

Bartosz Ceran

POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA  
I ENERGETYKI

ZAŁĄCZNIK 3

Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych,  
w szczególności określonych w art. 219 ust. 1. pkt 2b ustawy Prawo  
o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z dnia 20 lipca 2018 r.

## Spis treści

1. Imię i nazwisko .....	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej .....	3
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych .....	3
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.) .....	4
4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego .....	4
4.2. Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego .....	4
4.3. Omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników wraz z ich ewentualnym wykorzystaniem.....	5
4.3.1. Wprowadzenie .....	5
4.3.2. Modelowanie pracy hybrydowych systemów wytwórczych z uwzględnieniem spadku wydajności ich komponentów.....	7
4.3.3. Analiza wpływu spadku wydajności komponentów hybrydowych systemów wytwórczych na wynik końcowy wielowariantowych analiz porównawczych .....	20
4.3.4. Podsumowanie .....	29
4.4. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych (okres po uzyskaniu stopnia naukowego doktora) .....	32
4.4.1. Koncepcja wykorzystania układu hybrydowego PV/WT/FC do wygładzania profilu energetycznego odbiorcy .....	32
4.4.2. Analiza energetyczna pracy małych elektrowni wodnych .....	32
4.4.3. Analiza możliwości wykorzystania instalacji PV do lokalnego i krajowego ograniczenia obciążenia szczytowego w Polsce .....	33
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej .....	33
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę .....	34
7. Pozostałe informacje .....	36

## 1. Imię i nazwisko

Bartosz Ceran

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

1. Magister inżynier, kierunek: *Elektrotechnika*, specjalność: *Elektroenergetyka*, Wydział Elektryczny, Politechnika Poznańska, 2009. Tytuł pracy magisterskiej „*Aspekty techniczne i ekonomiczne współspalania biomasy z węglem w elektrowniach i elektrociepłowniach*”, promotor: dr inż. Robert Wróblewski
2. Studia podyplomowe, kierunek: *Kompetencje edukacyjne w obszarze przedmiotów politechnicznych*, Politechnika Poznańska, 2012
3. Doktor nauk technicznych w dyscyplinie naukowej: *Elektrotechnika*, w specjalności naukowej: *Elektroenergetyka*. Stopień nadany uchwałą Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej dnia 23.05.2017 r. Tytuł rozprawy: *Ogniwa paliwowe w systemach rozproszonego wytwarzania energii elektrycznej*, promotor prof. dr hab. inż. Józef Lorenc, promotor pomocniczy dr inż. Krzysztof Sroka, 2017

## 3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

Od 01.10.2009 do 30.09.2017 – asystent w Zakładzie Elektrowni i Gospodarki Elektroenergetycznej w Instytucie Elektroenergetyki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej.

Od 01.10.2017 do 31.12.2019 – adiunkt w Zakładzie Elektrowni i Gospodarki Elektroenergetycznej w Instytucie Elektroenergetyki na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej.

Od 01.01.2020 – adiunkt w Zakładzie Elektrowni i Gospodarki Elektroenergetycznej w Instytucie Elektroenergetyki na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Poznańskiej.

#### **4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.)**

##### **4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego**

„Analiza wpływu starzenia się wybranych komponentów hybrydowych systemów wytwórczych na ich efektywność energetyczną”.

Osiągnięcie habilitacyjne stanowi cykl 5-ciu powiązanych tematycznie artykułów naukowych zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2020 r. Poz. 85 z późn. zm.).

##### **4.2. Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego**

- [BC-1] **Bartosz Ceran**, Agata Orłowska, Krystian Krochmalny, „The method of determining PEMFC fuel cell stack performance decrease rate based on the voltage-current characteristic shift” *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2020; 22(3), doi:10.17531/ein.2020.3.16,  
**IF:2.176, Punkty MEiN:100**
- [BC-2] **Bartosz Ceran**, „Multi-criteria comparative analysis of clean hydrogen production scenarios”, *Energies* 2020, 13(16), 4180, <https://doi.org/10.3390/en13164180>,  
**IF:3.004, Punkty MEiN:140**
- [BC-3] **Bartosz Ceran**, Agata Mielcarek, Qusay Hassan, Janusz Teneta, Marek Jaszczur, „Aging effects on modelling and operation of a photovoltaic system with hydrogen storage”, *Applied Energy*, Volume 297, 1 September, 117161, 2021, doi:10.1016/j.apenergy.2021.117161  
**IF:9.746, Punkty MEiN:200**
- [BC-4] **Bartosz Ceran**, Agata Orłowska, „The impact of power source performance decrease in a PV/WT/FC hybrid power generation system on the result of a multi-criteria analysis of load distribution” *Energies* 2019, 12(18), 3453, doi: 10.3390/en12183453,  
**IF:2.702, Punkty MEiN:140**
- [BC-5] Jakub Jurasz, **Bartosz Ceran**, Agata Orłowska, „Component degradation in small-scale off-grid PV-battery systems operation in terms of reliability, environmental impact and economic performance”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 38, April 2020, 100647, doi: 10.1016/j.seta.2020.100647,  
**IF:5.353, Punkty MEiN:140**

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

### 4.3.1. Wprowadzenie

Światowe trendy związane z technologiami wytwarzania energii elektrycznej wskazują na znaczny wzrost wykorzystania tzw. odnawialnych źródeł energii (OZE) jako czystego źródła energii elektrycznej. Scenariusze wykorzystania w bilansach energetycznych odnawialnych źródeł energii zostały wzmocnione na poziomie międzynarodowym poprzez opracowanie polityki rządowej krajów Unii Europejskiej mającej na celu zwiększenie ich udziału w produkcji energii elektrycznej.

Pomimo faktu, że w ostatnich latach wybudowano wiele źródeł OZE takich jak farmy fotowoltaiczne, elektrownie wiatrowe i inne w celu promowania czystych technologii, nie można na nich całkowicie polegać, ponieważ tego typu źródła są niestabilne i nieprzewidywalne.

Większą przewidywalność i stabilność procesu generowanej energii elektrycznej można uzyskać poprzez stosowanie tzw. hybrydowych systemów wytwórczych (HSW), czyli systemów, w których połączono różne technologie produkcji energii elektrycznej (turbiny wiatrowe, źródła fotowoltaiczne) z technologią magazynowania energii elektrycznej (akumulatory, magazyny energii w postaci wodoru).

Literatura naukowa jest bogata w prace dotyczące modelowania, projektowania i optymalizacji pracy hybrydowych systemów wytwórczych składających się ze źródeł OZE (wiatrowe, fotowoltaiczne) i magazynów energii (akumulatory, układ magazynowania energii w postaci wodoru). Prace naukowe, w których została poruszona tematyka modelowania hybrydowych systemów wytwórczych, skupiają się na optymalnym wymiarowaniu systemów i/lub na optymalnym zarządzaniu ich pracą poprzez opracowanie algorytmów sterowania. Jednak analizy prezentowane w literaturze nie uwzględniają efektu starzenia się systemów hybrydowych po wieloletniej eksploatacji i związanego z nim spadku sprawności poszczególnych urządzeń przeznaczonych do produkcji i/lub magazynowania energii elektrycznej, przez co rzeczywiste uzyski mogą się znacząco różnić od wartości otrzymanych na drodze symulacji. Należy mieć na uwadze fakt, że hybrydowe systemy wytwórcze są projektowane na okres około 10 – 20 lat eksploatacji.

Spośród znanych technologii wykorzystywanych w generacji rozproszonej największymi spadkami wydajności po latach eksploatacji cechują się akumulatory, ogniwa paliwowe, elektrolizery oraz moduły fotowoltaiczne. Producenci modułów fotowoltaicznych (PV) podają w kartach katalogowych charakterystyki spadku ich wydajności w kolejnych latach eksploatacji, natomiast w kartach katalogowych akumulatorów, ogniw paliwowych oraz elektrolizerów można znaleźć informacje na temat ich parametrów znamionowych oraz okresu życia. Brak jest natomiast informacji dotyczących spadku wydajności tych urządzeń w funkcji czas pracy.

Z tego względu, w celu określenia spadku wydajności urządzeń, stosuje się modele matematyczne. Prace opisujące modele matematyczne urządzeń elektrochemicznych takich jak ogniwa paliwowe, elektrolizery, można podzielić na dwie grupy.

Do pierwszej należą publikacje, w który przedstawiono modele przeznaczone do optymalizacji parametrów stosu według funkcji celu takich jak: minimalizacja kosztów budowy, maksymalizacja gęstości prądu. Modele te są budowane w celu wspomaganie projektowania stosu ogniw paliwowych i nie uwzględniają spadku wydajności stosu po latach eksploatacji.

Do drugiej grupy publikacji dotyczących modelowania stosów ogniw paliwowych należą prace, w których modeluje się procesy degradacyjne zachodzące w stosie podczas jego pracy. Badacze skupiają się na wyznaczaniu wpływu jednego z elementów konstrukcyjnych, takich jak warstwa dyfuzyjna gazu (z ang. gas diffusion layer – GDL), płytki dwubiegunowe, membrana polimerowa i warstwa katalizatora na elektrodach stosu, na charakterystykę napięciowo-prądową. Modele te są wykorzystywane do minimalizacji źródła degradacji i zwiększenia żywotności stosu.

Wymienione wyżej modele i proponowane metody nie są jednak nastawione na praktyczne zastosowanie, ponieważ brakuje w nich wykazania jak postępujące procesy degradacyjne wpłyną na wydajność stosu ogniw paliwowych po wielu godzinach bądź latach eksploatacji a przede wszystkim jak zmieniają się wartości wskaźników eksploatacyjnych.

Zależność między degradacją komponentów HSW jest bardzo złożona, ponieważ zależy od wielu czynników i zazwyczaj nie jest brana pod uwagę w analizie wieloletniej pracy hybrydowego systemu wytwórczego. W przypadku systemów wykorzystujących instalacje fotowoltaiczne jako źródła energii elektrycznej, zarówno w mikrosieciach, jak i w większej skali, degradacja jest nieunikniona, co powoduje, w kolejnych latach pracy, zmniejszenie ilości wytwarzanej energii elektrycznej. W przypadku urządzeń przeznaczonych pośrednio lub bezpośrednio do magazynowania energii, takich jak akumulatory, ogniwa paliwowe (ang. fuel cells, FC), elektrolizery (ang. elektrolyzer, EI), zawsze ustalany jest okres żywotności takich jednostek, dlatego obecne modele matematyczne uwzględniają wymianę elementów na nowe w określonym okresie.

Ponadto większość specjalistycznego oprogramowania, które jest przeznaczone do modelowania pracy tego typu układów wytwórczych, takich jak HOMER, iHOGA, PVsys, TRANSYS, POLYSUN, TSOL, GSOL itp., nie uwzględnia degradacji elementów systemu (tylko wymianę elementów ze względu na żywotność), a co za tym idzie końcowe wyniki symulacji uzyskane przez badaczy są obciążone pewnym błędem, szczególnie w przypadku projektów o długim okresie eksploatacji.

Przedstawione fakty świadczą o ważności i aktualności podjętej przez autora tematyki, dotyczącej modelowania pracy układów hybrydowych.

*Jako cel naukowy autor postawił sobie rozbudowanie, o nowe algorytmy uwzględniające spadek wydajności poszczególnych komponentów związany z ich degradacją po wieloletniej eksploatacji, istniejących modeli matematycznych przeznaczonych do analiz energetycznych pracy hybrydowych systemów wytwórczych, które zawierają źródło energii elektrycznej jakim jest instalacja fotowoltaiczna oraz magazyn energii (akumulator lub system elektrolizer-ogniwo paliwowe).*

Przedstawiony cykl powiązanych tematycznie publikacji naukowych obejmuje podjętą tematykę, a przeprowadzone przez autora badania i analizy za pomocą opracowanych

algorytmów doprowadziły do poszerzenia stanu wiedzy na temat modelowania pracy hybrydowych systemów wytwórczych zawierających instalacje fotowoltaiczne oraz magazyny energii (elektrochemiczne lub w postaci wodoru).

#### **4.3.2. Modelowanie pracy hybrydowych systemów wytwórczych z uwzględnieniem spadku wydajności ich komponentów**

**Literatura zawiera wiele artykułów, w których przedstawiono wyniki analiz energetycznych i/lub ekonomicznych hybrydowych systemów wytwórczych źródło fotowoltaiczne – magazyn energii elektrycznej. W badaniach tych autorzy nie uwzględniali wpływu spadku wydajności komponentów rozpatrywanego układu na zmianę efektywności energetycznej całego hybrydowego systemu wytwórczego po latach eksploatacji.**

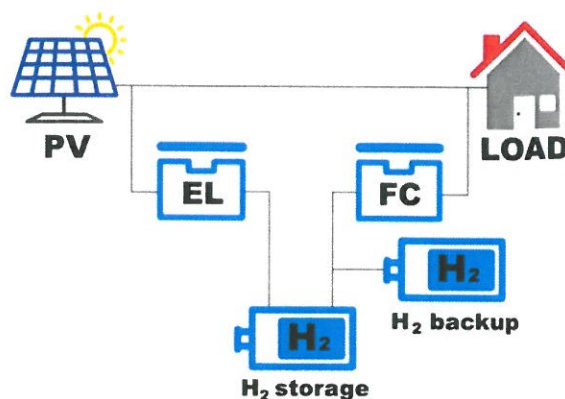
Jak wspomniano we wstępie zazwyczaj, jeśli w ogóle degradacja jest uwzględniana, pod uwagę brana jest tylko wymiana elementów, ale nie cała analiza efektu starzenia się systemu. Degradacja ogniwa paliwowego czy elektrolizera jest oczywista, ale zwykle nie jest uwzględniana w analizach energetycznych ani w modelach matematycznych rozpatrywanych systemów. Z drugiej strony wpływ starzenia się na degradację modułów fotowoltaicznych jest eksperymentalnie analizowany i szczegółowo opisany w różnych lokalizacjach i scenariuszach oraz może być zastosowany w modelowaniu.

Tempo degradacji systemu energetycznego zwykle nie jest stałe. Z tego powodu problem ten nie może być w prosty sposób oceniany, a przegląd literatury wykazał że jest on pomijany.

W pracach [BC-3, BC-5] autor przedstawił wyniki symulacji pracy hybrydowych systemów wytwórczych PV–magazyn energii, pracujących w trybie off–grid. Przedmiotem rozważań w pracy [BC–3] jest układ wytwórczy PV–EI–FC składający się z instalacji fotowoltaicznej PV oraz układu elektrolizer – ogniwo paliwowe (EI–FC), który jest przeznaczony do magazynowania energii w postaci wodoru. Przedmiotem rozważań w pracy [BC–5] jest system PV–Bat tj. instalacja fotowoltaiczna i akumulator litowo-jonowy (ang. battery).

**W pracy [BC-3] po raz pierwszy przeanalizowano wpływ starzenia się wszystkich komponentów układu na modelowanie i pracę systemu fotowoltaicznego z magazynowaniem wodoru w aspekcie zmniejszenia produkcji energii elektrycznej, a tym samym wzrostu zapotrzebowania na dodatkowy wodór (rezerwę wodorową) w ciągu 10 lat jego pracy.**

Schemat blokowy rozpatrywanego układu zasilania odbiorcy przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy rozpatrywanego układu, PV – instalacja fotowoltaiczna, EL- elektrolizer, FC – stos ogniw paliwowych typu PEM, H<sub>2</sub> storage – zbiornik wodoru, H<sub>2</sub> backup – rezerwa wodorowa, LOAD – profil obciążenia odbiorcy

Spadek wydajności paneli PV został zamodelowany w oparciu o charakterystyki starzeniowe podane w kartach katalogowych producentów. W modelu uwzględniono także wpływ temperatury pracy modułów PV na ich wydajność zgodnie z równaniem (1):

$$\Delta P_{PV} = S \cdot E \cdot [1 - \beta \cdot (\vartheta_{cell} - 25)] \cdot \Delta \eta_{PV} \quad (1)$$

gdzie:  $\Delta P_{PV}$  – zmiana mocy generowanej przez instalację PV [W],  $S$  – powierzchnia modułów PV [m<sup>2</sup>],  $E$  – natężenie promieniowania słonecznego [W/m<sup>2</sup>],  $\beta$  – współczynnik redukcji sprawności związany z temperaturą pracy modułów [%/°C],  $\vartheta_{cell}$  – temperatura pracy modułu,  $\Delta \eta_{PV}$  – roczna zmiana sprawności modułów PV [-].

Spadek wydajności stosu ogniw paliwowych został wyznaczony według algorytmu zbudowanego w oparciu o metodę opisaną przez habilitanta w [BC-1]. Jak wspomniano we wstępie, literatura zawiera prace naukowe, w których opisywane są modele procesów degradacyjnych zachodzących w stosie ogniw paliwowych podczas jego pracy. Modele te są jednak kłopotliwe w zastosowaniu ze względu na trudność w dostępie do danych niezbędnych do poprawnego określenia parametrów wejściowych. Nieprecyzyjne określenie parametrów modelu może doprowadzić do uzyskania nieprawdziwych wyników. Ponadto, jak wspomniano wcześniej, brakuje w nich wykazania jak postępujące procesy degradacyjne wpłyną na wydajność stosu ogniw paliwowych po wielu godzinach bądź latach eksploatacji oraz jak zmieniają się wartości wskaźników eksploatacyjnych.

W pracy [BC-1] autor przedstawił autorską metodę wyznaczania spadku wydajności stosu ogniw paliwowych na podstawie przesunięcia charakterystyki napięciowo-prądowej oraz udowodnił jej słuszność poprzez porównanie wyników symulacji z wynikami pomiarów wykonanych na rzeczywistym stosie ogniw paliwowych.

Przedstawiony w [BC-1] sposób modelowania spadku wydajności stosu ogniw paliwowych bazuje, w części, na danych uzyskanych na drodze eksperymentalnej. Dane



wejściowe modelu stanowią parametry katalogowe stosu oraz wyznaczona na podstawie pomiarów wartość napięcia stosu. Algorytm pozwala na określenie szybkości zmiany wartości średniego napięcia stosu ogniwo paliwowych zgodnie z zależnością (2), a co za tym idzie, szybkości spadku sprawności przetwarzania energii chemicznej paliwa na energię elektryczną, zgodnie z zależnościami (3) i (4) oraz wzrostu wartości wskaźnika jednostkowego zużycia paliwa zdefiniowanego wzorem (5):

$$\Delta U_{av} = U_{av} - \frac{dU_{av}}{dt} \cdot t \quad (2)$$

$$\Delta \eta_{el} = \frac{\Delta U_{av}}{E_t^0} \quad (3)$$

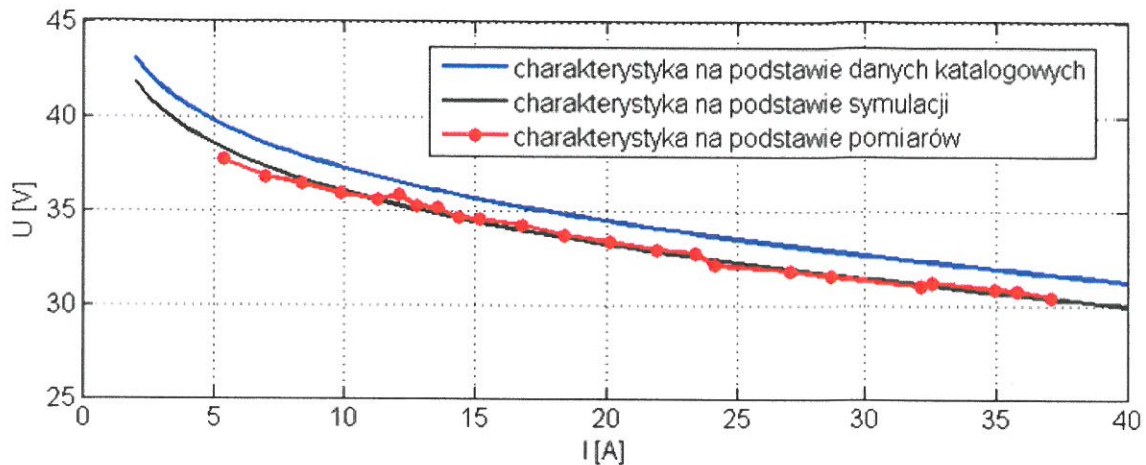
$$\Delta P_{el} = \Delta \eta_{el} \cdot \dot{n}_{H_2} \cdot Q_{W_{H_2}} \quad (4)$$

$$k_{FC} = \frac{V_{H_2}}{P_{el}} \quad (5)$$

gdzie:  $\Delta U_{av}$  – zmiana wartości średniego napięcia stosu [V],  $U_{av}$  – wartość średniego napięcia stosu ogniwo paliwowych [V],  $\frac{dU_{av}}{dt}$  – szybkość zmiany wartości średniego napięcia stosu w czasie [V/s],  $t$  – czas pracy stosu ogniwo paliwowych [s],  $\Delta \eta_{el}$  – zmiana wartości sprawności przetwarzania energii chemicznej wodoru na energię elektryczną przez stos,  $E_t^0$  – napięcie termoneutralne (ang. thermoneutral voltage) [V],  $\dot{n}_{H_2}$  – molowy strumień wodoru [mol/s],  $\Delta P_{el}$  – zmiana wartości mocy elektrycznej generowanej przez stos ogniwo paliwowych [W],  $Q_{W_{H_2}}$  – wartość opałowa wodoru odniesiona odpowiednio do 1 mola wodoru [J/mol],  $k_{FC}$  – wskaźnik jednostkowego zużycia paliwa przez stos [ $Nm^3/Ws$ ],  $V_{H_2}$  – objętościowy strumień wodoru [ $Nm^3/s$ ].

W celu wyznaczenia szybkości spadku wydajności stosu algorytm wykonuje szereg symulacji dla różnych wartości szybkości zmian średniego napięcia stosu z zadanyim krokiem i ocenia, z zadana dokładnością, dopasowanie charakterystyki rzeczywistej do symulowanej.

**Autor, dzięki współpracy z Politechniką Wrocławską, dokonał weryfikacji opracowanej metody w oparciu o wyniki pomiarów przeprowadzonych na stosie ogniwo paliwowych o mocy 1,2 kW.** Na rysunku 2 przedstawiono charakterystyki  $U=f(I)$  stosu ogniwo paliwowych: charakterystykę na podstawie danych katalogowych, charakterystykę wyznaczoną na podstawie pomiarów oraz charakterystykę uzyskaną za pomocą przeprowadzonych symulacji.



Rys. 2. Charakterystyki stosu ogniw paliwowych: katalogowa, symulowana, zmierzona

Odchylenia widoczne na charakterystyce pomiarowej są efektem działania układu płukania anody w czasie wykonywania pomiarów. W tym punkcie różnica między wielkością mierzoną a symulowaną wynosi około 0,6 V. W większości przedziału obszaru strat omowych tj. liniowego odcinka charakterystyki napięciowo – prądowej różnica między punktami wynosi około 0,2 V.

W celu określenia spadku wydajności stosu ogniw paliwowych w pracy [BC-3] autor wykorzystał algorytm opisany w [BC-1].

**Spadek wydajności elektrolizera pracującego w układzie przedstawionym na rysunku 1 został zamodelowany w oparciu o metodę opisaną w pracach [BC-2, BC-3]. Opracowana przez autora metoda określenia spadku wydajności elektrolizera została zaimplementowana w środowisku Matlab na podstawie modyfikacji metody przedstawionej w pracy [BC-1], w oparciu o następujące równania:**

$$\Delta U_{av} = U_{av} + \frac{dU_{av}}{dt} \cdot t \quad (6)$$

$$\Delta \eta_{El} = \frac{E_t^0}{\Delta U_{av}} \quad (7)$$

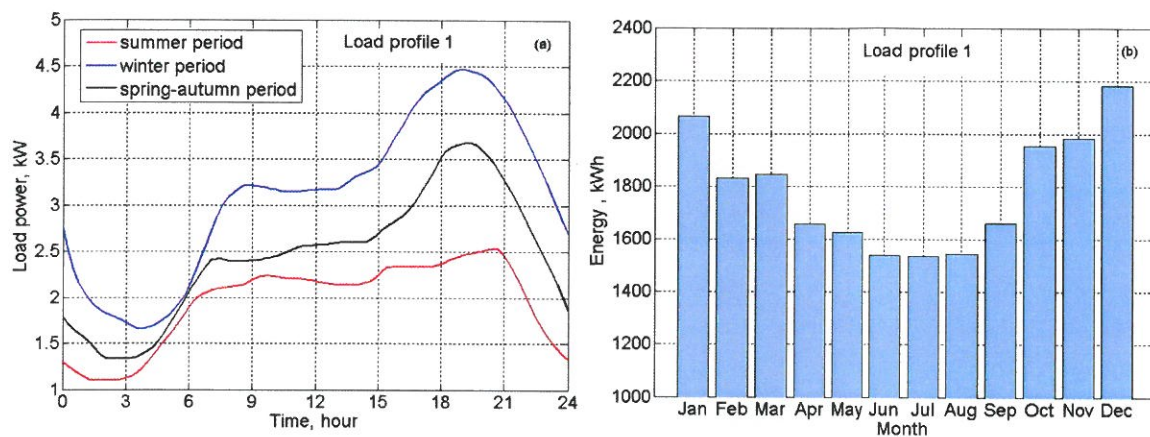
$$\Delta P_{El} = \frac{\dot{n}_{H_2} \cdot Q_{W_{H_2}}}{\Delta \eta_{El}} \quad (8)$$

$$k_{El} = \frac{P_{el}}{V_{H_2}} \quad (9)$$

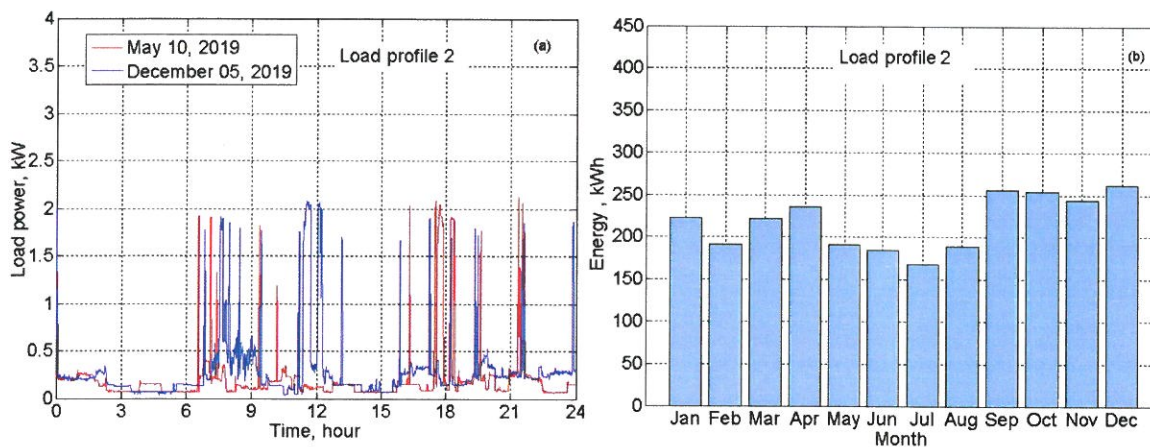
gdzie:  $\Delta U_{av}$  – zmiana wartości średniego napięcia elektrolizera [V],  $U_{av}$  – wartość średniego napięcia elektrolizera [V],  $\frac{dU_{av}}{dt}$  – szybkość zmiany wartości średniego napięcia elektrolizera w czasie [V/s],  $t$  – czas pracy elektrolizera [s],  $\Delta \eta_{el}$  – zmiana wartości sprawności przetwarzania

energii elektrycznej na energię chemiczną w postaci wodoru,  $\Delta P_{EI}$  – zmiana wartości mocy elektrycznej pobieranej przez elektrolizer [W],  $Q_{W_{H_2}}$  – wartość opałowa wodoru odniesiona odpowiednio do 1 mola wodoru [J/mol],  $k_{EI}$  – wskaźnik jednostkowego zapotrzebowania na energię elektryczną [Ws/Nm<sup>3</sup>],  $V_{H_2}$  – objęściowy strumień wodoru [Nm<sup>3</sup>/s].

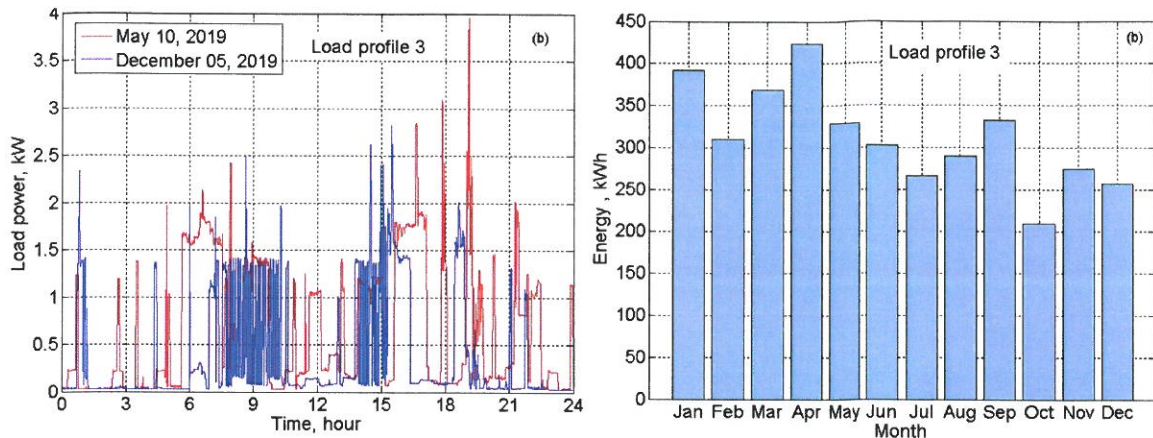
Badania przeprowadzono dla trzech różnych profili obciążenia (rysunki 3-5) i dwóch różnych typów modułów fotowoltaicznych z krzemu monokrystalicznego (ALEO-300) i krzemu polikrystalicznego (SHARP-265). **Dzięki podjętej współpracy z Akademią Górniczo – Hutniczą możliwe było przetestowanie opracowanego przez autora algorytmu na rzeczywistych profilach energetycznych odbiorcy uzyskanych za pomocą przeprowadzonych pomiarów eksperymentalnych.**



Rys. 3. Modelowy profil odbiorcy komunalnego, (a) – 3 wybrane profile dobowe, (b) – miesięczne zapotrzebowanie na energię elektryczną



Rys. 4. Rzeczywisty profil odbiorcy 2, (a) – 2 wybrane profile dobowe, (b) – miesięczne zapotrzebowanie na energię elektryczną



Rys. 5. Rzeczywisty profil odbiorcy 3, (a) – 2 wybrane profile dobowe, (b) – miesięczne zapotrzebowanie na energię elektryczną

Wykorzystując autorski model, rozbudowany o algorytmy uwzględniające spadek wydajności stosu ogniw paliwowych oraz elektrolizera, autor wyznaczył wartości energii produkowanej przez instalacje PV i stos ogniw paliwowych oraz wartość energii pobieranej przez elektrolizer w kolejnych latach pracy systemu. Następnie, na podstawie otrzymanych wyników, autor wyznaczył, w kolejnych latach pracy systemu, roczne wartości objętości wodoru wyprodukowanego przez elektrolizer oraz roczne wartości objętości wodoru zużytego przez stos ogniw paliwowych, a także określił przyrost rezerwy wodorowej, której zapewnienie jest niezbędne do pokrycia zapotrzebowania na energię przez odbiorcę.

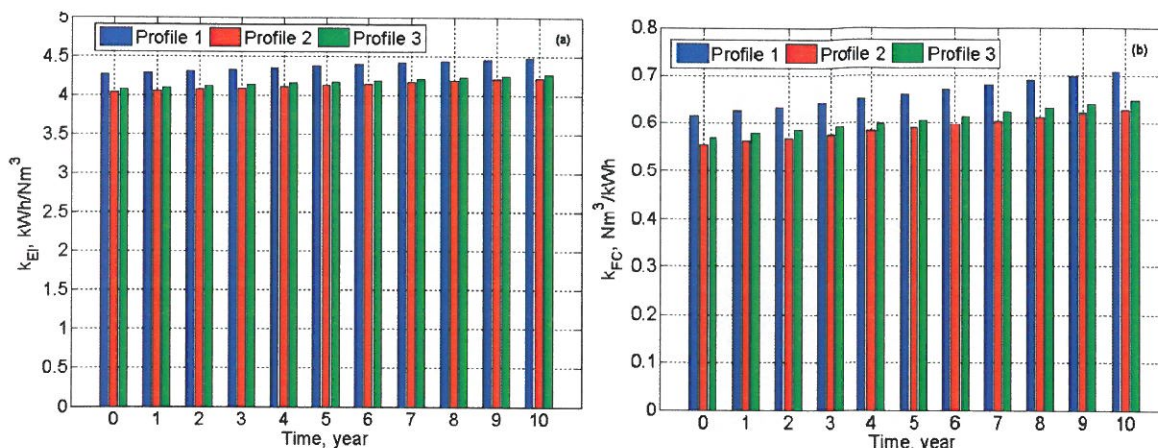
Autor w [BC-3] szczegółowo opisał mechanizm wpływu starzenia się poszczególnych elementów rozpatrywanego układu na efekt końcowy, jakim jest spadek wydajności całego systemu PV-EI-FC, podkreślając złożone, nieliniowe zależności obserwowane w rozpatrywanym systemie podczas jego wieloletniej pracy.

W celu przejrzystego opisu wpływu degradacji komponentów systemu na jego wydajność autor wyznaczył, dla każdego roku rozpatrywanego okresu pracy systemu, wartości następujących wskaźników: jednostkowe zapotrzebowanie na wodór przez stos ogniw paliwowych  $k_{FC}$  (5), jednostkowe zapotrzebowanie na energię elektryczną przez elektrolizer  $k_{EL}$  (9) oraz wskaźnik jednostkowego zużycia wodoru dodatkowego (10):

$$k_{HES} = \frac{H_2 \text{ backup}}{E_{load}} \quad (10)$$

gdzie:  $k_{HES}$  – wskaźnik jednostkowego zapotrzebowania na wodór dodatkowy przez rozpatrywany system PV-EI-FC [ $Nm^3/kWh$ ],  $H_2 \text{ backup}$  – rezerwa wodorowa [ $Nm^3$ ],  $E_{load}$  – roczne zapotrzebowanie na energię elektryczną [ $kWh$ ].

Wartości wskaźników  $k_{EL}$  oraz  $k_{FC}$  przedstawiono na rysunku 6.

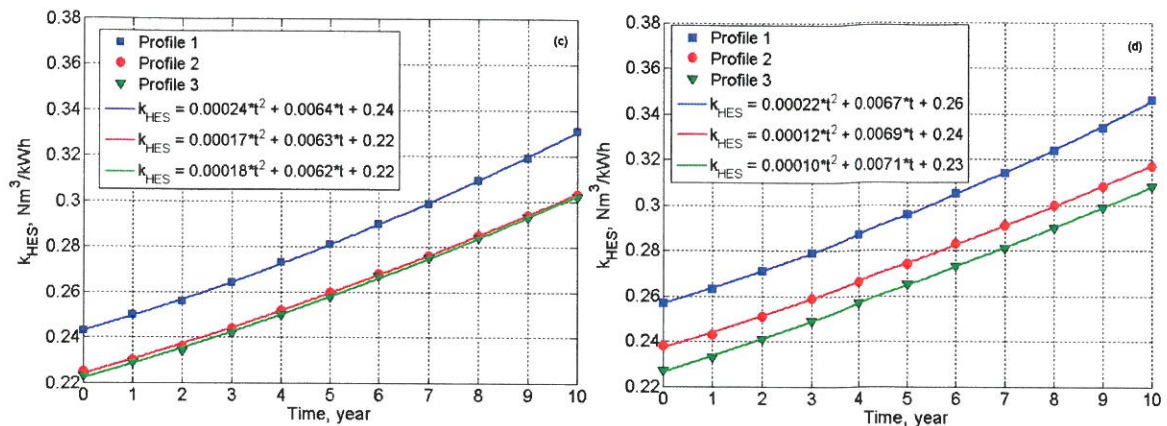


Rys. 6. Jednostkowe zużycie energii przez elektrolizer (a) i jednostkowe zużycie wodoru przez stos ogniw paliwowych (b) w kolejnych latach dla różnych profili obciążenia

Ze względu na postępujące starzenie się i różne warunki obciążenia, jednostkowe zużycie energii przez elektrolizer na wytworzenie 1 Nm<sup>3</sup> wodoru wzrasta w przedziale 4,6÷4,9% w ciągu 10 lat, przy czym obserwuje się większy wzrost (jak również degradację) dla systemu pracującego na profil o wyższym zapotrzebowaniu na energię. Elektrolizer, w kolejnych latach pracy, produkuje coraz mniejszą ilość wodoru w wyniku dwóch nakładających się na siebie zjawisk. Pierwszym zjawiskiem jest spadek mocy generowanej przez instalację PV w kolejnych latach, co przy założeniu stałej wartości nasłonecznienia oraz profilu obciążenia, spowoduje mniejsze nadwyżki energii dostarczanej do elektrolizera. Im większa wartość mocy zainstalowanej PV tym efekt ten jest silniejszy. Drugim zjawiskiem jest spadek wydajności samego elektrolizera związany ze starzeniem się jego komponentów.

W związku z powyższym roczna produkcja energii elektrycznej przez stos ogniw paliwowych wzrasta, aby zrekompensować tę stratę, jednak zwiększenie produkcji energii elektrycznej przez stos ogniw paliwowych skutkuje zwiększonym zużyciem wodoru. Aspektem dodatkowo wpływającym na wzrost zużycia wodoru przez stos ogniw paliwowych jest spadek jego wydajności w kolejnych latach eksploatacji. Jednostkowe zużycie wodoru przez ogniwo paliwowe do wytworzenia 1 kWh energii elektrycznej wzrasta w przedziale 13,3÷15,1% w ciągu 10 lat, przy czym większy wzrost obserwuje się dla systemu o większym zużyciu energii.

Powyższy złożony mechanizm wzajemnych nieliniowych oddziaływań zwiększa zapotrzebowanie na dodatkowy wódor przez rozważany układ PV-FC-EI w celu zapewnienia zdolności produkcyjnych. Na rysunku 7 przedstawiono zmiany wartości wskaźnika  $k_{HES}$  w kolejnych latach pracy analizowanego układu.



Rys. 7. Zmiana jednostkowego wskaźnika dodatkowego zużycia wodoru przez system OZE do produkcji energii elektrycznej w każdym kolejnym roku z modułami PV ALEO-300 (c) i SHARP-265 (d)

Otrzymane wyniki pokazują, że nieuwzględnianie efektu starzenia się spowoduje istotny błąd w każdej analizie energetycznej tego typu układów. W związku z degradacją elementów układu PV-FC-EL spowodowanych starzeniem się jego wydajność spada. Analiza energetyczna systemu wytwarzania energii PV-FC-EL w planowanym okresie długotrwałej eksploatacji, bez uwzględnienia tego faktu, prowadzi do otrzymania niedokładnych wyników. Roczne zapotrzebowanie na dodatkowy wodór znacznie wzrasta, a po 10 latach pracy instalacji wzrost ten średnio zawiera się w przedziale 33,2÷36,2% w odniesieniu do warunków nominalnych (początkowych).

Głównym osiągnięciem autora przedstawionym w pracy [BC-3] było opracowanie autorskiego modelu matematycznego przeznaczonego do oceny wpływu starzenia się elementów na działanie systemu fotowoltaicznego z magazynowaniem wodoru. Zaproponowany model uwzględnia efekt spadku wydajności wszystkich urządzeń układu hybrydowego, co jest nowatorskim podejściem i nie było dotychczas badane ani opisywane dla złożonych systemów fotowoltaicznych z magazynowaniem energii w postaci wodoru. Przedstawiony model pozwala określić roczny przyrost zapotrzebowania na dodatkowy wodór (ang. hydrogen backup, rezerwa wodorowa). Opracowany model może być wykorzystany w projektowaniu i badaniu systemów analogicznych i podobnych.

Oprócz magazynu energii w postaci wodoru, bardzo popularnym i często analizowanym w literaturze magazynem energii w układach hybrydowych jest akumulator (w literaturze angielskiej częściej nazywany baterią elektrochemiczną). Podobnie jak w przypadku systemów hybrydowych zintegrowanych z magazynem energii w postaci wodoru, autorzy prac naukowych dotyczących modelowania układu PV-Bat skupiają się na optymalnym zaprojektowaniu układu, gdzie najczęściej przyjmowaną funkcją celu w procesie optymalizacji jest kryterium ekonomiczne. Niemniej jednak spotyka się także artykuły naukowe, gdzie autorzy biorą pod uwagę inne kryteria np. środowiskowe lub niezawodnościowe.

Niezawodność wytwarzania energii elektrycznej (rozumiana jako wystarczalność generacji) ocenia się poprzez określenie prawdopodobieństwa stanu, w którym zapotrzebowanie

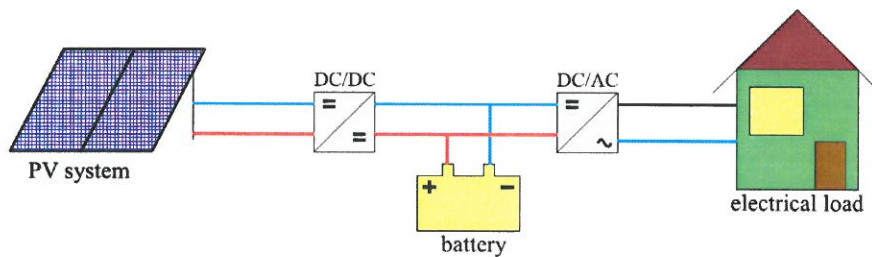
na moc przekracza moce wytwórcze systemu. Na podstawie tego prawdopodobieństwa określone są wskaźniki niezawodności wytwarzania energii elektrycznej takie jak prawdopodobieństwo niepokrycia zapotrzebowania (LOLP, ang. lost of load probability), oczekiwany czas niepokrycia zapotrzebowania (LOLE, ang. loss of load expectation), oczekiwana energia niedostarczona (EENS, ang. expected energy not supplied) itp.

W [BC-5] autor przedstawił wyniki badań modelowych pracy systemu off-grid PV-Bat w okresie 20-letniej eksploatacji z uwzględnieniem wpływu degradacji jego komponentów. Przedstawiona w [BC-5], opracowana przez autora, metoda pozwala na dobór urządzeń do profilu zapotrzebowania na moc w taki sposób, aby po określonym czasie eksploatacji zapewnić pożądany poziom niezawodności, opisany wskaźnikiem LOLP (ang. lost of load probability), zdefiniowanym jako:

$$LOLP = \frac{\sum_{i=1}^n E_i^{DNC}}{\sum_{i=1}^n E_i^D} * 100\% \quad (11)$$

gdzie:  $E_i^{DNC}$  – niepokryte zapotrzebowanie na energię [kWh],  $E_i^D$  – zapotrzebowanie na energię [kWh],  $n$  – liczba rozpatrywanych lat.

Na podstawie dokonanego w pracy [BC-5] przeglądu literatury stwierdzono, że zaproponowane metody optymalnego wymiarowania systemów PV-Bat pracujących w trybie off-grid (pod względem niezawodności długoterminowej) **nie uwzględniają wpływu spadku wydajności paneli PV i spadku pojemności baterii w funkcji czasu i odpowiednio liczby cykli pracy „ładuj-rozładuj”**. Parametry urządzeń systemu są optymalizowane pod kątem pierwszego roku eksploatacji. W [BC-5] przeprowadzono optymalizację w długim horyzoncie czasowym, a nie tylko dla stanu początkowego systemu. Schemat rozpatrywanego układu przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Schemat blokowy rozpatrywanego układu, PV – instalacja fotowoltaiczna, battery – akumulator litowo-jonowy, electrical load – profil odbiorcy

Zarządzanie energią w systemie zostało zamodelowane w oparciu o równania:

$$E_i^{PV} = P^{PV} \frac{H_i}{H^{STC}} \left( 1 - \beta \left( \left( T_i^a + H_i \left( \frac{T^{NOCT} - 20^\circ C}{H^{NOCT}} \right) \right) - T^{STC} \right) \right) \eta^{PV} \eta_i^0 t \quad (12)$$

$$E_i^B = E_{i-1}^B + \eta E_i^{Char} - \frac{E_i^{Dis}}{\eta} \quad (13)$$

$$E^{B\_Min} \leq E_i^B \leq E^{B\_Max} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (14)$$

gdzie:  $E_i^{PV}$  – uzysk energii z instalacji PV [kWh],  $P^{PV}$  – moc zainstalowana w systemie PV [kW],  $H_i$  – energia promieniowania słonecznego docierająca do powierzchni ziemi [ $\text{kWh/m}^2$ ],  $H^{STC}$  – energia promieniowania słonecznego dla warunków STC [ $\text{kWh/m}^2$ ],  $\mu$  – temperaturowy współczynnik redukcji sprawności [%/°C],  $T_i^{PV}$  – temperatura pracy modułów PV [°C],  $T^{STC}$  – temperatura pracy modułów PV dla warunków STC [°C],  $\eta^{PV}$  – sprawność systemu PV [%],  $\eta_i^0$  – zmiana sprawności związana z degradacją [%],  $T_i^a$  – temperatura powietrza [°C],  $T^{NOCT}$  – temperatura pracy w warunkach NOCT,  $H^{NOCT}$  – energia promieniowania słonecznego dla warunków STC [ $\text{kWh/m}^2$ ],  $t$  – krok czasowy [h],  $E_i^B$  – energia zmagazynowana w baterii [kWh],  $\eta$  – sprawność ładowania/rozładowania,  $E_i^{Char}$  – energia przeznaczona do ładowania baterii [kWh],  $E_i^{Dis}$  – energia pobierana podczas rozładowywania baterii [kWh],  $n$  – liczba lat.

Pojemność baterii i wydajność systemu fotowoltaicznego aktualizowano corocznie. Do oszacowania maksymalnej degradacji pojemności akumulatora litowo-jonowego zastosowano wzór aproksymujący charakterystykę jego pojemności w funkcji liczby cykli ( $c$ ).

$$E^{B\_Max} = -0.00004 \cdot c + 0.9523 \quad (15)$$

Rozważany stan naładowania baterii mieścił się w przedziale od 25% do 100%.

**Ponieważ w układzie PV-Bat pracującym w trybie off-grid, w porównaniu z systemem PV-EI-FC, nie ma możliwości dostarczenia zewnętrznego źródła energii (na wzór rezerwy wodorowej), w celu zapewnienia odpowiedniej niezawodności energetycznej konieczne jest przewymiarowanie komponentów, co wiąże się z poniesieniem dodatkowych kosztów i zaakceptowanie potencjalnych strat energii generowanej ze względu na ograniczoną pojemność magazynu.**

Z tego względu model opisany w [BC-5] wyznacza, koszty produkcji energii elektrycznej, opisane za pomocą wskaźnika LCOE (ang. levelized cost of electricity) (16), które rosną wraz z przewymiarowaniem systemu jakie należy założyć w wyniku degradacji komponentów przez dwadzieścia lat eksploatacji.

$$LCOE = \frac{I_0 + \sum_{t=1}^m \frac{A_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^m \frac{(E_t^D - E_t^{DNC})}{(1+r)^t}} \quad (16)$$

gdzie:  $I_0$  – koszt inwestycyjny [€],  $A_t$  – roczny koszt całkowity [€],  $E_t^D$  – zapotrzebowanie na energię [kWh],  $E_t^{DNC}$  – niepokryte zapotrzebowanie na energię [kWh],  $r$  – realna stopa procentowa [-].

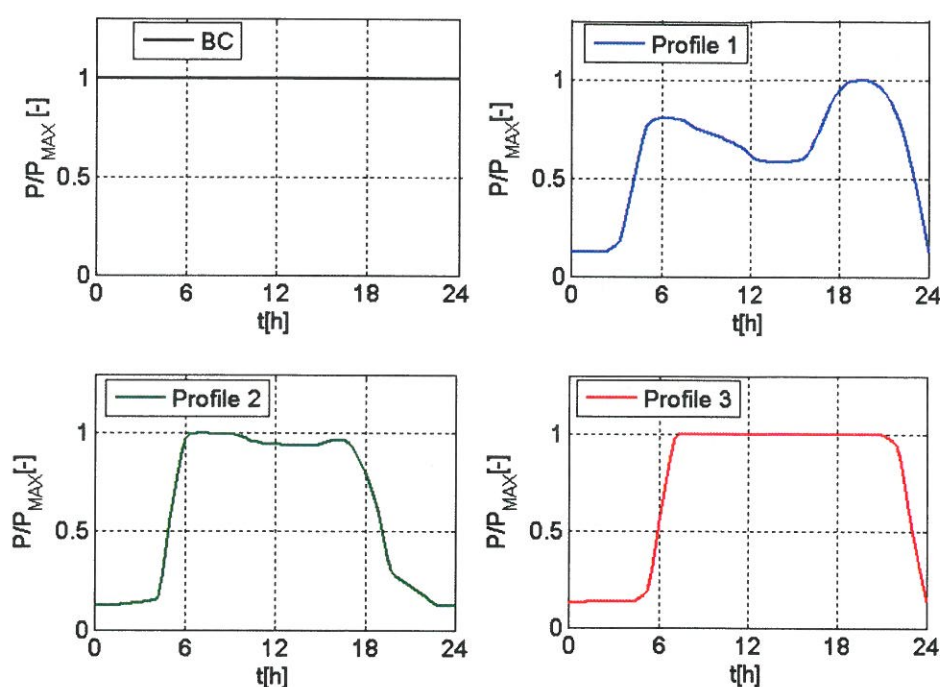
Dodatkowo model pozwala na wyznaczenie wskaźnika emisji  $\text{CO}_2$  (17) związanego z procesem produkcji komponentów systemu.



$$EI = \frac{EI^{PV} \sum_{i=1}^n E_i^{PV} + EI^B E^{B\_Max}}{\sum_{t=1}^m (E_t^D - E_t^{DNC})} \quad (17)$$

gdzie: EI – wpływ procesu produkcji systemu na środowisko [kgCO<sub>2</sub>/kWh], EI<sup>PV</sup> – wskaźnik emisji związany z procesem produkcji paneli PV [kgCO<sub>2</sub>/kWh], EI<sup>B</sup> – wskaźnik emisji związany z procesem produkcji akumulatora [kgCO<sub>2</sub>/kWh], E<sup>B\_Max</sup> – pojemność akumulatora [kWh].

Symulacje przeprowadzono dla czterech modelowych profili obciążenia dobowego o wartości mocy P<sub>max</sub> = 1 kW (profil stały BC oraz profile 1-3), które zostały przedstawione na rysunku 9.



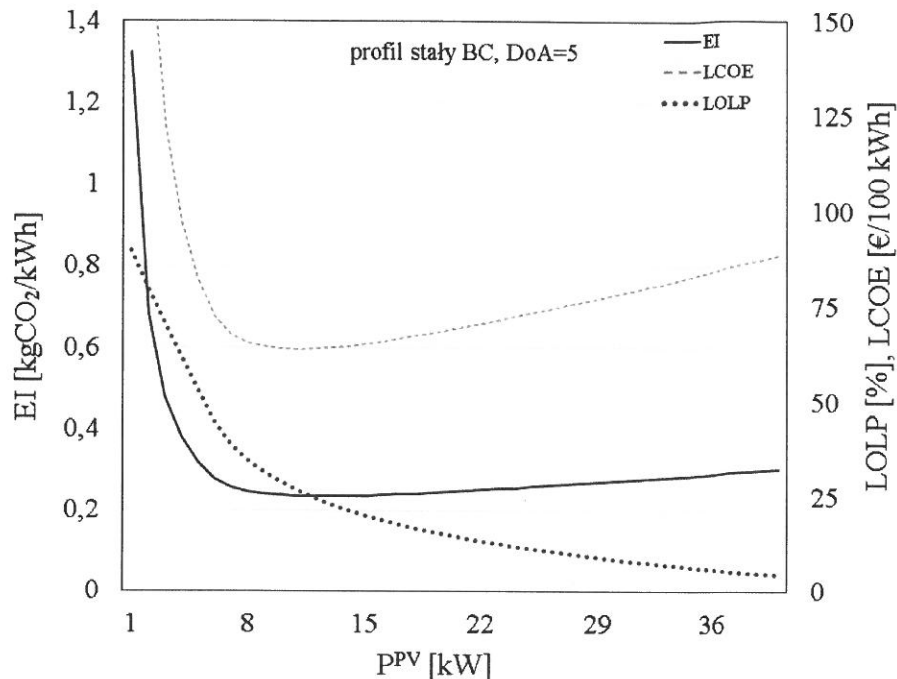
Rys. 9. Modelowe profile obciążenia

Dla rozważanych czterech profili obciążenia pojemność akumulatorów została określona w oparciu o podejście dni autonomii DoA. Jeśli liczba dni autonomii (DoA) wynosi „1”, system jest w stanie pokryć obciążenie przez całą dobę. Na podstawie przeprowadzonych symulacji, dla wszystkich czterech profili, w pracy [BC-5] przedstawiono charakterystyki LOLP=f(P<sup>PV</sup>), LCOE=f(P<sup>PV</sup>) oraz EI=f(P<sup>PV</sup>), gdzie moc PV zmienia się w zakresie od 0 do 40 kW, natomiast pojemność akumulatorów zmienia się w zakresie od 1 do 5 DoA.

W autoreferacie, w celu bardziej czytelnego przedstawienia wyżej wymienionych charakterystyk, zaprezentowano jeden z rozpatrywanych przypadków tj. system PV pracujący na profil stały BC, DoA=5 (rysunek 10).

Na rysunku 10 widoczny jest wyraźny punkt przegięcia uśrednionego kosztu energii elektrycznej (czerwona linia przerywana) i wpływu/emisji na środowisko (ciągła czarna linia).

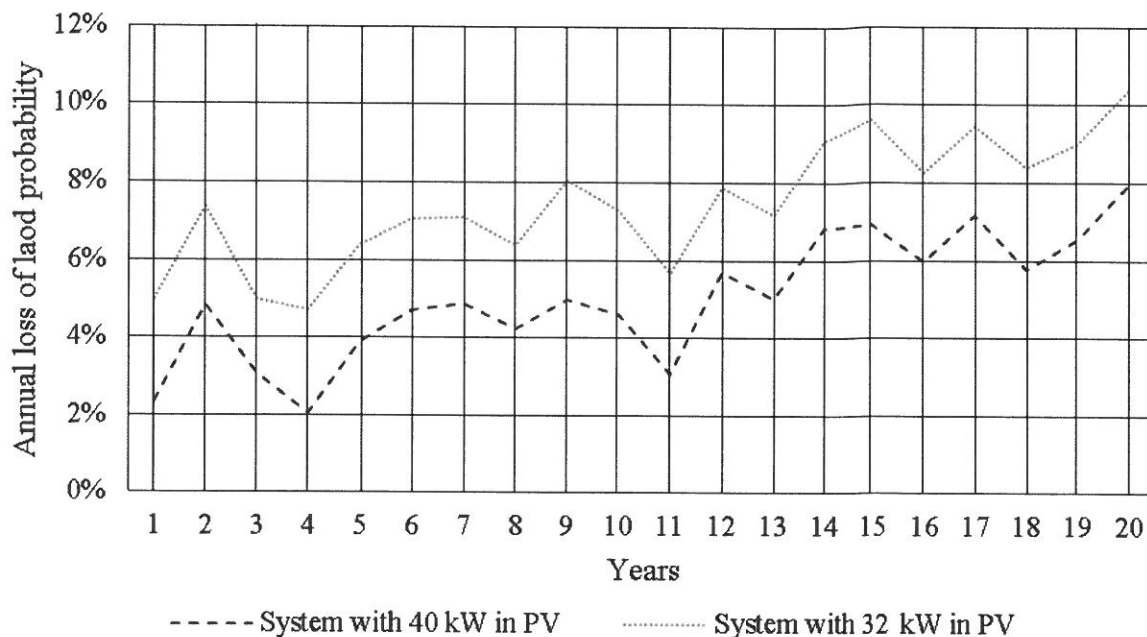
Niezawodność systemu (niebieskie kropki) poprawia się wraz ze wzrostem zainstalowanej mocy PV.



Rys. 10. Wydajność systemu PV-bateria pracującego na profil stały BC, DoA=5

Najniższy koszt energii elektrycznej uzyskuje się dla systemów o mocy PV od 5 do 8 kW, jednak systemy te nie zapewniają wymaganej niezawodności. Biorąc pod uwagę stochastyczny charakter produkcji energii elektrycznej przez instalację PV, konieczne jest przewymiarowanie systemu oraz, jak wspomniano wcześniej, zaakceptowanie potencjalnych strat energii ze względu na ograniczoną pojemność magazynu. Powyższe relacje między funkcjami  $LOLP=f(P^{PV})$ ,  $LCOE=f(P^{PV})$  oraz  $EI=f(P^{PV})$  zachodzą także dla pozostałych profili [BC-5].

Na rysunku 11 przedstawiono roczne zmiany niezawodności działania systemu PV-Bat pracującego na profil o stałym obciążeniu BC dla pojemności baterii DoA=5. Porównano dwa systemy, system spełniający kryterium niezawodnościowe: wartość średnia  $LOLP \leq 5\%$ , w którym moc PV wynosi 40 kW oraz system, w którym moc PV wynosi 32 kW.



Rys. 11. Niezawodność systemów PV-bateria obsługujących stałe obciążenie 1 kW przez 20 lat z uwzględnieniem degradacji komponentów, DoA = 5

Z przedstawionej wizualizacji widać, że ogólny trend wskazuje na spadek wydajności obu systemów w kolejnych latach. Jednak zdarzają się pojedyncze lata, kiedy niezawodność systemu jest znacznie wyższa od projektowanej (LOLP zaledwie 2%). Wynika to z międzyrocznej zmienności całkowitego uzysku energii z systemów fotowoltaicznych (roczny rozkład nasłonecznienia i wahania temperatury). W modelu wykorzystano historyczne rozkłady nasłonecznienia i temperatury z okresu 20 lat. **Wyniki przedstawione na rysunku 11 podkreślają dwa ważne, pomijane aspekty projektowania systemów PV-Bat tj. degradację komponentów systemu i małe, ale nadal znaczące zmiany z roku na rok produkcji energii elektrycznej przez instalację fotowoltaiczną.**

Jak wspomniano wcześniej, system PV-bat zwymiarowano w taki sposób, że średnia wartość wskaźnika LOLP na przestrzeni 20 lat jest równa lub mniejsza 5% tzn. poszukiwanie optymalnej struktury systemu jest prowadzone w oparciu o kryterium niezawodnościowe  $LOLP \leq 5\%$ .

Stosując drugie kryterium, związane z kosztami produkcji energii LCOE, można z uzyskanych wyników wybrać konfiguracje, które nie tylko spełniają żądany warunek kryterium niezawodnościowego, ale także charakteryzują się najniższym kosztem produkcji energii elektrycznej. W tabeli 1 przedstawiono zestawienie wyników symulacji.

Tabela 1. Parametry urządzeń systemu PV-Bat spełniających warunki  $LOLP < 5\%$  oraz  $LCOE \rightarrow \min$

Profil	PV [kW]	Pojemność akumulatorów [kWh]	LOLP [%]	EI [gCO <sub>2</sub> /kWh]	LCOE [€/kWh]
BC	40	79.9	4.77	249	0.75
P1	25	32.7	4.90	266	0.70
P2	24	32.0	4.59	222	0.68
P3	28	38.0	4.99	220	0.68

Przeprowadzone symulacje wykazały, że największa pojemność akumulatorów jest wymagana dla profilu stałego BC. Profil ten, ze względu na najmniejsze dopasowanie do profili generacji energii elektrycznej przez instalację PV, wymaga największego przewymiarowania komponentów systemu PV-Bat. W przypadku pozostałych profili korzyścią jest ich lepsze powiązanie z dobowym profilem wytwarzania energii elektrycznej przez system PV – co prowadzi zarówno do zmniejszenia pojemności magazynowej, jak i zmniejszenia wartości mocy zainstalowanej w samej instalacji fotowoltaicznej. Dla profili obciążenia 1÷3 (rys. 9) wystarczy zainstalować system magazynowania zapewniający dwa dni autonomii energetycznej, natomiast dla profilu obciążenia BC pojemność magazynowania należy zwiększyć o jeszcze jeden dzień.

Istotnym osiągnięciem autora w pracy [BC-5] jest wykazanie, że projektowanie, wysoce niezawodnych systemów fotowoltaicznych z akumulatorami do pracy w trybie off-grid, przeznaczonych do długoterminowej eksploatacji, wymaga rozważenia potencjalnej degradacji elementów systemu tj. spadku pojemności baterii oraz wydajności paneli PV. System zaprojektowany z niezawodnością 95% może wykazywać prawdopodobieństwo utraty obciążenia na poziomie 2% w pierwszym roku i ponad 8% po 20 latach.

#### 4.3.3. Analiza wpływu spadku wydajności komponentów hybrydowych systemów wytwórczych na wynik końcowy wielowariantowych analiz porównawczych

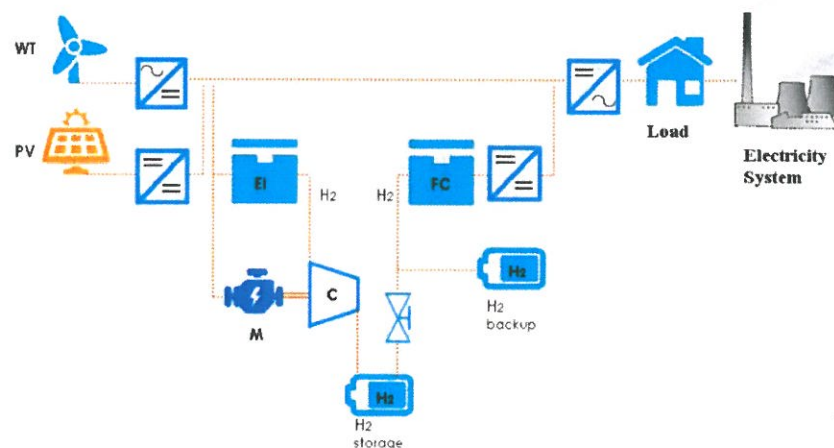
Hybrydowe systemy wytwórcze, w porównaniu z konwencjonalnymi technologiami, charakteryzują się mniejszym wpływem na środowisko, ale większymi kosztami jednostkowymi produkcji. Z tego względu planowanie ich pracy w systemie elektroenergetycznym rozpatrywane jest wielowariantowo, z uwzględnieniem aspektów energetycznych, ekonomicznych oraz środowiskowych, z wykorzystaniem metod wielokryterialnych analiz porównawczych. Metody wielokryterialnych analiz porównawczych są także często wykorzystywane do porównywania różnych technologii opisywanych tymi samymi wskaźnikami.

Wyznaczone na podstawie analizy energetycznej, opisaną w [BC-3], zmiany wartości wskaźnika jednostkowego zapotrzebowania na rezerwę wodorową wpłyną na zwiększenie kosztów eksploatacyjnych co w konsekwencji zwiększy jednostkowy koszt produkcji 1 kWh energii elektrycznej przez HSW. Ponadto, jeśli wodór dodatkowy jest produkowany w technologii np. reformingu parowego, to zwiększenie jego zużycia spowoduje zwiększenie

emisji CO<sub>2</sub>. Zatem degradacja urządzeń HSW spowoduje zmianę wartości nie tylko wskaźników energetycznych, ale także wskaźników ekonomicznych i środowiskowych. Wskaźniki należące do wyżej wymienionych grup są często wykorzystywane jako kryteria decyzyjne w wielokryterialnych analizach porównawczych. Przeprowadzony przez autora przegląd literatury wykazał, że porównywanie różnych wariantów pracy hybrydowych systemów wytwórczych z wykorzystaniem analiz wielokryterialnych nie uwzględnia wpływu spadku wydajności urządzeń na kryteria decyzyjne i w konsekwencji na wynik końcowy prowadzonej analizy.

W [BC-4] autor rozbudował, o algorytmy przeznaczone do wyznaczania spadku wydajności instalacji PV, elektrolizera [BC-2] i ogniwa paliwowego [BC-1], model przeznaczony do planowania pracy hybrydowego systemu wytwórczego składającego się z turbin wiatrowych (WT), instalacji fotowoltaicznej oraz magazynu energii elektrolizer-ogniwo paliwowe w ujęciu wieloaspektowym oraz wykazał wpływ starzenia się tych urządzeń na kryteria decyzyjne i wynik końcowy wielokryterialnej analizy rozdziału obciążeń między hybrydowy system wytwórczy PV/WT/FC a system elektroenergetyczny.

Schemat analizowanego układu przedstawiono na rysunku 12.



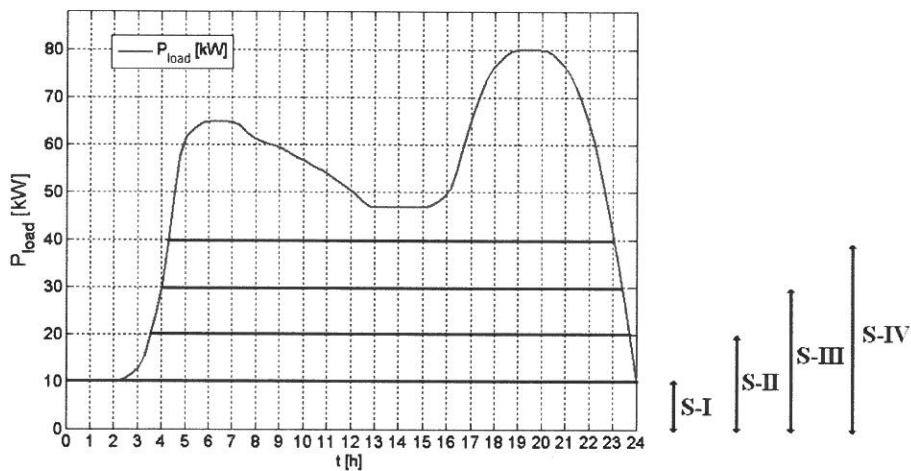
Rys. 12. Schemat blokowy rozpatrywanego układu, PV – instalacja fotowoltaiczna, WT – turbiny wiatrowe, E1- elektrolizer, FC – stos ogniwa paliwowych typu PEM, H2 storage – zbiornik wodoru, H2 backup – rezerwa wodorowa, load – profil obciążenia odbiorcy, electricity system – system elektroenergetyczny

Wyniki badań zaprezentowane w [BC-4] stanowią kontynuację rozwoju wcześniejszych osiągnięć naukowych autora związanych z budową modelu przeznaczonego do porównywania scenariuszy pracy układu przedstawionego na rysunku 13. Wspomniane wcześniej wieloaspektowe ujęcie planowania pracy HSW w systemie elektroenergetycznym, polega na przeprowadzeniu analizy z uwzględnieniem wpływu wskaźników energetycznych, ekonomicznych, środowiskowych oraz wskaźnika reprezentującego system elektroenergetyczny, jakim jest stopień pokrywania obciążenia odbiorcy z sieci elektroenergetycznej. **Analiza wpływu**

spadku wydajności HSW związanego ze starzeniem się instalacji fotowoltaicznej oraz elektrochemicznych przetworników energii na wyniki wielowariantowej analizy rozdziału obciążeń stanowią nowość naukową w pracy [BC-4].

Analizę wpływu starzenia się instalacji PV, ogniwa paliwowego oraz elektrolizera na kryteria decyzyjne i wynik końcowy wielowariantowej analizy rozdziału obciążeń przeprowadzono dla okresu 7 lat eksploatacji. Doświadczenia eksploatacyjne elektrowni wiatrowych nie wykazały spadku wydajności generacji spowodowanej degradacją komponentów przez okres 7 lat pracy, dlatego w analizie przyjęto stałą charakterystykę generacji mocy w funkcji wietrzności  $P=f(v)$ .

Badania wpływu starzenia się urządzeń hybrydowego systemu wytwórczego na efekt końcowy analizy wielokryterialnej rozdziału obciążeń przeprowadzono na modelowym profilu energetycznym odbiorcy przedstawionym na rysunku 13. Na rysunku zaznaczono 4 scenariusze pokrywania części obciążenia przez system elektroenergetyczny, pozostałe zapotrzebowanie jest pokrywane przez hybrydowy system wytwórczy PV-WT-FC.



Rys. 13. Wizualizacja porównywanych scenariuszy pokrywania obciążenia przez system elektroenergetyczny

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej autor zdefiniował następujące kryteria decyzyjne: kryterium energetyczne  $k_1$  – jednostkowe zapotrzebowanie na wodór dodatkowy, kryterium ekonomiczne  $k_2$  – jednostkowe koszty produkcji energii elektrycznej, kryterium środowiskowe  $k_3$  – jednostkowa emisja  $CO_2$  przez hybrydowy system wytwórczy związana z procesem produkcji wodoru dodatkowego (reforming parowy) oraz przez system elektroenergetyczny oraz kryterium systemowe  $k_4$  – stopień pokrywania obciążenia przez system elektroenergetyczny. **Szczegółowy opis analizy energetycznej, kryteriów decyzyjnych oraz zastosowanej metody wielokryterialnej znajduje się w pracy: B. Ceran, “The concept of use of PV/WT/FC hybrid power generation system for smoothing the energy profile of the consumer”.**

Dla wszystkich scenariuszy autor wyznaczył wartości kryteriów decyzyjnych dla 7 lat eksploatacji z krokiem czasowym co 1 rok. W tabeli 2 przedstawiono wartości kryteriów decyzyjnych dla warunków początkowych i siódmego roku eksploatacji.

Tabela 2. Wartości kryteriów decyzyjnych wyznaczone dla roku zerowego i siódmego roku eksploatacji HSW

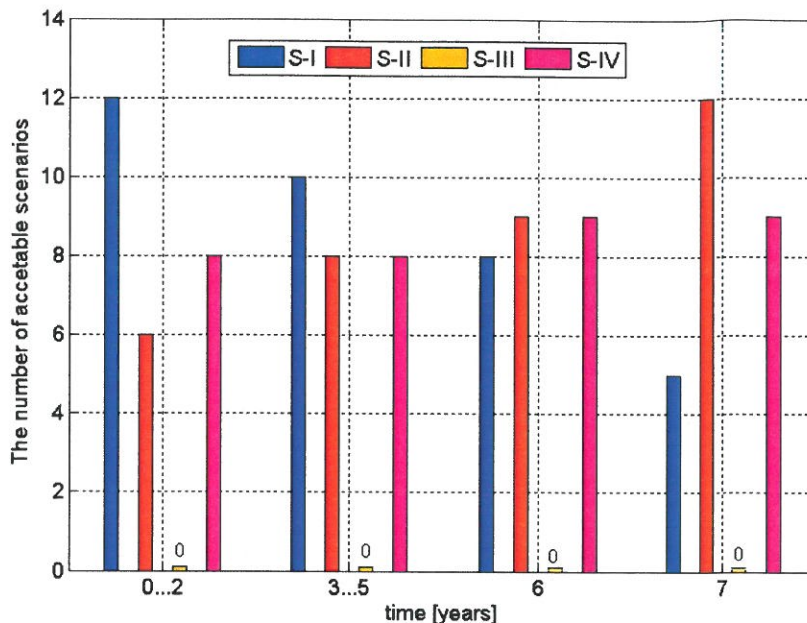
Kryteria	Porównywane scenariusze							
	S-I		S-II		S-III		S-IV	
	rok_0	rok_7	rok_0	rok_7	rok_0	rok_7	rok_0	rok_7
k <sub>1</sub> [Nm <sup>3</sup> /kWh]	0.119	0.231	0.090	0.165	0.072	0.131	0.047	0.083
k <sub>2</sub> [PLN/kWh]	1.300	1.417	1.320	1.420	1.331	1.437	1.454	1.549
k <sub>3</sub> [kgCO <sub>2</sub> /kWh]	0.310	0.447	0.415	0.508	0.528	0.601	0.627	0.671
k <sub>4</sub> [kWh/kWh]	1.000		1.079		1.125		1.159	

gdzie: k<sub>1</sub> – kryterium energetyczne, k<sub>2</sub> – kryterium ekonomiczne, k<sub>3</sub> – kryterium środowiskowe, k<sub>4</sub> – kryterium systemowe.

Mechanizm starzeniowy opisany w [BC-3] skutkuje coraz mniejszą produkcją wodoru w rozpatrywanym okresie czasu eksploatacji oraz coraz większym zapotrzebowaniem na wodór dodatkowy. W wyniku wzrostu wartości kryterium energetycznego k<sub>1</sub> rosną również koszty eksploatacyjne, co w konsekwencji zwiększa jednostkowy koszt produkcji 1 kWh energii przez HSW – wartość kryterium k<sub>2</sub> wzrasta. Zwiększenie zużycia wodoru dodatkowego obciążonego emisją CO<sub>2</sub> w procesie produkcji spowoduje, że wartość kryterium k<sub>3</sub> również będzie wzrastać. Wartość kryterium k<sub>4</sub> zależy od kształtu profilu energetycznego odbiorcy, dlatego zmiana charakterystyk eksploatacyjnych urządzeń nie wpływa na jego wartość.

Wynikiem wielowariantowej analizy jest szereg scenariuszy dla każdego przypadku stosunku wag kryteriów decyzyjnych w kolejności od scenariusza akceptowalnego do scenariusza najbardziej oddalonego od tzw. punktu idealnego. Badanie wpływu wag kryteriów decyzyjnych na wynik analizy wielokryterialnej przeprowadzono dla wariantu, w którym wszystkim kryteriom przypisano taką samą wartość wagi równą 25%. Następnie badano wpływ podwójnego i potrójnego przeważenia danego kryterium oraz wpływ podwójnego i potrójnego przeważenia par kryteriów k<sub>1</sub> i k<sub>2</sub> oraz k<sub>3</sub> i k<sub>4</sub> w stosunku do pozostałych na wyniki analizy wielokryterialnej. Szczegółowe analizy i opisy uzyskanych wyników znajdują się w [BC-4].

Na rysunku 14 przedstawiono scenariusze, które dla zadanego rozkładu wag, są uznawane jako akceptowalne w kolejnych okresach czasowych.



Rys. 14. Wyniki wielowariantowej analizy rozdziału obciążeń z uwzględnieniem spadku wydajności instalacji fotowoltaicznej oraz spadku sprawności ogniwa paliwowego i elektrolizera

W pierwszych trzech latach eksploatacji nie obserwuje się wpływu spadku wydajności urządzeń HSW na wynik końcowy wielowariantowej analizy rozdziału obciążeń. Najczęściej wskazywanym scenariuszem jest scenariusz SI, w którym system elektroenergetyczny pokrywa podstawę obciążenia, natomiast reszta zapotrzebowania jest pokrywana przez HSW. Spośród wszystkich akceptowalnych rozwiązań, scenariusz SI jest wskazywany jako najkorzystniejszy 12 razy, podczas gdy scenariusz SII jest wskazywany 6-cioкратно. Uwzględnianie zmiany wartości kryteriów decyzyjnych prowadzi do tego, że po siedmiu latach eksploatacji scenariusz SII wypiera scenariusz SI i zostaje, w świetle przyjętych kryteriów i ich wag, wariantem najkorzystniejszym. Analiza po siódmym roku eksploatacji wykazuje, że z grupy akceptowalnych rozwiązań, scenariusz SII jest wskazywany 12 razy natomiast SI jest wskazywany 5-cioкратно. Oznacza to, że po siedmiu latach, odbiorca będzie pobierał więcej energii z systemu elektroenergetycznego opartego na źródłach konwencjonalnych niż ze źródła hybrydowego opartego na źródłach odnawialnych.

Otrzymane na podstawie badań symulacyjnych wyniki potwierdziły tezę, że uwzględnienie starzenia się elementów HSW ma wpływ na wynik końcowy wielowariantowej analizy rozdziału obciążeń między HSW a system elektroenergetyczny po długim czasie eksploatacji. Analizy wykazały, że po siódmym roku eksploatacji najbardziej preferowanym scenariuszem jest scenariusz SII, który wyparł scenariusz SI.

**Istotnym osiągnięciem autora jest wykazanie, że zmiana wartości wskaźników energetycznych, ekonomicznych, środowiskowych związana ze spadkiem wydajności urządzeń HSW wpływa na wynik końcowy wielowariantowej analizy rozdziału obciążeń**



**między system elektroenergetyczny a hybrydowy system wytwórczy, szczególnie, że wielu badaczy, w dobie rozwoju OZE, często stosuje wielowariantowe analizy do porównywania pracy różnych struktur tego typu układów generacji energii elektrycznej.**

W przypadku hybrydowych systemów wytwórczych zintegrowanych z magazynowaniem energii w postaci wodoru jednym z ważnych elementów wpływających na wydajność systemu jest praca elektrolizera, w którym zachodzi proces konwersji energii elektrycznej na energię chemiczną w postaci wodoru. Fragment układu hybrydowego systemu wytwórczego, takiego jak źródło OZE - elektrolizer, przeznaczony do produkcji wodoru, jest w literaturze kwalifikowany jako technologia „Power to Gas” oznaczana skrótem P2G. Wykorzystanie elektrolizerów m.in. w układach P2G umożliwia zagospodarowanie nadwyżek energii pochodzącej z OZE i elektrowni systemowych oraz pozwala na integrację systemu gazowego z systemem elektroenergetycznym. Przyczynia się zatem do optymalizacji całego systemu energetycznego z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii.

W literaturze najczęściej rozpatrywane są układy, w których elektrolizer jest zasilany przez instalację fotowoltaiczną. Prowadzone badania naukowe skupiają się głównie na optymalizacji struktury układu PV-elektrolizer i minimalizacji kosztów produkcji wodoru. Jest to uzasadnione, ponieważ proces produkcji wodoru w tej technologii charakteryzuje się najwyższymi kosztami produkcji. Z drugiej strony rozwiązanie to ma duży potencjał redukcji emisji CO<sub>2</sub>. Mając na uwadze rozwój sektora transportu opartego na wodrze oraz postępującą decentralizację struktury produkcji energii elektrycznej należy prognozować, że zapotrzebowanie na czysty wodór będzie rosło.

W literaturze naukowej brakuje analiz długoterminowych, np. na okres 10 lat, które, dzięki uwzględnieniu spadku wydajności instalacji PV i elektrolizera, pozwoliłyby określić koszt produkcji wodoru po „n” latach eksploatacji. Prowadzone procesy optymalizacji są realizowane dla pierwszego roku eksploatacji systemu produkcji czystego, zielonego wodoru. W pracach nie jest uwzględniany spadek wydajności procesu produkcji wodoru.

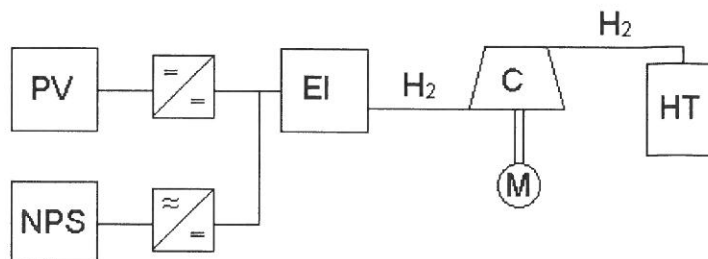
**W pracy [BC-2] autor, dzięki zastosowaniu autorskiego modelu przeznaczonego do spadku wydajności elektrolizera, wykazał wpływ jego degradacji i instalacji PV na wynik końcowy wielokryterialnej analizy porównawczej scenariuszy produkcji wodoru.**

Wielokryterialnej analizie porównawczej poddano następujące warianty produkcji 1 mln ton zielonego wodoru rocznie:

- V1 – 100% energii elektrycznej przeznaczonej do zasilania elektrolizerów jest dostarczane z systemu elektroenergetycznego,
- V2 – 25% energii elektrycznej przeznaczonej do zasilania elektrolizerów jest dostarczanych z instalacji PV, natomiast 75% zapotrzebowania jest pokrywane z systemu elektroenergetycznego,
- V3 – 50% energii elektrycznej przeznaczonej do zasilania elektrolizerów jest dostarczane z instalacji PV a pozostałe 50% zapotrzebowania jest pokrywane z systemu elektroenergetycznego,

- V4 – 75% energii elektrycznej przeznaczonej do zasilania elektrolizerów jest dostarczanych z instalacji PV, natomiast 25% zapotrzebowania jest pokrywane z systemu elektroenergetycznego,
- V5 – 100% energii elektrycznej przeznaczonej do zasilania elektrolizerów jest dostarczanych z instalacji PV („n” farm PV o mocy 1 MW<sub>P</sub>).

Schemat blokowy rozpatrywanego układu przedstawiono na rysunku 15.



Rys. 15. PV – instalacje PV, NPS – krajowy system elektroenergetyczny, EI – elektrolizer, C – kompresor, HT – zbiornik wodoru, M – silnik napędzający kompresor

W celu porównania wyżej wymienionych wariantów autor zdefiniował 3 kryteria porównawcze:

$$k_1 = P_{EL} \cdot m_{H_2}^{-1} [\text{kW} \cdot \text{kg}_{H_2}^{-1}] \quad (21)$$

$$k_2 = K_e \cdot m_{H_2}^{-1} [\text{PLN} \cdot \text{kg}_{H_2}^{-1}] \quad (22)$$

$$k_3 = m_{CO_2} \cdot m_{H_2}^{-1} [\text{kg}_{CO_2} \cdot \text{kg}_{H_2}^{-1}] \quad (23)$$

gdzie:  $k_1$  – kryterium energetyczne,  $k_2$  – kryterium ekonomiczne,  $k_3$  – kryterium środowiskowe,  $P_{EL}$  – moc elektryczna elektrolizera,  $m_{H_2}$  – masa wyprodukowanego wodoru,  $K_e$  – koszty eksploatacyjne związane z produkcją wodoru,  $m_{CO_2}$  – masa wyemitowanego  $CO_2$ .

Wartości wyznaczonych wskaźników decyzyjnych przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wartości kryteriów decyzyjnych

Kryteria decyzyjne	Warianty produkcji wodoru				
	V1	V2	V3	V4	V5
$k_1$ [kW/kgH <sub>2</sub> ]	0.0094	0.0235	0.0375	0.0516	0.0657
$k_2$ [PLN/kgH <sub>2</sub> ]	41.030	64.500	87.960	111.43	136.21
$k_3$ [kgCO <sub>2</sub> /kgH <sub>2</sub> ]	50.240	37.680	25.120	12.560	0

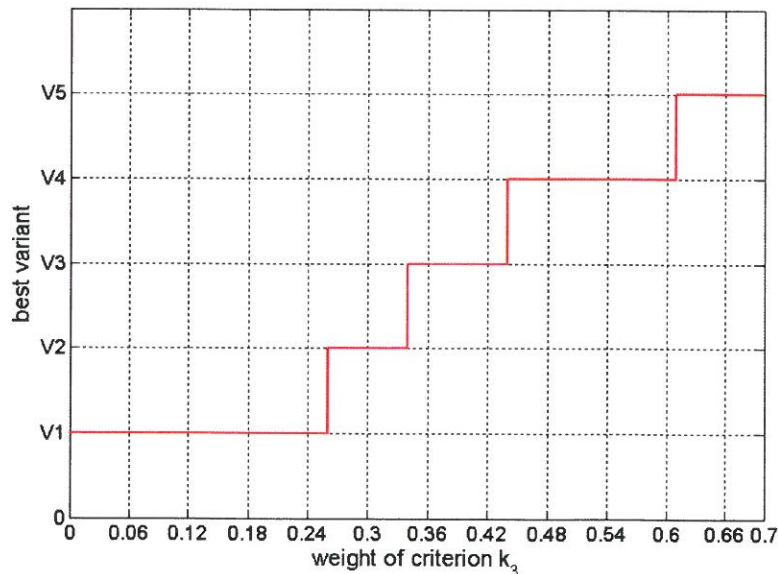
Uwzględniając spadek wydajności elektrolizerów, w oparciu o autorski model wyznaczania spadku wydajności elektrolizera, we wszystkich rozpatrywanych scenariuszach oraz spadek wydajności instalacji PV, w oparciu o dane katalogowe, w scenariuszach V2-V5 autor wyznaczył zmiany kryteriów decyzyjnych dla wszystkich wariantów (tabela 4).

Tabela 4. Wpływ spadku wydajności elektrolizerów i farm PV na wartości kryteriów decyzyjnych

kryteria	Warianty produkcji wodoru									
	V1		V2		V3		V4		V5	
	rok_0	rok_10	rok_0	rok_10	rok_0	rok_10	rok_0	rok_10	rok_0	rok_10
k <sub>1</sub>	0.0094	0.0094	0.0235	0.0249	0.0375	0.0423	0.0516	0.0622	0.0657	0.0849
Δk <sub>1</sub>	0		+0.0014		+0.0048		+0.0106		+0.0192	
k <sub>2</sub>	41.030	55.39	64.500	79.78	87.960	107.29	111.43	138.55	136.21	176.09
Δk <sub>2</sub>	+14.36		+15.28		+19.33		+27.12		+39.88	
k <sub>3</sub>	50.240	59.1	37.680	44.33	25.120	29.55	12.560	14.78	0	0
Δk <sub>3</sub>	+8.86		+6.65		+4.43		+2.22		0	

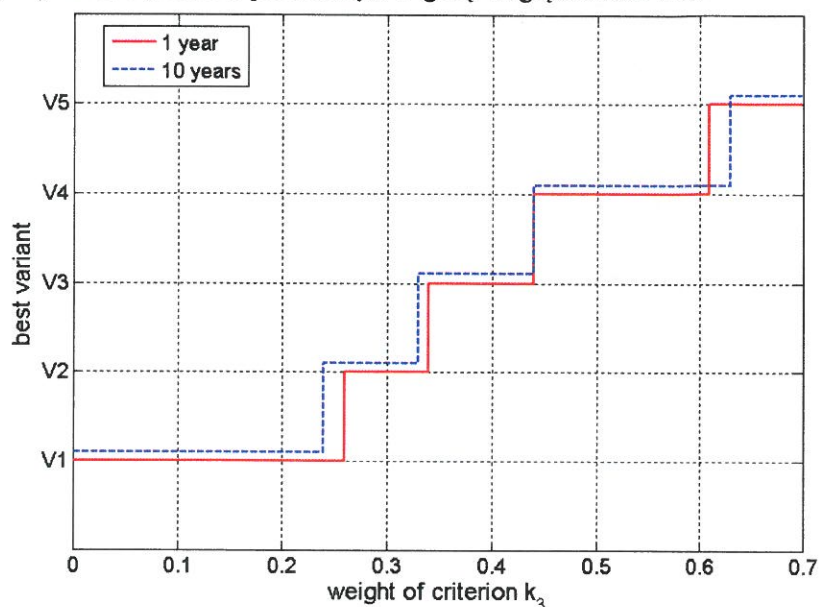
Szczegółowa interpretacja i opis wyników przedstawionych w tabelach 1 i 2 został zawarty w pracy [BC-2].

Głównym, celem prowadzonych badań symulacyjnych było określenie granicznej wartości wagi kryterium środowiskowego, dla którego scenariusz V5 jest uważany za najlepszy wariant produkcji wodoru w okresie planowanej eksploatacji systemu równej 10 lat. Badania przeprowadzono zwiększając wagę kryterium środowiskowego od 0.00 do 0.70 z krokiem co 0.01. Dla przyjętej wartości ważenia kryterium k<sub>3</sub> wagi kryteriów k<sub>1</sub> i k<sub>2</sub> były równe, a ich suma stanowiła uzupełnienie do 100%. Przeprowadzone symulacje pozwoliły na wyznaczenie przedziałów wartości wag dla kryterium środowiskowego, dla których dany wariant został wskazany jako najlepszy (rysunek 16).



Rys. 16. Wpływ wartości wagi kryterium środowiskowego na wynik wielowariantowej analizy porównawczej

Mimo przekroczenia wartości wagi kryterium  $k_3$  równej 50% wariant V5 nadal nie jest uznawany za najlepszy. Graniczna wartość wagi kryterium  $k_3$ , dla której następuje wskazanie wariantu V5 jako najlepszego wynosi 61%. Aby scenariusz V5 był uznany za najlepszy waga kryterium środowiskowego musi być ponad 3-krotnie większa od równomiernie rozłożonych wag na pozostałe kryteria. Uwzględniając spadek wydajności urządzeń związany z zachodzącymi procesami starzeniowymi, przeprowadzono symulacje dla wartości kryteriów po 10-ciu latach eksploatacji. Wyniki przedstawiono na rysunku 17. Linia niebieska (przerywana), w celu lepszej czytelności, została przesunięta w górę względem osi OY.



Rys. 17. Efekt uwzględnienia starzenia się paneli PV i elektrolizerów na wyniki symulacji

Analizując wpływ starzenia się można stwierdzić, że zmiana wartości kryteriów wpływa niejednoznacznie na wartości graniczne wag. W przypadku przedziału wartości wag preferującego wariant V1 wartość graniczna wagi spadła do 24%. Natomiast górna graniczna wartość wagi dla której preferowanym wariantem jest wariant V2 spadła do 33%. Jest to związane ze spadkiem wydajności elektrolizerów, który pociąga za sobą wzrost zużycia energii elektrycznej oraz wzrost emisji  $CO_2$ . W efekcie wprowadzanie PV do produkcji wodoru staje się bardziej atrakcyjne już dla mniejszej wartości wagi kryterium środowiskowego  $k_3$ .

Wzrost emisji  $CO_2$  ma mniejszy lub zerowy wpływ na rozkład wartości wag kryteriów dla wariantów IV i V. W tych scenariuszach redukcja emisji  $CO_2$  w procesie produkcji wodoru jest obciążona dużym wzrostem jednostkowych kosztów produkcji wodoru. W wariantach V4 i V5 efekt  $CO_2$  nie ma znaczenia, ponieważ wartość kryterium środowiskowego  $k_3$  wynosi 0. Dlatego graniczna wartość wagi kryterium przesuwają się w prawo, wzrastając o 2 punkty procentowe. Wariant V5 staje się atrakcyjnym rozwiązaniem dla wartości wagi kryterium środowiskowego równej 63%. Pozostałe kryteria mają wtedy wagi równe 18.5%.

Istotnym osiągnięciem autora jest wykazanie zasadności uwzględniania spadku wydajności elektrolizerów i modułów PV w prowadzeniu wielowariantowych analiz porównawczych scenariuszy produkcji zielonego wodoru w procesie elektrolizy. Proponowana metoda może znaleźć zastosowanie jako narzędzie do przeprowadzania analizy studium wykonalności układu PV-El, na podstawie której inwestor będzie w stanie dokładniej ocenić ryzyko związane z danym przedsięwzięciem, urzeczywistniając szacunki techniczno-finansowe. Analizy scenariuszy produkcji czystego, zielonego wodoru w procesie elektrolizy z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii, aby w pełni opisywały wszystkie aspekty procesu produkcji, powinny być rozpatrywane wielokryterialnie z uwzględnieniem efektu spadku wydajności urządzeń związanych z ich wieloletnią eksploatacją.

#### 4.3.4. Podsumowanie

Przedstawiony cykl publikacji obejmuje 5 prac dotyczących procesów modelowania i prowadzenia analizy energetycznej pracy poszczególnych komponentów hybrydowych systemów wytwórczych (elektrolizery, ogniwa paliwowe), jak i pracy hybrydowych systemów wytwórczych PV-magazyn energii z uwzględnieniem spadku ich wydajności po latach eksploatacji. Autor koncentrował się na rozbudowaniu istniejących modeli matematycznych przeznaczonych do analiz energetycznych pracy hybrydowych systemów wytwórczych, które zawierają źródło fotowoltaiczne oraz magazyn energii, o algorytmy uwzględniające spadek wydajności poszczególnych komponentów, aby urzeczywistnić wyniki analiz energetycznych.

Do najważniejszych osiągnięć w głównym nurcie badań autora wniosku zalicza się:

- opracowanie i zweryfikowanie metody wyznaczania spadku wydajności stosu ogniw paliwowych typu PEM,
- opracowanie metody wyznaczania spadku wydajności elektrolizera typu PEM oraz wykazanie zasadności uwzględniania spadku wydajności elektrolizerów w prowadzeniu wielowariantowej analizy porównawczej scenariuszy produkcji czystego wodoru,
- opracowanie modelu przeznaczonego do kompleksowej analizy hybrydowego systemu wytwórczego o strukturze źródło fotowoltaiczne - magazyn energii w postaci wodoru z uwzględnieniem spadku wydajności systemu po latach eksploatacji oraz wykazanie zasadności stosowania proponowanego podejścia w celu aktualizacji wartości wskaźników eksploatacyjnych,
- zaimplementowanie autorskiego algorytmu analizy pracy hybrydowego systemu wytwórczego do modelu przeznaczonego do przeprowadzenia wielowariantowej analizy porównawczej scenariuszy współpracy hybrydowego systemu wytwórczego PV/WT/FC z systemem elektroenergetycznym i wykazanie wpływu starzenia się komponentów instalacji PV, elektrolizera i ogniwa paliwowego na zmianę otrzymanego wyniku końcowego (zmiana preferowanego scenariusza pracy w świetle przyjętych kryteriów),

- opracowanie metody doboru składu urządzeń systemu PV-Bat do odbiorcy o określonym profilu energetycznym oraz przeprowadzenie analizy pracy systemu w perspektywie długoterminowej z uwzględnieniem spadku wydajności komponentów,

Zastosowanie zaproponowanych przez autora metod pozwoli na dokładniejsze, kompleksowe planowanie współpracy rozproszonych źródeł wytwórczych zintegrowanych z technologią magazynowania energii w obszarze np. mikrosieci czy klastra energetycznego w perspektywie ich wieloletniej eksploatacji. Modelowanie pracy hybrydowych źródeł wytwórczych lub ich komponentów (szczególnie elektrochemicznych) z uwzględnieniem efektu starzenia się stanowi, zdaniem autora, nowy kierunek rozwoju obszaru badawczego należącego do dyscypliny „Inżynieria środowiska, Górnictwo i Energetyka” jakim jest generacja rozproszona.

Poniższa tabela podsumowuje wkład merytoryczny oraz udział procentowy habilitanta w artykułach związanych z modelowaniem i analizą pracy hybrydowych systemów wytwórczych z uwzględnieniem spadku wydajności komponentów (panele fotowoltaiczne, elektrolizery, stopy ogniw paliwowych, akumulatory) w szerokim horyzoncie czasowym.

symbol pracy	wkład merytoryczny habilitanta w powstaniu pracy	udział % habilitanta
[BC-1]	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ opracowanie hipotezy badawczej oraz koncepcji pracy;</li> <li>➤ opracowanie metody wyznaczania szybkości spadku wydajności stosu ogniw paliwowych typu PEMFC na podstawie przesunięcia charakterystyki napięciowo-prądowej;</li> <li>➤ zaimplementowanie opracowanej metody w środowisku Matlab;</li> <li>➤ przeprowadzenie symulacji w celu wyznaczenia wskaźników eksploatacyjnych dla stosu ogniw paliwowych o mocy 50 kW;</li> <li>➤ przeprowadzenie weryfikacji opracowanej metody w oparciu o wyniki pomiarów przeprowadzonych na stosie ogniw paliwowych 1,2 kW należącym do systemu treningowego NEXA;</li> <li>➤ przygotowanie angielskiej wersji językowej artykułu;</li> </ul>	80 %
[BC-2]	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ opracowanie hipotezy badawczej oraz koncepcji pracy;</li> <li>➤ opracowanie metody wyznaczenia spadku wydajności elektrolizera typu PEM na podstawie metody opisanej w pracy BC-1;</li> <li>➤ przeprowadzenie wielowariantowej analizy porównawczej 5-ciu scenariuszy produkcji wodoru w procesie elektrolizy z uwzględnieniem spadku wydajności elektrolizera PEM i instalacji PV po latach eksploatacji;</li> <li>➤ zaimplementowanie opracowanej metody w środowisku Matlab;</li> <li>➤ przygotowanie angielskiej wersji językowej artykułu;</li> </ul>	100%

[BC-3]	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ opracowanie hipotezy badawczej oraz koncepcji pracy;</li> <li>➤ opracowanie metody analizy pracy hybrydowego systemu wytwórczego PV-EI-FC z uwzględnieniem spadku wydajności związanego ze starzeniem się wszystkich urządzeń systemu;</li> <li>➤ zaimplementowanie opracowanej metody w środowisku Matlab;</li> <li>➤ przeprowadzenie symulacji w celu wyznaczenia rocznych zmian generacji i konsumpcji energii elektrycznej przez poszczególne urządzenia systemu PV-EI-FC;</li> <li>➤ przeprowadzenie symulacji w celu wyznaczenia rocznego przyrostu zapotrzebowania na wodór dodatkowy;</li> <li>➤ wyznaczenie wartości wskaźników eksploatacyjnych elektrolizera, stosu ogniw paliwowych oraz całego hybrydowego systemu wytwórczego;</li> <li>➤ przygotowanie rozdziałów 2.1, 2.2, 2.3, 2.5, 3, 4,5;</li> </ul>	60 %
[BC-4]	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ opracowanie hipotezy badawczej oraz koncepcji pracy;</li> <li>➤ rozbudowanie modelu przeznaczonego do wielowariantowej analizy rozdziału obciążeń między hybrydowy system wytwórczy PV/WT/FC a system elektroenergetyczny o algorytmy przeznaczone do wyznaczania spadku wydajności elektrochemicznych przetworników energii elektrycznej opisanych w pracach [BC-1] i [BC-2];</li> <li>➤ analiza wpływu spadku wydajności elektrolizera, ogniwa paliwowego, instalacji fotowoltaicznej na wartości kryteriów decyzyjnych i wynik końcowy wielowariantowej analizy rozdziału obciążeń;</li> <li>➤ opracowanie rozdziałów 2,3,4,5,6;</li> </ul>	90 %
[BC-5]	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ opracowanie hipotezy badawczej oraz koncepcji pracy;</li> <li>➤ opracowanie metody analizy energetycznej pracy systemu PV-BAT w okresie wieloletniej eksploatacji z uwzględnieniem wpływu degradacji urządzeń układu;</li> <li>➤ opracowanie charakterystyki starzeniowej baterii litowo-jonowej;</li> <li>➤ przygotowanie korekty językowej artykułu;</li> <li>➤ współpracowanie treści rozdziałów „Methods and data”, „Results and discussion”, „Conclusion”;</li> </ul>	45 %

#### **4.4. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych (okres po uzyskaniu stopnia naukowego doktora)**

##### **4.4.1. Koncepcja wykorzystania układu hybrydowego PV/WT/FC do wygładzania profilu energetycznego odbiorcy**

Bartosz Ceran „The concept of use of PV/WT/FC hybrid power generation system for smoothing the energy profile of the consumer”, Energy 2019, vol. 167, s. 853-865, **IF:6.082, Punkty MEiN:200**

W pracy autor przeanalizował pracę hybrydowego systemu wytwórczego składającego się z elektrowni wiatrowych, paneli fotowoltaicznych oraz magazynu energii elektrolizer-ogniwo paliwowe. Przeprowadzona została wielowariantowa analiza porównawcza scenariuszy zasilania odbiorcy przez rozpatrywany hybrydowy system wytwórczy i system elektroenergetyczny.

W stosunku do modelu opisanego w rozprawie doktorskiej „Ogniwa paliwowe w systemach rozproszonego wytwarzania energii elektrycznej”, model opisany w tym artykule został rozbudowany o możliwość prowadzenia analizy wpływu zmiany rozkładu wietrzności i nasłonecznienia na końcowe wyniki analizy rozdziału obciążeń między hybrydowy system wytwórczy a system elektroenergetyczny.

Opisane w artykule wyniki badań stanowiły podstawę do rozpoczęcia prac nad nowym zagadnieniem badawczym, czyli prowadzeniem analiz techniczno-ekonomicznych pracy hybrydowych systemów wytwórczych w okresie wieloletnim z uwzględnieniem spadku wydajności urządzeń.

##### **4.4.2. Analiza energetyczna pracy małych elektrowni wodnych**

Bartosz Ceran, Jakub Jurasz, Robert Wróblewski, Adam Guderski, Daria Złotecka, Łukasz Kaźmierczak, „Impact of the Minimum Head on Low-Head Hydropower Plants Energy Production and Profitability”, Energies 2020, 13(24), 6728, doi:10.3390/en13246728, **IF:3.004, Punkty MEiN:140**

Głównym celem artykułu było porównanie dwóch technologii niskospadowych, turbiny Archimedesesa oraz turbiny rurowej Kaplana ze szczególnym uwzględnieniem wpływu minimalnego spadku na roczną produkcję energii elektrycznej na terenie Polski. W tym celu autorzy opracowali model matematyczny, który posłużył do symulacji uzysku energetycznego z turbin Archimedesesa i Kaplana, dla danej wartości minimalnego spadku, w zależności od liczby zainstalowanych hydrozespołów. Dla celów analizy ekonomicznej obliczono wskaźniki uśrednionego kosztu energii elektrycznej (LCOE) oraz wartości bieżącej netto (NPV). Przeprowadzone badania pozwoliły na porównanie warunków pracy turbin Archimedesesa



i Kaplana oraz tego, jak minimalny spadek wpływa na produkcję energii elektrycznej. Jak stwierdzono w wynikach, wpływ minimalnego spadku na produkcję energii jest bardziej wyraźny dla technologii śrub Archimedesa niż dla turbiny Kaplana.

#### **4.4.3. Analiza możliwości wykorzystania instalacji PV do lokalnego i krajowego ograniczenia obciążenia szczytowego w Polsce**

Bartosz Ceran, Jakub Jurasz, Agata Mielcarek, Pietro E. Campana, „PV systems integrated with commercial buildings for local and national peak load shaving in Poland”, *Journal of Cleaner Production*, IF:9.297, Punkty MEiN:140

W pracy przeanalizowano możliwość wykorzystania paneli PV do zmniejszenia zapotrzebowania na energię elektryczną w okresach szczytowych. Takie działanie, potocznie nazywane „peak shaving”, ma duże znaczenie dla funkcjonowania Krajowego Systemu Elektroenergetycznego z punktu widzenia stabilności pracy systemu elektroenergetycznego.

Tematyka artykułu koncentruje się na zagadnieniu ogólnopolskiego potencjału redukcji szczytów przez instalacje PV w budynkach biurowych w Polsce. Zakłada się, że sektor ten może odegrać znaczącą rolę w zmniejszaniu zapotrzebowania na moc szczytową na dużą skalę. Modelowanie obciążenia biurowca przeprowadzono z wykorzystaniem Sztucznej Sieci Neuronowej. W przeprowadzonych badaniach uwzględniono różne konfiguracje nachylenia i orientacji modułów fotowoltaicznych, a także przebadano wpływ spadku wydajności paneli PV po kolejnych latach pracy na efekt zmniejszania zapotrzebowania w szczytowych okresach obciążenia.

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

Wykaz prac powstałych w wyniku prowadzenia badań naukowych w więcej niż jednej jednostce naukowej:

- Współpraca naukowa z Akademią Górniczą Hutniczą.

Współpraca z Wydziałem Energetyki i Paliw Akademii Górniczo-Hutniczej została rozpoczęta w 2017 roku. W roku tym powstała publikacja: Bartosz Ceran<sup>1)</sup>, Qusay Hassan<sup>2)</sup>, Marek Jaszczur<sup>2)</sup>, Krzysztof Sroka<sup>1)</sup>, „An analysis of hybrid power generation systems for a residential load”, *Energy and Fuels Conference*, 21-23.08.2016, Krakow, Poland, E3S Web of Conferences - 2017, vol. 14, doi: 10.1051/e3sconf/20171401020 (<sup>1)</sup>Politechnika Poznańska, <sup>2)</sup>Akademia Górniczo-Hutnicza).

W 2021 roku, w ramach wyżej wymienionej współpracy naukowej powstała wspólna publikacja: Bartosz Ceran<sup>1)</sup>, Agata Mielcarek<sup>1)</sup>, Qusay Hassan, Janusz Teneta<sup>2)</sup>, Marek Jaszczur<sup>2)</sup>,

„Aging effects on modelling and operation of photovoltaic system with hydrogen storage”, Applied Energy - 2021, vol. 297, s. 117161-1-117161-18, doi:10.1016/j.apenergy.2021.117161 (1)Politechnika Poznańska, 2)Akademia Górniczo-Hutnicza).

- Współpraca naukowa z Politechniką Wrocławską.

Współpraca naukowa z Zakładem Kotłów, Spalania i Procesów Energetycznych, Wydziału Mechaniczno-Energetycznego Politechniki Wrocławskiej rozpoczęła się w 2014 roku. W owym roku autor wniosku odbywał na wyżej wymienionej uczelni staż naukowy.

W 2016 roku powstała publikacja: Bartosz Ceran<sup>1)</sup>, Jakub Długosz<sup>2)</sup>, Halina Kruczek-Pawlak<sup>2)</sup>, „Analiza energetyczna systemu ogniw paliwowych z jonowymienną membraną polimerową PEMFC”, Computer Applications in Electrical Engineering 2016, 18-19.04.2016, Poznan, Poland, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering - 2016, Issue 86, s. 301-312 (1)Politechnika Poznańska, 2)Politechnika Wroclawska).

W 2020 roku, w ramach wyżej wymienionej współpracy powstała publikacja: Bartosz Ceran<sup>1)</sup>, Agata Orłowska<sup>1)</sup>, Krystian Krochmalny<sup>2)</sup> „The method of determining PEMFC fuel cell stack performance decrease rate based on the voltage-current characteristic shift” Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2020; 22(3), doi:10.17531/ein.2020.3.16 (1)Politechnika Poznańska, 2)Politechnika Wroclawska).

## 6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę

### OSIĄGNIĘCIA DYDAKTYCZNE

- Promotor 15 prac magisterskich, w tym 6 na kierunku Energetyka, 9 na kierunku Elektrotechnika,
- Promotor 20 prac inżynierskich, w tym 15 na kierunku Energetyka i 5 na kierunku Elektrotechnika,
- Promotor prac dyplomowych, które uzyskały następujące nagrody i wyróżnienia w konkursie organizowanym przez firmę Veolia Energia Polska S.A. oraz Politechnikę Poznańską:
  - Paweł Szuber, I miejsce w konkursie na najlepszą pracę inżynierską dla studentów Politechniki Poznańskiej 2019, praca pt. „Analiza energetyczna kogeneracyjnego układu gazowo-parowego”,
  - Łukasz Kaźmierczak, III miejsce w konkursie na najlepszą pracę inżynierską dla studentów Politechniki Poznańskiej 2018, praca pt. „Analiza kosztów wytwarzania energii elektrycznej przez hybrydowy system wytwórczy”,

- Prowadzenie zajęć laboratoryjnych dla uczniów klasy III Technikum Energetycznego im. Henryka Zygałskiego w Poznaniu w zawodzie technik-energetyk 05.11.2018–31.01.2019 oraz 06.11.2017–31.01.2018,

### OSIĄGNIĘCIA ORGANIZACYJNE

- Członek Rady Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki – od 1 stycznia 2020,
- Członek Uczelnianej Komisji Dyscyplinarnej dla Doktorantów – 2020– 2024,
- Opiekun Studenckiego koła naukowego "SKN Elektroenergetyka",
- Prezentacja kierunków Wydziału Elektrycznego w ramach Poznańskiego Dnia Elektryka, 24 maja 2018,
- Coroczne prezentowanie w ramach „Drzwi otwartych” Politechniki Poznańskiej laboratoriów technologii wytwarzania energii elektrycznej,
- Cykliczne prezentowanie laboratoriów dydaktycznych uczniom szkół średnich,
- Członek komitetu organizacyjnego konferencji „*Blackout a Krajowy System Elektroenergetyczny 2018*”, organizowanej przez Instytut Elektroenergetyki PP,

### OSIĄGNIĘCIA POPULARYZUJĄCE NAUKĘ

- Wykładowca „Akademii Wodorowej” od kwietnia 2021 – tytuł szkolenia: „Zasady bezpieczeństwa na instalacjach wodorowych”,
- Popularyzacja energetyki jądrowej wśród młodzieży w ramach projektu „Zorganizowanie i przeprowadzenie lekcji o energetyce i energii jądrowej w szkołach podstawowych i ponadpodstawowych na terenie całego kraju” realizowanego dla Ministerstwa Klimatu i Środowiska przez Fundację Instytut Zrównoważonej Energetyki.
  - Edycja 2021
    - Szkoła Podstawowa nr 1 im. Strajku Dzieci Koźmińskich 1906/1907 w Koźminie Wielkopolskim – 6h lekcyjnych,
    - Szkoła Podstawowa w Mokronosie – 4h lekcyjne,
    - Zespół Szkół Ponadpodstawowych im. Józefa Marcińca w Koźminie Wielkopolskim – 8h lekcyjnych,
    - Zespół Szkół Elektrycznych nr 2 w Poznaniu im. ks. Piotra Wawrzyniaka – 4h lekcyjne.

- Popularyzacja energetyki jądrowej wśród młodzieży w ramach projektu „100 lekcji o atomie – przeprowadzenie lekcji o energii jądrowej w szkołach podstawowych i ponadpodstawowych” realizowanego dla Ministerstwa Energii (obecnie Ministerstwo Klimatu i Środowiska) przez Fundację Instytut Zrównoważonej Energetyki, edycje 2017, 2018, 2019.
  - Edycja 2019
    - Szkoła Podstawowa nr 3 im. K. Makuszyńskiego w Koźminie Wielkopolskim – 4h lekcyjne,
    - Zespół Szkół im. Adama Wodzicki w Mosinie – 4h lekcyjne,
    - Zespół Szkół Łączności im. Mikołaja Kopernika w Poznaniu – 4h lekcyjne,
  - Edycja 2018
    - Szkoła Podstawowa nr 1 im. Strajku Dzieci Koźmińskich 1906/1907 w Koźminie Wielkopolskim – 8h lekcyjnych,
    - Szkoła Podstawowa nr 3 im. Z. Herberta we Wronkach – 4h lekcyjne,
    - Zespół Szkół Elektrycznych nr 2 w Poznaniu im. ks. Piotra Wawrzyniaka – 4h lekcyjne.
  - Edycja 2017
    - Technikum energetyczne im. Henryka Zygałskiego w Poznaniu – 4h lekcyjne.

## 7. Pozostałe informacje

- Promotor pomocniczy w dwóch przewodach doktorskich:
  1. mgr inż. Franciszek Sidorski – powołanie 19 marca 2019 r., Tytuł przygotowywanej rozprawy „Wykorzystanie odnawialnych źródeł oraz magazynów energii w stacjach ładowania autobusów elektrycznych”.
  2. mgr inż. Paweł Sokółski – powołanie 21 kwietnia 2021 r., Tematyka przygotowywanej rozprawy dotyczy kooperacyjnego sterowania turbozespołem elektrowni jądrowej w warunkach zmiennego obciążenia.

W ramach przygotowywanej rozprawy powstały wspólne publikacje wieloautorskie:

1. Sokółski P., Rutkowski T.A., **Ceran B.**, Horla D. (2021) Robustness Analysis of a Distributed MPC Control System of a Turbo-Generator Set of a Nuclear Plant – Disturbance Issues. In: Szewczyk R., Zieliński C., Kaliczyńska M. (eds) Automation 2021: Recent Achievements in Automation, Robotics and Measurement Techniques. AUTOMATION 2021. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1390. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-74893-7\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-74893-7_17)

2. Paweł Sokółski, Tomasz A. Rutkowski, **Bartosz Ceran**, Dariusz Horla, Daria Złotecka, „Power system stabilizer as a part of a generator MPC adaptive predictive control system”, Energies, **IF:3004, Punkty MEiN:140**

- Złożony projekt do NCN w ramach programu PRELUDIUM 20.  
Tytuł projektu: Model matematyczny niezależnego systemu wytwórczego energii elektrycznej, złożonego z instalacji fotowoltaicznej i magazynu energii w postaci akumulatorów elektrochemicznych, uwzględniający długoterminową niezawodność.  
Rola w projekcie: opiekun naukowy.  
Status: w recenzji.
- Autor wniosku bardzo prosi recenzentów, aby podczas przeprowadzania analizy jego dorobku w bazach SCOPUS i Web of Science posługiwali się w wyszukiwarce numerem ORCID – **0000-0003-0207-3193**. Prośba motywowana jest faktem, że baza Scopus błędnie przypisała jedną publikację autora wniosku do Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza. Wniosek o korektę tego błędu został zgłoszony niezwłocznie.

*Bartosz Ceran*

.....  
(podpis wnioskodawcy)