

## BILANSOWANIE ENERGII W MIKROINFRASTRUKTURZE PME

Jarosław Michalak<sup>1</sup>

### Wprowadzenie

Niniejsze opracowanie<sup>2</sup> przedstawia możliwości sterowania pracą odbiorników i zasobnika energii w prosumenckiej mikroinfrastrukturze energetycznej PME, zaprezentowanej w [Popczyk, Zygmantowski, Michalak, Kielan, Fice], dla potrzeb bilansowania energii. Celem bilansowania jest odpowiednie dopasowanie profilu mocy odbiorników do mocy dostarczanej ze źródeł OZE i zgromadzonej w zasobniku. Pozwala to na minimalizację kosztów energii oraz umożliwia przeprowadzenie doboru zasobnika do konkretnego obiektu. W niniejszym opracowaniu przeanalizowano konkretny przypadek profilu produkcji, natomiast pełny dobór zasobnika powinien uwzględniać różne profile produkcji występujące w ciągu roku. Analiza przeprowadzona została w oparciu o arbitralnie przyjęte strategie sterowania odbiornikami oraz stanowi studium konkretnego przypadku. Przy tworzeniu opracowania przygotowano odpowiednie narzędzia, które pozwalają na badanie różnych strategii sterowania odbiornikiem/zasobnikiem oraz na analizę różnych profili energii generowanej i użytkowanej.

### 1. Założenia

W analizie założono dostępność pomiarową 5 minutowych profili energii ze źródeł OZE i profili energii zużytkowanej przez odbiorniki. Na tej podstawie określone zostały profile mocy uśrednionej. Przykładowe profile obciążeń i produkcji energii można znaleźć w [Fice1],[Wójcicki]. Wśród odbiorników wydzielono następujące grupy: odbiory niezależne (na których pracę nie wpływa się), odbiorniki charakterystyczne (np. pralka, lodówka, zmywarka – uruchamiane na żądanie, w odpowiedniej chwili), odbiorniki sterowane o charakterze zasobnikowym (np. bojler, czy ogrzewanie podłogowe – uruchamiane przy nadwyżce energii) oraz odbiorniki o niskim priorytecie (np. ładowarki telefonów, radio, które przy niedoborze energii nie muszą być zasilane). Zakłada się, że podział odbiorników nie jest ostateczny i użytkownik może w każdej chwili zmienić przyporządkowanie odbiornika do danej grupy. Rozważa się pracę z taryfą dwustrefową rozliczania energii. W analizie nie skupia się na usługach z punktu widzenia operatora systemu/operatora wirtualnej wyspy [Popczyk], tylko na wewnętrznych usługach zarządzania odbiornikami i energią, przy założeniu jak najlepszego dostosowania profilu produkcji/obciążenia w punkcie przyłączenia instalacji PME do sieci do profilu zadanego. Do szacowania kosztu energii przyjęto, że energia sprzedawana jest za 0,12 PLN/kWh, kupowana w taryfie dziennej za 0,74 PLN/kWh (wraz z kosztami przesyłu), a w taryfie nocnej za 0,28 PLN/kWh. Koszt gromadzenia energii w zasobniku energii przyjęto na poziomie 0,33 PLN/kWh. Koszt ten wyznaczono z całkowitego kosztu zakupu zasobnika podzielonego przez maksymalne wykorzystanie energii zasobnika wynikające z 5000 cykli ładowania/rozładowania zasobnika od 100 % do

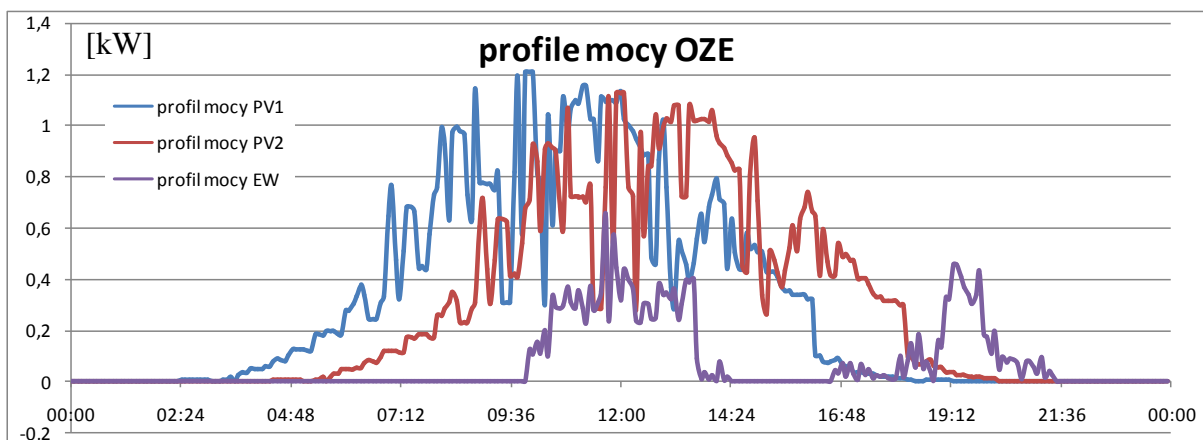
<sup>1</sup> dr inż. Jarosław Michalak – Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, Wydział Elektryczny, Politechnika Śląska.

<sup>2</sup> Opracowanie zostało wykonane w ramach Projektu badawczego „Rewitalizacja prosumenckich mikroinstalacji energoelektrycznych (REWIPROMIEN)”, realizowanego w ramach Programu GEKON – Generator Konceptji Ekologicznych, który jest wspólną inicjatywą Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (NFOŚiGW) oraz Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (NCBR). Wykonawcą Projektu jest Konsorcjum, w skład którego wchodzi: Euro Centrum – lider, Politechnika Śląska, Uniwersytet Zielonogórski i Akademia Górniczo Hutnicza.

20 % (80% DoD) [Fice2]. Przyjęto tu jako przykładowe rozwiązanie POWERWALL z akumulatorami litowo-jonowymi 10 kWh w cenie proponowanej przez Tesla Motors wynoszącej 3500 \$ [Powerwall].

## 2. Profil produkcji z OZE

W opracowaniu analizowany jest profil energii ze źródeł OZE obejmujący pracę trzech źródeł: dwóch łańcuchów paneli fotowoltaicznych, podłączonych do dwóch wejść z układami MPPT przekształtnika fotowoltaicznego (PV) oraz mikrogeneratorsa wiatrowego ( $\mu$ EW) z przekształtnikiem. Przedstawione profile produkcji energii pokazano na rysunku 1. Przesunięcie między generacją mocy z obu łańcuchów paneli fotowoltaicznych wynika z ich rozmieszczenia, co może np. wynikać z rozmieszczenia paneli na dachu dwuspadowym, jak to pokazano na rys. 2. Przy generacji energii z wiatru nastąpił okres pracy generatora od 10 do 14 oraz po godzinie 16. Łączna produkcja ze źródeł OZE wynosiła w analizowanym przypadku 15,81 kWh/dobę.



Rys. 1. Profile mocy ze źródeł OZE w analizowanym przypadku

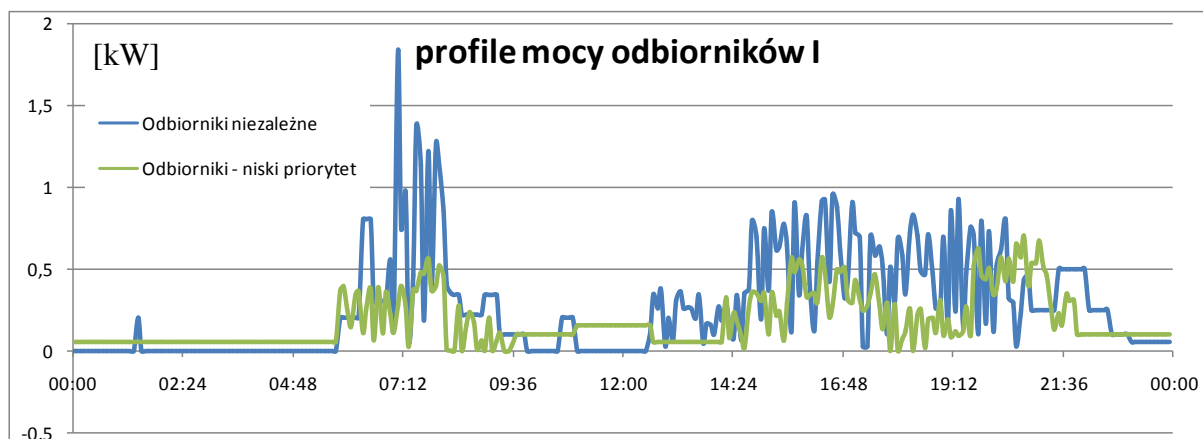


Rys. 2. Rozmieszczenie paneli na dachu dwuspadowym – zasoby internetowe [Internet]

### 3. Profile mocy odbiorników

W analizowanym przypadku na sumaryczny profil mocy odbiorników składa się pięć zasadniczych grup odbiorników, którym nadano różne priorytety (od priorytetu 1 – najwyższego, do priorytetu 5 – najniższego). Na rysunku 3 pokazane zostały odbiorniki niezależne (priorytet 1) i odbiorniki o najniższym priorytecie (5). Zostały one wyróżnione ze względu na fakt, że profile te są nieznaną funkcją czasu. Odbiorniki niezależne to wszystkie odbiorniki u prosumenta, których praca nie powinna być w żaden sposób zakłócana (poza sytuacjami braku energii w trybie off-grid). Do tego typu obciążeń zaliczyć można na przykład urządzenia niezbędne do codziennego użytkowania (typu oświetlenie, czy urządzenia kuchenne) oraz poprawiające jego komfort - przykładowo telewizja.

Drugą grupę (odbiorniki o niskim priorytecie) stanowią obciążenia w postaci np. zasilaczy urządzeń przenośnych, czy odbiorniki radiowe podczas wykonywania prac domowych. Wśród wszystkich grup odbiorników przyjęto, że odbiorniki o niskim priorytecie są odłączane jako pierwsze. Należy tu zaznaczyć, że o przyporządkowaniu urządzenia do danej grupy decyduje prosument, a zakładając, że urządzenia domowe wyposażone są w odpowiednie układy automatyki budynkowej, sterowanej przez sterownik nadrzędny interfejsu PME, możliwe jest zmiana priorytetu odbiorników. Na pokazanych na rysunku 3 profilach widoczny jest wzrost obciążenia poranny, związany z wyjściem domowników do pracy/szkoły oraz wzrost obciążenia popołudniowy, związany z typowym użytkowaniem odbiorników.



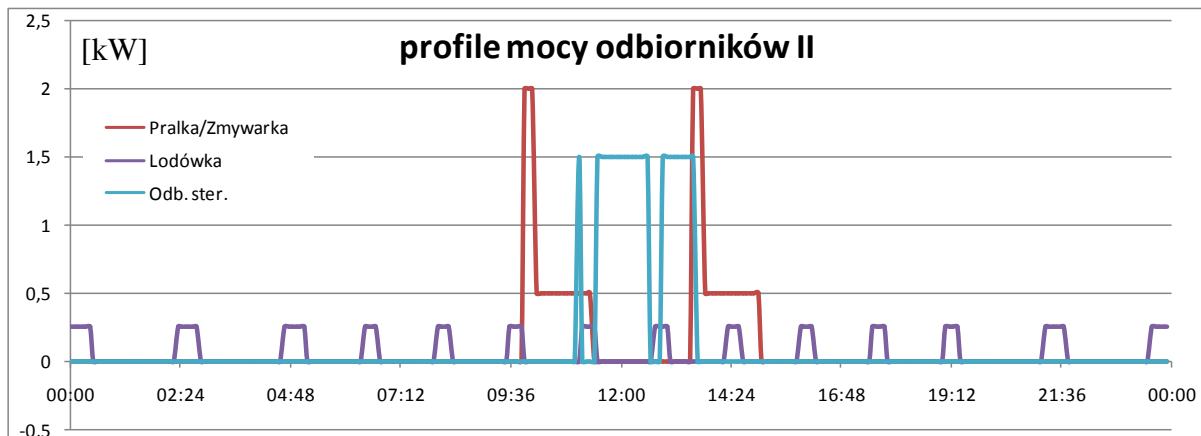
Rys. 3. Profile mocy dla odbiorników niezależnych (priorytet 1) i odbiorników o najniższym priorytecie (priorytet 5)

Na rys. 4 pokazano profile mocy dla odbiorników sterowanych, przy czym same strategie sterowania odbiornikami mogą być różne. Lodówce (zaznaczonej na rysunku 4 kolorem fioletowym) nadano najwyższy wśród odbiorników sterowanych priorytet (2). Dla tego odbiornika przyjęto możliwość sterowania „na żądanie” z dwoma sygnałami zależnymi od aktualnej temperatury. Założono przy tym wykorzystanie rozwiązania bazującego IoT [Wójcicki]. Szczegółowo strategię sterowania takim odbiornikiem opisano w dalszej części, natomiast typowa praca tego odbiornika polega na cyklicznym jego załączaniu przez czas wymagany do osiągnięcia określonej temperatury. Podobne sterowanie można zastosować dla klimatyzacji, przy czym w tym wypadku nie ma potrzeby, tak jak dla lodówki, bezwzględnego załączenia niezależnie od warunków energetycznych.

Kolorem czerwonym przedstawiono przebiegi mocy dla obciążeń typu pralka czy zmywarka, które mogą być kolejgowane i mają nadany priorytet (3). Dla tej grupy odbiorów użytkownik przygotowuje dane urządzenie do pracy i sygnalizuje potrzebę załączenia urządzenia w sterowniku interfejsu. Sterownik interfejsu PME analizuje aktualne,

ewentualnie przewiduje przyszłe warunki produkcji/użytkowania i gromadzenia energii i w oparciu o odpowiednią strategię sterowania załącza kolejne odbiorniki.

Niższy priorytet (4) wśród odbiorników sterowanych mają odbiorniki o charakterze zasobnikowym. Zaliczono do nich na przykład bojler czy elektryczne ogrzewanie podłogowe. Ze względu na zdolności akumulacji energii i właściwości izolacyjne w przypadku ogrzewaczy wody załącza się je przy nadwyżce mocy w dowolnej chwili. Bojler elektryczny wykorzystywany może być w każdym cyklu dobowym, ze względu na zużycie ciepłej wody, natomiast ogrzewanie podłogowe może być wykorzystane jako zasobnik ciepła w oparciu o prognozy pogody (głównie sezon wiosna/jesień). Przy niniejszej analizie zakłada się dodatkowo, że w ciągu doby odbiorniki te muszą pracować przez określony czas.



Rys. 4. Rozmieszczenie paneli na dachu dwuspadowym – zasoby internetowe [Internet]

#### 4. Sterowanie odbiornikami i zasobnikiem

W opracowaniu założono, że o załączeniu/wyłączeniu odbiornika decyduje analizowane na bieżąco zużycie energii przez odbiorniki, produkcja ze źródeł OZE, ilość energii w zasobniku oraz ewentualnie prognozy warunków pogodowych. Przyjęto tu profile uśrednione za 5 minut, natomiast w rzeczywistym układzie możliwe jest zastosowanie krótszych odcinków czasu (np. 1 minutowych). Należy zaznaczyć, że sterownik nadrzędny dołącza i odłącza odbiorniki głównie w oparciu o analizę profilu z poprzedniego okresu czasu. Odbiorniki o wyższym priorytecie modyfikują wewnętrzne profile zużycia/produkcji energii (w sterowniku nadrzędnym), co służy jako baza przy określaniu możliwości załączenia/odłączenia odbiornika o niższym priorytecie. Poniżej opisano przykładowe algorytmy sterowania odbiornikami z uwzględnieniem ich priorytetów.

**Priorytet 1 – odbiorniki niezależne:** odbiorniki niezależne stanowią grupę odbiorników na których pracę nie można wpływać. Z punktu widzenia bilansowania energii, należy je traktować jako zakłócenia, których działanie trzeba kompensować. Dla sterownika nadrzędnego stanowią one nieznaną bazowy profil zużycia energii w oparciu o który określane jest sterowanie dalszymi odbiornikami. Różnica mocy między produkowaną przez OZE a zużywaną przez odbiorniki o priorytecie 1, stanowi bazę do sterowania odbiornikami o niższych priorytetach. Taka sytuacja ma miejsce przy analizie możliwości załączenia odbiorników przy kolejnych priorytetach.

**Priorytet 2 – lodówka:** przy analizie sterowania lodówki zakłada się możliwość generowania przez nią sygnałów określających jej stan. Rozważa się tu wykorzystanie technologii *Internet of things* (IoT). W przypadku wzrostu temperatury powyżej pierwszego (niższego) poziomu lodówka wygeneruje sygnał informujący o potrzebie załączenia, który w przypadku nadwyżki produkcji energii spowoduje załączenia lodówki. W przypadku niewystarczającej ilości energii generowanej przez OZE lodówka nie załączy się.

W przypadku dalszego wzrostu temperatury powyżej kolejnego(wyższego) poziomu generowany jest sygnał potrzeby bezwzględnego załączenia, który powoduje załączenie lodówki niezależnie od aktualnych warunków. W rzeczywistych warunkach wykorzystane będą sygnały z czujnika temperatury, natomiast w opracowanym modelu uwzględniane to jest poprzez odmierzenie określonego czasu. Dodatkowo uwzględniana jest w tym przypadku potrzeba dłuższej pracy lodówki. Model odbiornika o priorytecie 2 opracowano tak, aby niezależnie od wykorzystywanego aktualnie sygnału, wykorzystanego do sterowania łączne zużycie energii na dobę było praktycznie identyczne. W przypadku sterowania klimatyzacją zamiast lodówką wykorzystywany jest jedynie jeden sygnał o przekroczeniu określonego poziomu temperatury, powodujący załączenie klimatyzacji przy nadwyżce energii. Dzięki temu sterowanie przypomina sterowanie odbiorników o priorytecie 4, opisane w dalszej części opracowania.

**Priorytet 3 – pralka/zmywarka:** użytkownik przygotowuje urządzenie o priorytecie 3 (pralkę lub zmywarkę) do załączenia, a następnie ustawia potrzebę załączenia urządzenia w sterowniku nadrzędnym PME. W przypadku ustawienia potrzeby pracy kilku urządzeń obowiązywać może ich kolejikowanie lub załączanie w kolejności wynikającej z nadwyżek mocy. Urządzenia o priorytecie 3 załączane są w przypadku uzyskania nadwyżki mocy produkowanej z OZE powyżej określonego poziomu (odrębnego dla każdego urządzenia) z ewentualnym uwzględnianiem nadwyżek energii wyprodukowanej z OZE i zgromadzonej w zasobniku. Ze względu na specyfikę ich pracy urządzenia ich cykl pracy nie jest przerywany mimo zmniejszenia się produkcji energii z OZE. W przypadku, gdy do chwili obowiązywania taryfy nocnej nie nastąpi załączenie urządzeń o priorytecie 3 nastąpi ich załączanie tak aby obniżyć koszt energii.

**Priorytet 4 – urządzenia o charakterze zasobnikowym:** użytkownik ze względu na codzienną potrzebę uzyskania c.w.u. oraz dodatkowo potrzebę gromadzenia energii przy prognozie pogody z której wynika, że następne godziny/dzień będą chłodne istnieje możliwość gromadzenia energii w zasobnikach energii cieplnej, przypisanych do urządzeń o priorytecie 4. W przypadku tych urządzeń sterownik nadrzędny samodzielnie decyduje o ich załączeniu. Zakłada się w tym przypadku, że bojler codziennie zużywa podobną ilość energii, przy czym sygnał załączający urządzenie powoduje jedynie podanie napięcia zasilania na nie. O pracy urządzenia decydują wewnętrzne układy załączania urządzenia uwzględniające temperaturę. Sygnał załączenia urządzenia zależy jedynie od nadwyżek mocy pochodzących z OZE i zakłada się, wyłączenie odbiorników z zasobnikami ciepła każdorazowo, gdy nadprodukcja mocy spadnie poniżej określonego poziomu. Algorytm sterowania urządzeniami o priorytecie 4 dopuszcza dodatkowo ich załączanie w czasie obowiązywania taryfy nocnej.

**Priorytet 5 – urządzenia, które mogą być dowolnie odłączane:** w przypadku pewnych urządzeń (np. laptop z ładowarką) nie jest wymagane ich ciągłe zasilanie i istnieje możliwość ich odłączania przez sterownik nadrzędny. Zakładając, że wybrana część instalacji przeznaczona będzie do zasilania urządzeń, które prosument uzna za urządzenia o priorytecie 5 – zasilanie tych urządzeń będzie się odbywać jedynie przy nadwyżce mocy produkowanej z OZE. Należy tu nadmienić, że urządzenia te stanowią nieznaną, zmienną w czasie profil obciążeń i do załączania/wyłączania tych obciążeń powinny decydować poziomy mocy w punkcie przyłączenia do sieci o różnych znakach(dodatni – nadwyżka mocy produkowanej, ujemny - pobór mocy).

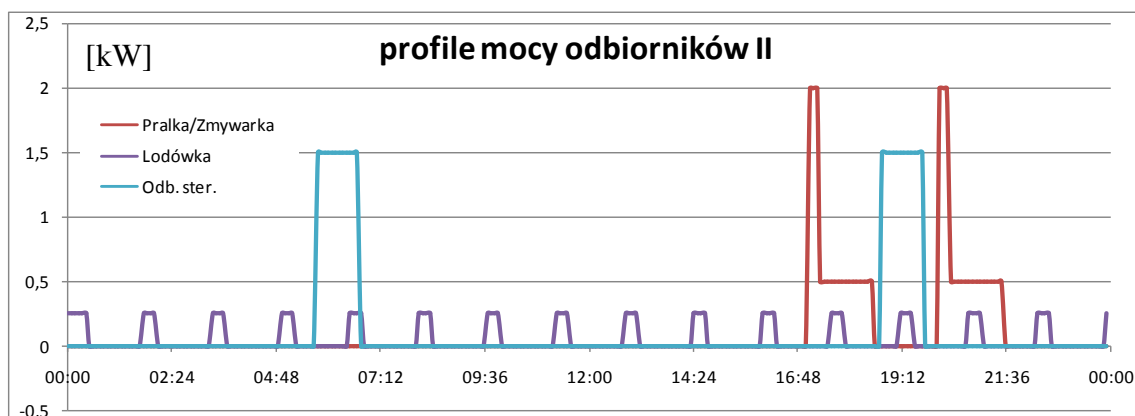
**Zasobnik akumulatorowy:** w rozważanej infrastrukturze PME planuje się stosowanie zasobnika energii elektrycznej w celu gromadzenia nadwyżek produkowanych z OZE, realizacji zadanego profilu obciążenia w punkcie przyłączenia do sieci (bilansowanie energii), czy minimalizacji kosztów energii poprzez jej zakup w taryfie nocnej/taryfie dynamicznej poniżej określonego progu cenowego. W przypadku samego bilansowania energii zasobnik

akumulatorowy może mieć mniejszą pojemność, natomiast w przypadku jej buforowania większą. Jako zasobnik energii rozważa się w niniejszym opracowaniu akumulator o dużej liczbie cykli ładowania/rozładowania (5000 przy 80 % DoD). Pojemność elektrycznego zasobnika energii powinna być dobrana do typowego profilu zużycia energii u prosumenta (z uwzględnieniem możliwości ich sterowania) i źródeł OZE, przy założeniu określonych profili produkcji energii typowych dla różnych okresów czasu. Przy określaniu tej pojemności można wykorzystać odpowiednie programy lub arkusze kalkulacyjne z wykorzystaniem danych typowych (na podstawie różnych baz danych dostępnych w zasobach internetowych) lub danych pomiarowych uzyskanych u prosumenta. W niniejszej analizie wykorzystano dane typowe (przykładowe), dodatkowo przyjęto, że zarówno proces ładowania jak i rozładowania odbywa się ze sprawnością 85 % (sprawność przekształtnika i straty na rezystancjach wewnętrznych zasobnika) czyli możliwe jest odzyskanie 72,2 % energii pochodzącej z nadprodukcji ze źródeł OZE. Kolejnym parametrem określającym zasobnik jest początkowy poziom jego naładowania na godzinę 6 rano. Godzina ta wynika z końca obowiązywania taryfy nocnej. W zależności od warunków pogodowych i ich prognoz sterownik nadrzędny może wpływać na ten poziom i przyjmować jego wyższą wartość w przypadku prognozowania niskiej produkcji ze źródeł OZE – minimalizacja kosztów zakupu energii, lub niższą wartość w przypadku prognozowania wysokiej produkcji z OZE – minimalizacja sprzedaży energii, którą trzeba będzie odkupić po wyższej cenie w przypadku wieczornego zwiększonego poboru energii. W dalszej części opracowania rozważane będą sytuacje przy braku występowania zasobnika oraz jego dwóch wartościach, zapewniających różny poziom dopasowania do zadanego profilu energii w punkcie przyłączenia do sieci.

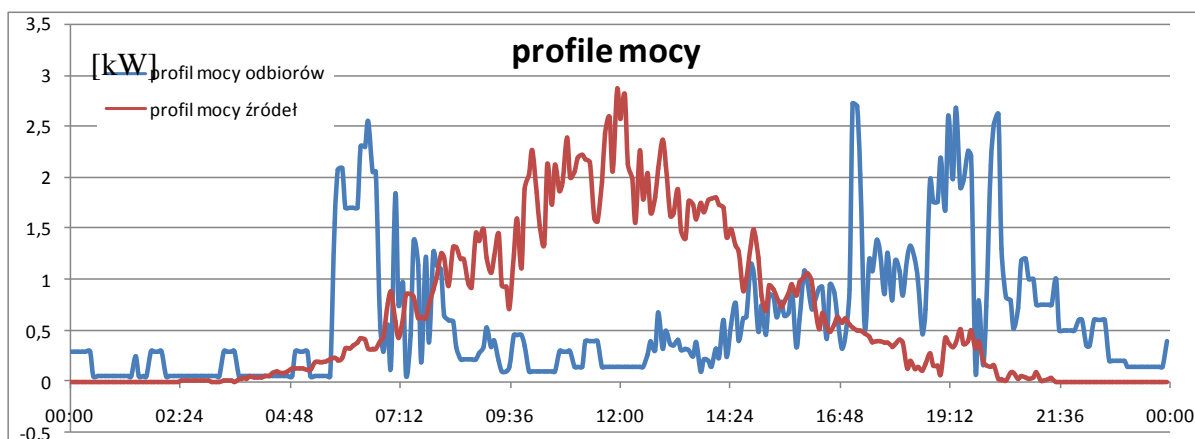
## 5. Przypadek referencyjny – brak bilansowania energii

Jako pierwszy przypadek rozważona została sytuacja bez bilansowania, w której odbiorniki załączane są według aktualnych potrzeb i przyzwyczajień użytkownika (rozważana sytuacja jest uproszczeniem z uwzględnieniem kumulacji pracy odbiornika z zasobnikiem ciepła). Na rysunku 5, przedstawione zostały profile mocy przy braku bilansowania energii. Rano (jeszcze w taryfie nocnej) załączany jest bojler w celu uzyskania ciepłej wody, a kolejne jego załączenie następuje w godzinach wieczornych. Lodówka załącza się cyklicznie co określony czas, do pracy przez 20 minut. Po godzinie 17 załączana jest zmywarka, a po 20 – pralka.

Sumaryczne profile produkcji ze źródeł OZE i zużycia energii z uwzględnieniem odbiorników o priorytecie 1 i 5 przedstawiono na rysunku 6. Widoczny jest w tym przypadku brak dopasowania produkcji do zużycia i występowanie szczytu porannego i wieczornego. W niniejszym przypadku dopasowano pracę odbiorników o priorytecie 5 tak aby uzyskać sumaryczne zużycie energii zbliżone do przypadków przedstawionych w dalszej części opracowania. Sumaryczne zużycie energii przez odbiorniki wynosiło 14,22 kWh/dobę.

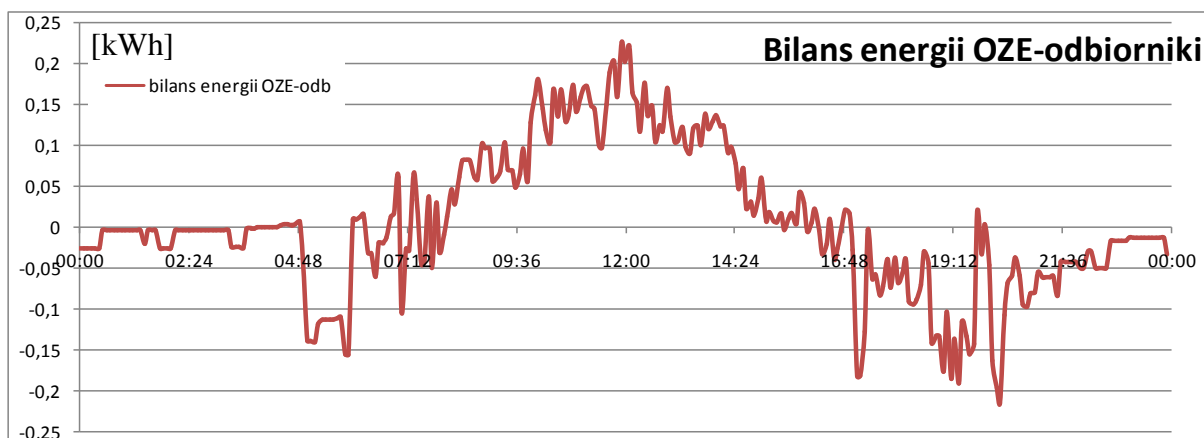


Rys. 5. Profile mocy odbiorników sterowanych przy braku bilansowania energii



**Rys. 6. Profil produkcji ze źródeł OZE i sumarycznego zużycia przez odbiorniki**

Na rysunku 7 pokazano wynikający z profili produkcji i zużycia bilans energii. Widoczna jest w nim zwiększona nadprodukcja w godzinach południowych oraz ujemne bilanse podczas szczytu porannego i wieczornego. W tabeli 1 zestawiono dobową produkcję i zużycie energii w każdej z taryf oraz ich koszty. Wynika z tego, że mimo nadwyżki produkcji (ze względu na niewielką cenę sprzedaży energii) oraz zakupu energii w taryfie dziennej sumaryczny koszt użytkowania energii w analizowanym przypadku wynosił 3,86 PLN. Koszt ten można zmniejszyć poprzez załączanie wybranych odbiorników energii w taryfie nocnej, niemniej wymagałoby to zmiany przyzwyczajeń i samodzielnej kontroli odbiorników przez użytkownika, co byłoby działaniem zbliżonym do opisanego przy bilansowaniu, przy czym wtedy rolę kontroli odbiorników przejmuje sterownik nadrzędny PME.



**Rys. 7. Profil produkcji ze źródeł OZE i sumarycznego zużycia przez odbiorniki**

**Tab. 1. Zestawienie produkcji/ zużycia energii i jej kosztów przy braku bilansowania energii**

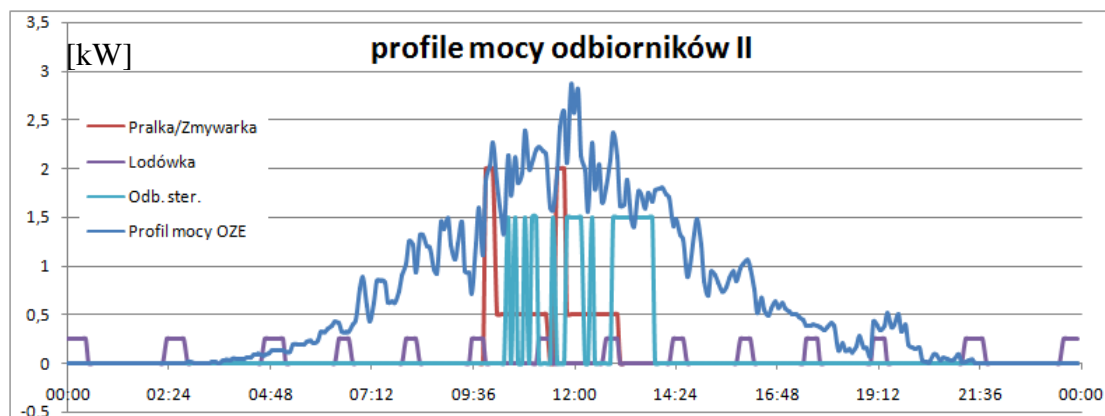
Produkcja/zużycie energii w kWh/dobę			
Energia zwrócona	Taryfa dzienna	Taryfa nocna	Suma
<b>10,07</b>	<b>-5,85</b>	<b>-2,65</b>	<b>1,57</b>
Koszt energii w PLN			
Energia zwrócona	Taryfa dzienna	Taryfa nocna	Suma
<b>-1,21</b>	<b>4,33</b>	<b>0,74</b>	<b>3,86</b>

## 6. Bilansowanie energii w punkcie przyłączenia bez wykorzystania zasobnika

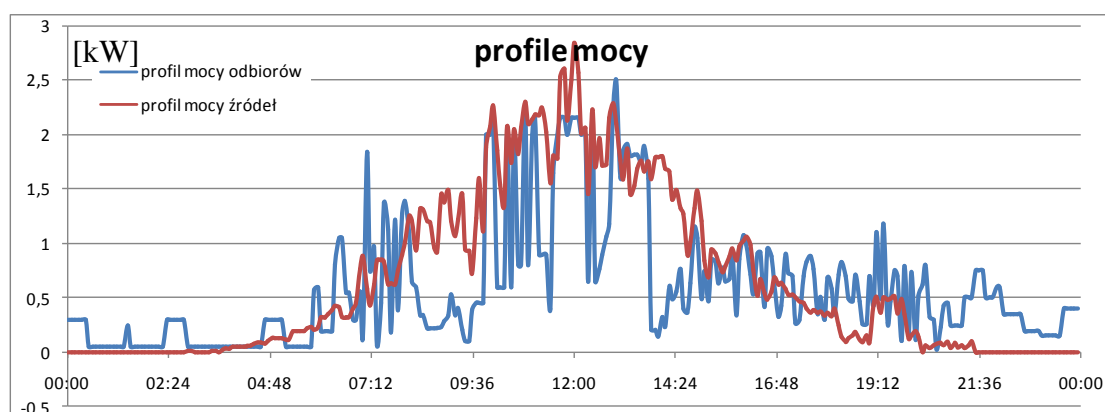
Ideę wykorzystania sterownika nadrzędnego do autonomicznego sterowania odbiornikami przedstawiono w przypadku, gdy w układzie nie wykorzystuje się zasobnika energii. Może to być tańsze rozwiązanie infrastruktury PME. Sterowanie odbiornikami odbywa się autonomicznie zgodnie z algorytmami odpowiednimi dla każdego z priorytetów. Na rysunku 8 pokazano wynik działania sterownika nadrzędnego powodującego załączanie i odłączanie odbiorników o priorytecie 2, 3 i 4. Jak można zauważyć lodówka (priorytet 2) załączana jest częściej w czasie nadprodukcji energii ze źródeł OZE, a rzadziej przy obniżonej produkcji. Pralka i zmywarka (priorytet 3) zostały załączone jedna po drugiej praktycznie przy największej produkcji energii, natomiast sterowanie bojlerem (priorytet 4) odbywa się w celu dopasowania do aktualnego profilu produkcji ze źródeł OZE.

Dopasowanie sumarycznego zużycia energii do profilu produkcji z OZE, dzięki zastosowaniu sterownika nadrzędnego pokazano na rys. 9. Widoczne tu jest znaczna poprawa w stosunku do przypadku opisywanego poprzednio. Zauważalne jest zwiększenie zużycia energii w godzinach południowych i zmniejszenie zużycia energii przy szczycie porannym i wieczornym. Sumaryczne zużycie energii w tym przypadku wynosi 14,35 kWh/dobę.

Bilans energii w punkcie przyłączenia, dla analizowanego przypadku pokazano na rysunku 10. Widoczna jest tu redukcja odchyłeń od wartości 0 w stosunku do bilansu pokazanego na rysunku 7. Dzięki temu możliwe jest zmniejszenie mocy zainstalowanej w punkcie przyłączenia jak i zmniejszanie dobowych zmian mocy w KSE. Efekt bilansowania energii zauważyć można w tabeli 2 zestawiającej produkcję / zużycie energii oraz jej koszty. Wynika z niego zmniejszenie kosztów użytkowania energii do 1,45 PLN w stosunku do przypadku referencyjnego.

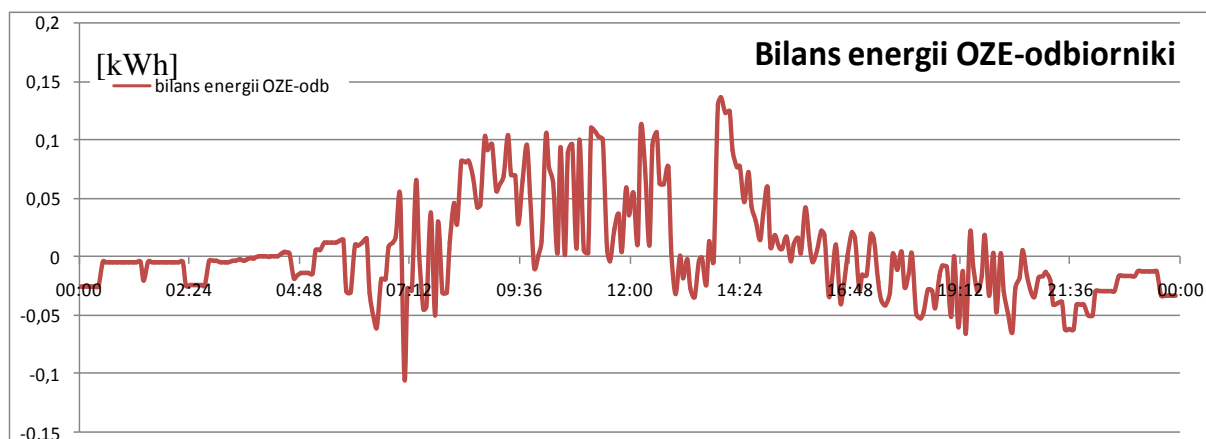


Rys. 8. Profile mocy odbiorników sterowanych przy bilansowaniu energii bez zasobnika



Rys. 9. Profil produkcji ze źródeł OZE i sumarycznego zużycia przez odbiorniki





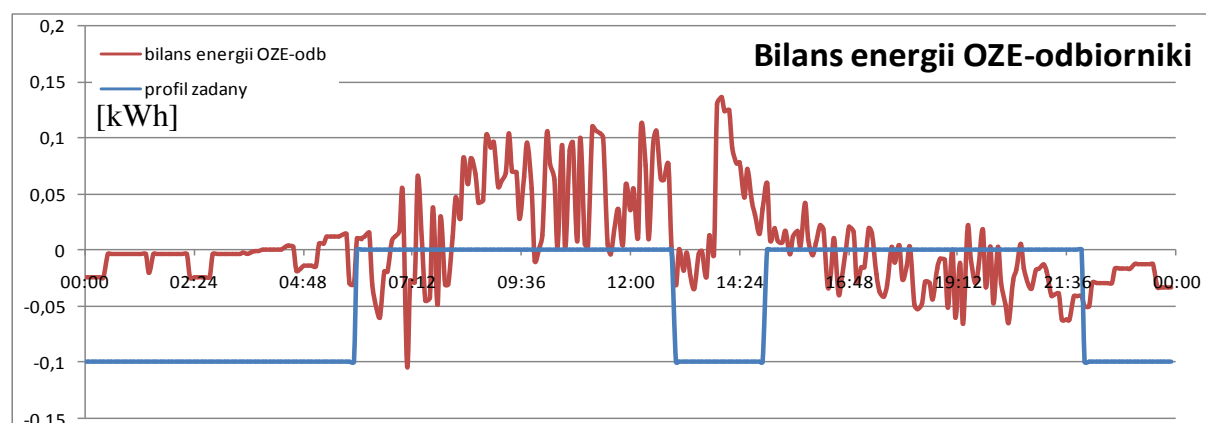
Rys. 10. Bilans energii wynikający z różnicy pomiędzy produkcją w OZE i zużyciem w odbiornikach przy bilansowaniu bez zasobnika energii

Tab. 2. Zestawienie produkcji/ zużycia energii dla bilansowania energii bez zasobnika

Produkcja/zużycie energii w kWh/dobę			
Energia zwrócona	Taryfa dzienna	Taryfa nocna	Suma
<b>5,22</b>	<b>-2,30</b>	<b>-1,35</b>	<b>1,57</b>
Koszt energii w PLN			
Energia zwrócona	Taryfa dzienna	Taryfa nocna	Suma
<b>-0,63</b>	<b>1,70</b>	<b>0,38</b>	<b>1,45</b>

## 7. Bilansowanie energii z wykorzystaniem zasobnika

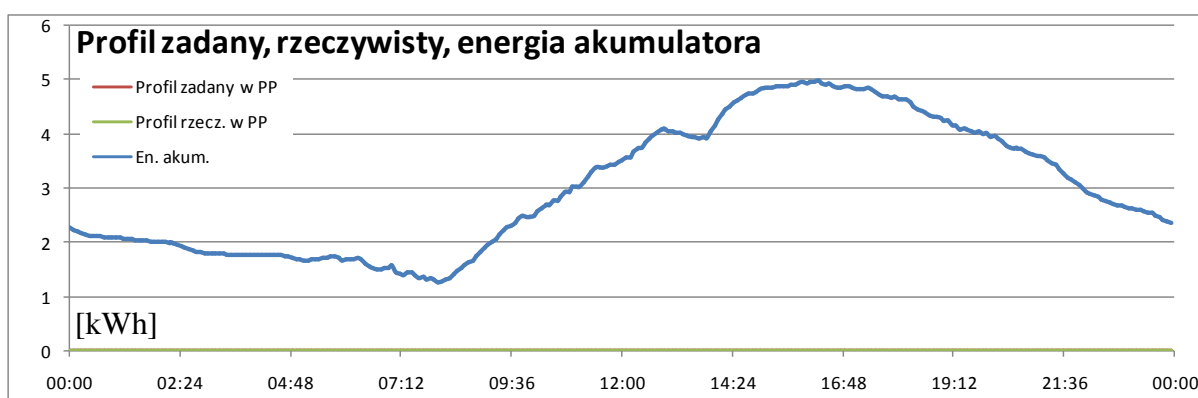
Przyjmując jako bazowy efekt wykorzystania sterownika nadrzędnego do bilansowania energii w infrastrukturze PME możliwe jest kształtowanie profilu mocy w punkcie przyłączenia PME do sieci zasilającej. W przypadku taryfy dwustrefowej optymalnym wydaje się być takie kształtowanie profilu aby nie następował zakup energii w taryfie dziennej. Na rysunku 11 pokazano bilans energii z rysunku 10 z naniesionymi obszarami w którym możliwy jest zakup energii. Należy zaznaczyć, że w przypadku taryfy dynamicznej profil zadany może ulegać modyfikacji w zależności od aktualnej ceny energii.



Rys. 11. Bilans energii w PME z zaznaczonym obszarem możliwego zakupu energii

W oparciu o bilans energii z rysunku 11 oraz założenia co do zasobnika energii możliwe jest przeprowadzenie procesu doboru zasobnika. Na rysunku 12 pokazano zmiany energii zgromadzonej w zasobniku w czasie doby przy założeniu zasobnika 5 kWh. Jest to zasobnik o minimalnej wartości pojemności, która wystarczałaby do pracy z pełnym bilansowaniem

energii w układzie, bez wymiany z siecią zasilającą. W celu spełnienia tego założenia dobrano początkowe naładowanie równe 1,4 kWh. Należy pamiętać, że akumulator powinien być dobrany do kilku typowych/uśrednionych profili produkcji energii z OZE i typowych profili obciążeń, różnych dla każdej z pór roku. W analizowanym przypadku zasobnik 5 kWh pozwalałby na pełną pracę off-grid infrastruktury PME. Gromadzenie energii w zasobniku wiąże się z jej stratami oraz kosztami. W tabeli 3 zestawiono sumaryczną energię związaną z ładowaniem w ciągu doby, straty energii w procesach ładowania i rozładowania oraz energię rozładowania. Wykorzystanie zasobnika w cyklu dobowym (w kWh) będzie równe energii rozładowania oraz połowie strat energii (związanych z procesem rozładowania). Z uwagi na założony koszt gromadzenia w zasobniku, powiązany z kosztem inwestycyjnym podzielonym przez maksymalną ilość energii dostępną z zasobnika sumaryczny koszt gromadzenia energii w zasobniku wynosi 1,47 PLN. Jak widać jest to porównywalne z kosztem bilansowania bez zasobnika. Należy jednak nadmienić, że koszty bilansowania energii wzrastać będą w czasie wraz ze wzrostem cen energii, natomiast koszt związany z inwestycją zakupu zasobnika nie będzie się zwiększał. Zasobnik o pojemności 5 kWh można traktować jako połączenie funkcjonalności bilansowania i buforowania energii.



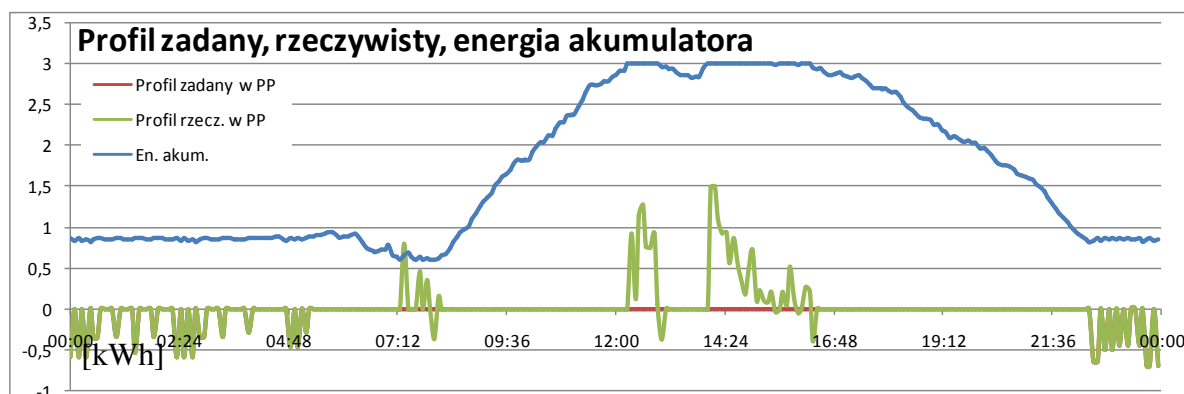
Rys. 12. Przebieg energii w akumulatorze oraz profile: zadany i rzeczywisty

Tab. 3. Energia w zasobniku 5 kWh

Energia w zasobniku w kWh/dobę		
Energia ładowania	Straty	Energia rozładowania
<b>5,11</b>	<b>1,46</b>	<b>3,65</b>

W celu zmniejszenia kosztów inwestycyjnych związanych z zakupem zasobnika możliwa jest jego minimalizacja, kosztem pewnych odstępstw od profilu zadanego w punkcie przyłączenia do sieci zasilającej. Na rys. 13 przedstawiono przebieg energii w zasobniku 3kWh, profil zadany i profil rzeczywisty w punkcie przyłączenia do sieci zasilającej. Warunek początkowy naładowania (0,85 kWh) został dobrany tak aby nie rozładować zasobnika poniżej 20% stanu naładowania. W celu utrzymania założonego warunku początkowego zasobniki zasilane w taryfie nocnej zasilane są energią z sieci. W czasie występowania taryfy dziennej występuje zwrot energii do sieci zasilającej wynikający z maksymalnego naładowania zasobnika oraz krótkotrwałe pobory energii wynikające z działania algorytmu sterowania sterownika nadrzędnego. Oprócz zmniejszenia kosztu inwestycyjnego związanego z zakupem zasobnika o mniejszej pojemności, niniejsze rozwiązanie charakteryzuje się najmniejszymi kosztami. W tabeli 4 przedstawione zostały łączne wartości energii ładowania, strat i rozładowania zasobnika, natomiast w tabeli 5 pokazano poszczególne udziały kosztów i sprzedaży energii związanych ze współpracą z siecią zasilającą oraz wykorzystaniem zasobnika. Sumaryczny

koszt energii za dobę w analizowanym przypadku wynosił 1,41 PLN. Ten koszt użytkowania energii jest najniższy, jednak różnice między poszczególnymi przypadkami nie są znaczące.



Rys. 13. Przebieg energii w akumulatorze oraz profile: zadany i rzeczywisty

Tab. 4. Energia w zasobniku 3 kWh

Energia w zasobniku w kWh/dobę		
Energia ładowania	Straty	Energia rozładowania
<b>4,31</b>	<b>1,20</b>	<b>3,11</b>

Tab. 5 Zestawienie produkcji/zużycia/gromadzenie energii i jej kosztów dla zasobnika 3kWh.

Produkcja/zużycie energii w kWh/dobę			
Energia zwrócona	Taryfa dzienna	Taryfa nocna	Energia rozładowania
<b>1,60</b>	<b>-0,07</b>	<b>-1,19</b>	<b>3,11</b>
Koszt energii w PLN			
Energia zwrócona	Taryfa dzienna	Taryfa nocna	Energia zasobnika
<b>-0,19</b>	<b>0,05</b>	<b>0,33</b>	<b>1,22</b>

## Podsumowanie

W niniejszym opracowaniu przedstawiono możliwości ograniczania kosztów energii poprzez jej bilansowanie w mikroinfrastrukturze PME. Analiza dotyczyła konkretnego przypadku, jednak opracowane przy powstawaniu raportu narzędzia pozwalają na testowanie procesu bilansowania i doboru zasobnika przy różnych profilach produkcji ze źródeł OZE i różnych profilach obciążeń.

W opracowaniu przedstawiono proponowane algorytmy bilansowania w oparciu o arbitralnie przyjęty podział odbiorników na grupy o 5 priorytetach. Algorytm sterowania odbiornikami dla każdego z priorytetów jest inny. Sumaryczne działanie algorytmu bilansowania bazuje na aktualnej (uśrednionej za 5 minut) różnicy między mocą pochodzącą ze źródeł OZE i z odbiorników. Dodatkowo algorytm ten może uwzględniać energię zgromadzoną w zasobniku.

W dalszej części opracowania przeprowadzono dobór zasobnika energii elektrycznej i pokazano wpływ wartości pojemności zasobnika na możliwość kształtowania profili w punkcie przyłączenia do sieci zasilającej. Dzięki zastosowaniu bilansowania energii oraz zasobnika energii uzyskano redukcję kosztów użytkowania energii w stosunku do przykładu referencyjnego. Charakterystyczne jest to, że mimo większej energii generowanej ze źródeł OZE niż użytkowana energia do zasilania odbiorników w użytkowanej instalacji ponoszone

są koszty. Koszty te stanowią zarówno koszty zakupu energii jak i uwzględniono tu koszty gromadzenia energii w zasobniku.

Przeprowadzona analiza dotyczyła taryfy dwustrefowej i minimalizacji kosztu zakupu energii w taryfie dziennej. Za najważniejsze osiągnięcie należy tu jednak uznać algorytmiczne rozdzielanie funkcji bilansowania energii od kształtowania profili mocy. Dzięki temu możliwe jest zadawanie (przy założonych ograniczeniach) dowolnego profilu mocy w punkcie przyłączenia, co ma szczególne znaczenie w przypadku zastosowania w miejsce taryfy dwustrefowej taryfy dynamicznej. W tym przypadku można założyć, że w zależności od ceny energii możliwe będzie kształtowanie profilu w punkcie przyłączenia a sterownik infrastruktury PME będzie w podrzędnej pętli regulacji zapewniał bilansowanie energii w oparciu o zadany profil.

## Literatura

[Popczyk, Zygmantowski, Michalak, Kielan, Fice] Popczyk J., Zygmantowski M., Michalak J., Kielan P., Fice M.: [Konceptcja prosumenckiej mikroinstalacji energetycznej \(PME\) wg iLab EPRO](#). BŻEP. Dział 1.2.09. , [www.klaster3x20.pl](http://www.klaster3x20.pl), podstrona CEP

[Fice1] Fice M.: [Prosumencka mikroinfrastruktura energetyczna jako obiekt regulacji/sterowania](#). BŻEP. Dział 1.1.06. , [www.klaster3x20.pl](http://www.klaster3x20.pl), podstrona CEP

[Wójcicki] Wójcicki R.: [Informatyka w EP](#). BŻEP. Dział 1.2.06. , [www.klaster3x20.pl](http://www.klaster3x20.pl), podstrona CEP

[Popczyk] Popczyk J.: [MODEL INTERAKTYWNEGO RYNKU ENERGII ELEKTRYCZNEJ. Od modelu WEK-NI-EP do modelu EP-NI-WEK](#). BŻEP. Dział 1.1.06. , [www.klaster3x20.pl](http://www.klaster3x20.pl), podstrona CEP

[Fice2] Fice M.: [EV jako zasobnik dla EP – koszty magazynowania energii w rzeczywistych zasobnikach](#). BŻEP. Dział 1.3.14. , [www.klaster3x20.pl](http://www.klaster3x20.pl), podstrona CEP

[Powerwall] - <http://www.teslamotors.com/powerwall>

[Internet] - <https://naatublog.wordpress.com/tag/montaz-paneli-fotowoltaicznych/>

## Księga Szkocka

*Teza.* Przedstawiona w Raporcie dojrzała analiza możliwości kształtowania profilu zapotrzebowania prosumenta na energię elektryczną (zarządzania tym profilem) pokazuje w nowym świetle dotychczasowy system usług systemowych, w tym DSM/DSR (kontraktowanych wyłącznie przez operatora systemowego OSP, a więc skrajnie scentralizowanych) i przyszłą taryfę dynamiczną (podstawowy, powszechny mechanizm rynkowy). Mianowicie, jest już jasne, że taryfa dynamiczna jest mechanizmem umożliwiającym bardzo głęboką (powszechną) decentralizację rynku usług systemowych. A to, łącznie z nową jakością regulacji mocy w infrastrukturze energetycznej prosumentów (por. Raport Michalak J., Zygmantowski M. [Sterowanie przekształtnikiem AC/DC w PME](#), BŻEP, Dział 1.2.07) oznacza zmianę podstaw funkcjonowania systemów elektroenergetycznych na miarę dwóch dotychczasowych zmian związanych z: wykreowaniem przez amerykańską ustawę PURPA konkurencji w wytwarzaniu oraz z powszechnym wdrożeniem zasady TPA zapoczątkowanym przez brytyjską reformę prywatyzacyjno-liberalizacyjną.

*Zadanie do rozwiązania.* Najpilniejszym zadaniem do wykonania jest szybkie poszerzenie środowiska sprzyjającego stosowaniu taryfy dynamicznej. Przede wszystkim potrzebne są rozległe badania naukowe w obszarze modelowania taryfy dynamicznej. Badania te nie mogą się jednak ograniczać tylko do aspektów technicznych (do obszaru nauk technicznych), muszą obejmować aspekty ekonomiczne i społeczne. Po drugie, potrzebne jest budowanie, w Polsce praktycznie od podstaw, środowiska biznesowego dostrzegającego swój interes w taryfie dynamicznej. Głównym segmentem tego środowiska będą zapewne niezależni inwestorzy (NI) budujący wirtualne wyspy WW w ramach rynku IREE (por. Raport Popczyk J. [Model](#)

Interaktywnego Rynku Energii Elektrycznej. BŻEP, Dział 1.1.06). Bardzo ważnym segmentem środowiska biznesowego dostrzegającym swój interes w taryfie dynamicznej będą producenci urządzeń przeznaczonych do stosowania w mikroinfrastrukturze PME (wyspecjalizowane serwery, przekształtniki energoelektroniczne, sterowniki i mikrokontrolery, sensory, rutery, ...). Po trzecie, potrzebne jest budowanie, również od podstaw, środowiska społecznego. W tym wypadku chodzi zarówno o długotrwałe zmiany cywilizacyjne w kierunku społeczeństwa prosumenckiego, jak również o budowanie kapitału społecznego, który doraźnie (pilnie) wywrze na rząd i parlament presję na zmiany prawa na rzecz taryfy dynamicznej.

Jan Popczyk

*Datowanie RAPORTU (wersja oryginalna) – 28.06.2015 r.*