



Tomasz MIROWSKI*, Monika PEPEŁOWSKA**

Analiza symulacyjna zużycia energii elektrycznej u odbiorcy końcowego z wykorzystaniem inteligentnego opomiarowania

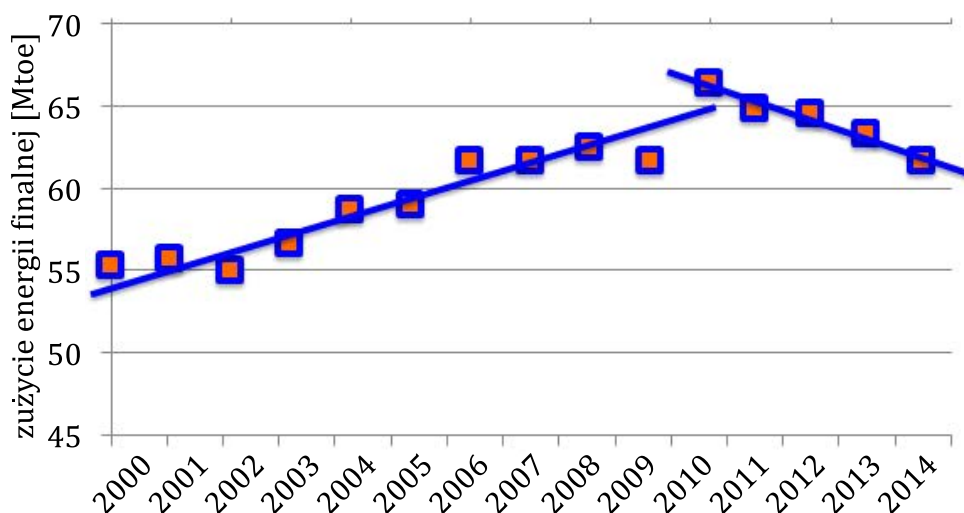
STRESZCZENIE: Operatorzy sieci dystrybucyjnych wprowadzają obecnie inteligentne systemy pomiaru zużycia energii w gospodarstwach domowych. Tym samym możliwe staje się zdalne odczytywanie parametrów miernika energii oraz automatyczne generowanie bilingu. Proces ten znajduje się we wczesnej fazie rozwoju. Obserwuje się stale rosnące zapotrzebowanie na usługi energetyczne, co stwarza potrzebę modernizacji i rozszerzenia funkcjonalności sieci elektroenergetycznych. W artykule przedstawiono zagadnienia dotyczące możliwości rozwoju inteligentnych sieci pomiarowych w Polsce. Wskazano zakres prac przeprowadzonych przez autorów w ramach projektu *Big Data for Energy Sector* – BigDES. Przybliżona została charakterystyka inteligentnych sieci *Smart Grid*. Na wybranych przykładach dokonano analizy możliwości wykorzystania inteligentnego opomiarowania systemu elektroenergetycznego. Przybliżono możliwości stosowania inteligentnych liczników energii elektrycznej – *smart meters*. W ramach zagadnienia kolejno badano zjawiska: precyzji pomiaru, dobowego zużycia energii elektrycznej w gospodarstwie domowym, opomiarowania stref gospodarstwa domowego oraz stosunku czasu pracy urządzeń do ceny energii elektrycznej. Zwrócono uwagę, że systemy inteligentne są w stanie ułatwić operatorom zarządzanie siecią elektroenergetyczną, a także dostarczyć wielu informacji odbiorcom końcowym. Zakończenie artykułu stanowi podsumowanie przeprowadzonych w ramach projektu prac.

SŁOWA KLUCZOWE: *smart metering*, *smart grid*, inteligentne opomiarowanie, *big data*

* Dr inż., ** Mgr inż. – Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków; e-mail: mirowski@meeri.pl

Wprowadzenie

Racjonalizacja zużycia paliw i energii jest jednym z głównych założeń polityki energetycznej państwa. Powinna ona obejmować wszystkie obszary/sektory gospodarki, w których odpowiednia gospodarka paliwowo-energetyczna, poprawa efektywności energetycznej mogą przynieść wymierne efekty w postaci oszczędności energii, a także związaną z tym redukcję kosztów. Dotyczy to w szczególności odbiorców końcowych energii, których świadomość i wiedza w tym zakresie jest coraz większa. Zmiany zużycia energii finalnej od 2011 roku, przedstawione na rysunku 1, świadczą o początku tego kierunku zmian. Wsparcie źródeł wytwórczych Odnawialnych Źródeł Energii (OZE) oraz poprawa efektywności energetycznej oprócz pozytywnych zmian w strukturze zużycia energii, niesie ze sobą szereg trudności, z którymi sektor elektroenergetyczny obecnie się boryka. Jest to m.in. trudna do dokładnego prognozowania charakterystyka pracy źródeł OZE oraz znikome zdolności regulacyjne (Paska i in. 2013).



Rys. 1. Zużycie energii końcowej w Polsce w latach 2000–2014
Źródło: Euro-Stat

Fig. 1. Final energy consumption in Poland 2000–2014

W artykule przedstawiono wstępne wyniki symulacji wykonanych na dużych zbiorach danych pomiarowych wygenerowanych i przetworzonych w jednostce Komputera Dużej Mocy Obliczeniowej ZEUS w Akademickim Centrum Komputerowym Cyfronet. Badanie miało na celu analizę wpływu częstości wykonanych odczytów w strefach pomiaru energii elektrycznej za pomocą inteligentnych układów pomiarowych u odbiorców końcowych (klienci indywidualni).

1. Krótka charakterystyka inteligentnych sieci i układów pomiarowych

Inteligentne układy pomiarowe (inaczej inteligentne liczniki, ang. *Smart Meters*) to najkrócej ujmując liczniki energii elektrycznej, które oprócz pomiaru zużycia energii udostępniają określone informacje odbiorcy końcowemu, dzięki którym ma on możliwość podejmowania świadomych decyzji w zakresie użytkowania odbiorników energii elektrycznej. Zastosowanie inteligentnego opomiarowania umożliwia:

- ◆ zwiększenie precyzji pomiaru poprzez zagęszczenie częstotliwości odczytu, co jest istotne głównie dla operatora sieci dystrybucyjnej (OSD),
- ◆ uzyskanie informacji na temat dobowego zużycia energii elektrycznej poprzez analizę wielkości dobowego zużycia energii elektrycznej w gospodarstwie domowym,
- ◆ uzyskanie informacji na temat strefy gospodarstwa domowego, w której występuje najwyższe zużycie, poprzez analizę wielkości zużycia energii elektrycznej w konkretnej strefie,
- ◆ zwiększenie oszczędności w gospodarstwie domowym poprzez analizę czasu pracy odbiorników energii.

Inteligentne układy pomiarowe można podzielić ze względu na okres, w którym zostały wdrożone (Billewicz 2013):

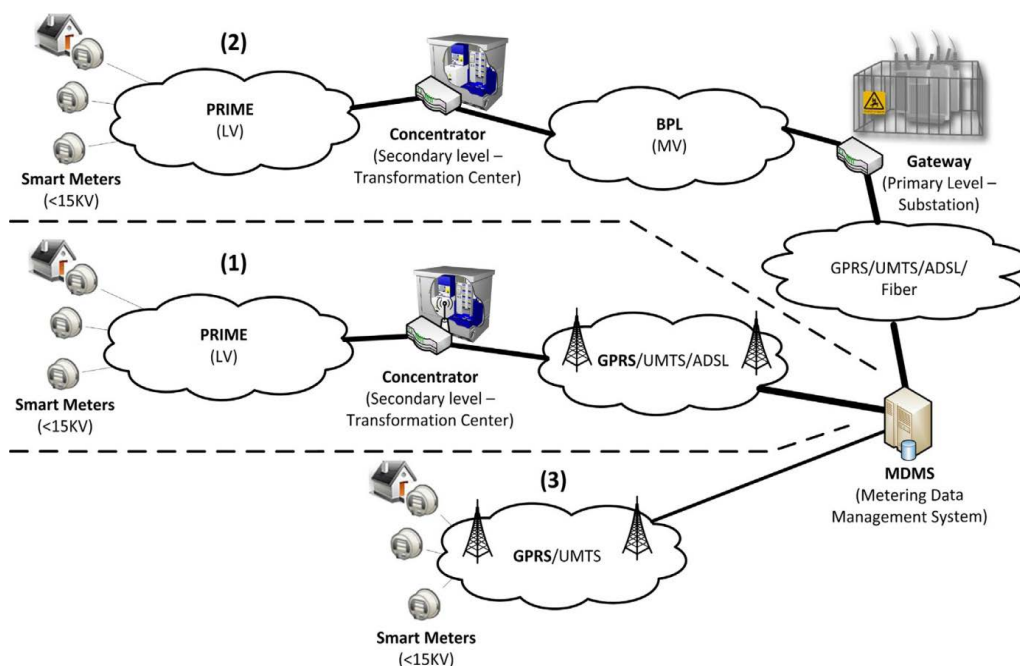
1. Systemy pierwszej generacji, wdrażane od 2001 roku o transmisji jednokierunkowej.
2. Systemy drugiej generacji, wdrażane od 2002 roku, mające dwukierunkową transmisję oraz dodatkowo umożliwiające zdalne odłączenie instalacji odbiorczej klienta.
3. Systemy trzeciej generacji, wdrażane w latach 2004–2007, zawierające dodatkowo informację o parametrach jakościowych energii, umożliwiające rozliczanie na podstawie godzinowych odczytów, a także zdalne podstawienie nowszej wersji oprogramowania urządzeń (ang. *upgrade firmware*).
4. Systemy najnowszej generacji, wdrażane od 2010 roku, dodatkowo współpracujące z siecią domową HAN (*Home Area Network*).

Inteligentne sieci (ang. *Smart Grids*) możemy definiować jako elektroenergetyczne sieci przesyłowe, które integrują zachowanie i działanie wszystkich podłączonych do nich użytkowników (wytwórców, konsumentów oraz użytkowników będących zarówno wytwórcami, jak i konsumentami) w celu dostarczania energii elektrycznej w sposób bezawaryjny, bezpieczny i ekonomiczny, uwzględniając wymogi ochrony środowiska. Istotne jest, że *Smart Grid* obejmuje wszystkie elementy systemu elektroenergetycznego. Tym samym integralną i nieodłączną częścią sieci inteligentnych są właśnie inteligentne liczniki energii elektrycznej. Dzięki temu urządzeniu otrzymujemy odczyt energii elektrycznej w interwale godzinowym lub krótszym; licznik przesyła te informacje do dostawcy energii. Inteligentne liczniki muszą umożliwiać odczyty dwustronne, co jest niezbędne w sieciach *Smart Grid*.

Obecnie polska energetyka znajduje się we wczesnej fazie wdrażania struktury *Advanced Metering Infrastructure* (Zaawansowana Infrastruktura Pomiarowa); dopiero podejmowane są

działania wstępne, mające na celu osiągnięcie w pełni rozwiniętej sieci inteligentnej. Światowa energetyka boryka się z problemem, którym jest przerwa generacji i dostawy energii na dużą skalę (tzw. *blackout*). Sieci *Smart Grid* projektowane są w taki sposób, aby zagrożenie wystąpienia takiej awarii zredukować do minimum.

Schemat części sieci *Smart Grid* przedstawia rysunek 2. Obrazuje także podstawowe elementy wchodzące w skład całej infrastruktury inteligentnych sieci przesyłowych: inteligentne liczniki, sieci przesyłowe, systemy komputerowe (których zadaniem jest kontrola procesu przesyłu i przechowywania danych), protokoły komunikacyjne określające metodę przesyłu i sposób szyfrowania informacji oraz procesy organizacyjne określające rolę i zakres obowiązków jednostek, których zadania związane są z pracą *Smart Grid*. Wymienione elementy potrzebne są do sprawnego pozyskiwania i przetwarzania danych o zużyciu energii. Pozwalają także na monitoring parametrów energii u każdego odbiorcy oraz pozwalają na sterowanie zużyciem energii przez odbiorcę w sposób przez niego akceptowany. Kształt infrastruktury sieci inteligentnych oraz sposób udziału poszczególnych elementów w jej działaniu nie są ściśle określone. Schematy poszczególnych sieci mogą się między sobą znacząco różnić. Można wyróżnić trzy różne konfiguracje połączeń sieciowych, które zależne są od poziomu urbanizacji miejsca budowy instalacji *Smart Grid*.



Rys. 2. Przykładowy schemat części sieci *Smart Grid*

Objaśnienia: Smart meters – inteligentne liczniki, PRIME – *Power Line Intelligent Metering Evolution*, BPL – szerokopasmowa sieć zasilająca, Concentrator – koncentratory danych, MDMS – system zarządzania danymi pomiarowymi, GPRS/UMTS/ADSL – mobilne technologie transmisji danych

Źródło: REFLEXE 2013

Fig. 2. An exemplary diagram of the Smart Grid network

Pierwsza z nich dotyczy obszarów miejskich i wiąże się z wykorzystaniem koncentratora do przesyłu danych. Koncentrator to punkt „zbiorczy”, który zbiera dane z określonej grupy liczników, a następnie konwertuje je do formatu odpowiedniego dla systemu zarządzania danymi. Urządzenie zazwyczaj montowane jest przy transformatorach niskiego napięcia. Informacje do koncentratora przesyłane są za pomocą sieci niskiego napięcia.

Kolejny rodzaj sieci *smart* to taki, który wykorzystuje zarówno koncentrator jak i bramę (z ang. *gateway*). Brama pełni podobną rolę jak koncentrator, jednak w tym przypadku połączenie odbywa się za pomocą sieci średniego napięcia. Taki układ sieci wykorzystywany jest na obszarach wiejskich i innych o niewielkim stopniu urbanizacji, gdzie sieci niskiego napięcia nie umożliwiają dobrej jakości przesyłu danych. Bramy zazwyczaj znajdują się przy Głównych Punktach Zasilających (GPZ) oraz innych miejscach podobnej rangi w infrastrukturze elektroenergetycznej.

2. Analizy symulacyjne wykorzystania *smart meteringu*

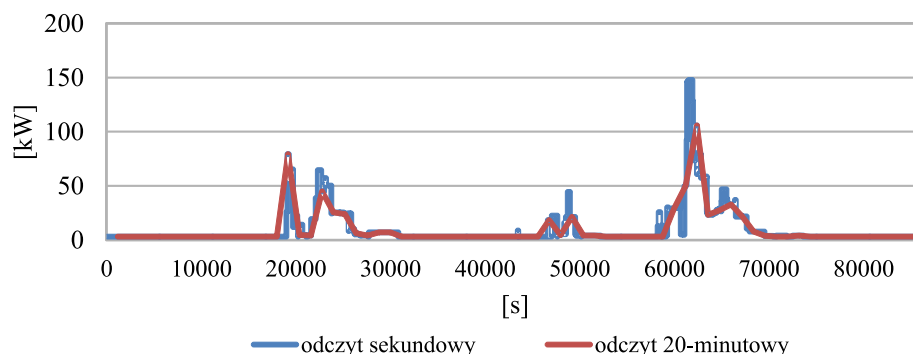
W 2015 roku zespół naukowy Zakładu Polityki i Badań Strategicznych Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN przy wsparciu Akademickiego Centrum Komputerowego Cyfronet AGH zajmował się analizą dużych zbiorów danych w sektorze energetyki (*Big Data for Energy Sector* – BigDES).

Ze względu na brak dostępu do danych rzeczywistych odpowiedniej jakości oraz ochronę wyników prac wdrożeniowych w zakresie *Smart Grid* prowadzonych przez polskie koncerny energetyczne, postanowiono stworzyć generator profilu zużycia energii elektrycznej u odbiorcy końcowego, uzyskując niemal nieograniczone możliwości tworzenia zbiorów danych. Zbiory te były identyczne w zakresie struktury danych do rzeczywistych odczytów z liczników inteligentnych stosowanych w projekcie pilotażowym zrealizowanym na północy Polski. Prace badawcze miały na celu wygenerowanie oraz szybką analizę danych empirycznych zbliżonych do rzeczywistych wartości zużycia energii elektrycznej w sieciach HAN dla czterech stref mieszkalnych (pokoje, kuchnia, łazienka, urządzenia zewnętrzne).

Opracowano generator profili zużycia w HAN, dzięki któremu można utworzyć zbiór dobowych odczytów zużycia energii elektrycznej z dokładnością nawet do 1 sekundy i informacją o każdym odbiorniku. Ograniczeniem jest jedynie przestrzeń dyskowa do przechowywania tak utworzonych danych. W artykule zebrano najważniejsze wnioski dotyczące możliwości zastosowania inteligentnego opomiarowania na wybranych przykładach.

Przykład analizy 1 – Precyzja pomiaru

Na podstawie próbki danych sporządzono wykres przedstawiający porównanie wyników sekundowego oraz 20 minutowego odczytu zużycia mocy z licznika pomiarowego energii elektrycznej w okresie doby (rys. 3).



Rys. 3. Odczyt zapotrzebowania na moc chwilową w odstępach sekundowych oraz 20 minutowych dobowego zużycia energii

Źródło: opracowanie własne

Fig. 3. Reading of the instantaneous power demand for the seconds and 20 minutes of the daily energy consumption

W przypadku odczytu pomiarów mocy w dwóch interwałach czasowych w określonym przedziale czasu zauważamy znaczące wahania w rozbieżności pomiarów. Biorąc pod uwagę okres dobowy różnice odczytów pomiarowych osiągają nawet do 30%, ilość pominiętych informacji w przypadku pomiaru 20 minutowego staje się niezwykle istotna. Najbardziej znaczące różnice zauważalne są w pikach porannym i wieczornym, kiedy to zostaje uruchomiona największa liczba urządzeń domowych. Niektóre z nich – np. czajnik – na mniej niż 20 minut, dlatego zostają zarejestrowane tylko w odczycie sekundowym. Utrata informacji o chwilowym szczytowym zapotrzebowaniu na moc powoduje, że wiedza z analiz takich danych jest obciążona błędem (otrzymujemy z interwału 20-minutowego chwilową moc maksymalną i minimalną oraz średnie zużycie).

Należy zaznaczyć, że odczyt oraz gromadzenie danych w interwale sekundowym rozszerza ich ilość do potężnych rozmiarów tworząc zbiór *Big Data*, co w obecnym czasie może stanowić problem dla przedsiębiorstwa energetycznego lub operatora danych, który musiałoby je archiwizować i sprawnie analizować. Koszty utrzymania infrastruktury IT zapewniającej archiwizację, bezpieczeństwo oraz analizę danych jest obecnie głównym problemem strumieniowego zapisu wyników pomiarowych.

Przykład analizy 2 – Dobowe zużycie energii elektrycznej w gospodarstwie domowym

W przykładzie 2 przedstawiono wyniki symulacji dobowego zużycia energii elektrycznej u 37 odbiorców indywidualnych (gospodarstwa domowe). Wirtualne inteligentne liczniki zostały przypisane do wybranych lokalizacji domów jednorodzinnych w miejscowości Lubycza Królewska (woj. podkarpackie). Dzięki wizualizacji można analizować np. rozkłady obciążeń na poszczególnych węzłach sieci, wykrywać awarie, kradzieże itp.

Informacje przedstawione na rysunku 4 są niezwykle istotne dla operatora, ponieważ pokazują wprost wielkość zużycia energii elektrycznej, a tym samym wielkość zapotrzebowania na energię u odbiorcy końcowego. Badania w tym zakresie są prowadzone od lat w wielu ośrodkach



Rys. 4. Przykład wizualizacji dobowego zużycia energii elektrycznej w gospodarstwach domowych na przykładzie miejscowości Lubycza Królewska (woj. podkarpackie)
Źródło: opracowanie własne

Fig. 4. The visualization example of daily electricity consumption in households – Lubycza Królewska (province. podkarpackie)

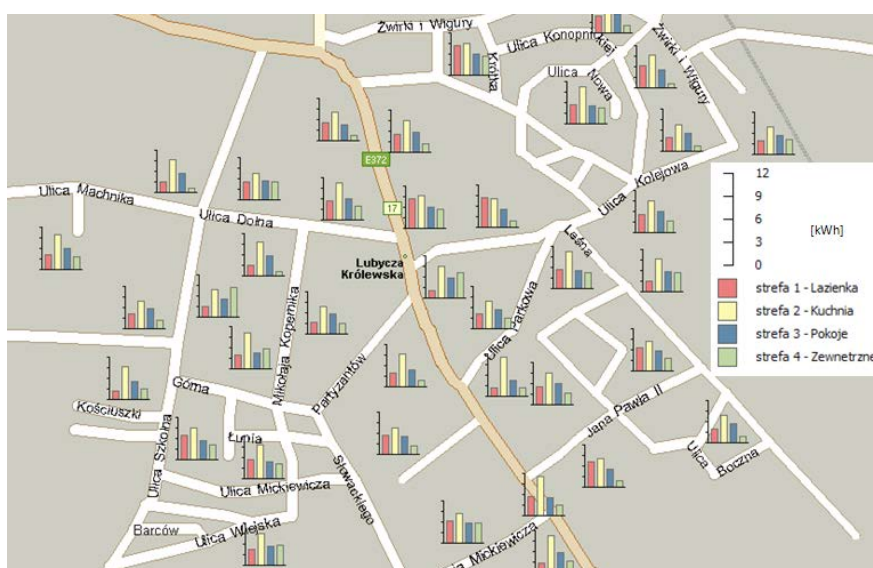
naukowo-badawczych współpracujących z sektorami elektroenergetyki i automatyki. Na szczególną uwagę zasługuje europejski projekt SMARTCITIES 2013 pod nazwą: „Równoważenie (bilansowanie) konsumpcji i produkcji energii w efektywnym energetycznie inteligentnym sąsiedztwie”, do przeanalizowania wyników którego autorzy zachęcają (Matusiak 2016).

Można także dane prześledzić godzina po godzinie lub w dowolnych interwałach czasowych śledząc zmiany w zapotrzebowaniu na energię.

Przykład analizy 3 – Opomiarowane strefy gospodarstwa domowego

Liczniki inteligentne stosowane w projektach badawczych pozwalają na pomiar parametrów (energia, moc maksymalna całodobowo, czas, data, taryfa, nr licznika) w podziale na strefy. W przykładowym eksperymencie wyszczególniono cztery strefy (1 – łazienka, 2 – kuchnia, 3 – pokoje, 4 – urządzenia zewnętrzne). Wyniki przedstawiono na rysunku 5.

Na podstawie tak zrealizowanego założenia operator jest w stanie wskazać maksymalne zużycie energii elektrycznej w poszczególnych strefach; dla wybranego przykładu wyniosło 12 kWh. Widoczna jest również strefa, w której wystąpiło największe zapotrzebowanie, tj. strefa oznaczona numerem 2 – kuchnia). Dzięki takiej analizie danych, przedsiębiorstwo energetyczne może przygotować dedykowaną ofertę taryfową dla konkretnego gospodarstwa domowego. Natomiast użytkownik posiadając takie informacje może szacować, które z urządzeń w danej strefie jest najbardziej energochłonne i ewentualnie podjąć decyzję o zmianie takiego urządzenia.



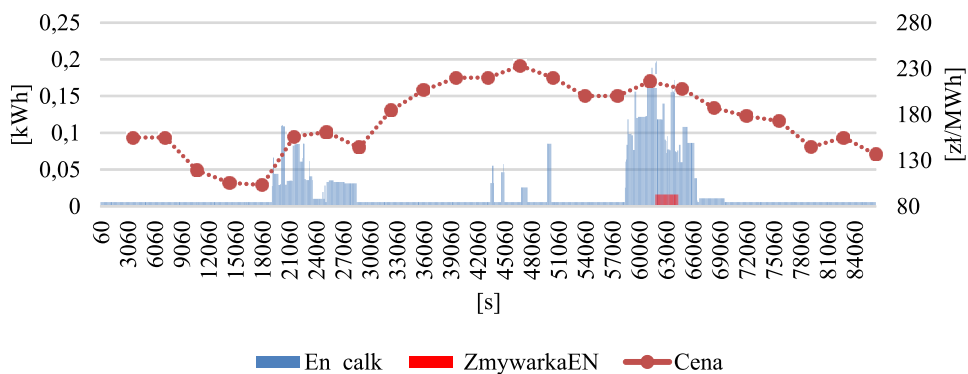
Rys. 5. Dobowe zużycie energii elektrycznej w gospodarstwach domowych w podziale na 4 strefy
Źródło: opracowanie własne

Fig. 5. Daily electricity consumption in households divided into 4 zones

Przykład analizy 4 – Czas pracy urządzeń a cena energii elektrycznej

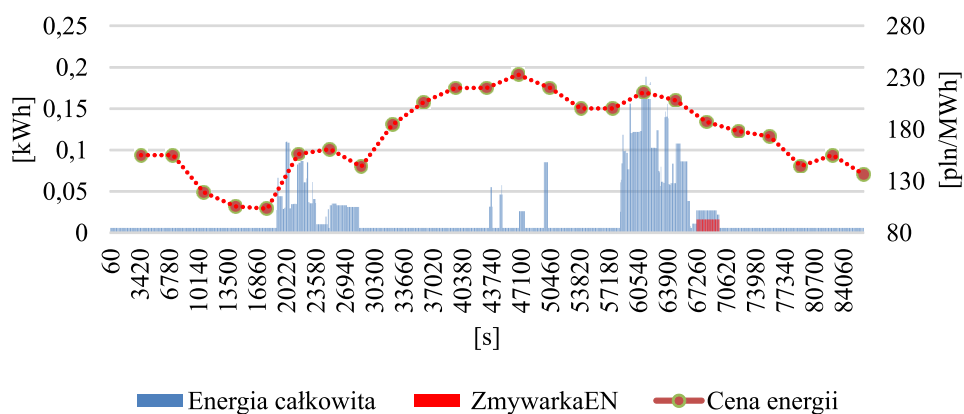
Kolejnym zadaniem przyjętym przez autorów było zintegrowanie danych o czasie pracy urządzeń domowych z informacjami na temat aktualnej ceny energii elektrycznej z rynku giełdowego. Informacja taka stanowiłaby podstawę do zarządzania zużyciem energii poprzez włączanie urządzenia kiedy cena energii kształtuje się na niższym poziomie. Użytkownik zyskuje w ten sposób oszczędności, podobnie operator. Istotnym było również, aby wybrać do badań urządzenie, w którym zmiana jego czasu pracy nie wpłynie na komfort użytkownika. Do celów tego przykładu przeanalizowano czas pracy zmywarki u konkretnej osoby. Analizowany użytkownik uruchomił zmywarkę o godzinie 17:18, a jej czas włączenia to 25 minut, co zobrazowano na rysunku 6. Jak zauważamy na wykresie, urządzenie zostało uruchomione w czasie stosunkowo wysokich wartości ceny energii elektrycznej na rynku hurtowym.

Autorzy zaproponowali przesunięcie włączenia zmywarki w czasie o zaledwie 30 min, ponieważ jak zauważymy na rysunku 7, taka niewielka zmiana pozwala na uzyskanie oszczędności. Przyjęte ceny są cenami, które dotyczą operatora i są sugestią oszczędności właśnie dla niego. Pośrednio na takiej analizie może zyskać również konsument, który może uzyskać od operatora dedykowaną ofertę taryfową.



Rys. 6. Pierwotny czas włączania zmywarki
Źródło: opracowanie własne

Fig. 6. The initial on-time of dishwasher



Rys. 7. Zmiana czasu włączania zmywarki
Źródło: opracowanie własne

Fig 7. Changing the on-time of dishwasher

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały szereg możliwości praktycznego stosowania danych pochodzących z inteligentnych liczników oraz potencjał badawczy w tym zakresie. Wielkość możliwych do uzyskania informacji jest niemal nieograniczona. Analiza zbiorów *Big Data* stanowi nie lada wyzwanie zarówno dla zmieniającej się energetyki, jak i dla pozostałych sektorów gospodarczych kraju. W obecnym czasie rozbudowanych technologii i możliwości *smart mete-*

ringu niezbędne jest tworzenie dużych baz danych, a co najistotniejsze – budowa narzędzi, które umożliwią ich szybką analizę. Umiejętność sprawnej analizy danych elektroenergetycznych usprawniłaby działanie systemu, a tym samym niesłaby szereg korzyści zarówno dla operatora, jak i dla odbiorcy końcowego.

Zastosowanie sieci *Smart Grid* umożliwia między innymi bardziej precyzyjne prognozowanie i bilansowanie energii w systemie elektroenergetycznym, identyfikację przyczyn awarii na poziomie rozdziału i dystrybucji, aktywny udział odbiorców końcowych w rynku energii elektrycznej.

Stosowanie inteligentnych liczników w obecnej infrastrukturze sieciowej, organizacji rynków energii oraz scentralizowanej strukturze wytwarzania nie ma większego sensu. Jednym z głównych rozwiązań jest wprowadzenie nowego gracza na rynek energii – prosumenta, który wymusi zmiany w sposobie bilansowania systemów elektroenergetycznych (Popczyk i in. red. 2014). Równie ważnym rozwiązaniem jest integracja źródeł rozproszonych energii, elastycznych odbiorców i magazynów energii w lokalnych obszarach geograficznych za pomocą mikrosieci. Jest to zarazem pierwszy krok do budowy inteligentnych sieci elektroenergetycznych (Wasilewski i in. 2015).

Publikacja zrealizowana w ramach badań statutowych Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk.

Literatura

- BILLEWICZ, K. 2013. Perspektywy rozwoju inteligentnych systemów pomiarowych. *Pomiary Automatyka Kontrola* R. 59, nr 1, s. 79–84.
- Euro-Stat. Consumption of final energy. [Online] Dostępne w: <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database> [Dostęp: 26.01.2016].
- MATUSIAK, B. 2016. Zarządzanie wymianą energii w inteligentnym sąsiedztwie – model biznesowy. *Rynek Energii* Nr 1(122), s. 22–25.
- PASKA i in. 2013 – PASKA, J., PAWLAK, K. i SURMA, T. 2013. Systemy wsparcia jako istotny element optymalizacji wpływu nowych, „ekologicznych” źródeł energii elektrycznej na system elektroenergetyczny. *Rynek Energii* Nr 2, s. 48–53.
- POPCZYK i in. red. 2014 – POPCZYK, J., KUČĘBA, R., DĘBOWSKI, K. i JĘDRZEJCZYK, W. red. 2014. *Energetyka prosumencka*. Pierwsza próba konsolidacji, Sekcja Wydawnictw Wydziału Zarządzania Politechniki Częstochowskiej.
- REFLEXE 2013. Response of Electrical Flexibility of commercial buildings & industrial sites for smart grid. Materiały źródłowe projektu www.smratgrid-reflexe.com.
- WASILEWSKI i in. 2015 – WASILEWSKI, J., KALETA, M. i BACZYŃSKI, D. 2015. Wybrane zagadnienia mikrosieci energetycznych w Polsce. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal* t. 18, z. 1, s. 45–58.

Tomasz MIROWSKI, Monika PEŁOWSKA

Simulation analysis of electricity consumption for the final consumer with the use of smart metering

Abstract

Distribution network operators are currently rolling out intelligent systems for measuring energy consumption in households. Therefore, it becomes possible to remotely read meter parameters of energy and automatically generate billing. This process is currently in the early stages of development. There has been a growing demand for energy services, which creates the need to modernize and extend the functions of Polish power grid. The article presents issues concerning the possibility of smart metering network development in Poland indicated the scope of the data carried out by the authors as part of Big Data for Energy Sector – BigDES project. Authors provided approximate characterization of intelligent Smart Grid and analysis of the possibilities of using smart metering power system. Brought closer the possibility of applying smart meters. Some of Smart Grid features have been studied in- the precision of the measurement, the daily electricity consumption in the household, household metering zones and the ratio of the working time of equipment for the price of electricity. It was pointed out that intelligent systems are able to facilitate the management of the electricity network operators, as well as provide a variety of information to end users. The end of the article is a summary of the project works.

KEYWORDS: smart metering, smart grid, big data

