

ANALIZA WPLYWU MECHANIZMÓW STEROWANIA ODBIORNIKAMI NA ZWIĘKSZENIE EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ W FOTOWOLTAICZNYCH INSTALACJACH PROSUMENCKICH¹

Robert Wójcicki²

Wprowadzenie

Generacja energii elektrycznej z zasobów OZE takich jak źródła PV, czy źródła wiatrowe różni się od tradycyjnej, wykorzystującej paliwa kopalne w wielu aspektach. Jednym z nich jest brak synchronizacji dostępnej mocy zasobów wytwórczych z zapotrzebowaniem na energię elektryczną, co jest podyktowane warunkami pogodowymi (źródła z produkcją wymuszoną). Powoduje to potrzebę nowego, całkowicie odmiennego podejścia do zaspokajania potrzeb energetycznych, polegającego na dostosowaniu popytu na energię do aktualnie dostępnych warunków, aby jak najlepiej wykorzystać produkcję źródeł OZE. Kolejnym wyzwaniem staje się zapewnienie mechanizmów regulacyjnych i bilansujących na rynku energii elektrycznej oraz w mikrosieciach, nadążających za zmianami generacji ze źródeł OZE z produkcją wymuszoną i stabilizujących pracę całego systemu elektroenergetycznego [Popczyk]. Można do nich zaliczyć mechanizmy związane z tworzeniem elastycznych, szybko reagujących, bilansujących źródeł wytwórczych takich jak elektrownie biogazowe, czy gazowe, ale istotnym elementem stają się także mechanizmy zarządzania popytem dostosowujące go do aktualnych warunków podaży energii elektrycznej w obrębie mikrosieci [Jongbae, Jinsung..]. Jednym ze sposobów zarządzania popytem w skali makro może być taryfa dynamiczna [Popczyk], w której cena energii elektrycznej zależeć będzie od kosztów jej wytworzenia i w przypadku wysokiej podaży taniej energii elektrycznej ze źródeł OZE będzie przyjmowała niskie wartości, a w przypadku jej niedoborów wzrośnie, powodując tym samym zmniejszenie popytu. W skali mikro, na poziomie instalacji prosumenckiej, możemy zaobserwować podobne mechanizmy, lecz bilansujące źródła wytwórcze mogą być zastąpione przez zasobniki akumulatorowe lub w przypadku większych prosumentów (np. producentów rolnych, gminnych mikrosieci) przez mikrobiogazownie z zasobnikiem biogazu, natomiast rolę taryfy dynamicznej w skali mikro przejmuje mechanizm wykorzystania generowanej energii elektrycznej ze źródeł OZE na potrzeby własne (dla prosumenta, cena własnej energii elektrycznej wynosi zero). Problemem staje się takie sterowanie odbiornikami energii, aby mogły one zrealizować swoje zadania wykorzystując w jak największym stopniu energię elektryczną generowaną w instalacji OZE, minimalizując koszt poboru energii z sieci, i zwiększając tym samym efektywność energetyczną. Zarządzanie kosztami energii związane jest nie tylko z wykorzystaniem energii elektrycznej z własnego źródła OZE, lecz również z wykorzystaniem obowiązujących na rynku energii taryf [Brachman,Wójcicki]. W pracach [Wójcicki1, Wójcicki2] przedstawiono analizę instalacji prosumenckiej pracującej w polskich warunkach

¹ Preprint artykułu przesłanego na konferencję 23rd International Science Conference on Computer Networks CN2016.

² dr inż. Robert Wójcicki, Instytut Informatyki, Wydział Automatyki Elektroniki i Informatyki, Politechnika Śląska.

zwracając szczególną uwagę na sposoby poprawy efektywności energetycznej związane ze zwiększeniem zużycia energii elektrycznej produkowanej w źródłach PV na potrzeby własne z wykorzystaniem technologii Internetu Rzeczy. Technologia ta może wspomóc instalacje prosumenckie w poprawie efektywności energetycznej i zwiększeniu współczynnika wykorzystania energii elektrycznej na potrzeby własne, jednak wymaga to zarówno komunikacji poszczególnych urządzeń gospodarstwa domowego ze sterownikiem kontrolującym generację i zapotrzebowanie na energię elektryczną w danym obiekcie, jak i odpowiednich algorytmów sterowania urządzeniami.

W niniejszej pracy przedstawiono analizę wybranych algorytmów sterowania odbiornikami w korelacji z pracą instalacji fotowoltaicznej w polskich warunkach, pod kątem zmniejszenia ilości energii elektrycznej pobieranej z sieci elektroenergetycznej i zwiększenia wykorzystania energii pochodzącej z instalacji fotowoltaicznej na potrzeby własne. Podczas badań wykorzystany został, zbudowany w oparciu o rzeczywiste dane, model symulacyjny instalacji prosumenckiej składający się z modelu źródła wytwórczego w postaci ogniw fotowoltaicznych oraz modeli podstawowych urządzeń AGD takich jak chłodziarko-zamrażarka, pralka oraz zmywarka.

1. Badania symulacyjne instalacji prosumenckiej

1.1. Dobór urządzeń dla modelu instalacji prosumenckiej

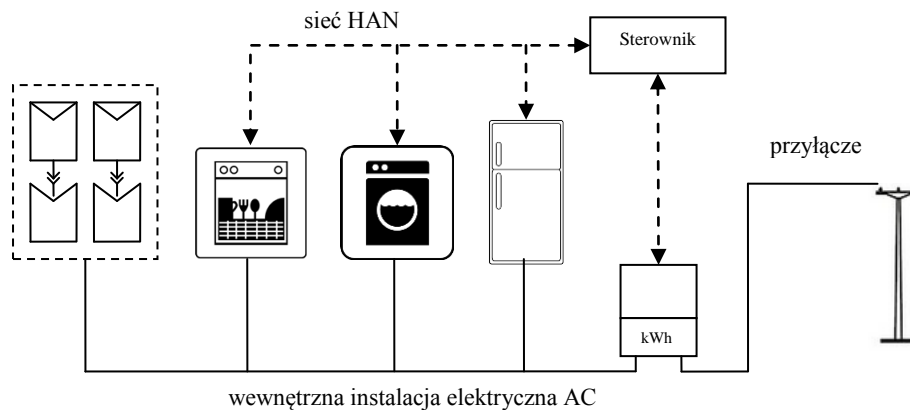
Dobór urządzeń dla modelu instalacji prosumenckiej został opracowany na podstawie analizy rzeczywistego gospodarstwa domowego wyposażonego w typowe urządzenia (odbiorniki) gospodarstwa domowego, gruntową pompę ciepła do ogrzewania budynku oraz mikroinstalację fotowoltaiczną o mocy 4,4 kW. W budynku zastosowano bieżącą rejestrację produkcji i poboru energii elektrycznej z wykorzystaniem zdalnych odczytów liczników energii elektrycznej i rejestracji danych na portalu www.pvmonitor.pl. Całoroczne zużycie energii elektrycznej za rok 2015 wyniosło 7485 kWh, z czego 2763 kWh przypadło na ogrzewanie budynku za pomocą pompy ciepła. W tym okresie wyprodukowano w instalacji fotowoltaicznej 4061 kWh.

W wyniku ponad rocznej analizy profili dotyczących poboru i produkcji energii elektrycznej w instalacji prosumenckiej, wybrano urządzenia, których zautomatyzowane sterowanie nie powoduje zauważalnego zmniejszenia komfortu domowników. Można do nich zaliczyć chłodziarko-zamrażarkę, zmywarkę, pralkę oraz pompę ciepła służącą do ogrzewania domu. Urządzenia te odpowiedzialne są za większość konsumowanej w ciągu roku energii elektrycznej analizowanego gospodarstwa domowego. Kolejnym, łatwym do sterowania energochłonnym urządzeniem może być elektryczny podgrzewacz wody, lecz w analizowanym gospodarstwie domowym nie był on wykorzystywany.

1.2. Model instalacji prosumenckiej

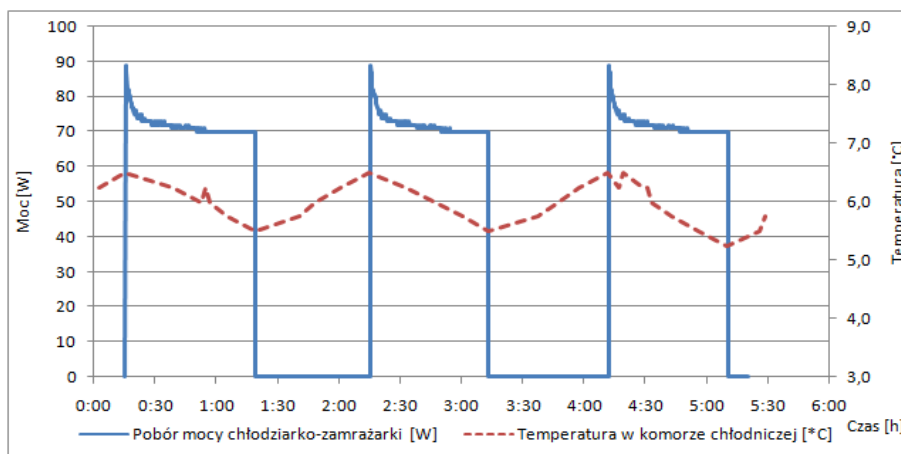
Na potrzeby pracy, w oparciu o rzeczywiste dane pochodzące z instalacji prosumenckiej, zbudowano w środowisku Omnet++ [Omnet] model symulacyjny gospodarstwa domowego wyposażonego w podstawowe urządzenia gospodarstwa domowego takie jak chłodziarko-zamrażarka, pralka oraz zmywarka, a także w instalację fotowoltaiczną. W niniejszej pracy zrezygnowano z badań uwzględniających pracę pompy ciepła, gdyż obecnie ten sposób ogrzewania nie jest w Polsce popularny, jednak w przyszłości planowane jest rozbudowanie symulatora i przeanalizowanie współpracy pompy ciepła z instalacją fotowoltaiczną. Schemat wykorzystanego w pracy modelu przedstawia rys. 1. Modele poszczególnych urządzeń zostały sporządzone na podstawie profili mocy i zużycia energii elektrycznej zarejestrowanych podczas pracy rzeczywistych urządzeń na najczęściej wykorzystywanych programach, natomiast model instalacji fotowoltaicznej został zaimplementowany na podstawie całorocznych pomiarów zarejestrowanych w jednonominutowych odstępach czasu

rzeczywistej instalacji fotowoltaicznej o mocy 4,4 kW. Profile poboru mocy innych urządzeń mogą się różnić od badanych, z tego względu sterownik pracujący z innymi urządzeniami powinien je zarejestrować.



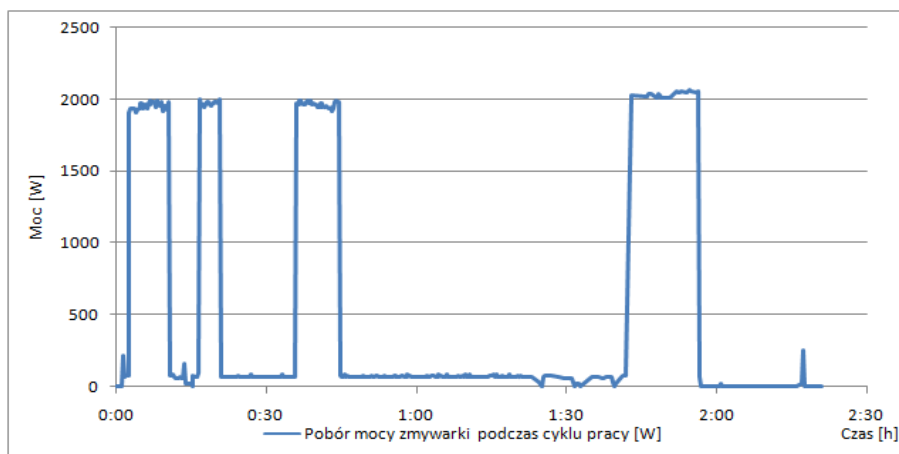
Rys. 1. Model instalacji prosumenckiej

Parametry cyklu pracy chłodziarko-zamrażarki przedstawiono na rys. 2, na którym można zaobserwować periodyczną pracę oraz wahania temperatury w komorze chłodniczej urządzenia, które mieszczą się w przedziale od około 5,5 do 6,5°C. Podczas wykonywanych pomiarów cykl pracy trwał około 1 godziny, a cykl odpoczynku w granicach 60-70 minut. Na potrzeby budowy modelu symulacyjnego, przyjęto, że podczas cyklu pracy współczynnik zmian temperatury w komorze chłodniczej wyniósł $-2^{\circ}\text{C}/\text{h}$, natomiast podczas przerwy (cyklu pasywnego) $1,8^{\circ}\text{C}/\text{h}$. Charakterystyka poboru mocy urządzenia jest nieco bardziej złożona. Tuż po starcie sprężarki pobór mocy dochodzi do 90 W, lecz szybko spada, stabilizując się po około 20 minutach na poziomie 70-75 W. Model zaimplementowano na podstawie danych pochodzących z rzeczywistych pomiarów mocy i temperatury komory chłodniczej w czasie.



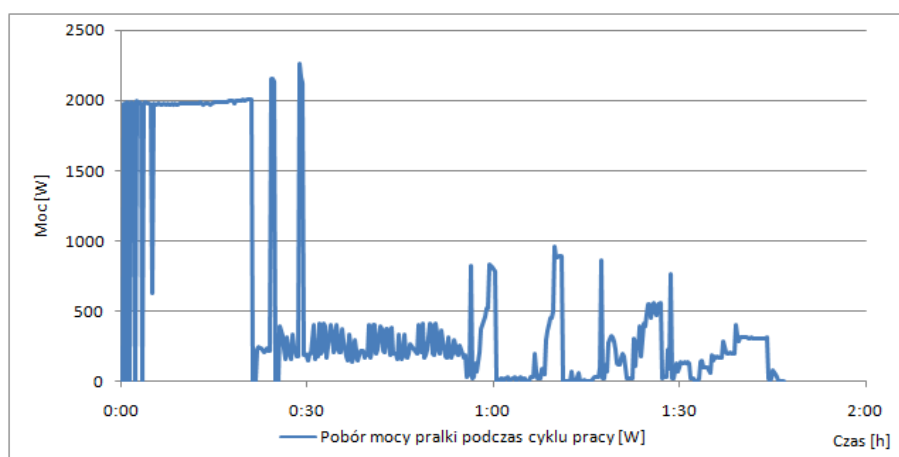
Rys. 2. Parametry cyklu pracy chłodziarko-zamrażarki

Parametry cyklu pracy zmywarki przedstawia rys. 3. Przez większość czasu pobór mocy zmywarki stabilizuje się w okolicach 70 W, jedynie w czasie cykli ogrzewania bądź suszenia pobór mocy wzrasta do około 2 kW. W zależności od wybranego programu, podczas cyklu pracy może występować różna liczba cykli ogrzewania. Prezentowane pomiary dotyczą najczęściej wykorzystywanego przez użytkowników badanego urządzenia programu zmywania wraz z suszeniem. Model symulacyjny zmywarki zaimplementowano w oparciu o przedstawiony cykl pracy.



Rys. 3. Pobór mocy zmywarki podczas cyklu pracy

Na rys. 4 przedstawiono pobór mocy pralki podczas cyklu prania. W początkowej fazie pobór mocy oscyluje od 0 do 2 kW, aby po kilku minutach ustabilizować się na poziomie 2 kW. Tak wysoki pobór mocy związany jest z ogrzewaniem wody. W dalszej części cyklu pracy pobór mocy spada poniżej poziomu 500 W, lecz wykazuje duże nieregularności związane z pracą silnika pralki. W zależności od wybranego programu i temperatury prania, cykl ogrzewania wody może trwać dłużej lub składać się kilku etapów związanych np. z praniem wstępnym i zasadniczym. Na potrzeby badań wybrano najczęściej wykorzystywany przez użytkowników program prania i na jego podstawie zaimplementowano model symulacyjny pralki.



Rys. 4. Pobór mocy pralki podczas cyklu pracy

W pracach [5,6] przedstawiono problemy z wykorzystaniem generowanej energii elektrycznej na potrzeby własne oraz propozycje algorytmów sterowania urządzeniami pracującymi w współpracy z fotowoltaicznym źródłem wytwórczym w instalacjach prosumenckich. Sterownik kontrolujący przepływy energii elektrycznej, współpracując z urządzeniami AGD pracującymi w wewnętrznej sieci domowej HAN (ang. Home Area Network), może stosować algorytmy przesuwania obciążenia i harmonogramowania czasu pracy tak, aby w jak największym stopniu wykorzystać energię elektryczną generowaną w źródle PV minimalizując jej pobór z sieci. Sterowanie pracą urządzeń takimi jak pralka, czy zmywarka wykonującymi zadane programy, jest w pewnym stopniu ograniczone, gdyż aby osiągnąć odpowiedni efekt działania urządzenia (np. wyprane „wsadu”) nie można w dowolnej chwili, na dowolny czas przerwać jego działania. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku urządzenia kontrolującego wybrane parametry jak np. temperatura komory chłodniczej lodówki, gdzie priorytetem jest utrzymanie temperatury w zadanym zakresie. Do tych ograniczeń dochodzą kolejne, związane z celem pracy urządzeń przeznaczonych do

zaspokajania potrzeb ich użytkowników i zostały one określone na podstawie obserwacji. W związku powyższym, podczas badań przyjęto następujące założenia i ograniczenia:

Dla chłodziarko-zamrażarki:

- urządzenie pracuje w identycznych warunkach przez cały analizowany okres czasu, a wahania temperatury wewnątrz komory chłodniczej mieszczą się w zakresie 4-6 °C.

Dla zmywarki:

- urządzenie uruchamiane jest codziennie, cykl musi zostać zakończony przed godziną 16⁰⁰.

Dla pralki:

- urządzenie uruchamiane jest co 3 dni, a cykl pracy musi zostać zakończony przed godziną 17⁰⁰.

1.3. Wyniki badań symulacyjnych

Badania symulacyjne wykonano z wykorzystaniem modelu, którego schemat przedstawiono na rys. 1. Podczas symulacji, przyjęto wykorzystanie taryfy jednostrefowej, dla której przyjęto jednakowy dla całego roku koszt zakupu energii elektrycznej, w związku z czym koszt zakupu energii jest wprost proporcjonalny do jej sumarycznej ilości pobranej w całym badanym okresie. Ze względu na uniezależnienie wyników symulacji od zmian czasu, zastosowano czas UTC. Profil mocy fotowoltaicznego mikroźródła przeskalowywano, aby otrzymać profile o zadanej mocy w zakresie od 1kW do 5kW. Roczne zużycie energii elektrycznej przez poszczególne urządzenia przedstawia tab. 1.

Tab. 1. Zużycie energii elektrycznej

Urządzenie	Podczas cyklu [kWh]	Dobowe [kWh]	Roczne [kWh]
Chłodziarko-zamrażarka	0,046	0,81	296
Zmywarka	1,23	1,23	448
Pralka	0,97	0,32	118
Łącznie:		2,36	862

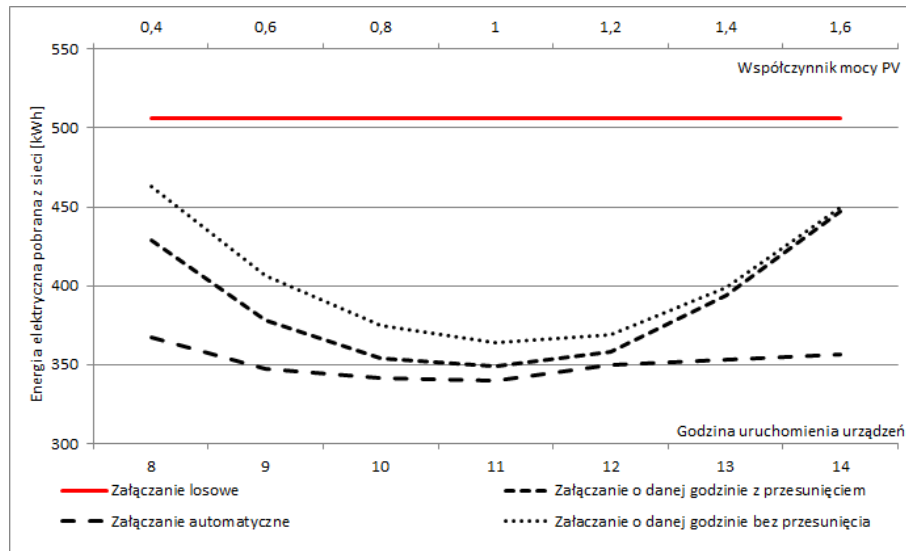
Podczas badań przeanalizowano 3 scenariusze pracy poszczególnych urządzeń. Są to następujące scenariusze.

1. Jednoczesne uruchomienie pralki i zmywarki o stałej porze.
2. Niezależne uruchomienie pralki i zmywarki o stałej porze z zastosowaniem stałego przesunięcia czasowego pomiędzy uruchomieniem urządzeń.
3. Niezależne uruchomienie urządzeń po osiągnięciu zadanej mocy instalacji fotowoltaicznej.

We wszystkich scenariuszach badań praca chłodziarko-zamrażarki była cykliczna z priorytetem utrzymania temperatury komory chłodniczej w zadanym zakresie.

Rysunek 5 przedstawia zależności pomiędzy ilością energii elektrycznej pobranej z sieci dla poszczególnych strategii zarządzania urządzeniami i różnych parametrów wpływających na załączenie urządzeń w obecności źródła PV o mocy 5 kW. Linia ciągła przedstawia ilość energii elektrycznej pobranej z sieci dla strategii konserwatywnej (profile „naturalne” odbiorników) polegającej na losowym niezależnym załączaniu pralki i zmywarki w godzinach od 8⁰⁰ do 21⁰⁰ i całodobowej pracy chłodziarko-zamrażarki. W tej strategii do pracy urządzeń wykorzystano tylko 41% energii elektrycznej ze źródła OZE, pozostała część została pobrana z sieci. Nie jest to jednak najbardziej pesymistyczny przypadek, gdyż w

zależności od trybu życia i przyzwyczajzeń użytkowników pralki i zmywarki, odsetek ten może się wyraźnie zmniejszyć, zwłaszcza jeśli użytkownicy będą załączać te urządzenia np. po pracy w godzinach wieczornych. W takich przypadkach energię elektryczną ze źródła OZE będzie pobierać tylko chłodziarko-zamrażarka pracująca cyklicznie przez całą dobę.

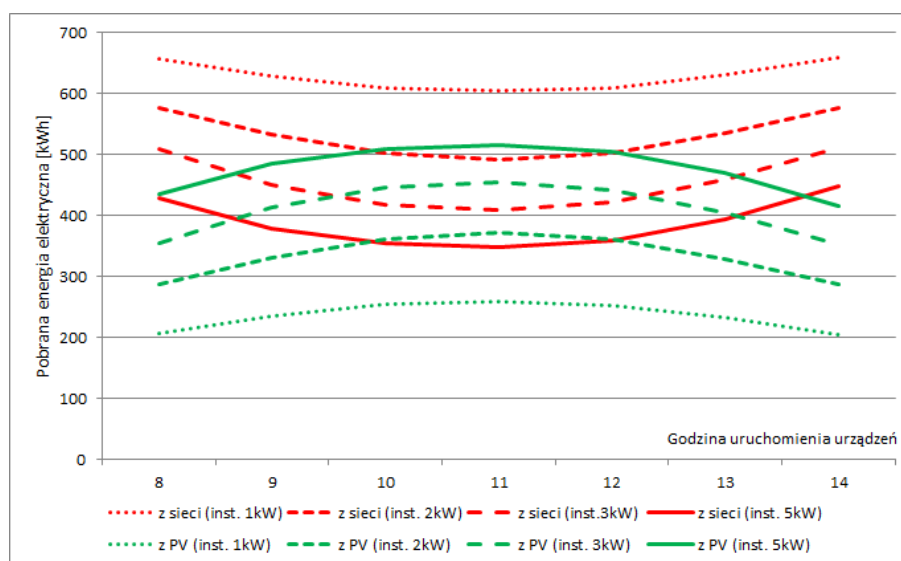


Rys. 5. Skuteczność różnych strategii sterowania urządzeniami dla instalacji PV o mocy 5 kW

Linia kropkowana przedstawia wyniki działania strategii załączającej jednocześnie pralkę i zmywarkę przez cały rok o stałej godzinie. Godzina załączenia urządzeń przedstawiona została na dolnej osi odciętych. Na wykresie wyraźnie widać, że dzięki tej strategii wykorzystanie generowanej w źródle PV energii elektrycznej znacząco wzrosło, zwłaszcza gdy godzina załączenia urządzeń ustawiona została na 11⁰⁰. W takim przypadku ilość energii niezbędnej do zasilania urządzeń wzrosła do 57% energii pobranej ze źródła OZE. Przesunięcie załączenia urządzeń o godzinę (najpierw zmywarka, następnie po godzinie pralka) dodatkowo poprawia skuteczność sterowania, gdyż ilość energii elektrycznej potrzebna do zasilania urządzeń pochodząca z mikroźródła wzrosła do 60%. Górna linia przerywana przedstawia pobór energii elektrycznej dla takiej strategii w zależności od godziny załączenia urządzeń (dolna oś odciętych). Najlepsze wyniki (61% energii pokrytej ze źródła OZE) prezentuje strategia automatycznego załączania urządzeń (dolna linia przerywana), w której zmywarka oraz pralka były załączane po przekroczeniu przez instalację fotowoltaiczną progowej mocy generacji. Współczynnik określający moment uruchomienia urządzeń (górna oś odciętych) został wyznaczony jako stosunek bieżącej mocy źródła OZE do mocy znamionowej urządzenia o najwyższej mocy znamionowej wynoszącej 2 kW dla symulowanych urządzeń. Aby zagwarantować uruchomienie urządzeń bez względu na warunki atmosferyczne, wprowadzono bezwarunkowe załączenie zmywarki o godzinie 12⁰⁰ pralki o godzinie 13⁰⁰, gdyż takie godziny bezwarunkowego załączenia urządzeń przynosiły najlepsze rezultaty.

Na rys. 6. przedstawiono wyniki symulacji pracy urządzeń (zmywarka, pralka) uruchamianych przez cały rok o stałej godzinie (oś odciętych) z zachowaniem jednogodzinnego przesunięcia pomiędzy uruchomieniem zmywarki i pralki dla instalacji fotowoltaicznych o mocach z przedziału od 1kW do 5kW. Zmywarkę uruchamiano codziennie, pralkę co trzy dni, a chłodziarko-zamrażarka pracowała w trybie ciągłym utrzymując zadane temperatury komory chłodniczej. Na wykresie można zauważyć, że dla wszystkich przypadków ilość energii elektrycznej pobranej ze źródła OZE a potrzebnej do

zasilenia urządzeń osiąga największe wartości, gdy cykl pracy urządzeń rozpoczyna się o godzinie 11⁰⁰. Ilość energii elektrycznej pobranej z sieci spada poniżej 50% dla instalacji fotowoltaicznej o mocy 3 i 5 kW, a dla instalacji PV o mocy 2 kW zbliża się do tej wartości.



Rys. 6. Roczny pobór energii z sieci oraz PV dla instalacji o różnych mocach

W tabeli 2 przedstawiono ilość energii elektrycznej wygenerowanej w symulowanych instalacjach fotowoltaicznych o mocach od 1 kW do 5 kW wraz z ilością energii elektrycznej pochodzącej z PV zużytej przez zamodelowane urządzenia oraz współczynnik wykorzystania wyprodukowanej energii na potrzeby własne. Można zauważyć, że wraz ze wzrostem mocy instalacji PV, mimo wzrostu ilości energii elektrycznej pochodzącej z OZE zużytej przez urządzenia, maleje współczynnik jej wykorzystania na potrzeby własne. Świadczy to o tym, że dla większych instalacji pozostaje większy, niezagospodarowany nadmiar produkcji, który może być wykorzystany do innych celów, zmagazynowany w zasobnikach, bądź zasilić pulę energii bilansowanej w programie net-meteringu.

Tab. 2. Zużycie energii elektrycznej z PV na potrzeby własne

Moc instalacji	Roczna produkcja [kWh]	Zużycie przez urządzenia [kWh]	Zużycie na potrzeby własne
1 kW	911	259	28%
2 kW	1785	371	21%
3 kW	2778	454	16%
5 kW	4526	514	11%

Podsumowanie i wnioski

Zamieszczone w artykule wyniki badań symulacyjnych jednoznacznie wskazują potrzebę integracji urządzeń wchodzących w skład prosumenckiego gospodarstwa domowego w spójny, zarządzany system, składający się np. ze sterownika nadrzędnego sieci domowej monitorującego pobór i produkcję energii elektrycznej oraz współpracujących z nim urządzeń. System ten może być zbudowany z wykorzystaniem technologii Internetu Rzeczy, a jego praca zoptymalizowana w kierunku minimalizacji kosztów zakupu energii elektrycznej. Sterownik sieci domowej powinien znać profile poboru energii elektrycznej przez

poszczególne urządzenia dla wykorzystywanych przez nie programów pracy i na ich podstawie zarządzać załączaniem urządzeń w taki sposób, aby jak najlepiej dopasować pobór energii elektrycznej do chwilowej produkcji, choć nawet najprostsze algorytmy załączające urządzenia o zadanym czasie przynoszą zadowalające rezultaty. Sterownik powinien jednak uwzględniać również pozostałe czynniki wpływające na koszt zakupu energii takie jak taryfy, programy bilansowania oraz wykorzystanie ewentualnych zasobników akumulatorowych, co wymaga zastosowania bardziej wyrafinowanych algorytmów sterowania.

Przedstawiony w artykule model instalacji prosumenckiej jest modelem uproszczonym wymagającym dalszych badań i rozwoju, gdyż nie uwzględnia wielu czynników wpływających na rzeczywisty profil zapotrzebowania na energię elektryczną gospodarstwa domowego. Można do nich zaliczyć wpływ pozostałych urządzeń gospodarstwa domowego, audio-video, klimatyzacji, centralnego ogrzewania, ogrzewania c.w.u., oświetlenia, czy też pracy urządzeń o stałym poborze, jak np. routery, sterowniki, urządzenia pracujące w trybie uśpienia itp. Oprócz odbiorników, wpływ na sumaryczny koszt zakupu energii mają również stosowane na danym rynku energii elektrycznej mechanizmy takie jak taryfy wielostrefowe, taryfy dynamiczne oraz programy bilansowania. Przykładowo, 1 stycznia 2016 roku ustawodawca uruchomił w Polsce program częściowego bilansowania energii elektrycznej bez opłat za dystrybucję, co znacząco wpłynie na koszty zakupu energii elektrycznej przez prosumenta, lecz wciąż największe korzyści przynosi spożytkowanie wyprodukowanej energii elektrycznej na potrzeby własne. Mimo przyjętych uproszczeń wyniki pracy wykazują wagę problemu sterowania urządzeniami (odbiornikami) w celu maksymalizacji wykorzystania produkowanej energii elektrycznej na potrzeby własne, jak i znaczenie technologii Internetu Rzeczy umożliwiającej komunikowanie się i wzajemną współpracę poszczególnych urządzeń w celu zminimalizowania kosztów zakupu energii.

Literatura

[Brachman,Wójcicki] Brachman A., Wójcicki R.: Profitability analysis of PV installation in combination with different time-of-use strategies in Poland. ICMMI 2015, Springer, 2016, Advances in Intelligent Systems and Computing vol. 391 2194-5357, s. 605-614.

[Jongbae, Jinsung...] Jongbae K., Jinsung B., Daebeom J., Myeong-in Ch., Byeongkwan K., Sehyun P.: An IoT-Based Home Energy Management System over Dynamic Home Area Networks, International Journal of Distributed Sensor Networks, Volume 2015 (2015), Article ID 828023.

[Omnet] OMNeT++ Discrete Event Simulator. <https://omnetpp.org/>

[Popczyk] Popczyk J.: Model interaktywnego rynku energii elektrycznej. Od modelu WEK-IPP-EP do modelu EP-IPP-WEK, BŻEP (Biblioteka Źródłowa Energetyki Prosumenckiej), www.klaster3x20.pl, Nr katalogowy 1.1.06. Synteza EP.

[Wójcicki1] Wójcicki R.: Prosumencka mikroinstalacja fotowoltaiczna na przykładzie domu jednorodzinnego. Energetyka prosumencka : pierwsza próba konsolidacji, 2014, ISBN: 978-8-3635-0092-4, s. 164-168.

[Wójcicki2] Wójcicki R.: Internet przedmiotów jako narzędzie wspomagające poprawę efektywności energetycznej w fotowoltaicznych instalacjach prosumenckich. Studia Informatica, 2015, vol. 36 nr 2, s. 59-72.

Datowanie RAPORTU (wersja oryginalna) – 08.04.2016 r.