

Strażnik energii dla systemów zarządzania energią elektryczną w budynkach mieszkalnych

Streszczenie. W artykule przedstawiono wynik analizy statystycznej zużycia energii w budynkach mieszkalnych. Za pomocą wykresów pudełkowych odwzorowano zmienność zapotrzebowania w okresach godzinowych i dobowych, która pozwoliła na określenie odchylenia standardowego w każdej godzinie w każdy dzień tygodnia. Ze względu na niedeterministyczne zachowanie mieszkańców zaproponowano aplikację „strażnik energii” pełniącą rolę systemu doradczego. System zweryfikowano dla rzeczywistych budynków mieszkalnych, każdorazowo uzyskując redukcję zużycia.

Abstract. Results of the statistical analyses of the residential buildings' electrical energy consumption have been presented in the article. Demand variability in hourly and daily periods has been modeled by the box plot. It allowed finding the standard deviation each hour on each day of the week. Due to the nondeterministic behavior of the inhabitants, the authors proposed an "energy guard" application as a tool acting as an advisory system. The system has been successfully verified in the real residential buildings (Energy Guard for Energy Management System in residential buildings).

Słowa kluczowe: redukcja zużycia, analiza statystyczna, strażnik energii, budynki mieszkalne.

Keywords: energy demand reduction, statistical analysis, energy guard, residential buildings.

Wstęp

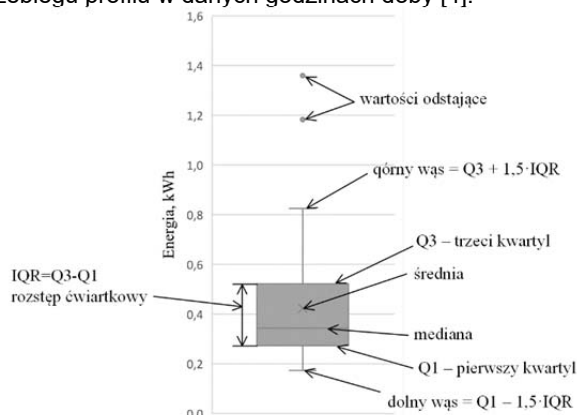
Zarządzanie energią w budynkach może być realizowane w wielu aspektach. Końcowy efekt zawsze pozostaje ten sam, obniżenie kosztów zakupu energii. W przypadku odbiorców indywidualnych w taryfie G, można stosunkowo łatwo wpływać na harmonogram pracy urządzeń, uzyskując wymierny efekt zmniejszenia zużycia energii lub dopasowania do generacji w odnawialnym źródle energii (OZE).

Sterowanie wymaga przewidywania profilu zapotrzebowania. Jednak w przypadku odbiorców w taryfie G jest to bardzo trudne [1,2], głównie ze względu na dużą moc pojedynczych odbiorników w porównaniu do mocy zamówionej przyłącza, a właściwie profilu odbiorcy.

Załączenie czajnika o mocy 2 kW, może spowodować chwilowy wzrost mocy o 300%, a co więcej jego załączenie nie jest deterministyczne.

Problem losowości zużycia energii elektrycznej

Ze względu na niedeterministyczne zachowania osób w gospodarstwach domowych, do analizy dobowego profilu zapotrzebowania wykorzystano wykresy pudełkowe (rys. 1) [3], które pozwalają na statystyczne odwzorowanie przebiegu profilu w danych godzinach doby [4].



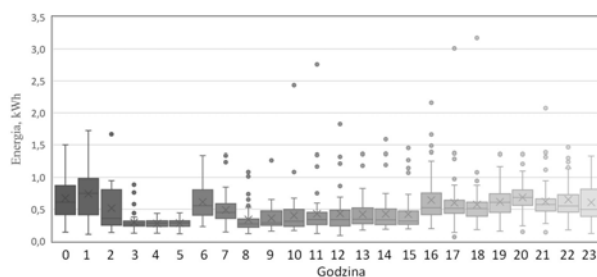
Rys.1. Interpretacja wykresu pudełkowego

Na podstawie analizy wykresu pudełkowego można określić prawdopodobieństwo wystąpienia godzinowego zużycia energii, przy czym:

- IQR – rozstęp ćwiartkowy określa 50% wszystkich wartości ($\pm 0,67 \sigma$);
- wąsy – obejmują 99,3% wszystkich występujących wartości;
- wartości odstające wynikają tu z sytuacji nietypowych, dla przykładu dni przedświąteczne, urlop itp. Są to wartości nietypowe i dla takich dni należy przewidzieć dedykowany tryb pracy.

W kontekście prognozowania zużycia dla gospodarstwa domowego, IQR powinien mieć jak najmniejszą wartość i nie powinny występować wartości odstające.

Analizę statystyczną dla przykładowego gospodarstwa domowego [5] wykonano na podstawie rocznego rzeczywistego profilu zużycia energii elektrycznej. Wyniki zostały przeanalizowane dla każdej godziny w każdym dniu tygodnia. Przykładowa godzinowa analiza statystyczna dla każdej godziny w każdą środę została pokazana na rys. 2. Na podstawie analizy można zauważyć, że największy rozstęp ćwiartkowy występuje w godzinach nocnych (0 do 3) a najmniejszy w ciągu dnia.



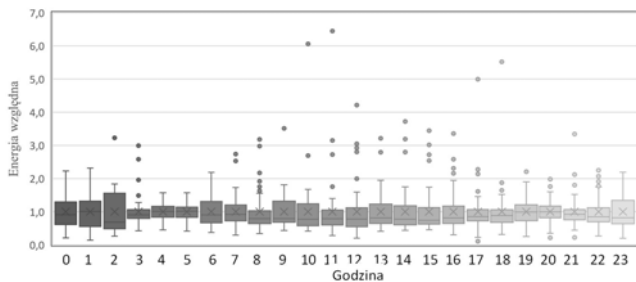
Rys.2. Wyniki analizy statystycznej zużycia energii dla każdej godziny w każdą środę roku

W dalszej kolejności wyniki znormalizowano w celu uogólnienia, a także łatwiejszej interpretacji wyników. Analiza została wykonana dla każdej godziny z osobna. Jako współczynnik normalizujący przyjęto wartość średnią energii w każdej godzinie zgodnie ze wzorem:

$$(1) \quad E_i^* = \frac{E_i}{E_{0-23}}$$

gdzie: E_i – energia w i -tej godzinie, E_{0-23} – wartość średnia energii w każdej godzinie.

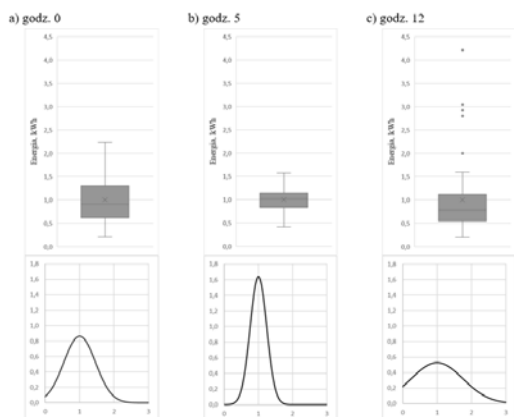
Wynik normalizacji wykresów pudełkowych z rysunku 2 zamieszczono na rysunku 3. Normalizacja, oprócz uogólnienia analizy, pozwoliła również na uwypuklenie wartości odstających, wynikających głównie z występowania dni świątecznych.



Rys.3. Względne zużycie energii dla każdej godziny w każdą środę roku

Normalizacja pozwala w sposób bezpośredni odczytać zakres zmienności obciążenia. Na podstawie uzyskanych wyników analizy statystycznej można wnioskować, że prognozowanie zużycia energii dla każdej godziny obarczone jest dużym błędem. Błąd ten spowodowany jest przede wszystkim tym, że pojedyncze urządzenie może charakteryzować się dużym poborem energii w odniesieniu do średniej wartości godzinowego zużycia, ponadto, w analizowanym gospodarstwie domowym urządzenia te nie były sterowane. Powoduje to, że możliwość losowego załączenia znacznie ogranicza pewność prognozowania.

Przeprowadzona analiza statystyczna pozwala również na obliczenie i wykreślenie funkcji rozkładu prawdopodobieństwa wystąpienia względnej energii. Prawdopodobieństwo to jest różne dla różnych godzin.



Rys.4. Wykresy pudełkowe i odpowiadające im krzywe Gaussa dla wybranych godzin w środę a) godz. 0, b) godz. 5, c) godz. 12

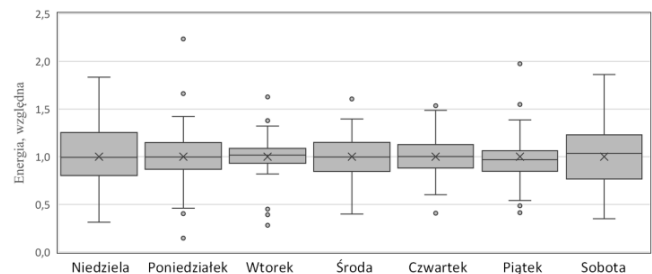
Na podstawie analizy statystycznej możliwe jest również obliczenie rozkładu prawdopodobieństwa wystąpienia danej

wartości energii za pomocą krzywych Gaussa (rys. 4). W każdym przypadku (każdej godzinie) najwyższe prawdopodobieństwo występuje dla wartości średniej względnej energii.

Krzywe Gaussa mają ograniczenia w postaci zerowego zapotrzebowania. Prawdopodobieństwo braku poboru energii w każdym przypadku nie jest zerowe, jednak tam, gdzie odchylenie standardowe jest największe (istnieją również wartości odstające), jest ono istotnie wyższe. Wynika to z dużego odchylenia standardowego w populacji, które zawiera się w przedziale od 0,22 do 0,97 (tabela 1).

Analiza statystyczna pokazuje, że prognozowanie zużycia energii jedynie na podstawie danych archiwalnych nie pozwala na odwzorowanie profilu w budynkach mieszkalnych. Możliwe jest jedynie określenie prawdopodobieństwa wystąpienia energii w danej godzinie. Na podstawie tego można sformułować tezę o konieczności wykonywania ciągłych pomiarów w przypadku realizacji funkcjonalności zarządzania energią.

W kontekście analizy pomiarów rozważmy możliwość obliczenia dobowego zużycia energii. Dobowe wartości zostały uzyskane na podstawie rzeczywistych odczytów sumarycznych w okresach godzinowych (rys. 5).



Rys.5. Wykres pudełkowy względnego dobowego zużycia energii dla gospodarstwa domowego

W przypadku szacowania dobowego zużycia energii, odchylenie standardowe, dla każdej doby jest mniejsze od 0,32 (tabela 2).

Tab. 2. Odchylenie standardowe dla względnego dobowego zapotrzebowania

dzień tygodnia	niedz.	pon.	wt.	śr.	czw.	pt.	sob.
odchylenie standardowe	0,30	0,31	0,23	0,23	0,24	0,29	0,32

Pozwala to na osiągnięcie dokładności odwzorowania na poziomie 80% ($\pm 0,2$ w wartościach względnych). Wartość taką można uznać za wystarczającą do prognozowania zapotrzebowania w systemach zarządzania energią elektryczną w okresach dobowych.

Tabela 1. Odchylenie standardowe w populacji dla względnego zapotrzebowania na energię elektryczną

Godzina	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Niedziela	0,61	0,64	0,54	0,63	0,59	0,45	0,26	0,58	0,72	0,78	0,51	0,69	0,76	0,71	0,69	0,63	0,72	0,66	0,51	0,63	0,65	0,69	0,52	0,46
Poniedziałek	0,59	0,60	0,61	0,64	0,22	0,26	0,68	0,42	0,64	0,72	0,97	0,93	0,72	0,42	0,65	0,66	0,64	0,63	0,75	0,64	0,58	0,63	0,57	0,43
Wtorek	0,55	0,55	0,57	0,54	0,38	0,25	0,43	0,35	0,54	0,50	0,48	0,54	0,61	0,67	0,48	0,42	0,53	0,39	0,46	0,54	0,54	0,55	0,45	0,38
Środa	0,46	0,47	0,61	0,43	0,24	0,24	0,42	0,45	0,58	0,49	0,82	0,92	0,75	0,57	0,65	0,67	0,60	0,70	0,74	0,40	0,34	0,50	0,48	0,52
Czwartek	0,54	0,52	0,61	0,65	0,49	0,40	0,48	0,60	0,65	0,56	0,65	0,56	0,60	0,56	0,68	0,48	0,38	0,51	0,47	0,44	0,60	0,89	0,93	0,53
Piątek	0,45	0,51	0,48	0,55	0,25	0,25	0,47	0,43	0,51	0,45	0,52	0,39	0,36	0,38	0,48	0,60	0,58	0,65	0,71	0,76	0,65	0,60	0,61	0,39
Sobota	0,64	0,61	0,68	0,57	0,60	0,45	0,48	0,54	0,50	0,70	0,54	0,60	0,69	0,81	0,71	0,78	0,70	0,72	0,75	0,71	0,55	0,52	0,56	0,51

Określenie liczby punktów pomiarowych

Każde urządzenie pomiarowe wymaga zasilania, dlatego pomiar i sterowanie wszystkimi urządzeniami nie jest celowe i wpływa na zużycie mocy.

Do określenia liczby urządzeń wykorzystuje się analizę statystyczną. Należy mierzyć te urządzenia, które charakteryzują się największym zużyciem energii.

Jeżeli celem jest osiągnięcie zakładanego prawdopodobieństwa zużycia energii, to sumaryczna liczba mierzonych urządzeń wynika z ich procentowego udziału w całkowitym zapotrzebowaniu i tak osiągnięcie prawdopodobieństwa:

- $1 \cdot \sigma$ - 55%;
- $2 \cdot \sigma$ - 75%;
- $3 \cdot \sigma$ - 80%.

Do dobrego odwzorowania rzeczywistego profilu dobowego wystarczy pomiar tylu urządzeń, żeby ich sumaryczna moc w ciągu doby wynosiła 55%. Takie podejście znacznie ogranicza liczbę potrzebnych pomiarów, przy dobrym odwzorowaniu profilu i ograniczania się zazwyczaj od trzech do pięciu urządzeń o największym zużyciu energii takich jak pralka, suszarka czy zmywarka. Urządzenia te charakteryzują się dodatkowo największą losowością, ale również potencjałem zarządzania ich pracą.

Zasada Pareto w kontekście zużycia energii

Analiza statystyczna potwierdziła zasadę Pareto, czyli 20% odbiorników odpowiada za 80% zapotrzebowania, co więcej, w gospodarstwie domowym są to również odbiorniki, którymi można zarządzać – modyfikować ich harmonogram pracy.

Metody statystyczne nie dały zadowalających wyników przy prognozowaniu zużycia energii, nawet na kolejne 24 godziny, jednakże znając zapotrzebowanie na energię tych odbiorników można prognozować zużycie energii przez generowanie propozycji harmonogramu pracy odbiorników sterowalnych. Jest to podstawa do opracowania strażnika energii, aplikacji wskazującej cel dobowego zużycia energii oraz pasma regulacji dla odbiorników sterowalnych, a to można określić z wystarczającym prawdopodobieństwem.

Idea strażnika energii

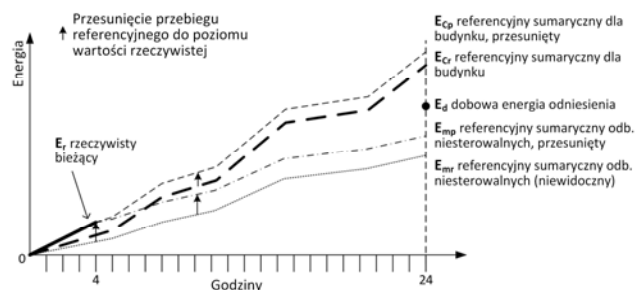
Proponowany strażnik energii ma za zadanie dostarczenie odbiorcy w sposób przejrzysty informacji o aktualnym zużyciu energii oraz prognozowanym zużyciu na koniec doby z dziennym celem i prognozowanym pasmem regulacji. Układ pełni rolę doradczą i pozwala, na podstawie przebiegu referencyjnego obejmującego prognozowane potrzeby oraz pomiarów wybranych urządzeń, zwizualizować oraz zaprognozować możliwe do osiągnięcia na koniec doby wartości zużytej energii. Realizowane jest to na podstawie dobowego przebiegu referencyjnego.

Przebieg referencyjny jest wyznaczony na podstawie pomiarów urządzeń dla danego gospodarstwa oraz analizy statystycznej. Służy do określenia dobowego celu zużycia energii, a w konsekwencji redukcję zużycia poprzez budowanie świadomości użytkowników. Niezwykle istotna jest jednak ilość dostarczanych informacji oraz sposób ich przedstawiania. W przypadku zbyt dużej liczby danych wymagane będzie duże zaangażowanie użytkowników, a to wpłynie negatywnie na cały proces ograniczenia zużycia energii, głównie ze względu na duże prawdopodobieństwo zniechęcenia użytkowników.

Jedną z ważniejszych kwestii jest forma przedstawienia danych oraz ich właściwe przygotowanie. Jakkolwiek ciekawym rozwiązaniem może być bieżąca informacja o mocy chwilowej oraz zużytej energii urządzeń, to nie będzie możliwe szybkie wyciągnięcie wniosków z przedstawionych informacji.

Urządzenia stosowane w gospodarstwie domowym podzielono na te, które pracują autonomicznie i ich działanie nie może zostać ogólnie zmienione przez użytkownika domu. W tej grupie znajdują się odbiorniki, które: pobierają niewiele energii i dlatego sterowanie nimi nie jest zasadne (przykładowo ładowarka telefonu), pobierają średnie lub duże ilości energii, jednak nie jest możliwe wyłączenie ich przez użytkownika ze względu na funkcję jaką spełniają (przykładowo lodówka). Jest to zatem duża grupa urządzeń elektrycznych. Urządzenia sterowalne to takie, które zużywają duże ilości energii i jednocześnie mogą zostać załączone w określonym czasie. Jeżeli jest to urządzenie realizujące określony proces (pralka, suszarka bębnowa, zmywarka), sterowanie musi umożliwiać załączenie odbiornika na czas całego procesu. W przypadku urządzeń typu bojler, sterowanie nie ma ograniczeń, ponieważ może skutkować wyłącznie komfortem użytkownika (np. większa różnica temperatur wody użytkowej), a nie przerwaniem określonego procesu.

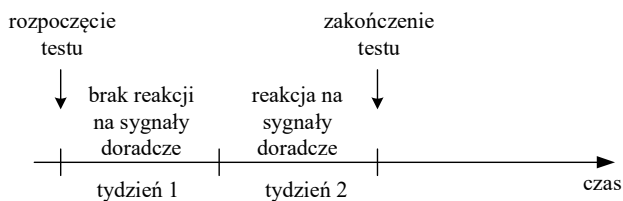
Po dokonaniu identyfikacji oraz pomiaru urządzeń zarządzanych (pomiar wykonano w 6 budynkach, dla których rejestrowano zużycie sumaryczne w budynku oraz prawie wszystkich odbiorników), uwzględniając pomiar całkowity (za licznikiem głównym) oraz obliczając przebieg referencyjny, możliwa jest realizacja strażnika energii. W zaproponowanym systemie, strażnik energii określa górną i dolną granicę referencyjną, a następnie wizualizuje aktualne zużycie, dobowy cel oraz pasmo sterowania. Można to uzyskać określając dwie wartości energii w bieżącej godzinie dnia. Jedną z nich jest określeniem prognozy przebiegu referencyjnego dla wszystkich urządzeń, ale skorygowanego o rzeczywiste zużycie w danej godzinie (o różnicę pomiędzy energią rzeczywistą, a referencyjną), druga wynika tylko z działania urządzeń niesterowalnych (określona na podstawie prognoz). Idea określenia pasma sterowania została pokazana na rysunku 5.



Rys.5. Idea określenia pasma sterowania

Procedura testowa weryfikacji działania systemu zarządzania energią

Głównym założeniem systemu strażnika jest redukcja zużycia energii, przy czym efekt ten osiągany jest poprzez załączanie i wyłączanie urządzeń sterowalnych. Dla budynków mieszkalnych jest to proces nieprzewidywalny, stochastyczny. Dwa identyczne budynki, z takim samym wyposażeniem, będą użytkowane w zupełnie inny sposób. W celu przetestowania działania systemu został on zainstalowany w różnych budynkach (z różnym wyposażeniem i o różnym rocznym zapotrzebowaniu). Do weryfikacji użyto metodę porównania zużycia energii dla dwóch kolejnych tygodni. Wybrane tygodnie charakteryzują się podobną pogodą (oszacowanie na podstawie prognozy pogody) oraz obecnością mieszkańców w budynku. Na rys. 6 pokazano schematycznie proces prowadzenia testu.



Rys.6. Proces prowadzenia testu weryfikującego działanie systemu zarządzania energią

Założeniem jest porównanie stanu z systemem wyłączonym i załączonym, czyli z brakiem reakcji na sygnał doradczy oraz z reakcją na sygnał doradczy. Każda reakcja na sygnał doradczy zmienia charakterystykę zużycia energii (ilościowo i jakościowo), która nie może być brana pod uwagę w kolejnym teście. Uzyskanie redukcji zużycia wpłynie na kolejne prognozy, względem których nie będzie dalszej możliwości redukcji.

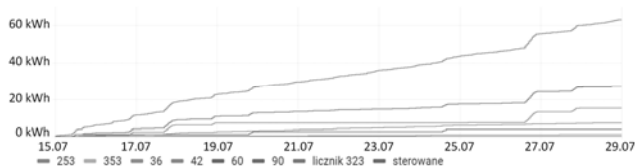
Wyniki badań

System testowano w wybranych obiektach referencyjnych, będących gospodarstwami domowymi normalnie użytkowanymi przez mieszkańców. W ten sposób uzyskano wyniki rzeczywistej reakcji na system doradztwa.

Podczas testu użytkownik otrzymywał informację o prognozowanym zużyciu energii w formie profilu referencyjnego oraz informację z bazy profili referencyjnych dla odbiorników o przeciętnym dobowym zużyciu energii przez odbiorniki sterowane.

Dla wszystkich analizowanych przypadków redukcja wynosiła od 4% do 17% dla wszystkich odbiorników oraz od 8% do 40% dla odbiorników sterowanych. Potwierdziło to możliwość wykorzystania proponowanego strażnika energii w celu zwiększenia efektywności gospodarstwa domowego poprzez racjonalizację zużycia energii.

Zarejestrowane pomiary w przykładowym gospodarstwie domowym z uwzględnieniem okresu testowego, przedstawiono na rysunku 7. Są to wykresy pobieranej energii narastająco dla odbiorników sterowanych oraz wykres licznika sumarycznego. Strażnik energii jako system doradczy spowodował obniżenie zużycia energii w przedstawionym przypadku o około 5% i o około 8% dla wszystkich odbiorników oraz odbiorników sterowanych odpowiednio.



Rys.7. Wyniki wizualizacji wersji testowej strażnika energii dla wybranych godzin

Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań statystycznych potwierdzono założenie, że 80% energii zużywane jest przez 20% odbiorników – obowiązuje reguła Pareto. Są to często odbiorniki, których harmonogram pracy może być modyfikowany. Przy czym metody statystyczne nie dały wyników zadowalających przy prognozowaniu zapotrzebowania na kolejne 24 godz., ale pozwalają na określenie referencyjnego profilu energii.

Realizacja redukcji zużycia wymaga zarządzania pracą odbiorników charakteryzujących się wysokim zapotrzebowaniem na energię elektryczną. Wykorzystując analizę statystyczną oraz znając zapotrzebowanie na energię odbiorników sterowalnych można prognozować zużycie energii przez generowanie propozycji harmonogramu pracy tych odbiorników.

Prowadzone badania miały na celu opracowanie strażnika energii dla odbiorców energii elektrycznej z grupy budynków mieszkalnych. Na podstawie danych pomiarowych możliwe jest wskazanie celu dobowego zużycia energii oraz pasma regulacji dla odbiorników sterowalnych. Jest to idea pracy systemu doradczego wizualizującego odczyt i prognozującego cel na koniec doby. System (strażnik energii) pozwala na zwiększenie świadomości odbiorców energii. Zaletą proponowanego rozwiązania jest minimalizacja przekazywanych informacji oraz prosty interfejs redukujący konieczność szczegółowej analizy danych.

Weryfikacja w warunkach rzeczywistych strażnika pozwoliła na uzyskanie redukcji zużycia od 4% do 17% dla wszystkich odbiorników oraz od 8% do 40% dla odbiorników sterowanych.

Prezentowany program badawczy został wsparty finansowo przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR): POIR.04.01.01-00-0028/19-00

Autorzy: dr inż. Adam Piłśniak, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki, ul. Akademicka10, 44-100Gliwice, e-mail: adam.pilsniaki@polsl.pl; dr inż. Marcin Fice, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka10, 44-100 Gliwice, e-mail: marcin.fice@polsl.pl; dr inż. Krzysztof Bodzek, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, e-mail: krzysztof.bodzek@polsl.pl;

LITERATURA

- [1] Nan, S., Zhou, M., Li, G. et al. Optimal Scheduling Approach on Smart Residential Community Considering Residential Load Uncertainties. *J. Electr. Eng. Technol.* 14, 613–625 (2019). <https://doi.org/10.1007/s42835-019-00094-0>
- [2] Asrari A., Javan D., Javidi M., Monfrared M.: Application of Gray-Fuzzy-Markov Chain Method for Day-Ahead, Electric Load Forecasting, *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, r. 88, Nr 3b/2012, s. 228-237.
- [3] DuToit, S. H. C. et al. (2012). Graphical exploratory data analysis. Springer. ISBN 978-1-4612-9371-2.
- [4] E. Yukseltan, A. Yucekaya, A. H. Bilge: Hourly electricity demand forecasting using Fourier analysis with feedback, Elsevier Ltd. *Energy Strategy Reviews* 31 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100524>
- [5] Kott M.: Prognozowanie zużycie energii elektrycznej w gospodarstwach domowych, *Przegląd Elektrotechniczny, Rocznik 2017 z. 4, nr 104922*