

doi:10.15199/48.2024.07.53

## Potencjał wdrożenia rozwiązania DSM dla gospodarstw domowych w Polsce

**Streszczenie.** Poniższy artykuł prezentuje potencjał realizacji rozwiązania DSM dla odbiorców końcowych jakimi są gospodarstwa domowe. W ramach analizy przeprowadzono proces ankietyzacji oraz przygotowano model ekonometryczny, uwzględniający czynniki wpływające na ilość zaoszczędzonej energii przez gospodarstwa domowe w ramach realizacji rozwiązania DSM. Przeprowadzono także symulację Monte Carlo w celu zaprognozowania potencjalnych efektów realizacji DSM w analizowanym przypadku.

**Abstract.** The following article presents the potential of implementing the DSM solution for end users, such as households. As part of the analysis, a survey process was carried out and an econometric model was prepared, taking into account factors affecting the amount of energy saved by households as part of the implementation of the DSM solution. A Monte Carlo simulation was also performed to predict the potential effects of DSM implementation in the analyzed case (**Potential of implementing the DSM solution for households in Poland**).

**Słowa kluczowe:** DSM, zarządzanie popytem, zarządzanie energią, symulacja Monte Carlo.

**Keywords:** DSM, demand management, energy management, Monte Carlo simulation.

### Rozwiązania DSM

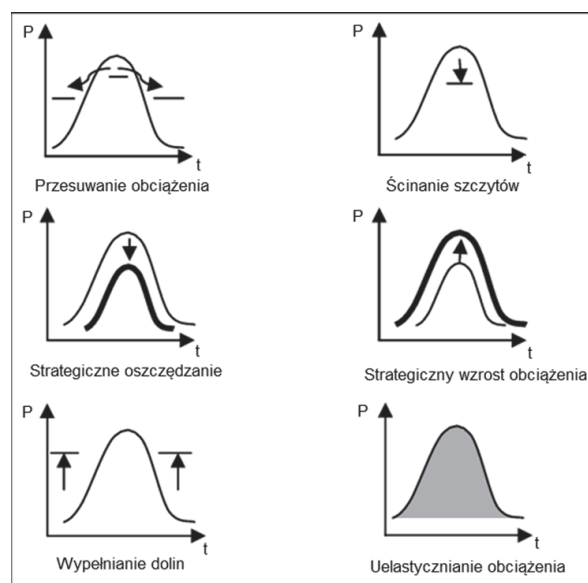
Demand Side Management (DSM) oznacza Zarządzanie Stroną Popytową. Poprzez DSM rozumie się działania operatora prowadzące do osiągnięcia pożądanych, długoterminowych zmian w kształtowaniu się zapotrzebowania na energię elektryczną u odbiorców końcowych (takich jak gospodarstwa domowe czy też przedsiębiorstwa przemysłowe) [1, 2]. Pojęcie DSM obejmuje wiele różnorodnych strategii pozwalających osiągać cele w postaci pożądanych zmian w popycie na energię elektryczną i jego zmienności w czasie. DSM może być realizowane poprzez np. wymianę urządzeń na energooszczędne czy też wprowadzenie zróżnicowanych cenowo taryf na energię elektryczną [3, 4].

Podstawową motywacją wdrażania DSM jest uzyskanie działań alternatywnych dla tradycyjnych działań po stronie podażowej systemu. Dotychczas za równowagę generacji energii elektrycznej i jej zużycia odpowiedzialna była strona podażowa – wytwórcy oraz operatorzy. Strona popytowa nie brała czynnego udziału w procesie bilansowania. Wytwórcy energii dopasowują wielkość generowanej energii elektrycznej do przewidywanych zmian zapotrzebowania na energię [1, 2]. Obecnie usługi sterowania stroną popytową stają się coraz bardziej popularne na świecie. Rozwój technologii informatycznych i komunikacyjnych, oraz inwestycje w inteligentne liczniki i sieci inteligentne smart grid przyczyniają się do zwiększenia potencjału usługi DSM w zakresie zarządzania popytem na energię elektryczną [1, 5].

Swoj udział w usłudze DSR/DSM może mieć każdy podmiot, który posiada możliwość zmiany swojego zapotrzebowania lub jego przesunięcia w czasie. Odbiorcy biorący udział w usłudze DSM mają różne motywacje. Dużą rolę odgrywają tu potencjalne korzyści, które mogą czerpać odbiorcy z udziału w realizacji DSR/DSM [2, 6]. Jedną z nich jest np. niższa cena za energię elektryczną oraz wiążące się z tym niższe rachunki za energię elektryczną. Inną zaletą dla odbiorcy może być otrzymywanie wynagrodzenia za ograniczenie zużycia energii elektrycznej. Usługa DSM może nieść korzyści zarówno dla odbiorców końcowych i dla operatorów systemu. Wraz ze zwiększaniem się ilości podmiotów biorących udział w realizacji usługi DSM, możliwe będzie czerpanie większych korzyści z jego wdrożenia [1, 6].

Dla operatorów głównymi korzyściami płynącymi z zastosowania DSR/DSM jest redukcja obciążenia

szczytowego, możliwość odpowiedniego zarządzania ograniczeniami systemowymi, a także wspomaganie systemu w sytuacjach awaryjnych. Usługa DSR/DSM może również pełnić rolę usługi systemowej. Możliwa jest racjonalizacja użytkownika energii elektrycznej oraz większa efektywność jej wykorzystania. Może to mieć istotny wpływ na poprawę niezawodności systemu [7, 8].



Rys.1. Efekty wdrożenia DSM/DSR [9]

Wyróżnia się sześć różnych efektów wdrożenia DSM w postaci zmian profilu zapotrzebowania – przesunięcie obciążenia, ścinanie szczytów, wypełnianie dolin, strategiczny wzrost obciążenia, uelastycznianie obciążenia oraz strategiczne oszczędzanie (rys 1). Ścinanie szczytów ma na celu kontrolowanie obciążenia w taki sposób, aby zmniejszyć wartości obciążeń szczytowych [7, 10].

Wypełnianie dolin oznacza wytworzenie dodatkowego zapotrzebowania na energię w okresie tzw. dolin zapotrzebowania, które występują zwykle w godzinach nocnych. Celem zarówno ścinania szczytów, jak i wypełniania dolin jest zmniejszenie wahań obciążenia w ciągu doby. Efektem jest zwiększenie bezpieczeństwa pracy systemu elektroenergetycznego, poprzez

łagodniejsze przyrosty obciążenia w okresie porannym i łagodniejsze spadki obciążenia w okresie wieczornym [9].

Kolejnym efektem jest przesuwanie obciążenia. Polega na przesunięciu części zapotrzebowania z okresu występowania szczytowych obciążeń na okres pozaszczytowy [9, 10].

Strategiczny wzrost obciążenia dotyczy ogólnego zwiększania się obciążenia systemu. Wzrost ten może nastąpić w wyniku wprowadzenia odbiorcy lub urządzenia wykazującego duże zapotrzebowanie na moc przy jednoczesnej niemożności wykorzystania wypełnienia dolin [10]. Rozwiązanie te wymaga odpowiedniego planowania i podejmowania konkretnych działań w celu zrównoważenia zwiększającego się obciążenia systemu z tworzeniem nowej, niezbędnej infrastruktury, która jest niezbędna, aby ten popyt zaspokoić [7].

Celem uelastyczenia obciążenia jest zwiększenie niezawodności systemu elektroenergetycznego [7, 11].

Strategiczne oszczędzanie polega na celowym obniżeniu zapotrzebowania na energię elektryczną w wybranym obszarze systemu poprzez wdrożenie rozwiązań mających wpływ bezpośrednio na zużycie energii elektrycznej przez odbiorców [10]. Zmiany w zużyciu energii elektrycznej wynikają m.in. z zastosowania technologii energooszczędnych, a także urządzeń bardziej wydajnych energetycznie [7, 12].

### Realizacja rozwiązań DSM w Polsce

Usługa DSM przy poprawnym sposobie jej realizacji, może przynieść liczne korzyści dla systemu elektroenergetycznego. Staje się coraz bardziej popularna nie tylko na świecie, ale także w Polsce. Polski system elektroenergetyczny zmagają się z wieloma problemami – konieczność zmiany struktury miksu energetycznego, utrudnienia w bilansowaniu systemu i w zarządzaniu pracą systemu, a w związku z tym wzrost kosztów funkcjonowania systemu. Ponadto, elektrownie węglowe starzeją się, co wiąże się to ze wzrostem kosztów ich użytkowania, remontów oraz kosztów wytwarzania energii. Jednocześnie zwiększa się udział odnawialnych źródeł wytwórczych, które są niestabilne. W związku z tym, rozwiązanie takie jak DSM może stanowić ważny zasób energii elektrycznej pozwalający na zachowanie elastyczności pracy systemu elektroenergetycznego [5]. Usługa DSM cechuje się również niższymi kosztami realizacji niż budowa nowych bloków wytwórczych [2, 13, 14].

Obecnie w Polsce realizowany jest krótkoterminowy wariant DSM – DSR (ang. Demand Side Response), czyli Odpowiedź Strony Popytowej. DSR polega na czasowym (zwykle kilku godzinny) obniżeniu, zwiększeniu lub przesunięciu obciążenia w czasie i może zostać wykorzystane m.in. w sytuacjach awaryjnych, więc zawiera się w tzw. „elastycznym kształtowaniu popytu”, które zwykle jest wymieniane jako jedna ze strategii DSM. Program jest skupiony na wspieraniu systemu elektroenergetycznego w sytuacjach awaryjnych, w celu utrzymania ciągłości dostaw energii elektrycznej. Program skierowany jest do odbiorców przemysłowych i przedsiębiorstw [2].

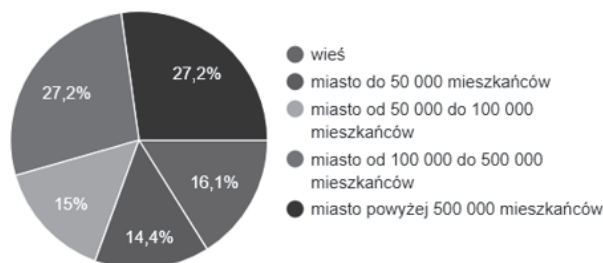
Niektóre cele DSM, m.in. w USA są z powodzeniem realizowane także przez gospodarstwa domowe, m.in. dążenie do długoterminowego obniżenia zapotrzebowania na energię elektryczną [15, 16].

W związku z tym, w niniejszej publikacji przeanalizowano potencjał realizacji rozwiązania DSM w Polsce przez odbiorców końcowych, jakimi są gospodarstwa domowe. W analizie uwzględniono osiągnięcie efektu w postaci ogólnego zmniejszenia się zapotrzebowania na energię elektryczną (strategiczne oszczędzanie).

### Charakterystyka potencjalnych uczestników strategicznego oszczędzania energii elektrycznej

W celu określenia potencjału realizacji DSM w zakresie strategicznego oszczędzania przez gospodarstwa domowe, przeprowadzono ankietyzację reprezentatywnej grupy odbiorców energii elektrycznej z całej Polski. Wdrożenie rozwiązań, które jest najbardziej pożądane przez odbiorców ma wpływ na zwiększenie szansy na powodzenie realizacji DSM.

Proces ankietyzacji przeprowadzono w okresie 01.04.2022 – 31.06.2022 roku poprzez wykorzystanie elektronicznego formularza ankiety. W związku z tym zakłada się, że badane rozwiązanie DSM byłoby realizowane jednocześnie przez grupy odbiorców pochodzących z różnych obszarów kraju. W badaniu ankietowym udział wzięło łącznie 180 osób. Większość odpowiedzi otrzymano od kobiet (65%). Większą liczbę odpowiedzi otrzymano także od osób powyżej 27 roku życia (58%). Respondenci charakteryzowali się uzyskanym wykształceniem wyższym (63,3%) i średnim (33,3%). Udało się uzyskać odpowiedzi od osób mieszkających zarówno w większych miastach jak i mniejszych ośrodkach miejskich i wsiach (rys. 2). Respondenci w większości zamieszkują mieszkania (70%), pozostałe 30% jest mieszkańcami domów jednorodzinnych.



Rys.2. Respondenci według miejsca zamieszkania

W ankiecie zaprezentowano 7 różnych sposobów oszczędzania energii elektrycznej w ramach DSM:

- Przyjęcie odpowiedniej taryfy (zróznicowanie cen za energię elektryczną w ciągu doby, np. tańsza energia elektryczna w nocy, droższa w ciągu dnia);
- Zainstalowanie systemów, pozwalających na odłączenie urządzeń, gdy zużycie energii elektrycznej jest zbyt duże;
- Wykorzystanie własnych, przydomowych źródeł energii np. fotowoltaiki do produkcji energii elektrycznej na własne potrzeby;
- Zainstalowanie systemów sterowania budynkiem (załączanie klimatyzacji, przełożenie pracy np. pralki, zmywarki na inny okres czasu);
- Wymiana sprzętów na energooszczędne (np. lodówki, zmywarki, pralki);
- Wymiana oświetlenia na energooszczędne;
- Działania dobrowolne (świadomość tego, jakie działania wpłyną na oszczędność np. wyłączanie światła, wyłączanie komputerów, umiejętne korzystanie z kuchni elektrycznej itd.).

Następnie respondenci ocenili każde z powyższych rozwiązań w skali 1 - 5, gdzie 1 oznaczało bardzo złe rozwiązanie, a 5 – bardzo dobre rozwiązanie. Największą popularnością wśród respondentów cieszyło się rozwiązanie „Wymiana sprzętów na energooszczędne (np. lodówki, zmywarki, pralki)”, jako bardzo dobre rozwiązanie oceniło je ok. 73% osób odpowiadających na pytanie, kolejnym wysoko ocenianym rozwiązaniem było „Wymiana oświetlenia na energooszczędne” (ok. 66% pozytywnych ocen).

Powyższe wyniki ankietyzacji wskazują, które rozwiązanie DSM ma największy potencjał wdrożeniowy i największą szansę na odniesienie sukcesu. Funkcjonowanie poszczególnych wariantów DSM jest ściśle związane z odbiorcami energii elektrycznej – m.in ich satysfakcją z wdrożonego programu. Wpływa to na chęć uczestnictwa w danym wariancie, co sprzyja pozyskaniu większej ilości uczestników DSM w przyszłości [17]. W związku z tym, na podstawie powyższych wyników można wywnioskować, że realizacja DSM poprzez wymianę sprzętów na energooszczędne ma największą szansę powodzenia, gdyż jest ono ocenione pozytywnie przez większość respondentów.

W ankiecie zadano także pytanie o oczekiwany sposób wynagradzania za udział w programach DSM/DSR. Każdy z respondentów mógł wybrać maksymalnie dwie możliwości. Spośród proponowanych opcji najpopularniejszą była „obniżenie rachunków za energię elektryczną” (ok. 82% głosów) oraz „Zbieranie punktów za zaoszczędzoną energię elektryczną, które można wymienić na gratyfikacje (kupony/sprzęty/itd.)” (ok. 41% głosów). W tym przypadku wyniki wskazują najbardziej pożądaną przez respondentów wynagrodzenie za uczestnictwo w programie DSM. Podobnie jak wcześniej, związane jest to ze zwiększeniem szansy na powodzenie badanego rozwiązania. Wynika stąd, że na drodze planowania i realizacji DSM, przyszłym uczestnikom należy zaproponować obniżenie rachunków za energię elektryczną.

Scharakteryzowana grupa badawcza posłużyła do zbadania populacji badawczej, jaką stanowią wszyscy odbiorcy energii elektrycznej w Polsce. Grupa badawcza została wybrana losowo. W celu stwierdzenia czy grupa badawcza jest reprezentatywna, obliczono jej minimalną liczebność na podstawie wzoru [18] (1):

$$(1) \quad N_{min} = \frac{N_p(z^2 * f(1-f))}{N_p * e^2 + z^2 * f(1-f)}$$

gdzie:  $z$  – poziom ufności dla wyników. Dla poziomu 95% wynosi on 1,96,  $f$  – wielkość frakcji. Stanowi 90% wielkości populacji,  $N_p$  – wielkość populacji – w tym przypadku przyjęto ilość odbiorców energii elektrycznej w Polsce (15,5 miliona gospodarstw domowych),  $e$  – dopuszczalny błąd maksymalny – przyjęto 4%,  $N_{min}$  – minimalna ilość respondentów (próbny badawczej).

Na podstawie powyższej formuły stwierdzono, że ilość udzielonych odpowiedzi (180 respondentów) pozwala stwierdzić, że w przeprowadzonym badaniu uzyskano wyniki na poziomie ufności 95% oraz o dopuszczalnym błędzie ok. 4%. Niski dopuszczalny błąd i wysoki poziom ufności świadczą o tym, że grupa badawcza jest reprezentatywna dla populacji odbiorców energii elektrycznej w Polsce.

### Model ekonometryczny opisujący ilość energii zaoszczędzonej w ramach realizacji DSM w Austin (USA) przez gospodarstwa domowe

Poprzez ankietyzację określono najbardziej pożądaną sposób realizacji DSM w celu dążenia do ogólnego zmniejszenia zapotrzebowania na energię elektryczną, czyli wymiana sprzętów na energooszczędne. W celu zbadania wielkości potencjału oszczędności energii elektrycznej przy wdrożeniu rozwiązań wytypowanych na drodze ankiety, przygotowano odpowiedni model ekonometryczny.

DSM jest realizowane w podobny sposób już od 2007 roku w mieście Austin w USA. Na podstawie danych udostępnionych na stronie internetowej miasta Austin zbadano zależności i wpływ wdrażania programów zarządzania popytem na zużycie energii elektrycznej.

Wynikiem badania jest przedstawiony poniżej model ekonometryczny.

Model ekonometryczny powstał na podstawie bazy danych udostępnionej przez miasto Austin [15]. Baza danych zawiera takie dane jak ilość uczestników biorących udział w rozwiązaniach DSM wdrożonych na terenie miasta, koszty przedsięwzięcia, ilość zaoszczędzonej i zużytej energii elektrycznej z podziałem na odbiorców do jakich skierowane są dane sposoby realizacji DSM (gospodarstwa domowe i odbiorcy przemysłowi). Dane te pochodzą z okresu 2007 – 2017 i dotyczą wszystkich odbiorców biorących udział w rozwiązaniu DSM realizowanym na terenie miasta Austin. Baza danych jest wciąż uaktualniana z pewnym opóźnieniem czasowym.

Przyjęto, że model będzie oparty o zmienne, odznaczające się najwyższymi wartościami współczynnika Pearsona spośród proponowanych (tabela 1).

Tabela 1. Proponowane zmienne modelu ekonometrycznego

	Łączne koszty wdrożenia DSM	Ilość programów DSM	Stosunek kosztów energii zaoszczędzonej do zużytej	Stosunek liczby uczestników DSM i odbiorców energii elektrycznej
Wskaźnik Pearsona	50%	48%	66%	76%

W związku z powyższym, model zawiera dwie zmienne – odnoszącą się do ilości uczestników i kosztu oszczędzonej energii. Następnie parametry modelu zostały dobrane na podstawie metody najmniejszych kwadratów. Model opisany jest następującym równaniem (2):

$$(2) \quad \frac{E_r}{E_z} = 0,012 * \frac{R_r}{R_z} + 0,007 * \frac{L_r}{O}$$

gdzie:  $E_r/E_z$  - stosunek energii zaoszczędzonej do zużytej [MWh/MWh],  $R_r/R_z$  - stosunek kosztów energii zaoszczędzonej do zużytej [zł/zł],  $L_r/O$  - stosunek liczby uczestników DSM i odbiorców energii elektrycznej w mieście [szt. mieszkańców/szt. mieszkańców].

W celu weryfikacji statystycznej modelu, przeprowadzono kilka testów statystycznych. Dla tego modelu otrzymano wartość współczynnika  $R^2 = 0,99$ , co świadczy o dobrym dopasowaniu do bazowego zestawu danych. Model w znacznej części opisuje zmienność zmiennej objaśnianej.

Obliczony współczynnik F w teście F-Snedecora dla danego modelu wynosi 89,26. Wartość krytyczna jest mniejsza i wynosi 9,38 – regresja jest istotna statystycznie. Oznacza to, że wynik w postaci wartości zmiennej objaśnianej nie jest efektem losowości.

W wyniku testu t-Studenta dla zmiennej  $R_r/R_z$  otrzymano wartość  $t = 4,6$ , a dla  $L_r/O$   $t = 2,33$ . Wszystkie wartości  $t$  obliczonego są większe niż wartość krytyczna ( $t_k = 1,83$ ) odczytana z tablic. Każda ze zmiennych sprawdzona testem studenta (dla poziomu istotności  $p=0,1$ ) jest istotna statystycznie i wpływa na zmienną objaśnianą [19, 20].

Powyższy model powstały na podstawie danych zebranych dla Austin zawiera w sobie przeliczone wartości kosztów. Łatwo także odnieść go do ilości odbiorców energii elektrycznej w Polsce. Pozwala to uniknąć problemów związanych z różnicami w rozliczaniu programów DSM w Polsce i w Stanach Zjednoczonych.

Ponadto, aby umożliwić wykorzystanie modeli w odniesieniu do polskich odbiorców energii elektrycznej,

zbadano także związek pomiędzy polskimi i amerykańskimi użytkownikami energii elektrycznej.

W celu zbadania podobieństwa pomiędzy tymi grupami wyznaczono tzw. współczynnik podobieństwa struktury na podstawie danych dotyczących cen za MWh energii elektrycznej oraz średniego rocznego zużycia energii elektrycznej przez odbiorców w Polsce i w Austin. Współczynnik podobieństwa struktury jest wyznaczany w celu porównania struktur dwóch lub więcej grup. Stanowi on miarę określającą podobieństwo kształtowania się badanej cechy w dwóch różnych grupach. Im wartość współczynnika bliższa jedności, tym większe jest podobieństwo badanych grup [19, 20]. Współczynnik podobieństwa struktury opisany jest wzorem (3):

$$v_p = \sum_{i=1}^k m \ln\{v_{1i}, v_{2i}\} \quad (3)$$

gdzie:  $v_p$  – współczynnik podobieństwa struktury,  $v_1$  – wskaźnik struktury pierwszego zbioru,  $v_2$  – wskaźnik struktury drugiego zbioru.

Wartość współczynnika podobieństwa struktury na poziomie 0,97 można interpretować jako duże podobieństwo w strukturze charakterystyk odbiorców polskich i amerykańskich. Powyższy model ekonometryczny można z powodzeniem zastosować do wyznaczenia spodziewanej ilości oszczędzonej energii elektrycznej w wyniku realizacji DSM w Polsce.

Z pomocą przedstawionego modelu ekonometrycznego dotyczącego gospodarstw domowych obniżających swoje zużycie energii elektrycznej można wyznaczyć, ile energii elektrycznej jest możliwe do zaoszczędzenia przy wdrożeniu najbardziej pożądanego rozwiązania przez respondentów – wymiany urządzeń na energooszczędne.

Model ten ma zastosowanie w analizowanym przypadku z kilku powodów – odnosi się on do odbiorców prywatnych. Natomiast odbiorcy dobrowolnie zamierzają zmniejszyć swoje zużycie energii elektrycznej poprzez wdrożenie długofalowych rozwiązań. Dane uwzględnione przy tworzeniu modelu dotyczyły oszczędności energii elektrycznej przez gospodarstwa domowe w wyniku wdrożenia strategicznego oszczędzania. Dzięki podobieństwu w strukturze obu grup odbiorców – polskich i amerykańskich model ten może zostać odniesiony do realizacji tzw. strategicznego oszczędzania w Polsce. Ponadto, w wyniku toku obliczeniowego określone będą także koszty energii zaoszczędzonej. W związku z tym model ten dobrze odnosi się do rozpatrywanego przypadku.

Na podstawie danych zebranych przez Główny Urząd Statystyczny [20], średnie roczne zużycie energii elektrycznej przez odbiorców mieszkających w mieszkaniach wynosi ok. 2500 kWh, a w domach 4200 kWh. Po uwzględnieniu odpowiedzi zawartych w ankietach, wyznaczono średnie roczne zużycie energii elektrycznej przez grupę 180 odbiorców – wyniosło ono 541 MWh energii elektrycznej rocznie. Respondenci wykazali największe zainteresowanie rozwiązaniem uwzględniającym wymianę sprzętów na energooszczędne. Urządzeniami zużywającymi najwięcej energii elektrycznej w gospodarstwach domowych są pralki i lodówki. Dlatego też przyjęto, że właśnie te sprzęty zostaną wymienione na energooszczędne odpowiedniki. Koszt zestawu zawierającego lodówkę i pralkę oszacowano na poziomie 4300 zł. Przyjęto także, że obsługa programu DSM (rozliczenia, usługi wymiany sprzętów) wyniosą ok. 46 tysięcy zł. Uzyskane w ten sposób informacje stanowią podstawę do wyznaczenia potencjału oszczędzonej energii przy wykorzystaniu modelu opisanego równaniem (2).

W wyniku zastosowania modelu, określono wielkość zaoszczędzonej energii elektrycznej na poziomie 12 MWh rocznie. Najpopularniejszą taryfą, według której rozliczani są odbiorcy energii elektrycznej jest taryfa G11. Taryfa ta określa cenę energii elektrycznej na poziomie ok. 0,5 zł/kWh. W związku z tym wartość zaoszczędzonej energii elektrycznej wynosi ok. 6 tysięcy zł rocznie.

### Prognoza oszczędności energii – symulacja Monte Carlo

W celu dalszej analizy potencjału realizacji DSM w Polsce, dokonano prognozy oszczędności energii. Celem prognozy jest sprawdzenie czy rozwiązanie ma szansę na utrzymanie pozytywnych wyników w przyszłości oraz sprawdzenie jakie są jego potencjalne kierunki rozwoju. Narzędziem wykorzystanym do analizy jest symulacja Monte Carlo.

Pierwszym etapem procedury prognozy jest określenie wartości granicznych zmiennych, w zastosowanym modelu ekonometrycznym. Liczba uczestników biorących udział w proponowanym rozwiązaniu jest ograniczona potencjalną ilością odbiorców energii elektrycznej zainteresowanych uczestnictwem w realizacji DSM. W początkowej fazie rozwoju może być ona dość niska. W związku z tym założono przyrost do 200 uczestników. Zakładając wzrost liczby uczestników do 200, łączny koszt programu DSM powinien pozostać możliwie niski, w tym przypadku proporcjonalnie został on ograniczony do ok. 570 tys. zł.

W ramach symulacji Monte Carlo, obliczono prawdopodobieństwo uzyskania większej oszczędności energii elektrycznej w zależności od wpływania na poszczególne zmienne modelu ekonometrycznego. Zbadano trzy różne scenariusze: zmienność zarówno ilości uczestników jak i kosztów (zmienność obu zmiennych w modelu), zmienność jedynie liczby uczestników oraz zmienność jedynie kosztów.

Przy badaniu poszczególnych wariantów wykonano 1000 iteracji, co pozwala zachować błąd symulacji na poziomie 4%. Następnie wyznaczono szanse uzyskania oszczędności energii na poziomie większym niż 13 MWh/rocznie w zależności od wpływania na poszczególne zmienne. Wyniki przedstawia tabela 2. Prawdopodobieństwo uzyskania lepszego wyniku niż oszczędność 13 MWh/rocznie wyznaczono następująco (4):

$$P(y_b > y) = \frac{D}{c} \quad (4)$$

gdzie:  $c$  – liczba wszystkich iteracji,  $D$  - ilość symulacji w których uzyskano lepszy wynik (oszczędność większą niż 13 MWh/rocznie),  $P(y_b > y)$  – prawdopodobieństwo uzyskania lepszego wyniku.

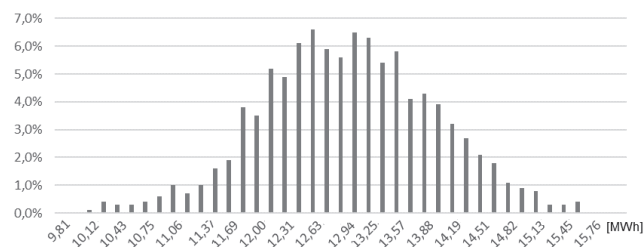
Wynika stąd, że największy potencjał oszczędności energii można uzyskać dla scenariusza zakładającego zmienność jedynie liczby uczestników (szansa na oszczędzenie więcej niż 13 MWh/rocznie wynosi 75%). W związku z tym przy rozwijaniu analizowanej metody DSM, należałoby skupić się na pozyskaniu coraz większej liczby uczestników.

Poniższe wykresy (rysunek 3 i 4) przedstawiają częstość względną i częstość skumulowaną dla najbardziej korzystnego wariantu, zakładającego zmienność jedynie liczby uczestników.

Tabela 2. Szanse uzyskania lepszych efektów wdrożenia DSM w zależności od wpływania na poszczególne zmienne

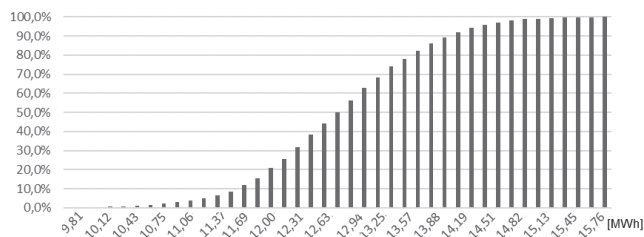
Prawdopodobieństwo uzyskania wyniku	Zmienność obu zmiennych	Zmienność jedynie liczby uczestników	Zmienność jedynie kosztów
Większego niż 13 MWh/rocznie	67%	75%	71%
Mniejszego niż 13 MWh/rocznie	33%	24%	29%
Statystyki uzyskanych wyników symulacji Monte Carlo			
Średnia [MWh/rocznie]	12,98	13,00	12,97
Mediana [MWh/rocznie]	12,99	12,98	12,94
Maksymalna oszczędność [MWh/rocznie]	15,64	16,08	15,93
Minimalna oszczędność [MWh/rocznie]	9,94	9,81	10,07

Częstość względna to stosunek odnoszący liczbę zdarzeń, która sprzyja wystąpieniu danego zdarzenia do liczby wszystkich zdarzeń ogółem.



Rysunek 3. Częstość względna dla symulacji Monte Carlo zakładającej zmienność jedynie liczby uczestników

Wykres częstości względnej wskazuje procentową szansę wystąpienia danego wyniku oszczędności energii elektrycznej. Z wykresu można odczytać, że istnieje największa szansa na otrzymanie wyniku 13,1 MWh/rocznie (6,6%). Natomiast częstość skumulowana dla tej wartości wynosi ok. 56%, co świadczy o tym, że istnieje 44% szansa na uzyskanie wyniku lepszego niż 13,1 MWh/h.



Rysunek 4. Częstość skumulowana dla symulacji Monte Carlo zakładającej zmienność jedynie liczby uczestników

Najlepsze rezultaty można uzyskać w przypadku zwiększania ilości uczestników zaangażowanych w realizację rozwiązania DSM. Przy zwiększeniu ilości uczestników ze 180 do 200, szansa, że wielkość zaoszczędzonej energii wyniesie ponad 13 MWh/rocznie wynosi 75%. Jeśli zarządzanie popytem w ramach DSM poprzez inwestycje w wymianę sprzętów na energooszczędne ma się rozwijać i prowadzić do większych oszczędności w przyszłości, należy skupić się na zaangażowaniu jak największej liczby odbiorców. Analiza wykazała, że przy udziale 200 uczestników w realizacji DSM można zaoszczędzić ok. 13,6 MWh/rocznie energii elektrycznej. Wartość zaoszczędzonej energii wyniosłaby 6,8 tys. zł/rocznie.

## Wnioski

Rozwiązania DSM mają niewątpliwy potencjał wdrożeniowy na terenie Polski. Bieżąca kondycja polskiego systemu elektroenergetycznego i zagrożenia jakie się z nią wiąże, wymagają podjęcia natychmiastowych kroków w celu poprawy tej sytuacji. DSM może być dobrym kierunkiem zmian w funkcjonowaniu i planowaniu pracy systemu elektroenergetycznego. Dzięki takim aspektom jak poprawa efektywności wykorzystania energii elektrycznej, DSM może funkcjonować także w już zmodernizowanym systemie elektroenergetycznym.

Przeprowadzone badanie wśród odbiorców energii elektrycznej oraz analiza ich odpowiedzi i wykonanie obliczeń wykazało potencjał wdrożenia rozwiązania DSM w Polsce. Niewątpliwie stanowi to obszar, w jakim można podjąć konkretne działania w celu rzeczywistego wdrożenia strategii zarządzania popytem, które może odnieść sukces.

**Autor:** dr inż. Wiktoria Stahl, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: wiktoria.stahl@pg.edu.pl

## LITERATURA

- [1] Du P. i in.: Demand Response in Smart Grids, Springer, 2019
- [2] Strona internetowa Polskich Sieci Elektroenergetycznych o DSM: dsr.pse.pl [dostęp 04.10.2023]
- [3] Kaplun V. i in.: Dynamic energy management system with real time component control to increase the efficiency of local polygeneration microgrid, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2023, nr 9, 128-134
- [4] Kanakadhurga D.: Demand side management in microgrid: A critical review of key issues and recent trends, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol 256, Elsevier, 2022
- [5] Kaznowski R.: System elektroenergetyczny oparty o odnawialne źródła energii - możliwości i bariery rozwoju, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2 (2023), nr 2, 186-188
- [6] Mrityunjay K. i in.: Demand-side management and its impact on utility and consumers through a game theoretic approach, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 140, Elsevier, 2022
- [7] Hu Z., Han X.: Integrated Resource Strategic Planning and Power Demand-Side Management, Springer, 2013
- [8] Sabour K. M., i in.: Renewable Electricity Real-Time Pricing: Enhancing Grid's Stability Through Demand Side Management, 2021 *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, Brisbane, Australia, 2021
- [9] Rimer S. i in.: Time programmable smart devices for peak demand reduction of smart homes, *IEEE International Conference on Adaptive Science and Technology*, 2015
- [10] Goswami D., Kreith F.: Energy Efficiency and Renewable Energy Handbook, CRC Press Taylor & Francis Group, 2016
- [11] Groppi D. i in.: A review on energy storage and demand side management solutions in smart energy islands, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 235, Elsevier 2021
- [12] Zator S.: Power Scheduling Scheme for DSM in Smart Homes with Photovoltaic and Energy Storage, *Energies*, 14(24), 2021
- [13] Maćkowiak-Pandera J.: Jak radzimy sobie ze szczytami letnimi? Bilans zmian po kryzysie 2015 r., *Forum Energii – Analizy i dialog*, 2018
- [14] Paska J.: Assessment of the development of demand side response services in European Union countries, *Rynek Energii*, nr 4, 2020
- [15] Strona internetowa Austin Energy: <https://austinenergy.com>
- [16] Gagne D. i in.: Demand Response Compensation Methodologies: Case Studies for Mexico, *raport National Renewable Energy Laboratory*, 2018
- [17] Szkutnik J.: Smart metering jako decydujące uwarunkowanie wdrożenia strategii DSM w Polsce, *Rynek Energii*, nr1, 02.2010
- [18] Babbie E.: Badania Społeczne w Praktyce, 9 edycja, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2004
- [19] Balicki A., Makać W.: Metody wnioskowania statystycznego, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, 2010
- [20] Strona internetowa GUS: <https://stat.gov.pl>