

Wybrane elementy sąsiedzkiej wymiany energii - model funkcjonalny i wyniki symulacji

Streszczenie. Z końcem listopada 2016 roku został upubliczniony przez Komisję Europejską pakiet dokumentów kierunkowych „Czysta energia dla wszystkich Europejczyków” w perspektywie do 2030 roku, zwany także Pakietem Zimowym. Rekomendacje zawarte w części dokumentów zakładają kontynuację integracji rynków w wymiarze krajowym i regionalnym stawiając ambitne cele w zakresie dekarbonizacji, wzrostu efektywności energetycznej i wzrostu udziału OZE w bilansie energetycznym krajów UE. Krótki czas na przeprowadzenie gruntownej przebudowy sektora wytwórczego zmusza do poszukiwania rozwiązań wpisujących się w ramy Pakietu Zimowego. Jedną z metod wsparcia realizacji zaleceń unijnych, jest wykorzystanie potencjału mikro-sieci lokalnych społeczności, zdolnych do generacji i dążących do niezależności energetycznej oraz utworzenie regulacji i mechanizmów umożliwiających wymianę sąsiedzką energią. Wymiana energii elektrycznej w oparciu o tą formułę, funkcjonuje w postaci projektów pilotażowych w wielu lokalizacjach na całym świecie i realizowana jest z pominięciem sprzedawcy energii. W referacie przedstawiona została koncepcja założeń funkcjonalnych i analitycznych dla przykładowej prosumenckiej struktury sąsiedzkiej wraz z prezentacją wyników symulacji bazujących na rzeczywistych profilach odbiorczo- wytwórczych i prezentacją korzyści ekonomicznych.

Abstract. At the end of November 2016, the European Commission published a package of guidance documents called "Clean energy for all Europeans" in the perspective of 2030, also known as the Winter Package. The recommendations contained in some of the documents assume the continuation of market integration in the national and regional dimension, setting ambitious targets in the field of decarbonisation, increase of energy efficiency and increase of RES share in the energy balance of EU countries. The short time for reconstruction of the manufacturing sector forces to search for solutions that fit into the framework of the Winter Package. One of the methods of supporting the implementation of EU recommendations is to use the potential of local communities micro-grids, capable of generating energy and striving for energy independence, and to create regulations and mechanisms providing neighborly energy exchange. The exchange of energy based on this formula works in the form of pilot projects in many locations around the world and operate without an energy seller. The paper presents the concept of functional and analytical assumptions for an exemplary prosumer neighborhood structure along with the presentation of simulation results based on real prosumer profiles and the presentation of economic benefits. **(Selected elements of neighborly energy exchange- functional model and simulation assumptions)**

Słowa kluczowe: prosument, wymiana sąsiedzka, odnawialne źródła energii, PV.

Keywords: prosumer, neighborly exchange, renewable energy sources, PV.

Wstęp

W ramach realizacji zaleceń Pakietu Zimowego [1] zakłada się w perspektywie do 2030 roku osiągnięcie zmniejszenia emisji CO₂ o 40%, uzyskanie 32,5% docelowego poziomu efektywności energetycznej oraz wzrost udziału OZE do 32%. Ambitność celów i ograniczony czas na ich realizację są szczególnie istotne z perspektywy konieczności przemodelowania i dostosowania krajowego Energy-mix z jednoczesnym zachowaniem niezbędnego poziomu bezpieczeństwa i niezawodności funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. W ramach opublikowanych przez Ministerstwo Energii założeń polityki energetycznej Polski, w perspektywie do 2030 r. udział paliw kopalnych tj. węgla kamiennego i brunatnego ma spaść z obecnego poziomu wynoszącego około 83% do 60%. Powstała różnica ma być uzupełniona w dużej mierze źródłami opartymi o gaz i OZE.

Wymiana sąsiedzka energii generowanej w społeczności za pośrednictwem źródeł PV stanowić może wsparcie w krajowych dążeniach ukierunkowanych na realizację celów wyznaczanych przez dyrektywy unijne. W ramach społeczności lokalnych, wymiana energii elektrycznej realizowana jest głównie poprzez mikro-sieci, lub na obszarze ograniczonych topologicznie fragmentów sieci dystrybucyjnej operatorów i ma na celu uzyskanie lokalnego zbilansowania z wykorzystaniem nadwyżek produkcyjnych w źródłach prosumenckich.

Potrzeba znalezienia odpowiednich rozwiązań wspierających realizację założeń umożliwiających funkcjonowanie lokalnej wymiany energii przyczyniła się do podjęcia prób implementacji zaprojektowanych metod i schematów, w różnych częściach świata [2], [3]. Głównym celem wdrażania tego typu rozwiązań nie jest generowanie zysków związanych z obrotem energią, ale stworzenie możliwości zrównoważonego rozwoju uwzględniającego nieustannie rosnący i zmieniający się profil

zapotrzebowania na energię elektryczną, a także propagowanie idei budowy proekologicznej energetyki. Obserwacja zachowań i zmiennych kształtujących lokalne rynki na całym świecie daje prócz walorów edukacyjnych sposobność do ciągłej weryfikacji, modyfikacji oraz doskonalenia i rozwoju procesów wymiany energii w ramach mikro-sieci lokalnych społeczności.

Można zatem postawić tezę, że model sprzedaży sąsiedzkiej spełnia wytyczne kierunkowe Pakietu Zimowego zarówno w zakresie promocji rozwoju rozproszonych, zdecentralizowanych źródeł OZE, jak i wzrostu efektywności energetycznej. Konstrukcja i usankcjonowanie mechanizmu wymiany wpłynie na wzrost podaży energii ze źródeł OZE oraz na optymalizację kosztów zakupu energii w ramach lokalnych społeczności wpływając na wzrost konkurencyjności rynku.

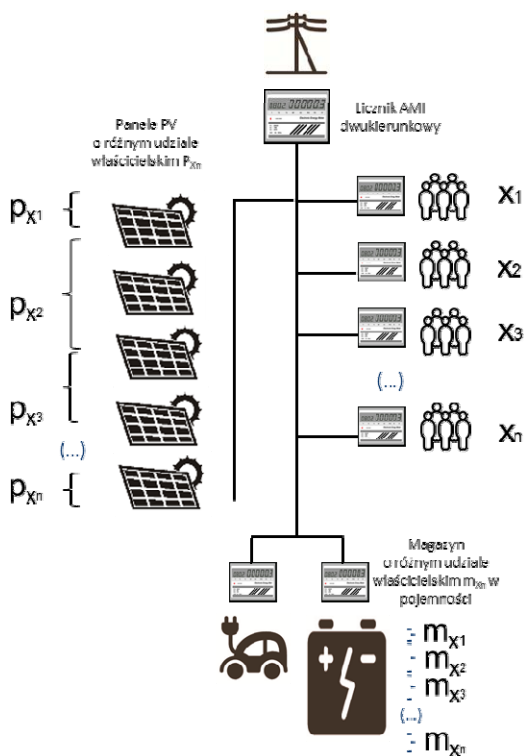
Charakter wymiany sąsiedzkiej

Mikro- sieć, w założeniu, to ograniczona geograficznie sieć elektroenergetyczna, lub lokalny system elektroenergetyczny mający na celu zapewnienie samowystarczalności energetycznej lokalnej społeczności w oparciu o funkcjonujące w ramach mikro-sieci urządzenia odbiorcze i wytwórcze. W rozpatrywanym przypadku można rozważyć, iż jest to przestrzeń zrzeszająca podmioty chętne do realizacji założeń wymiany sąsiedzkiej w niskonapięciowym systemie dystrybucji przyłączonym do sieci Operatora Systemu Dystrybucyjnego (OSD). Mikro-sieć stanowi połączenie co najmniej kilku podmiotów – przedstawicieli grup: prosumentów – gospodarstwa domowe posiadające jednostki wytwórcze tj. np. panele fotowoltaiczne generujące energię oraz odbiorców [4], [5]. Sensem istnienia lokalnej społeczności jest wspólny interes i cel. Wymagania warunkujące możliwość i zasadność jej funkcjonowania to gotowość podmiotów do współpracy i

wzajemnego dzielenia się wyprodukowaną lokalnie energią oraz czerpania z tego tytułu korzyści.

Przykładem ilustrującym funkcjonowanie sąsiedzkiej wymiany energii może być koncepcja bazująca na utworzeniu spółdzielni energetycznej w ramach wspólnoty mieszkaniowej wielorodzinnego budynku mieszkalnego. Dla takiego scenariusza można przyjąć następujące założenia ogólne determinujące funkcjonowanie mikro-sieci i wymiany sąsiedzkiej:

- Wykorzystanie wewnętrznej linii zasilającej budynku wielorodzinnego będącej własnością wspólnoty mieszkaniowej lub spółdzielni energetycznej jako sieci służącej do dystrybucji energii elektrycznej wytworzonej w ramach generacji prosumenckiej.
- Udział mieszkańców w wymianie związany jest ściśle z partycypacją w nakładach inwestycyjnych w tym w szczególności w kosztach infrastruktury wytwórczo-magazynowej tj. np. w zakupie paneli fotowoltaicznych, magazynu energii, ładowarki samochodowej.
- Udział ten określa tym samym rozkład własności wygenerowanej i zmagazynowanej energii oraz określa wielkość wolumenu, którą dany podmiot może rozporządzać. Ilustracja struktury przedstawiona została na rysunku 1.



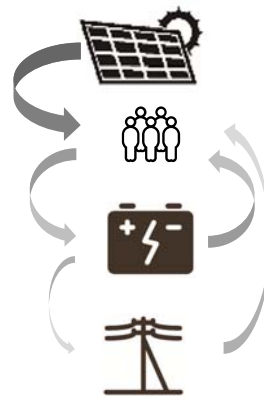
Rys. 1. Architektura mikro-sieci

- Energia wytwarzana we współdzielonej instalacji PV, w pierwszej kolejności pokrywa zgodnie z posiadanym udziałem bieżące zapotrzebowanie każdego gospodarstwa. Ewentualna nadwyżka trafia do lokalnego magazynu energii, którego dostępna pojemność determinowana jest indywidualnym udziałem w strukturze właścicielskiej.
- W sytuacji wypełnienia magazynu lokalnego, energia wprowadzana jest do sieci OSD, która pełni rolę magazynu sieciowego.
- W przypadku braku generacji, bieżące zapotrzebowanie podmiotu pokrywane jest z energii zgromadzonej w magazynie lokalnym, a w przypadku jej braku z sieci OSD do której trafiła nadwyżka generacyjna podmiotu.

- Pobranie energii z magazynu lokalnego odbywa się bez ponoszenia kosztów, natomiast pobranie energii zgromadzonej w sieci OSD odbywa się w oparciu o mechanizm opustu [6]. Pobór energii z sieci następuje bezkosztowo w wymiarze odpowiadającym 80% lub 70% wolumenu uprzednio zgromadzonego w magazynie sieciowym. Związane jest to z poniesieniem kosztu magazynowania wynoszącego 20% lub 30% wprowadzonego wolumenu odpowiednio dla instalacji o mocy do 10kW i w przedziale 10-50 kW. W przypadku braku zakumulowanej w nim energii, jej pobór rozliczany jest zgodnie z obowiązującą taryfą dystrybucyjną i cennikiem wynikającym z zawartej umowy kompleksowej.
- Odbiorcy nieposiadający udziału w infrastrukturze wytwórczo-magazynowej, należący jednak do spółdzielni energetycznej ze względów lokalizacyjnych mogą korzystać z działalności lokalnych prosumentów i kupować energię zgromadzoną w magazynie po cenie korzystniejszej niż oferowana przez sprzedawcę.

Studium przypadku – model funkcjonalny i założenia wymiany sąsiedzkiej

W celu dowiedzenia postawionej tezy w szczególności w kontekście optymalizacji kosztów zakupu energii elektrycznej, konieczne jest przeprowadzenie analiz symulacyjnych. Próba odwzorowania mechanizmów i implementacja założeń w środowisku rzeczywistym zrealizowana może być w ramach wspólnoty mieszkańców wielorodzinnego budynku mieszkalnego, gdzie wewnętrzna instalacja elektryczna spełnia założenia mikro-sieci umożliwiającej wymianę energii pomiędzy jej uczestnikami. Struktura mieszkań w budynku wg kategorii własności pozwala każdemu gospodarstwu na uczestniczenie, na tych samych warunkach, we własności infrastruktury wytwórczo-magazynowej oraz na udział w wymianie energii (odrębna własność lokalu).



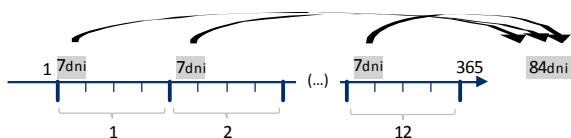
Rys. 2. Przepływy energii w ramach struktury.

Moc wytwórcza instalacji, przypadająca na gospodarstwo domowe zgodna z posiadanym przez nie udziałem, generuje w danej jednostce czasu (granulacja godzinowa) ilość energii, która w pierwszej kolejności pokrywa bieżące zapotrzebowanie danego gospodarstwa zgodnie z jego profilem zapotrzebowania. Nadprodukcja energii, podlega dwuetapowemu procesowi magazynowania. W pierwszym etapie, zgodnie z nadanym priorytetem, nieskonsumowana wielkość generacji trafia do magazynu lokalnego, aż do pełnego wykorzystania jego pojemności. Kolejny etap zakłada wykorzystanie sieci OSD do transferu energii, której przepływy regulowane są obowiązującymi przepisami. W momentach braku generacji zmagazynowana ówczesnie energia pobierana jest przez gospodarstwo domowe z magazynu lokalnego w tej samej

ilości bez ponoszenia strat czy kosztów, w drugiej zaś kolejności z magazynu sieciowego OSD gdzie koszt w postaci opustu stanowi 30% wolumenu energii magazynowanej przez gospodarstwo w sieci. Po wyczerpaniu magazynowanych zasobów energii dane gospodarstwo może dokonać zakupu energii od sprzedawcy po cenie określonej umową kompleksową. Etapy magazynowania energii przedstawiono na rysunku 2.

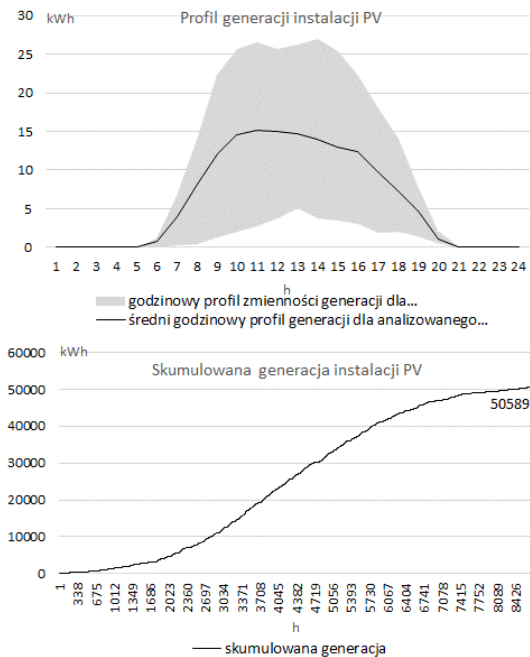
W założeniach do przeprowadzenia symulacji przyjęto:

- Ilość gospodarstw domowych biorących udział w ramach mikro- sieci w sąsiedzkiej wymianie energii wynosi 30 i obejmuje wszystkich mieszkańców budynku wielorodzinnego w ramach którego funkcjonuje wspólnota mieszkaniowa.
- Dach budynku o powierzchni 374 mkw. został wyposażony w panele fotowoltaiczne o łącznej mocy 50 kW. Moc została dostosowana do istniejących zacienień na powierzchni dachu limitujących jego aktywne wykorzystanie oraz do konieczności prowadzenia prac eksploatacyjnych.
- W budynku został zainstalowany magazyn lokalny energii o pojemności 54 kWh, stanowiący kaskadę czterech magazynów typu PowerWall 2 o pojemności 13,5 kWh każdy.
- Funkcją celu optymalizacji procesu jest minimalizacja kosztów zakupu energii przez wszystkich członków spółdzielni w hybrydowej wymianie łączącej transfer energii z udziałem sieci dystrybucyjnej oraz wymiany sąsiedzkiej, gdzie energia rotowana jest za pośrednictwem magazynu lokalnego.
- Efekty optymalizacyjne to: (i) konfiguracja udziałów gospodarstw domowych (uwzględniających poziom i profil ich zapotrzebowania na energię) w infrastrukturze wytwórczo-magazynowej, dla której uzyskuje się minimalizację łącznych kosztów funkcjonowania wymiany energii, (ii) przepływy energii w ramach wymiany sąsiedzkiej z uwzględnieniem magazynu lokalnego oraz sieci OSD, w której magazynowana jest energia uczestników.
- Przeprowadzenie analiz optymalizacyjnych w oparciu o rozwiązania dedykowanego modelu matematycznego zaprojektowanego w technice mixed integer programming [7]. Model matematyczny zaimplementowany został w języku GMP [8], a rozwiązanie odbywało się z wykorzystaniem biblioteki COINOR-CBC [9], która bazuje na metodzie branch and cut i jest dedykowana do rozwiązywania wielkoskalowych zadań całkowitoliczbowych. Przeprowadzenie optymalizacji i analiz zrealizowano na bazie danych w granulacji dobowo-godzinowej.
- Obliczenia zrealizowane zostaną na bazie zredukowanego zbioru danych o generacji i zapotrzebowaniu na energię. Redukcja wynika z ograniczonej mocy obliczeniowej niezbędnej do kalkulacji modeli. Przyjęto, że kalkulacja obejmie dane dla każdego pierwszego - rozpoczynającego się od poniedziałku tygodnia, każdego z miesiący 2018 r. Redukcja danych w okresie analizy przedstawiona została na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat wyboru danych do analizy

- Wykorzystanie historycznych i rzeczywistych danych dotyczących poziomu generacji instalacji fotowoltaicznej o mocy 1 MW, przeskalowanej do wielkości mocy 50 kW. Profil generacji przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Rzeczywisty średni profil generacji instalacji fotowoltaicznej

- Wykorzystanie historycznych i rzeczywistych danych dotyczących zużycia energii elektrycznej w gospodarstwach domowych. Celem jak najbardziej realnego odwzorowania rzeczywistości podmioty wymiany podzielono na pięć rodzajów gospodarstw domowych różniących się dobowym profilem oraz rocznym poziomem zapotrzebowania na energię związanym z ich specyfikacją - dane przedstawione na rysunku 5. Charakterystyka grup odbiorców wchodzących w skład analizowanej spółdzielni energetycznej: (i) dwupokoleniowe gospodarstwo domowe o ograniczonej aktywności nocnej - model 2+2, zakładający aktywność zawodową jednego z dorosłych członków w porze nocnej, (ii) dwupokoleniowe gospodarstwo domowe o ograniczonej aktywności popołudniowej - model 2+2, zakładający aktywność zawodową jednego z dorosłych członków w porze popołudniowej, (iii) dwupokoleniowe gospodarstwo domowe o ograniczonej aktywności popołudniowej - model 2+2, zakładający aktywność zawodową jednego z dorosłych członków w porze popołudniowej, (iv) dwuosobowe gospodarstwo domowe o profilu energooszczędnym, (v) jednoosobowe gospodarstwo domowe o profilu energooszczędnym
- mechanizmu wymiany w oparciu o następujące poziomy cen: (i) 600 zł/MWh przy zakupie energii w ramach umowy kompleksowej od sprzedawcy, (ii) 540 zł/MWh stanowiącej wynagrodzenie za transfer energii do magazynu lokalnego oraz stanowiącej opłatę za jej pobranie, gwarantując w ten sposób brak ponoszenia kosztu magazynowania.
- Przeprowadzenie analiz ekonomicznych i oceny efektywności energii.

Studium przypadku – model matematyczny

W analizowanym zadaniu optymalizacyjnym minimalizowany jest koszt zakupu energii elektrycznej z sieci i z magazynu pomniejszony o zysk ze sprzedaży energii do magazynu, co można przedstawić w postaci fragmentów kodu.

minimize funkcja_celu: KosztSpóldz;

Definicja funkcji celu

subject to def_FunkcjaCelu:

KosztSpóldz =

sum{*i* in Godziny, *o* in Odbiorcy}

KosztPobraniaZSieci[*i*,*o*]

+ sum{*i* in Godziny, *o* in Odbiorcy}

KosztPobraniaZMagazSpóldz[*i*,*o*]

- sum{*i* in Godziny, *o* in Odbiorcy}

ZyskZWyslaniaDoMagazSpóldz[*i*,*o*]

Koszt pobrania z magazynu w godz. h dla odbiorcy o

subject to def_KosztPobraniaZMagazSpóldz{*h* in Godziny, *o* in Odbiorcy}:

KosztPobraniaZMagazynuSpóldz[*h*,*o*] =

(CenaPobraniaZMagaz)*PobranieZMagazSpóldz[*h*,*o*];

Zysk z wysłania do magazynu w godz. h dla odbiorcy o.

subject to def_ZyskZWyslaniaZMagazSpóldz{*h* in Godziny, *o* in Odbiorcy}:

ZyskZWyslaniaDoMagazSpóldz[*h*,*o*] =

(CenaPobraniaZMagaz)*WyslaniaDoMagazSpóldz[*h*,*o*];

Koszt pobrania z sieci w godzinie h dla odbiorcy o

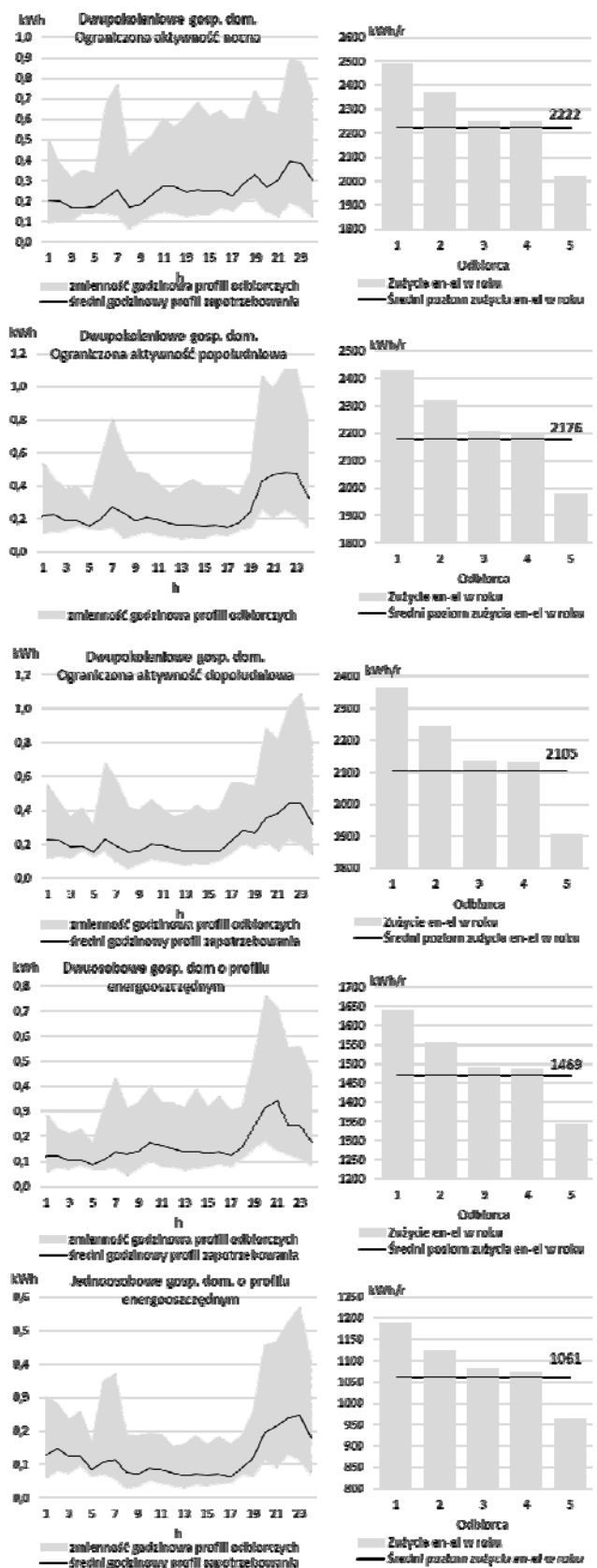
subject to def_kosztPobraniaZSieci{*h* in Godziny, *o* in Odbiorcy}:

KosztPobraniaZSieci[*h*,*o*] =

(CenaPobraniaZSieci)*PobranieZSieci[*h*,*o*];

Funkcja celu osiągnięta jest w procesie optymalizacji zmiennej określającej udział uczestnika spółdzielni w infrastrukturze, a także poprzez przepływy magazynowe i wymianę międzysąsiedzką oraz przepływy z siecią zewnętrzną. Model dopuszcza następujące fundamentalne działania w ustalonej godzinie roku h realizowane przez odbiorcę, przy określonym poziomie zapotrzebowania (profil w godzinie h) i udziale w produkcji z paneli:

- w przypadku gdy zapotrzebowanie jest większe niż odpowiedni udział w produkcji odbiorca może:
 - kupić energię z sieci zewnętrznej,
 - kupić energię z magazynu energii, ale w części nie większej niż przypadający mu udział w magazynie energii, jeśli magazyn nie jest pusty lub jeśli któryś z użytkowników w danej godzinie chce energię odprowadzić do magazynu,
 - odzyskać energię wprowadzoną do sieci wewnętrznej w modelu opustów (wskaźnik 70%),
- w przypadku gdy zapotrzebowanie jest mniejsze niż odpowiedni udział w produkcji odbiorca może:
 - sprzedać energię do magazynu energii, ale w części nie większej niż przypadający mu udział w magazynie energii, jeśli magazyn nie jest pełny lub jeśli któryś z użytkowników chce energię odkupić,
 - wysłać energię do sieci zewnętrznej w modelu opustowym.
- # Zmienna Udział[*o*] reprezentuje udział odbiorcy o w całkowitej produkcji z paneli i udział w zasobach magazynowych klastra. Udział jest ≥ 0 i ≤ 1 . Suma udziałów wszystkich odbiorców wynosi 1.
- subject to constr_SumaUdzialow:
- sum{o in Odbiorcy}
- Udział[*o*] = 1;



Rys. 5. Rzeczywiste profile odbiorcze poszczególnych rodzajów gospodarstw domowych wchodzących w skład spółdzielni

ProfilZapotrzebowania[*h*,*o*] jest zapotrzebowaniem na energię odbiorcy o w godzinie h. Jest to parametr zadania i nie podlega optymalizacji.

subject to def_ProfilZapotrzebowania{*o* in Odbiorcy, *h* in Godziny}:

ProfilZapotrzebowania[*h*,*o*] = RawData[*h*,*o*];

UdziałWProdukcji[*h*,*o*] to udział w całkowitej produkcji odbiorcy *o* w godzinie *h*. Jest to zmienna optymalizowana liniowo zależna od Udział[*o*].

subject to def_UdziałWProdukcji{*o* in Odbiorcy, *h* in Godziny}:

UdziałWProdukcji[*h*,*o*] = Udział[*o*]*PV[*i*];

Każdy odbiorca ma magazyn sieciowy - do którego może oddać część odpowiedniego udziału w produkcji, a z którego może potem bezkosztowo odebrać (ProcentOdzyskiwEnergii) energii, którą wprowadził. W pierwszej godzinie magazyn jest pusty. W kolejnych godzinach, stan magazynu sieciowego to stan z poprzedniej godziny uwzględniający saldo wymiany z magazynem.

subject to def_MagazynSieciowyOdbiorcy{*h* in Godziny, *o* in Odbiorcy}:

MagazynSieciowyOdbiorcy[*h*,*o*] =

If (*h* in PoczątkiOkresowRozliczeniowych) then 0 else

(MagazynSieciowyOdbiorcy[*h*-1,*o*]

- PobranieZMagazSieciow[*h*,*o*]

+ProcentOdzyskiwEnergii*WyslanieDoMagazSieciow[*h*,*o*]);

W pierwszej godzinie PobranieZMagazSieciow inicjalizowane jest na 0, ponieważ magazyn jest pusty.

subject to

constr_InicjalnePobraneZMagazSieciowInicjalizacja{*o* in Odbiorcy}:

PobranieZMagazSieciow[1,*o*] = 0;

MagazynSpółdzOdbiorcy w pierwszej godzinie jest pusty - inicjalizacja na 0. W kolejnych godzinach jego stan to poziom z poprzedniej godziny pomniejszony o PobranieZMagazSpółdz przez odbiorcę, powiększony o WyslanieDoMagazSpółdz przez odbiorcę, pomniejszony o WymianaSasiedzkaOddanie i powiększony o WymianaSasiedzkaPobranie.

subject to def_MagazynSpółdzOdbiorcy{*h* in Godziny, *o* in Odbiorcy}:

MagazynSpółdzOdbiorcy[*h*,*o*] = if(*h*==1) then 0 else

(MagazynSpółdzOdbiorcy[*h*-1,*o*]

- PobranieZMagazSpółdz[*h*,*o*]

+ WyslanieDoMagazSpółdz[*h*,*o*]

- WymianaSasiedzkaOdbiorcyOddanie[*h*,*o*]

+ WymianaSasiedzkaOdbiorcyPobranie[*h*,*o*]);

Całkowita wymiana sąsiedzka składa się z dwóch elementów - pobrania i wysłania. Całkowite pobranie w godzinie *h*, to suma pobrań wszystkich odbiorców. Całkowite oddanie w godzinie *h*, to suma oddań wszystkich odbiorców. W każdej godzinie całkowite pobranie jest równe całkowitemu oddaniu.

subject to def_CalkowitaWymianaSasiedzkaPobranie{*h* in Godziny}:

WymianaSasiedzkaPobranie[*h*] = sum{*o* in Odbiorcy}

WymianaSasiedzkaOdbiorcyPobranie[*h*,*o*];

subject to def_CalkowitaWymianaSasiedzkaOddanie{*h* in Godziny}:

WymianaSasiedzkaOddanie[*h*] = sum{*o* in Odbiorcy}

WymianaSasiedzkaOdbiorcyOddanie[*h*,*o*];

subject to constr_wymianaSasiedzka{*h* in Godziny}:

WymianaSasiedzkaPobranie[*h*] =

WymianaSasiedzkaOddanie[*h*];

W każdej godzinie *h* całkowity stan magazynu lokalnego jest sumą składowych odpowiadających strukturze własnościowej odbiorców.

subject to def_MagazynSpółdz{*h* in Godziny}:

MagazynSpółdz[*h*] =

sum{*o* in Odbiorcy} MagazynSpółdzOdbiorcy[*h*,*o*];

W każdej godzinie *h* całkowita pojemność magazynu jest ograniczona z góry przez MaxPojemoscMagazynu.

subject to constr_MaxPojemoscMagazynu{*h* in Godziny}:

MagazynSpółdz[*h*] <= MaxPojemoscMagazynu;

Dla każdego odbiorcy, w każdej godzinie, magazyn lokalny odbiorcy jest ułamkiem całkowitej maksymalnej pojemności wynikającej ze zmiennej Udział

subject to constr_MaxMagazynuSpółdz{*h* in Godziny, *o* in Odbiorcy}:

MagazynSpółdzOdbiorcy[*h*,*o*] <=

Udział[*o*]*MaxPojemoscMagazynu;

Wymiana sąsiedzka jest ograniczona przez udział w pojemności magazynu

subject to constr_WymianaSasiedzkaOdbiorcyOddanie{*h* in Godziny, *o* in Odbiorcy}:

WymianaSasiedzkaOdbiorcyOddanie[*h*,*o*] <=

Udział[*o*]*MaxPojemoscMagazynu;

subject to constr_WymianaSasiedzkaOdbiorcyPobranie{*h* in Godziny, *o* in Odbiorcy}:

WymianaSasiedzkaOdbiorcyPobranie[*h*,*o*] <=

Udział[*o*]*MaxPojemoscMagazynu;

Całkowite zapotrzebowanie na energię odbiorcy *o* w godzinie *h* (ProfilZapotrzebowania) pomniejszone o fragment w udziale w produkcji z paneli, który jest wykorzystany do pokrycia profilu muszą zostać albo wysłane do magazynu (nadwyżka) albo pobrane z magazynu lub sieci (niedobór).

subject to constr_mainBilans{*h* in Godziny, *o* in Odbiorcy}:

(ProfilZapotrzebowania[*h*,*o*] -

UdziałWProdukcji[*h*,*o*]) =

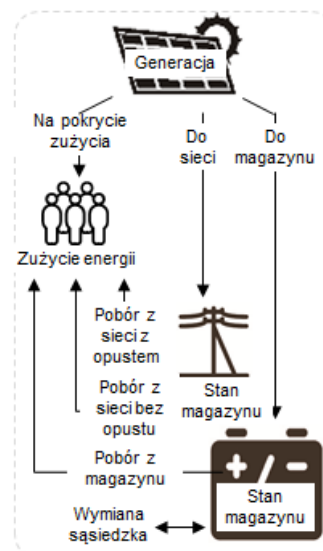
(PobranieZMagazSpółdz[*h*,*o*]

+ PobranieZMagazynuSieciow[*h*,*o*]

+ PobranieZSieci[*h*,*o*]

- WyslanieDoMagazSieciow[*h*,*o*]

- WyslanieDoMagazSpółdz[*h*,*o*]);



Rys. 6. Schemat przepływów energii

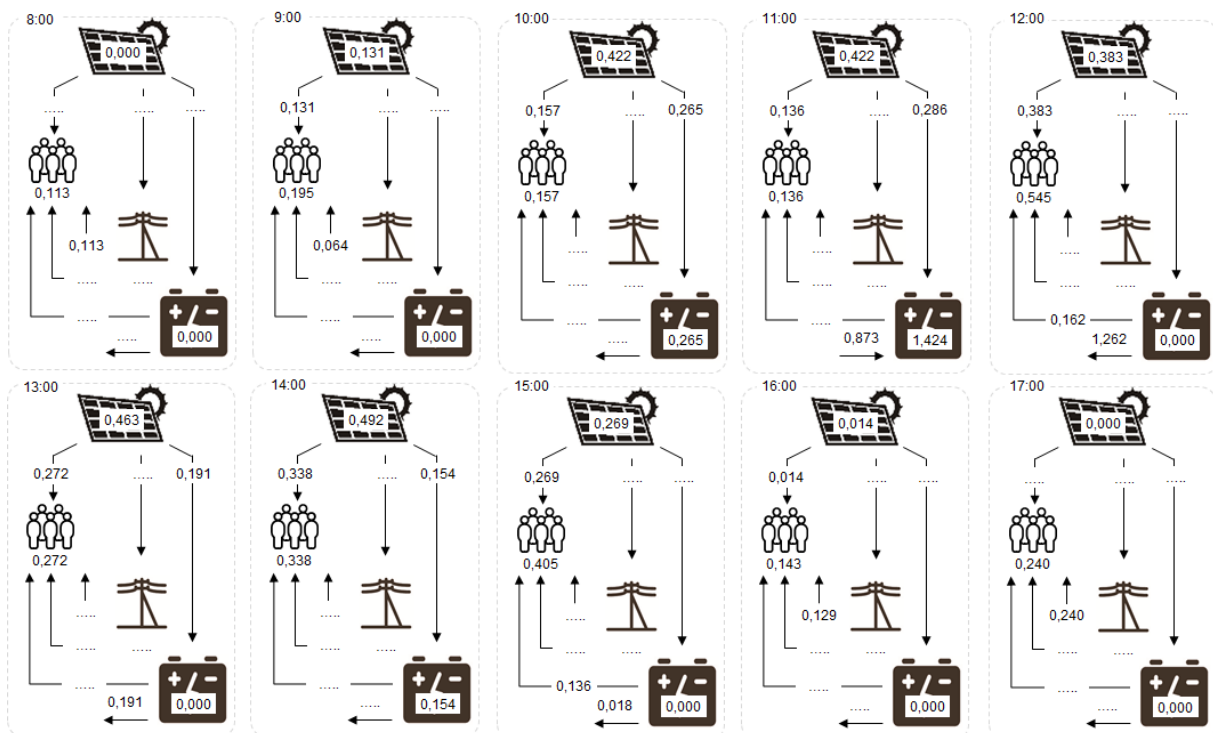
Studium przypadku – prezentacja wyników i wnioski

W oparciu o założenia i algorytm optymalizacyjny, na rysunku 6 i 7 przedstawiona została struktura przepływów energii elektrycznej między poszczególnymi elementami infrastruktury oraz uczestnikami wymiany sąsiedzkiej. Ilustracja przedstawia rzeczywiste wyniki symulacji zanotowane w godzinach 8:00 – 17:00 w dniu 2.01.2018 r., które można opatrzyć następującym komentarzem:

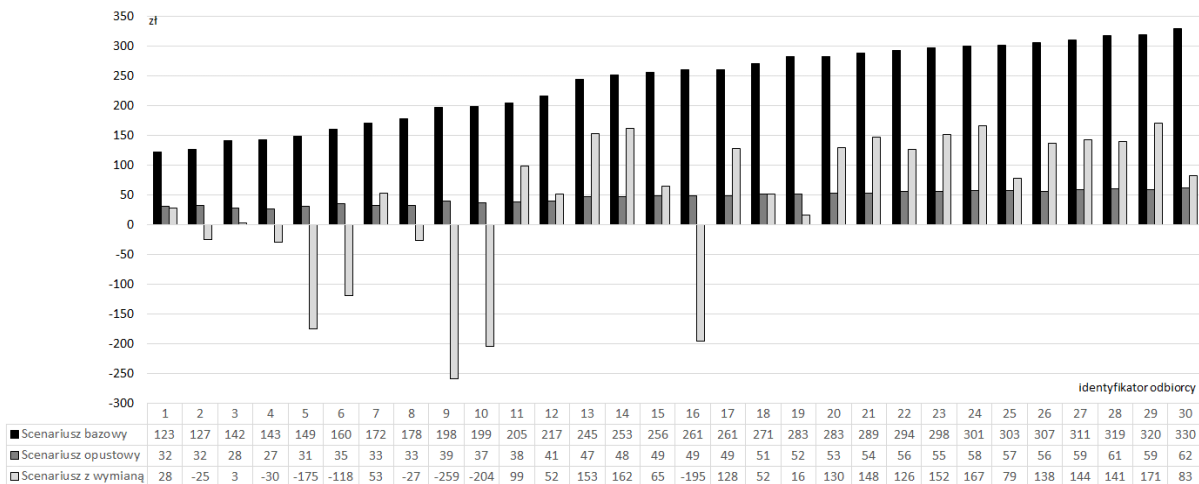
- w godz. 8:00 – zapotrzebowanie pokrywane jest wyłącznie poprzez pobór i zakup energii z sieci OSD,
- w godz. 9:00 – zapotrzebowanie dodatkowo pokrywane jest z własnej generacji,
- w godz. 10:00 – nadwyżka generacji ponad pokrycie zapotrzebowania trafia do magazynu lokalnego,
- w godz. 11:00 – zapotrzebowanie pokrywane jest z własnej generacji, a nadwyżka po uwzględnieniu przepływów w ramach wymiany sąsiedzkiej zasila magazyn lokalny,
- w godz. 12:00 – zapotrzebowanie pokrywane jest zarówno z własnej generacji, jak i magazynu lokalnego.

Nadwyżka zgromadzona w magazynie pobierana jest przez uczestników wymiany,

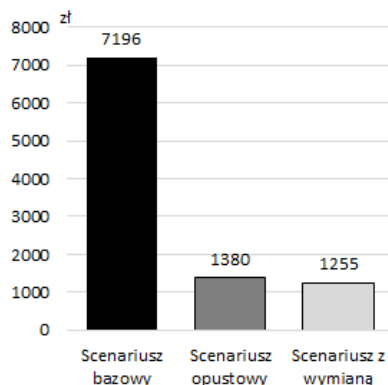
- w godz. 13:00 – zapotrzebowanie pokrywane jest z własnej generacji, a nadwyżka rozłokowana zostaje pomiędzy uczestników wymiany sąsiedzkiej,
- w godz. 14:00 – nadwyżka generacji ponad zapotrzebowanie przekazywana jest do magazynu lokalnego,
- o godz. 15:00 – zapotrzebowanie pokrywane jest zarówno z własnej generacji, jak i z magazynu lokalnego. Nadwyżka magazynowa konsumowana jest przez uczestników wymiany sąsiedzkiej,
- o godz. 16:00 – zapotrzebowanie pokrywane jest z własnej generacji uzupełnionej o pobór i zakup energii z sieci OSD,
- o godz. 17:00 – zapotrzebowanie pokrywane jest w całości poprzez pobór i zakup energii z sieci OSD.



Rys. 7. Przepływy energii elektrycznej między obiektami wymiany



Rys. 8. Koszty zakupu energii elektrycznej dla różnych scenariuszy w podziale na odbiorców, w zaokrągleniu do zł.



Rys. 9. Łączny koszt zakupu energii dla analizowanego okresu

Dla analizowanego okresu czasowego - 84 dni reprezentujące 2018 r. – na uwagę zasługuje prezentacja wypadkowych kosztów ponoszonych przez mieszkańców wspólnoty mieszkaniowej, którą przedstawiono na rysunku 8. Wyniki ujęte zostały w trzech scenariuszach. Pierwszy z nich – scenariusz bazowy – ilustruje koszty jakie ponosiliby poszczególni mieszkańcy w modelu poza prosumenckiego zakupu energii w ramach umowy kompleksowej. Scenariusz opustowy zakłada, że każdy z mieszkańców jest jednocześnie producentem i konsumentem energii i rozlicza się w modelu opustowym. W celu zastosowania porównywalności wyników przyjęto wskaźnik opustu na poziomie 1 do 0,7. Ostatni z wariantów – scenariusz z wymianą – zakłada funkcjonowanie w ramach wspólnoty mieszkaniowej modelu opustowego poszerzonego o mechanizm wymiany sąsiedzkiej z wykorzystaniem lokalnego magazynu energii.

Na podkreślenie zasługuje fakt sumarycznego ograniczenia kosztów zakupu energii dla wszystkich mieszkańców wspólnoty, co przedstawione zostało na rysunku 9. Dzięki zastosowaniu wyłącznie scenariusza opustowego uzyskano 80% ograniczenie kosztów. Implementacja modelu z wymianą sąsiedzką dodatkowo obniża łączne koszty o 9% względem wyników z modelu opustowego, a także umożliwia uczestnikom realizację indywidualnych celów finansowych i uzyskiwanie przychodów.

Indywidualny poziom poniesionych przychodów bądź kosztów uzależniony jest w głównej mierze od wielkości

udziału w infrastrukturze wytwórczej i magazynowej oraz profilu i poziomu zużycia energii.

Podsumowanie

W referacie wykazano, że istnieje możliwość zaprojektowania mechanizmów funkcjonalno-rozliczeniowych umożliwiających wymianę sąsiedzką energii w ramach wielorodzinnych budynków mieszkalnych, z uwzględnieniem opustowego modelu prosumenckiego. Implementacja założeń w autentycznym budynku przybliża wizję wykorzystania potencjału miejskich struktur mieszkalnych do realizacji energetyki rozproszonej bazującej na OZE, wspierającej dążenia kraju do realizacji celów wspólnotowych. Wyposażenie architektury prosumenckiej we wspólny magazyn energii zapewnia możliwość współdzielenia wyprodukowanej lokalnie energii, zwiększa walor ekonomiczny płynący z wymiany sąsiedzkiej oraz ogranicza opustową stratę pokrywającą realny koszt magazynowania energii w sieci operatora [10].

Autorzy: dr Mariusz Kozakiewicz, Szkoła Główna Handlowa, E-mail: mariusz.kozakiewicz@sggw.waw.pl; dr inż. Maciej Sołtysik, PSE Innowacje Sp. z o.o., E-mail: maciej.soltyfik@pse.pl; mgr Joanna Wróbel, PSE Innowacje Sp. z o.o., E-mail: joanna.wrobel@pse.pl;

LITERATURA

- [1] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/2001 z dnia 11 grudnia 2018 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych.
- [2] <https://www.powerledger.io>
- [3] <https://sonnengroup.com/sonnencommunity>
- [4] Rzepka P., Sołtysik M., Szablicki M., Prosumencka chmura energii – koncepcja nowej usługi dla prosumentów, *Zeszyty Naukowe IGSMiE PAN*, rok 2017, nr 98, s. 177-186
- [5] Rzepka P., Sołtysik M., Szablicki M., Wirtualny punkt przyłączenia użytkownika energii elektrycznej w sieci niskiego napięcia, *Rynek Energii*, 10/2017.
- [6] Ustawa z dnia 20 lutego 2015 roku o odnawialnych źródłach energii (Dz. U. 2015 poz. 478).
- [7] Williams H. Paul: Model Building in Mathematical Programming, Wiley, 2013.
- [8] <https://www.gnu.org/software/glpk/>
- [9] <https://www.coin-or.org/>
- [10] Sołtysik M., Wróbel J., Ocena wybranych elementów wsparcia prosumentów, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, 2019 nr 63.