnych warunków rejestrowanych przez stacje meteorologiczne. Drugi przypadek to prognozy krótkoterminowe z wyprzedzeniem od jednej do sześciu godzin, sporządzane przy użyciu modeli statystycznych lub bazujące na sztucznej inteligencji, z rozdzielczością od jednej minuty do piętnastu minut. W przypadku obydwu prognoz ważne jest oszacowanie niepewności, aby można było planować rezerwy mocy. Prognozy mogą być świadczone w postaci usługi dla poszczególnych obiektów. Możliwe jest również prognozowanie obszarowe uwzględniające większą liczbę instalacji.

Z wyżej wymienionych powodów w Zespole JUEE podjęto prace badawcze oraz implementacyjne w zakresie prognozowania z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji. W pierwszej kolejności opracowano i wdrożono system prognozowania zapotrzebowania na energię elektryczną oraz gaz ziemny w ArcelorMittal Poland SA, który z sukcesem stosowany jest już od wielu lat. Dla każdej godziny i każdego większego odbioru w hucie, a także dla wprowadzonego planu produkcyjnego – z uwzględnieniem parametrów pogodowych, dnia tygodnia, miesiąca, godzin zmianowych i wielu innych parametrów – na podstawie modelu neuronowego wykonywane są prognozy zapotrzebowania na energię elektryczną. Uzyskane prognozy, po weryfikacji rzeczywistego wykonania, stają się nową bazą danych wykorzystywaną do uczenia modeli neuronowych. Swoista pętla zamknięta prognoz i uzyskanych weryfikacji produkcji stała się samodoskonalącą się (uczącą się) aplikacją (Klempka et Świątek 2013).

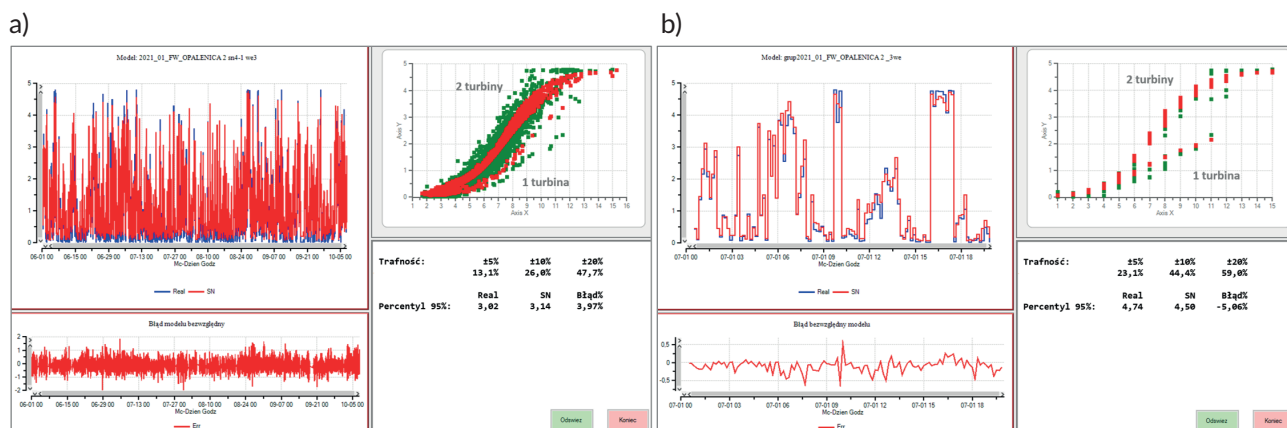
W ramach działań badawczych zespołu opracowano także modele prognostyczne bazujące na metodach sztucznej inteligencji dla instalacji fotowoltaicznych (PV) oraz wiatrowych. Na Rys. 11 przedstawiono przykład działania wybranych modeli prognostycznych. Z kolei Rys. 12 przedstawia porównanie błędów MAE prognoz dla testowanych modeli. Szersze wyniki analiz oraz dokładności modeli zamieszczono w (Dutka et al. 2023) oraz w rozprawie doktorskiej (Dutka 2021).



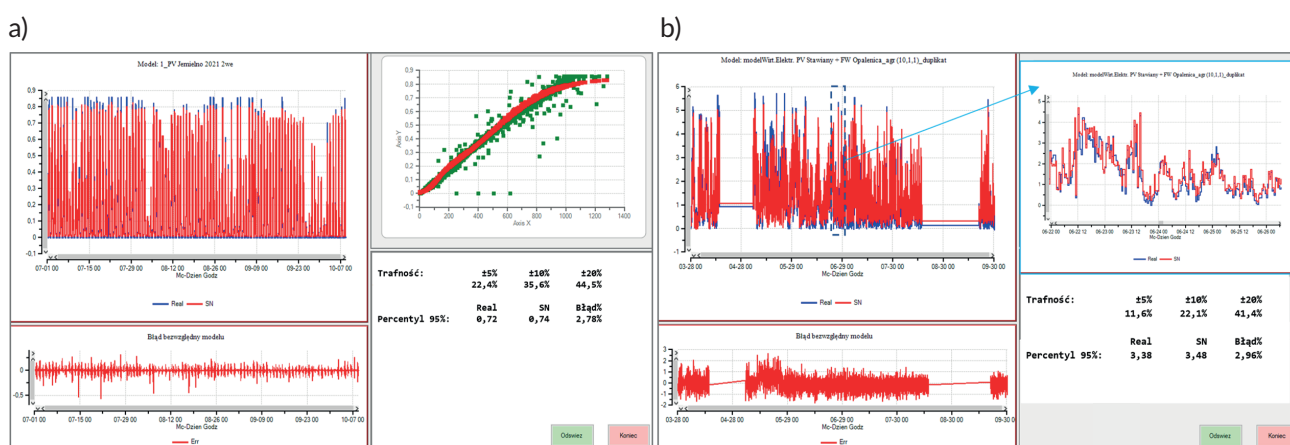
Rys. 11. Modele prognostyczne przeznaczone dla elektrowni: a) wiatrowych; b) fotowoltaicznych (Dutka 2021)



Rys. 12. Porównanie błędów prognoz dla modeli prognostycznych dla elektrowni: a) wiatrowych; b) fotowoltaicznych



Rys. 13. Przykładowe okno aplikacji do prognozowania: elektrownia wiatrowa: a) model  $moc = f(\text{prędkość wiatru, liczba pracujących turbin, temperatura})$ ; b) model uczony na podstawie zdyskretyzowanego zbioru uczącego (Dutka 2021)



Rys. 14. Przykładowe okno aplikacji do prognozowania: a) elektrownia fotowoltaiczna: model  $moc = f(\text{nasłonecznienie, temperatura})$ ; b) wirtualna elektrownia EPV+EW: model  $moc VPP = f(EPV_{(\text{nasłonecznienie})}, EW_{(\text{prędkość wiatru, liczba turbin})})$  (Dutka 2021)

Wynikiem pozyskanych kompetencji i doświadczeń związanych z prognozowaniem generacji energii elektrycznej przez elektrownie fotowoltaiczne i elektrownie wiatrowe jest opracowanie autorskiej aplikacji. Jest ona demonstratorem systemu prognozowania wyposażonym m.in. w moduł do samodzielnego budowania modeli prognostycznych przez użytkownika o cechach właściwych dla konkretnego przypadku oraz w moduł przetwarzania danych w celu ich właściwego przygotowania. Analiza wpływu czynników pogodowych na moc elektrowni wiatrowych oraz fotowoltaicznych pozwoliła wytypować strukturę danych wejściowych oraz zwiększyć dokładność prognoz. Zaproponowane modele sieci neuronowych oraz algorytmy uczenia maszynowego umożliwiają wykonanie prognoz o wysokiej trafności, porównywalnej lub niejednokrotnie lepszej niż w przypadku modeli

komercyjnych. Na Rys. 13–14 przedstawiono przykładowe okna z demonstratora systemu prognozowania produkcji energii: dla elektrowni wiatrowej EW (Rys. 13), dla elektrowni fotowoltaicznej EPV oraz dla wirtualnej elektrowni złożonej z EW i EPV (Rys. 14).

## 5. Podsumowanie

Podejmowane przez Zespół JUEE AGH prace i działania są bezpośrednio związane z transformacją energetyczną, w której uczestniczy Polska, Europa i świat. Ich realizacja była możliwa dzięki zaangażowaniu się w krajowe i międzynarodowe projekty oraz dzięki aktywnej współpracy z energią zawodową i przemysłem oraz instytucjami związanymi z rynkiem energii (Energetyka-rozproszona.pl b.r.). Taka

aktywność daje okazję do dzielenia się wiedzą i kompetencjami charakterystycznymi dla środowiska akademickiego (studia podyplomowe: Jakość dostawy energii elektrycznej, Rozproszone źródła i magazyny energii, Efektywne użytkowanie energii elektrycznej, Zintegrowane systemy automatyzacji, sterowania, zarządzania i bezpieczeństwa budynków, szkolenia tematyczne) (Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii b.r.), ale też jest źródłem cennego doświadczenia. Stanowi wyzwanie polegające na weryfikacji prowadzonej działalności naukowo-badawczej w praktyce, w rzeczywistości pozauczelniowej.

#### Bibliografia:

- Azebase Mboving Ch.S. (2020), *Methods for Reducing Voltage and Current Distortion Caused by Power Electronic Converters in Power Systems*, praca doktorska.
- Baggini A. (red.) (2008), *Handbook of Power Quality*, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester.
- Centrum Energetyki AGH, *Laboratorium Jakości Energii Elektrycznej 1*, [www.ce.agh.edu.pl/laboratoria/bk-ljee1/](http://www.ce.agh.edu.pl/laboratoria/bk-ljee1/) [dostęp: 15.06.2025].
- Chmielowiec K., Ziętek M., Piątek K., Firlit A., Szkoda R., Balawender P. (2012), *Comparative Tests of Power Quality Analyzers – Harmonic Distortion*, [w:] ICHQP'12, IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 17–20 June, Hong Kong, IEEE: 307–312.
- Chmielowiec K., Rogóż M., Hanzelka Z., Bień A., Firlit A., Kołek K., Piątek K., Woźny K. (2014), *Raport z eksperymentu pomiarowego – badania porównawcze analizatorów jakości energii elektrycznej – Piknik Jakości Energii Elektrycznej*, <https://www.tauron-dystrybucja.pl/piknik-jee> [dostęp: 15.06.2025].
- Chmielowiec K., Wiczyński G., Rodziejewicz T., Firlit A., Dutka M., Piątek K. (2020), *Location of Power Quality Disturbances Sources Using Aggregated Data from Energy Meters*, [w:] 12th International Conference and Exhibition on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU), IEEE, Kraków: 1–5.
- Chmielowiec K., Topolski Ł., Piszczek A., Hanzelka Z. (2021), *Photovoltaic Inverter Profiles in Relation to the European Network Code NC RfG and the Requirement of Polish Distribution System Operators*, „Energies” 14 (1486): 1–21.
- Dutka M. (2021), *Prognozowanie generacji energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii przy wykorzystaniu metod sztucznej inteligencji*, praca doktorska, Kraków.
- Dutka M., Świątek B., Hanzelka Z. (2023), *Wind Power Forecasts and Network Learning Process Optimization Through Input Data Set Selection*, „Energies” 6 (2562): 1–21.
- Energetyka-rozproszona.pl, <https://www.energetyka-rozproszona.pl>.
- Firlit A. (2011), *Ciągły monitoring i analiza jakości energii elektrycznej*, „Elektroenergetyka – Współczesność i Rozwój” 4 (10): 62–76.
- Firlit A. (2012), *Ciągły monitoring jakości energii elektrycznej*, „Wiadomości Elektrotechniczne” 2 (80): 6–9.
- Firlit A., Hanzelka Z., Chmielowiec K., Piątek K., Świątek B., Woźny K. (2015), *Opracowanie wirtualnego hybrydowego źródła energii elektrycznej złożonego z rozproszonych i odnawialnych źródeł z zastosowaniem systemu ciągłego monitorowania jakości energii elektrycznej*, [w:] *Jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych w Polsce, VI konferencja, Białka Tatrzańska, 9–10 czerwca*, PTPIREE, Poznań: 105–119.
- Firlit A., Kołek K., Piątek K. (2017a), *Heterogeneous Active Power Filter Controller*, [w:] 59th International Symposium ELMAR, IEEE Zadar, Croatia, 18–20 September, IEEE: 241–244.
- Firlit A., Kołek K., Piątek K. (2017b), *Rapid Controller Development for a Dynamic Voltage Restorer*, [w:] 59th International Symposium ELMAR, IEEE Zadar, Croatia, 18–20 September, IEEE: 237–240.
- Firlit A., Hanzelka Z., Piątek K., Barcentewicz S., Chmielowiec K., Dutka M. (2020a), *Monitorowanie jakości dostawy energii elektrycznej z uwzględnieniem supraharmonicznych oraz synchronizatorów*, „Przegląd Elektrotechniczny” 3 (96): 59–62.
- Firlit A., Świątek B., Hanzelka Z., Piątek K., Dutka M., Siostrzonek T. (2020b), *Analysis of Selected Power Quality Indicators at Non-Measured Distribution Network Points Based on Measurements at Other Points*, „Przegląd Elektrotechniczny” 5 (96): 39–42.
- Firlit A., Piątek K., Hanzelka Z., Szaniawski K., Piasecki S., Topolski Ł. (2022–2023), *Analiza pracy sieci zasilającej OSD po uruchomieniu magazynu energii elektrycznej firmy APATOR w Ochotnicy Dolnej*, [https://www.energetyka-rozproszona.pl/media/ckeditor/2023/09/12/analiza-pracy-sieci-osd-z-magazynem-energii-aporator-public-afirlit-agh\\_mm.pdf](https://www.energetyka-rozproszona.pl/media/ckeditor/2023/09/12/analiza-pracy-sieci-osd-z-magazynem-energii-aporator-public-afirlit-agh_mm.pdf) [dostęp: 15.06.2025].
- Gmina Ochotnica Dolna (2022), *Przemysłowe magazyn energii elektrycznej w Ochotnicy*, [www.ochotnica.pl/aktualnosci/przemyslowe-magazyn-energii-elektrycznej-w-ochotnicy/](http://www.ochotnica.pl/aktualnosci/przemyslowe-magazyn-energii-elektrycznej-w-ochotnicy/) [dostęp: 15.06.2025].
- Hanzelka Z. (2013), *Jakość dostawy energii elektrycznej – zaburzenia wartości skutecznej napięcia*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Hanzelka Z. (red.) (2021), *Handbook of Electrical Power Reliability: Selected Issues*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Hanzelka Z., Firlit A. (red.) (2015), *Elektrownie ze źródłami odnawialnymi – zagadnienia wybrane*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Hanzelka Z., Piątek K. (red.) (2024), *Instalacje fotowoltaiczne w systemie elektroenergetycznym*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Hanzelka Z., Głowacki F., Koseda H., Wrocławski M. (2009a), *I Krajowy raport benchmarkingowy nt. jakości dostaw energii elektrycznej do odbiorców przyłączonych do sieci przesyłowej i dystrybucyjnej*, URE.
- Hanzelka Z., Wasiluk-Hassa M., Błajszczak G., Firlit A., Łoziak W., Rogóż M., Chmielowiec K., Hanzelka Z. (2009b), *Monitorowanie wskaźników jakości energii elektrycznej w elektroenergetycznych sieciach przesyłowych*, [w:] APE'09, XIV międzynarodowa konferencja naukowa, Gdańsk, Jurata, 3–5 czerwca, Politechnika Gdańska: 73–87.
- Hanzelka Z., Firlit A., Błajszczak G. (2012), *Syntetyczne miary jakości napięcia*, „Automatyka, Elektryka, Zakłócenia” 3 (10): 62–70.
- Hanzelka Z., Chmielowiec K., Firlit A., Świątek B. (2013), *New Challenges for Voltage Quality Studies*, „Przegląd Elektrotechniczny” 6 (89): 17–25.
- II Krajowy raport benchmarkingowy nt. jakości dostaw energii elektrycznej do odbiorców przyłączonych do sieci przesyłowych i dystrybucyjnych (2021), [www.er.agh.edu.pl/projekt-klastery/krajowy-raport-benchmarkingowy/](http://www.er.agh.edu.pl/projekt-klastery/krajowy-raport-benchmarkingowy/) [dostęp: 15.06.2025].
- Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej, <https://www.tauron-dystrybucja.pl/uslugi-dystrybucyjne/instrukcja-iriesd> [dostęp: 15.06.2025].
- Jurek M., Rączka J., Świątek B., Hanzelka Z., Firlit A. (2015), *Zagregowane wskaźniki w rozproszonym systemie oceny jakości dostaw energii elektrycznej PSE SA*, [w:] *Jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych w Polsce, IV konferencja, Białka Tatrzańska, 9–10 czerwca*, PTPIREE: 43–54.
- Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, studia podyplomowe, <https://keiaspe.agh.edu.pl/studia-podyplomowe-i-szkolenia> [dostęp: 15.06.2025].

- Klempka R. (2012), *A New Method for the C-type Passive Filter Design*, „Przegląd Elektrotechniczny” 88 (7a): 277–281.
- Klempka R. (2013), *Passive Power Filter Design Using Genetic Algorithm*, „Przegląd Elektrotechniczny” 89 (5): 294–301.
- Klempka R. (2014), *Designing a Group of Single-Branch Filters Taking into Account Their Mutual Influence*, „Archives of Electrical Engineering” 63 (1): 81–91.
- Klempka R. (2016), *Design and Optimisation of a Simple Filter Group for Reactive Power Distribution*, „Mathematical Problems in Engineering”: 4125014.
- Klempka R. (2021a), *Optimal Double-Tuned Filter Efficiency Analysis*, „IEEE Transactions on Power Delivery” 36 (2): 1079–1088.
- Klempka R. (2021b), *Skuteczność filtracji grupy filtrów jednogłęzowych oraz filtru podwójnie nastrojonego*, Wydawnictwa AGH, Kraków.
- Klempka R. (2022), *Analytical Optimization of the Filtration Efficiency of a Group of Single Branch Filters*, „Electric Power Systems Research” 202 (107603): 1–10.
- Klempka R., Świątek B. (2013), *Prognozowanie godzinowego zapotrzebowania na energię elektryczną dla dużej huty z wykorzystaniem sieci neuronowych*, „Przegląd Elektrotechniczny” 89 (7): 95–99.
- Koćek K., Firlit A. (2021), *A New Optimal Current Controller for a Three-Phase Shunt Active Power Filter Based on Karush-Kuhn-Tucker Conditions*, „Energies” 14 (19): 6381.
- Lombardi P.A. (2018–2021), *Dynamic Energy Management System for Optimal Control of Flexible Loads and Renewable Energies in Production Operations*, [www.iff.fraunhofer.de/en/business-units/energy-systems-infrastructures/relflex.html](http://www.iff.fraunhofer.de/en/business-units/energy-systems-infrastructures/relflex.html) [dostęp: 15.06.2025].
- Obserwatorium Transformacji Energetycznej (2023–2025), <https://www.energetyka-rozproszona.pl/obserwatorium-transformacji-energetycznej/> [dostęp: 15.06.2025].
- Piątek K., Koćek K. (2015), *Rapid Algorithm Prototyping and Implementation for Power Quality Measurement*, „EURASIP Journal on Advances in Signal Processing” 1 (19): 1–12.
- Piątek K., Koćek K., Firlit A., Chmielowiec K., Woźny K. (2015), *Uniwersalna platforma pomiarowa parametrów elektrycznych i jakości energii elektrycznej*, [w:] *Jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych w Polsce*, VI konferencja, Białka Tatrzańska, 9–10 czerwca, PTPIREE: 77–86.
- Piątek K., Firlit A., Chmielowiec K., Dutka M., Barcentewicz S., Hanzelka Z. (2021), *Optimal Selection of Metering Points for Power Quality Measurements in Distribution System*, „Energies” 14 (4): 1–18.
- Polskie Centrum Akredytacji, *Laboratoria wzorujące*, [www.pca.gov.pl/akredytowane-podmioty/akredytacje-aktywne/laboratoria-wzorujace/AP%20205,podmiot.html](http://www.pca.gov.pl/akredytowane-podmioty/akredytacje-aktywne/laboratoria-wzorujace/AP%20205,podmiot.html) [dostęp: 15.06.2025].
- Projekt KlastER (2019–2022), <https://www.er.agh.edu.pl> [dostęp: 15.06.2025].
- Seminarium 18 KlastER (2021), *Magazyny energii elektrycznej w sieciach dystrybucyjnych*, [www.energetyka-rozproszona.pl/wydarzenia/seminarium-18-magazyny-energii-elektrycznej-w-sieciach-dystrybucyjnych/](http://www.energetyka-rozproszona.pl/wydarzenia/seminarium-18-magazyny-energii-elektrycznej-w-sieciach-dystrybucyjnych/) [dostęp: 15.06.2025].
- Świątek B., Firlit A., Hanzelka Z., Woźny K., Chmielowiec K., Piątek K. (2015), *Integracja analizatorów jakości dostawy energii elektrycznej pochodzących od różnych producentów*, [w:] *Jakość energii elektrycznej w sieciach elektroenergetycznych w Polsce*, VI konferencja, Białka Tatrzańska, 9–10 czerwca, PTPIREE, Poznań: 193–202.
- Tauron Dystrybucja (2021), *Piknik OZE 2021*, <https://www.tauron-dystrybucja.pl/piknik-oze> [dostęp: 15.06.2025].
- Tauron Dystrybucja (2025), *Piknik AMI*, [www.tauron-dystrybucja.pl/piknik-ami](http://www.tauron-dystrybucja.pl/piknik-ami) [dostęp: 15.06.2025].

## The impact of distributed energy resources (DERs) on supply network, power quality

**Abstract:** This paper presents contemporary trends and challenges around power quality in the context of the development of “intelligent” power systems (smart grids) and distributed generation. The authors of the paper, who are members of the Electric Power Quality and Utilization Team of AGH University, share their experience from participation in scientific research, experimental development, and educational activities conducted through national and international projects. They were related to the cooperation with power companies and utilities (transmission (TSO) and distribution (DSO) system operators), industry, and institutions operating for the energy market. Some selected research topics are briefly presented.

**Keywords:** power quality, distributed energy resources, smart grids, monitoring systems, power production and consumption forecasting

prof. dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,  
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej  
hanzel@agh.edu.pl



## Autorzy wszystkich części:

prof. dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka,  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,  
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH

dr hab. inż. Ryszard Klempka, prof. AGH,  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,  
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH

dr inż. Chamberlin Stephane Azebaze Mboving,  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,  
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH

dr inż. Szymon Barcentewicz,  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,  
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH

dr inż. Mateusz Dutka,  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,  
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH

dr inż. Andrzej Firlit,  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,  
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH

dr inż. Tomasz Siostrzonek,  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,  
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH

Krzysztof Chmielowiec,  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,  
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH