

Predykcja zużycia ciepła w lokalu mieszkalnym na podstawie danych historycznych z ciepłomierzy mieszkaniowych

Prediction of heat consumption in a dwelling on the basis of archival data from residential heat meters

GRZEGORZ BARTNICKI, BOGDAN NOWAK

DOI 10.36119/15.2020.12.2

Koszty zakupu ciepła, paliwa gazowego i energii elektrycznej na potrzeby ogrzewania budynków wielorodzinnych dzielone są na poszczególne lokale mieszkalne i użytkowe. Do pomiaru zużycia ciepła do ogrzewania mieszkań stosowane są m.in. ciepłomierze. Urządzenie to może jednak ulec awarii, która uniemożliwia odczyt danych. W artykule opisano analizę możliwości wykorzystania danych historycznych do oszacowania udziału w kosztach ogrzewania całego budynku takiego lokalu, w którym stwierdzona została awaria ciepłomierza. Zaproponowano, aby w tym celu wyodrębnić na podstawie danych z poprzednich okresów rozliczeniowych grupę mieszkań jednorodnych z mieszkaniem z uszkodzonym ciepłomierzem. Zamiast oszacowania na podstawie uśrednionych wskaźników jednostkowych wyznaczonych w oparciu o pomiary dla wszystkich mieszkań, można wówczas wyznaczyć brakujący odczyt zużycia na podstawie wartości wyznaczonych dla tej grupy mieszkań jednorodnych. Artykuł opisuje praktyczne wykorzystanie tej metody, na przykładzie systemu zaopatrzenia w ciepło grupy budynków mieszkalnych na jednym z wrocławskich osiedli.

Słowa kluczowe: układ pomiarowy, węzeł ciepłowniczy, modelowanie predykcyjne,

The purchase costs of heat, gas fuel or electricity for the dwelling heating are divided into individual residential and commercial premises. For example, heat meters are used to measure the heat consumption for heating individual apartments. However, this device may be damaged and the data cannot be read. The article describes an analysis of the possibility of using historical data to estimate the share in the heating costs of this premise in which a heat meter failure has been found. For this purpose, it was proposed to distinguish a group of homogeneous flats from a flat with a damaged heat meter on the basis of data from previous billing periods. Instead of estimating on the basis of average unit indicators calculated on the basis of records from all apartments, it is possible to determine the missing consumption reading based on the values calculated for this group of homogeneous apartments. The article describes the practical use of this method, on the example of a heat supply system for a group of residential buildings in one of Wrocław's housing estates.

Keywords: measurement system, district heating node, predictive modelling

Wstęp

Konieczność obciążania odbiorców końcowych kosztami za zużycie ciepła w oparciu o jego rzeczywiste zużycie jest jednym z czynników mających na celu oszczędzanie energii i jej nośników, co ma też bezpośrednie przełożenie na ochronę środowiska [1, 4, 5, 6]. Wynika również z zasady "użytkownik płaci". W przypadku budynków wielorodzinnych nie jest to jednak proste rozwiązanie, a ze względu na różne uwarunkowania (np. wymianę ciepła pomiędzy lokalami, konieczność zapewnienia prawidłowych warunków eksplo-

atacji budynku i lokali w zakresie temperatury i wentylacji, określonych w przepisach prawa budowlanego itp.) zasada ta nie jest możliwa w pełni do wdrożenia [1, 4, 5, 9]. Ciepłomierze mieszkaniowe są od wielu lat powszechnie używanymi urządzeniami w projektowanych i budowanych obiektach. Jeżeli jest to możliwe i uzasadnione, montowane są również w modernizowanych instalacjach. Współczesne ciepłomierze wykazują dużą trwałość i niezawodność działania. Są urządzeniami pomiarowymi, które mierzą i przetwarzają (przeliczają wg określonego algorytmu) wielkości fizyczne, a ich wskazania są mianowane

w konkretnych jednostkach (np. układ SI). Wyposażenie systemu zaopatrzenia w ciepło w liczniki zużycia ciepła (ewentualnie również w liczniki ciepła wytworzonego) nie tylko wypełnia obowiązki wynikające z regulacji przepisów prawa [14], ale również eliminuje szereg trudności formalnych i technicznych u wszystkich stron procesu rozliczania kosztów. Zarządcy i administratorzy nieruchomości minimalizują ryzyko zakwestionowania opłat za ogrzewanie, braku możliwości dokonania odczytu czy też zapewnienia kompletności danych dla całej instalacji. Układy pomiarowe pozwalają na bieżące monitorowanie systemu

dr inż. Grzegorz Bartnicki – <https://orcid.org/0000-0002-4482-6950>; e-mail: grzegorz.bartnicki@pwr.edu.pl, dr inż. Bogdan Nowak – <https://orcid.org/0000-0002-9764-5555>; e-mail: bogdan.nowak@pwr.edu.pl – Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, Politechnika Wroclawska,

zaopatrzenia w ciepło i jego efektywności, identyfikowanie potencjalnych źródeł strat ciepła i wykrywanie nieprawidłowości w działaniu, choć zazwyczaj wymaga to wyposażenia jeszcze w dodatkowe narzędzia do interpretacji zebranych danych i rozbudowania układów pomiarowych o dodatkowe elementy [4, 5, 7, 9]. Natomiast właściciele mieszkań otrzymując dane (wskazania zużycia) łatwo porównywalne w kolejnych okresach rozliczeniowych, z możliwością ich weryfikacji oraz obserwowania na ciepłomierzu zużycia w okresach pomiędzy kolejnymi rozliczeniami i planowania przyszłych kosztów ogrzewania. Zgodnie z art. 45a Prawa energetycznego [14] właściciel lub zarządca budynku wielokomunalnego dokonuje rozliczenia całkowitych kosztów zakupu ciepła na poszczególne lokale mieszkalne i użytkowe, w oparciu o ustalony przez siebie regulamin, gwarantujący określone ustawą warunki i wymagania. Co do zasady, system rozliczeń kosztów ciepła oparty na wykorzystaniu ciepłomierzy mieszkaniowych wydaje się być prostszy do sformalizowania na poziomie zapisów regulaminu rozliczeń i łatwiejszy do zaakceptowania przez mieszkańców. Szczególnie jest to realne do zapewnienia w przypadku, gdy źródło ciepła jest opomiarowane w sposób umożliwiający ustalenie rzeczywistej ilości ciepła kierowanego do instalacji c.o. oraz układu przygotowania c.w. [1, 7, 9, 11].

Chociaż nie dotyczy to bezpośrednio obowiązku sprzedającego ciepło, a jego odbiorcy, w ofercie przedsiębiorstw ciepłowniczych stały się powszechne rozwiązania umożliwiające zamontowanie bardziej rozbudowanego układu pomiarowego, w skład którego – obok ciepłomierza głównego – wchodzi dodatkowy ciepłomierz instalowany za wymiennikiem c.o. (zazwyczaj po stronie sieciowej). Różnica wskazań obu urządzeń wyznacza ilość ciepła przekazanego do układu przygotowania c.w. (w tym straty ciepła na cyrkulacji). Wcześniej ilość ciepła wykorzystywanego na potrzeby c.w. była wyznaczana w sposób bardziej uproszczony i mało dokładnie. Wykorzystywane są w tym celu wskazania wodomierza mierzącego wodę zimną, która jest podgrzewana w węźle cieplnym. Taki pomiar nie rejestruje jednak temperatur wody zimnej i ciepłej, a przede wszystkim pomija ciepło wykorzystywane na potrzeby podgrzania wody krążącej w instalacji cyrkulacyjnej [2]. Ilość ciepła wykorzystanego w postaci c.w. jest w takiej metodzie szacowana w oparciu o przyjęte teoretycznie temperatury wody zimnej i ciepłej, a po odjęciu tej wartości od wskazań ciepłomierza głównego straty ciepła na cyrkulacji c.w. wchodzi do bilansu ciepła zużytego na ogrzewanie budynku.

W przypadku kotłowni lokalnych budowa układu pomiarowego do pomiaru ilości wy-

tworzonego ciepła jest nieco trudniejsza. Brak dokładnych informacji o wartości opałowej paliwa oraz sprawności kotłów (dodatkowo oba parametry są zmienne w czasie) powodują, że uzasadniony jest montaż zarówno ciepłomierza głównego (bezpośrednio za kotłami) oraz urządzenia pomiarowego po stronie instalacji c.o. (lub w układzie przygotowania c.w.). Wymagana jest jeszcze większa rozbudowa układu pomiarowego, jeśli zasilane w ciepło jest kilka budynków. W przypadku kotłowni lokalnych znajdujących się w zasobach własnych, Prawo energetyczne [14] nie wymaga jednak od zarządcy budynku podziału kosztów wytworzenia ciepła pomiędzy lokale mieszkalne i użytkowe, a podziału kosztów zakupu paliwa gazowego. Faktycznie jednak zarządca może mieć wyłącznie wiedzę o zużyciu ciepła na potrzeby ogrzewania poszczególnych lokali. W budynkach wielorodzinnych i wielokomunalnych (z instalacjami z rozdzielaczem/węzłem mieszkaniowym i poziomym rozprowadzeniem czynnika grzewczego do grzejników) podział kosztów i rozliczenie opłat za ogrzewanie oparty jest o wskazania ciepłomierzy mieszkaniowych.

Niezależnie od stopnia skomplikowania całego systemu pomiarowo – rozliczeniowego, nie jest możliwe wyeliminowanie awarii poszczególnych urządzeń czy ingerencji zewnętrznej w działanie poszczególnych elementów. Mogą to być zarówno zdarzenia losowe, jak i skutek działania osób (zamierzonych lub przypadkowych). Są one trudne do przewidzenia i regulaminy rozliczeń ciepła nie zawsze uwzględniają takie przypadki.

Awaria ciepłomierza mieszkaniowego

Nawet w mniej skomplikowanych systemach zaopatrzenia w ciepło i ich układach pomiarowych trudno jest przewidywać wszystkie możliwe przypadki i warunki, które mogą wystąpić w czasie ich eksploatacji. Poza stanami pracy przy zmieniających się w ciągu roku warunkach eksploatacji, występują również stany awaryjne, wywołane uszkodzeniem pojedynczych elementów lub całego systemu. Pomimo ciągłego udoskonalania ich konstrukcji, awariom ulegają również ciepłomierze mieszkaniowe. Najczęściej takie uszkodzenia są zauważane w przypadku naliczenia dużej dopłaty czy wykazania przez ciepłomierz pomiaru znacząco odbiegającego od danych historycznych (in plus) lub uszkodzeń uniemożliwiających odczyt. Dużo trudniej jest wykryć uszkodzenie, którego skutkiem jest brak zarejestrowania zużycia ciepła w mieszkaniu, gdyż jest ono korzystne dla użytkownika takiego lokalu, a stan taki można jednocześnie wyjaśnić zamknięciem zaworów na grzejnikach. Zazwyczaj nie jest też możli-

we jednoznaczne określenie momentu, kiedy awaria nastąpiła, a nawet czy stało się to w danym okresie rozliczeniowym. Poza tym, że niedostępna staje się informacja o wielkości zużycia ciepła w okresie rozliczeniowym, wykrycie awarii może wzbudzić też wątpliwość do danych pomiarowych z poprzednich okresów. Dla przypadków braku lub wątpliwości co do wskazań urządzenia pomiarowego, w regulaminie rozliczenia kosztów ciepła powinien więc być określony algorytm ustalania udziału takiego lokalu w koszcie zakupu ciepła dostarczonego do budynku w okresie rozliczeniowym. Zazwyczaj zaproponowany sposób oszacowania zużycia ciepła dla lokalu z uszkodzonym ciepłomierzem bazuje na wyznaczeniu średniej wartości ze wszystkich lub określonej części lokali mieszkalnych. Znane są również modyfikacje tego ogólnego sposobu, polegające na wprowadzaniu różnego rodzaju współczynników korekcyjnych, najczęściej zwiększających, a w skrajnych przypadkach przypisujące zużycie ciepła w oparciu o lokal/lokale z maksymalnym w danym okresie zużyciu. Obciążony takimi kosztami użytkownik lokalu, do tego momentu nie interesujący się takimi regulacjami, poznając takie warunki może czuć się poszkodowany, szczególnie gdy nie odpowiada za awarię i oszczędnie gospodarował ciepłem do ogrzewania swojego lokalu. Jest to częstą przyczyną kwestionowania opłat za ogrzewanie i postępowań prowadzonych przed sądem. Za niesprawiedliwe użytkownik lokalu może też uznać konieczność uregulowania kosztów wyznaczonych np. w oparciu o pomiar dla lokalu z największym jednostkowym zużyciem ciepła w budynku, powiększonych jeszcze o 30-50% lub wyznaczonych w oparciu o średnie jednostkowe zużycie ciepła dla całego budynku, ale np. pomnożone przez współczynnik 4,3, szczególnie gdy wcześniej płacił dużo niższe rachunki.

Administrator / zarządca nieruchomości oraz firmy odpowiadające za prowadzenie rozliczeń zainteresowani są możliwie prostymi procedurami obliczeniowymi. Preferowane są też zasady, które będą zapobiegały świadomym i celowym działaniom użytkowników, prowadzącym do uszkodzenia czy wywołania awarii układu pomiarowego. Im algorytm jest mniej skomplikowany, tym łatwiej wykonać obliczenia (nawet jak obecnie wpisanie formuły obliczeniowej czy to w arkuszu kalkulacyjnym, czy wręcz przygotowanie modułu obliczeniowego w zewnętrznej aplikacji nie jest ani trudne ani kosztowne), ale przede wszystkim możliwe jest objaśnienie i proste wytłumaczenie sposobu oszacowania zainteresowanemu właścicielowi mieszkania, którego dotyczy ten problem. Możliwe jest też wpisanie takiej reguły wprost (łącznie z wzorami) w treść regulaminu rozliczeń ciepła i wskazanie tego

regulaminu jako podstawy prawnej działania zarządcy (wynikającej z Prawa energetycznego [14]) – zazwyczaj niekwestionowanej wówczas przez sądy.

Właściciele lokali mieszkalnych zainteresowanie szczegółowymi regulacjami w zakresie rozliczania kosztów w przypadkach awarii zwykle wykazują dopiero w przypadku gdy zachodzi konieczność zastosowania danej procedury wobec ich lokalu. Dopiero wówczas też zaczynają zgłaszać zastrzeżenia do algorytmów, które nie pozwalają im na samodzielne wykonanie obliczeń (np. na skutek braku dostępu do szczegółowych danych dla całego budynku, czy nieokreślony sposób obliczeń). Za argument podważający zasadność obciążenia ich tak oszacowanymi kosztami przytaczają historię wcześniej dokonywanych opłat i wielkości zużytego ciepła. Argumentem może być też twierdzenie o braku korzystania z ogrzewania w spornym okresie rozliczeniowym, czy o oszczędnym korzystaniu z uwagi na obawę przed poniesieniem dużych wydatków. Szczególnym problemem może być przypadek gdy we wcześniejszych okresach rozliczeniowych, np. na skutek awarii (ale przecież może być to też efekt braku użytkownika lokalu), ciepłomierz wykazywał brak lub zmniejszone zużycie ciepła, a awaria ta nie została jeszcze wówczas wykryta.

Oczekiwanie przez użytkowników lokali, jak i często przez zarządców nieruchomości, prostej formuły algebraicznej powoduje, że powszechnie stosowane algorytmy i regulacje dotyczące ustalania zużycia ciepła do ogrzewania pomieszczeń w przypadku braku odczytu ciepłomierza mieszkaniowego lub kwestionowania tego wskazania będą obciążone dużym błędem. Jest też bardzo prawdopodobne, że uzyskana w oparciu o takie obliczenia wartość może istotnie odbiegać od faktycznego zużycia ciepła w zadanym czasie, tym bardziej im dłuższe są okresy rozliczeniowe. Przemawia to zatem za skracaniem okresów rozliczeniowych, co jednak generuje dodatkową pracę dla pracowników zarządcy nieruchomości, preferujących pobieranie opłat zaliczkowych i rozliczanie ich raz lub dwa razy w roku.

Należy podkreślić, że istnieją modele prognostyczne umożliwiające dokładniejsze szacowanie zużycia ciepła, które wykorzystują dostępne dane, np. historyczne wielkości zużycia w poprzednich miesiącach (okresach rozliczeniowych). Wykorzystują sprawdzone w praktyce w różnych dziedzinach nauki i techniki metody matematyczne, takie jak np. analiza szeregów czasowych, sieci neuronowe, algorytm lasów losowych, modele stochastyczne [3, 11, 12, 16] itp. Oczywiście, dokładne przypisanie danemu lokalowi mieszkalnemu udziału w zużyciu ciepła na ogrzewanie budynku wielolokalowego jest prak-

tycznie niemożliwe bez dysponowania dokładnymi danymi pomiarowymi. Zużycie to zależy bowiem od wielu czynników [1, 2, 4, 9, 10, 13] i tylko w części zależnych od warunków pogodowych i temperatury zewnętrznej. Wynikać może również z lokalizacji mieszkania w bryle budynku. Trzeba też mieć na uwadze wymianę ciepła pomiędzy lokalami [6], która zależy od utrzymywania w nich różnych warunków temperaturowych. Duży wpływ ma również intensywność wentylacji. Wszystkie te utrudnienia nie zwalniają jednak zarządcy od obowiązku obciążenia użytkownika takiego lokalu kosztami ogrzewania. Istotne jest więc, aby można było zarówno uzasadnić wielkość takiej opłaty, jak i aby była jak najbardziej zbliżona do udziału takiego lokalu w kosztach zakupu ciepła (ewentualnie zakupu paliwa gazowego i energii elektrycznej) na cele ogrzewania budynku.

Jednostkowe zużycie ciepła

Biorąc pod uwagę opisane uwarunkowania techniczne i formalno-prawne, przeprowadzona została analiza możliwości wykorzystania danych historycznych do oszacowania udziału w kosztach ogrzewania całego budynku takiego lokalu, w którym stwierdzona została awaria ciepłomierza. W tym celu wykorzystano posiadane dane pomiarowe z systemu zaopatrzenia w ciepło grupy budynków mieszkalnych na jednym z osiedli we Wrocławiu. Układ pomiarowy obejmował 259 ciepłomierzy mieszkaniowych. Wykorzystywały one przepływomierze ultradźwiękowe

o przepływie nominalnym 0,6 m³/h, a odczyt odbywał się drogą radiową. W okresie uwzględnionym w programie badań (październik 2015 r. – grudzień 2019 r.), z wyjątkiem jednego lokalu, wszystkie urządzenia działały poprawnie. W listopadzie i grudniu 2018 r. w wyniku tej awarii, nie odczytano stanów jednego z ciepłomierzy. Sytuacja ta potwierdza, że prawdopodobieństwo uszkodzenia urządzenia pomiarowego jest minimalne, ale jednak możliwe.

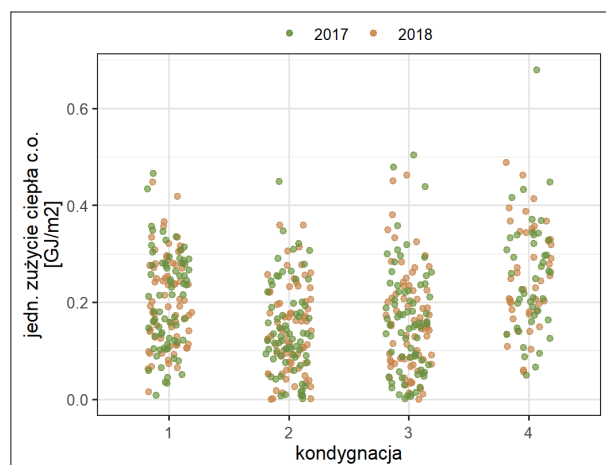
W celu dokonania analizy zużycia ciepła w mieszkaniach i lokalach należących do tego systemu wyznaczone zostały wartości średnie jednostkowego zużycia ciepła na ogrzewanie pomieszczeń w 2017 i 2018 r. oraz określono względną zmianę w kolejnym roku (odniesioną do stanu z 2017 r.). Wartości średnie dla mieszkań na poszczególnych kondygnacjach przedstawiono w tab. 1, a graficzny rozkład na podstawie pomiarów dla poszczególnych lokali na rys. 1.

Biorąc pod uwagę odmienne warunki wykorzystania instalacji ogrzewania, w przypadku lokali, które nie są użytkowane (i nie są ogrzewane, więc mogą istotnie zaburzać wartość średnią), przeanalizowano możliwość ich wyeliminowania na etapie obliczeń średniego zużycia ciepła. W tym celu ustalono liczbę mieszkań/lokali, w których zużycie ciepła do ogrzewania pomieszczeń było niższe niż 0,1 GJ/rok. Jest to więcej niż zero, ale mocno odbiega od ilości, która w okresie roku zapewniłaby utrzymanie temperatury komfortu czy dyżurnej. W 2018 r. na kondygnacji 2. zużycie mniejsze niż 0,1 GJ (roczne)

Tab. 1 Średnie jednostkowe zużycie ciepła na potrzeby ogrzewania mieszkań w 2017 r. i 2018 r. w zależności od kondygnacji, na której znajduje się mieszkanie
Average unit heat consumption for apartment heating in 2017 and 2018 depending on the floor on which the apartment is located

| Kondygnacja | Średnie jednostkowe zużycie ciepła na c.o. w 2017 r. GJ/m ² | Średnie jednostkowe zużycie ciepła na c.o. w 2018 r. GJ/m ² | Zmiana procentowa (2017 = 100 %) |
|-------------|--|--|----------------------------------|
| 1 | 0,203 | 0,204 | 101,0 |
| 2 | 0,144 | 0,140 | 97,7 |
| 3 | 0,160 | 0,159 | 99,5 |
| 4 | 0,253 | 0,249 | 98,3 |

Rys. 1 Jednostkowe zużycie ciepła na potrzeby ogrzewania mieszkań w 2017 r. i 2018 r. w zależności od kondygnacji, na której znajduje się mieszkanie
Unit heat consumption for apartment heating in 2017 and 2018, depending on the floor on which the apartment is located



zarejestrowano w 3 lokalach mieszkalnych, a na kondygnacji 3. – w jednym. W 2017 r. zużycie mniejsze zarejestrowano tylko w dwóch lokalach – po jednym na kondygnacji 2. i 3. Uznano więc, że tak nieliczna grupa mieszkań z wyłączonym ogrzewaniem nie będzie wpływać w sposób istotny na wyznaczoną wartość średnich. Średnia liczona bez mieszkań o zużyciu ciepła mniejszym niż wartość graniczna dla 2. kondygnacji wyniosła 0,147 GJ/m², zaś dla 3. kondygnacji – 0,161 GJ/m² (2018 r.). W przypadku większej liczby takich mieszkań, problem może być bardziej istotny i powinien być brany pod uwagę.

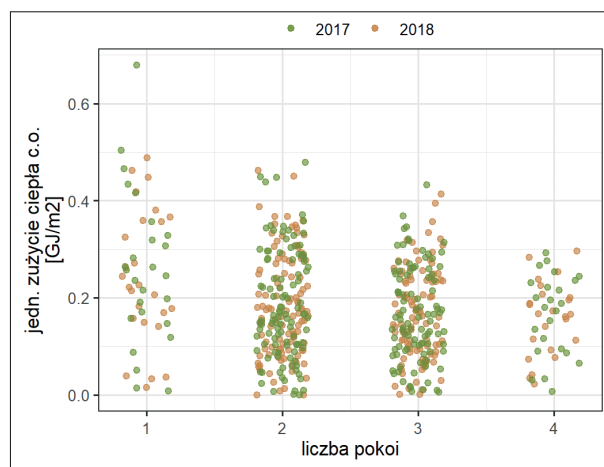
Uwzględnienie zależności zużycia ciepła od kondygnacji, na której znajduje się lokal mieszkalny od strony technicznej można wyjaśnić dość prosto. Związane jest to zarówno z ilością przegród zewnętrznych (parter – strop nad garażem, 4. kondygnacja – stropodach) jak i wentylacją budynku, jako całości, z uwzględnieniem wpływu na nią klatek schodowych. Potwierdzają to też jednostkowe wskaźniki przedstawione w tab. 1, gdzie największe średnie jednostkowe zużycie dla obu lat jest dla kondygnacji 4., mniejsze, ale też powyżej 0,2 GJ/m² dla kondygnacji 1., natomiast dla kondygnacji pośrednich jest najmniejsze (ok. 0,15 GJ/m²). O ile też uzyskana została podobna tendencja zmiany wskaźnika jednostkowego w stosunku do roku poprzedniego (spadek o ok. 0,5-2%) dla trzech pięter, to dla parteru jest to wzrost o 1%. Wartość uśredniona nie jest jednak dobrym miernikiem do analizy pojedynczego zjawiska, dlatego tab. 1 należy analizować łącznie z rys. 1. Wynika z niego, że na każdej kondygnacji są mieszkania, w których jednostkowe zużycie ciepła przekracza 0,4 GJ/m² (ok. 2 razy większe niż wartość średnia), jak i mieszkania z niewiele większym od 0,0 GJ/m² zużyciem. Wyjątkiem są tylko mieszkania na 4. kondygnacji, dla których jednostkowy wskaźnik jest zawsze większy od 0,05 GJ/m². Największego jednostkowego zużycia ciepła można się też spodziewać w mieszkaniach na ostatniej kondygnacji.

Pomimo tych czytelnych prawidłowości, mając na uwadze, że dla każdej kondygnacji uzyskano podobne chmury punktów przedstawionych graficznie na rys. 1, zbadano również, czy zarejestrowane pomiary wykazują jednoznaczną zależność statystyczną. Podstawowym instrumentem stosowanym w takich przypadkach jest badanie korelacji liniowej. Współczynnik korelacji Pearsona dla danych z 2018 r. wyniósł 0,104, a wartość p-value wskazuje na brak istotnej statystycznie zależności. Dla danych z 2017 r. uzyskano wynik odpowiednio: 0,105 i p-value > 0,05. Wynik testu jest więc podobny jak dla danych z 2018 r. O ile dla kondygnacji po-

wtarzalnych (2. i 3.) jest to oczywiste, to dla kondygnacji 1. i 4. wyjaśnieniem takiego wyniku może być porównywalność wpływu na roczne zużycie ciepła do ogrzewania wymiany ciepła pomiędzy lokalami mieszkalnymi oraz strat ciepła przez strop nad garażem i poprzez stropodach, jak i znaczącego udziału wentylacji w stratach ciepła mieszkania.

Poddano również analizie zależność jednostkowego zużycia ciepła do ogrzewania mieszkania od wielkości mieszkania określonej liczbą pokoi. Wyniki tych obliczeń zestawiono w tab. 2 oraz na rys. 2. Trzeba zastrzec, że na uzyskane wyniki wpływ może

Rys. 2
Jednostkowe zużycie ciepła na potrzeby ogrzewania mieszkań w 2017 r. i 2018 r. w zależności od liczby pokoi w mieszkaniu.
Unit heat consumption for apartment heating in 2017 and 2018 depending on the number of rooms in the apartment



Tab. 2 Średnie jednostkowe zużycie ciepła na potrzeby ogrzewania mieszkań w 2017 r. i 2018 r. w zależności od liczby pokoi w mieszkaniu.
Average unit heat consumption for apartment heating in 2017 and 2018 depending on the number of rooms in the apartment

| Liczba pokoi w mieszkaniu | Średnie jednostkowe zużycie ciepła na c.o. w 2017 GJ/m ² | Średnie jednostkowe zużycie ciepła na c.o. w 2018 GJ/m ² | Zmiana procentowa (2017 = 100 %) |
|---------------------------|---|---|----------------------------------|
| 1 | 0,258 | 0,244 | 94,5 |
| 2 | 0,183 | 0,184 | 100,0 |
| 3 | 0,167 | 0,168 | 101,0 |
| 4 | 0,166 | 0,158 | 95,5 |
| Średnia ogólna | 0,183 | 0,182 | 99,4 |

mieć już liczebność poszczególnych zbiorów, gdyż nie są one już tak porównywalne, jak liczba mieszkań na każdej kondygnacji. Mieszkań jedno – i czteropokojowych jest mniej. Niemniej jednak wyraźnie widać, że mieszkania jednopokojowe mają największe średnie jednostkowe zużycie ciepła na ogrzewanie, a wraz z liczbą pokoi ono maleje. Najbardziej też zwarta jest chmura punktów dla mieszkań czteropokojowych, a najbardziej rozproszona (o największym przedziale zmienności) dla mieszkań jednopokojowych. Im mniejsze mieszkanie (im mniej mieszkańców) tym bardziej losowy może być charakter jego użytkowania (łącznie z brakiem użytkowania).

Dodatkowo, tab. 3 przedstawia przebieg zmienności powierzchni użytkowej mieszkań klasyfikowanych w oparciu o liczbę pokoi.

Tab. 3 Powierzchnia mieszkania w zależności od liczby pokoi
Apartment area depending on the number of rooms

| Liczba pokoi w mieszkaniu | Minimalna powierzchnia mieszkania m ² | Maksymalna powierzchnia mieszkania m ² |
|---------------------------|--|---|
| 1 | 26,7 | 33,6 |
| 2 | 36,0 | 55,6* |
| 3 | 57,7 | 74 |
| 4 | 84,2 | 101,3 |

*) jedno z mieszkań jako 2-pokojowych ma powierzchnię 103,4 m² i powstało z połączenia dwóch mieszkań. W zestawieniu powierzchni uwzględniono je jako dwa mieszkania. W pozostałych analizach, ze względu na sposób użytkowania, występuje jako 2-pokojowe.

wartości średniej mają tę cechę, że uzyskiwany wynik nie jest zindywidualizowany. Niezależnie od tego, którego mieszkania dotyczyłoby takie oszacowanie zużycia ciepła, wynik (jednostkowy) będzie taki sam. Takie podejście metodyczne zupełnie pomija też dane historyczne dla konkretnego mieszkania i informacje dotyczące wcześniejszych miesięcy, a które tworzą zindywidualizowany profil zużycia ciepła na ogrzewanie konkretnego mieszkania. Mając więc na uwadze te ograniczenia zaproponowano inne podejście do rozwiązania opisanego problemu.

Indywidualny profil zużycia ciepła mieszkań jednorodnych

Disponując bazą danych historycznych o zużyciu ciepła w mieszkaniach można w zbiorze wszystkich lokali mieszkalnych wybrać grupę mieszkań, w których profil zużycia ciepła w miesiącach poprzedzających awarię był najbardziej zbliżony do mieszkania, w którym stwierdzono uszkodzenie ciepłomierza lub brak możliwości odczytu. Taki sposób będzie uwzględnił kondygnację, na której znajduje się mieszkanie, wielkość mieszkania, liczbę pokoi, preferencje mieszkańców w zakresie utrzymywanej temperatury wewnętrznej, a nawet warunki termiczne utrzymywane w sąsiadujących z nim mieszkaniach. Taką grupę mieszkań określono jako "grupa mieszkań jednorodnych". Na podstawie danych z okresu lat 2015–2019, dla wyodrębnionej grupy mieszkań jednorodnych, do której można zaliczyć mieszkanie z uszkodzonym ciepłomierzem mieszkaniowym, profile zużycia ciepła w kolejnych miesiącach przedstawiono na rys. 2. Jak widać, w każdym z mieszkań w grupie mieszkań jednorodnych występowało inne zużycie ciepła wyrażone w jednostkach bezwzględnych, jednak przebieg zmienności (profil) jest zbliżony. Dopuszczenie takiej możliwości zapewniła zgromadzenie większej liczby danych dla analizy trendu zmian, zakładając, że warunki użytkowania lokalu, dla którego dokonywane jest oszacowanie, w sposób istotny się nie zmieniły.

Przy tak przyjętych założeniach przeprowadzono symulację oszacowania zużycia ciepła na ogrzewanie w styczniu, listopadzie i grudniu 2019 r. dla wybranych mieszkań w oparciu o dane historyczne, za pomocą modelu prognostycznego. W tym celu opracowano moduł obliczeniowy w środowisku R. Odczyty z ciepłomierza posłużyły natomiast do oceny tak uzyskanej prognozy. Dane z okresu październik 2015 r. – grudzień 2018 r. stanowiły zbiór uczący, zaś zużycie ciepła z 2019 r. – zbiór testowy. Dla porównania oszacowano również zużycie ciepła na

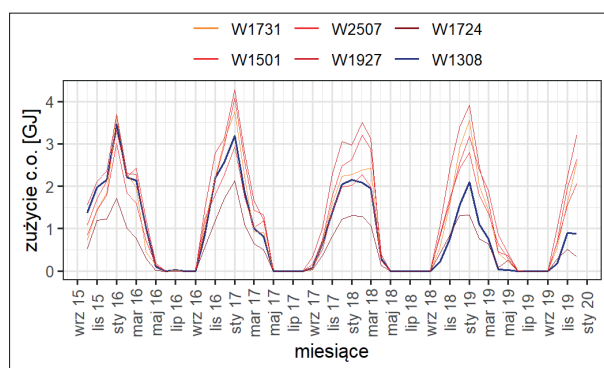
podstawie średniego jednostkowego zużycia ciepła dla danej kondygnacji.

Dyskusja wyników

Przedstawione w tab. 4 wyniki wskazują, że oszacowanie na podstawie symulacji metodą grupy mieszkań jednorodnych może zarówno przekraczać rzeczywiście zmierzone wartości, jak i że oszacowanie może być mniejsze. W przypadku mieszkania W2307 i grudnia czy W0303 i listopada, niedoszacowanie jest duże. Dla W2307 niedoszacowanie jest przy tym mniejsze niż określone na podstawie wskaźnika średniego jednostkowego zużycia, a dla mieszkania W0303 wartość obliczona na podstawie wskaźnika znacząco przekracza odczytane z ciepłomierza zużycie. Można jednak uznać, że opisana w artykule metoda daje co najmniej porównywalne wyniki jak oszacowanie zużycia ciepła w oparciu o średnie jednostkowe zużycie ciepła dla poszczególnych kondygnacji. Jej dużą zaletą jest zindywidualizowane podejście do każdego lokalu mieszkalnego. W przypadku szacowania na podstawie wskaźnika jednostkowego dla

kondygnacji, na której zlokalizowane jest mieszkanie (lub wskaźnika dla całego budynku) wyliczenie zużycia uzależnione jest wyłącznie od wielkości mieszkania. Uwzględnienie historycznie dokonywanych odczytów zużycia w analizowanym mieszkaniu eliminuje często powtarzające się zastrzeżenia mieszkańców obciążanych przez zarządcę nieruchomości opłatą, ustalaną w przypadku awarii układu pomiarowego. Wskazują bowiem rozliczenia z poprzednich okresów, ewentualnie porównując je do znanych im rozliczeń sąsiadów, potwierdzając tym, że naliczenie podane przez zarządcę znacząco odbiega od wcześniejszych opłat. Zazwyczaj nie odpowiadają też oni za awarię ciepłomierza, więc nie ma podstawy do ukarania ich zbyt wysoką opłatą za ogrzewanie. Jednocześnie w opisanej metodzie, do ustalenia prognozy nie wykorzystano wyłącznie danych historycznych danego mieszkania, ale również uwzględniono dane z mieszkań o podobnej do jego dynamice zużycia. Prognoza uwzględnia w ten sposób uwarunkowania zewnętrzne, od których zależy zużycie ciepła do ogrzewania, a których wpływ jest

Rys. 3
Profile zużycia ciepła do ogrzewania pomieszczeń w „grupie lokali jednorodnych”. Przedmiotowe mieszkanie – W1308
Heat consumption profiles for space heating in the "group of homogeneous premises". The flat in question – W1308



Tab. 4 Wyniki symulacji oraz rzeczywiste zużycie ciepła dla wybranych lokali mieszkalnych oraz wytypowanych okresów rozliczeniowych (miesiące).

Simulation results and actual heat consumption for selected apartments and selected billing periods (months).

| Mieszkanie | Miesiąc | Rzeczywiste zużycie ciepła (wg ciepłomierza) | Szacowane zużycie ciepła – metoda grup lokali jednorodnych | Szacowane zużycie ciepła – metoda średniej dla danej kondygnacji | Zgodność – metoda grup lokali jednorodnych (4)/(3) · 100 % | względem metody średniej dla danej kondygnacji (4)/(5) · 100 % |
|------------|---------|--|--|--|---|---|
| | | GJ | GJ | GJ | | % |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| W0303 | 1 | 1,46 | 0,96 | 2,79 | 65,82 | 190,77 |
| | 11 | 0,52 | 0,27 | 1,34 | 51,29 | 257,61 |
| | 12 | 0,3 | 0,55 | 2,02 | 181,76 | 672,86 |
| W1105 | 1 | 2,25 | 2,11 | 2,56 | 93,65 | 113,99 |
| | 11 | 0,79 | 0,84 | 1,38 | 106,96 | 174,89 |
| | 12 | 1,33 | 2,35 | 1,92 | 176,88 | 144,13 |
| W1306 | 1 | 3,95 | 3,89 | 2,97 | 98,43 | 75,19 |
| | 11 | 0,25 | 2,07 | 0,80 | 827,34 | 639,96 |
| | 12 | 1,31 | 2,72 | 1,60 | 207,98 | 169,44 |
| W2307 | 1 | 3,11 | 2,97 | 2,22 | 95,6 | 70,37 |
| | 11 | 2,77 | 1,77 | 2,19 | 63,84 | 41,62 |
| | 12 | 3,09 | 1,91 | 1,15 | 61,74 | 52,3 |

uśredniany (i w ten sposób eliminowany) w metodzie wykorzystującej średni jednostkowy wskaźnik zużycia.

Artykuł nie ma na celu przedstawienie gotowego modelu, uniwersalnego dla wszystkich budynków, a prezentuje przede wszystkim założenia do postępowania i określa metodę oraz ilustruje to wynikami przeprowadzonych obliczeń numerycznych. Jak widać w tab. 4, proponowany algorytm musi zostać jeszcze zoptymalizowany o określenie zakresu danych historycznych. Odwoływanie się do odległych czasowo danych może wprowadzać zbędne zakłócenia, które mogą być związane ze zmianą liczby osób czy trybu użytkownika pomieszczeń (praca zdalna). Wstępne analizy wykazały, że klasyfikowanie 5-6 mieszkań do „jednorodnej grupy lokali” daje najlepsze wyniki szacowań, choć wymaga to dodatkowych badań i weryfikacji.

W oparciu o wiedzę dotyczącą dynamicznych zachodzących zmian społecznych, wydaje się, że celowe będzie też uwzględnienie w przyszłych badaniach dodatkowych czynników, które mogą poprawić zaproponowany algorytm i model. Szczególnym problemem jest uwzględnienie wpływu nagłej zmiany wielkości zużycia ciepła, jak w przypadku mieszkania W1306 w listopadzie i grudniu 2019 r. (rys. 2). Wielkość zużycia c.w. bądź energii elektrycznej w danym lokalu mieszkalnym przynosi istotne informacje dotyczące zarówno trybu użytkownika lokalu mieszkalnego, jak również zwyczajów i preferencji użytkowników. W przypadku więc kompleksowego zarządzania energią w budynku [5, 7, 8] możliwości tego typu analiz są jeszcze większe.

Wnioski

Bardzo istotne dla analizy działania systemów zaopatrzenia w ciepło są dane gromadzone w oparciu o system monitoringu i pomiarów poszczególnych wielkości, mających wpływ na zużycie ciepła i efektywność energetyczną [2, 7, 8]. Umożliwiają one bardziej lub mniej dokładną diagnostykę stanu, jak i szukanie źródeł ograniczenia zużycia nośników energii pierwotnej, przy zapewnieniu odpowiednich warunków komfortu cieplnego. Wymaga to nie tylko zbierania danych, ale i ich przetworzenia i porównań. Wyposażenie budynków wielorodzinnych w mieszkaniowe liczniki ciepła umożliwi pomiar zużytego do ogrzewania mieszkania ciepła i na tej podstawie podzielenie kosztów zakupu ciepła, paliwa gazowego i energii elektrycznej wykorzystanych do ogrzewania całego budynku wielolokalowego. Nie ma jednocześnie dobrej i skutecznej metody działania w przypadkach, gdy pojedynczy układ pomiarowy w takim systemie rozliczeń ulegnie uszkodzeniu. Stosowane regulaminy rozliczenia kosztów

ogrzewania często sprowadzają taki przypadek do wykorzystania prostych metod obliczeniowych, wykorzystujących średni wskaźnik jednostkowy wyznaczony w oparciu o pozostałe pomiary i określenia na podstawie powierzchni mieszkania brakującego pomiaru (ewentualnie stosując jeszcze mnożniki zwiększające). Taki algorytm pozwala na uzupełnienie brakującego udziału i obciążenie kosztami mieszkania z uszkodzonym ciepłomierzem za dany okres rozliczeniowy, jednak nie ma żadnego związku z rzeczywistym zużyciem ciepła na jego ogrzewanie.

Zasadne jest więc poszukanie takich metod, które choć nie są w stanie odtworzyć utraconego pomiaru, to jednak będą w stanie oszacować zużycie ciepła, uwzględniając dotychczasowe zachowania użytkownika, jak i inne czynniki różniące udział konkretnego lokalu w zużyciu ciepła na ogrzewanie całego budynku (np. temperatura użytkownika w sąsiadujących lokalach). Przydatne w tym celu mogą być metody matematyczne, takie jak np. analiza szeregów czasowych, sieci neuronowe, algorytm losów losowych, modele stochastyczne [3, 11, 12, 16] itp. Przedstawiony przykład pokazał, że matematycznie, przy obecnie rozwiniętych technologiach informatycznych jest to możliwe. Niekoniecznie jednak trzeba wykorzystać wyłącznie dane historyczne dla danego lokalu. Wydaje się uzasadnione wyodrębnienie w budynku „grupy mieszkań jednorodnych” i poszerzony w ten sposób zbiór danych wykorzystać do oszacowania brakującego odczytu.

Opisany w artykule problem ma również związek z częstotliwością dokonywania rozliczeń. Opisano system zaopatrzenia w ciepło, w którym dokonywane są one w cyklach miesięcznych. Zalecenie Komisji Europejskiej [15] mówi o zaostreniu wymogów w zakresie częstego udzielania informacji o rozliczeniach i zużyciu, jeżeli dostępne są urządzenia umożliwiające zdalny odczyt, ale pozostawiony został jeszcze okres przejściowy (od dnia 25 października 2020 r. dwa lub cztery razy w ciągu roku i co miesiąc od dnia 1 stycznia 2022 r.). Odczyty kontrolne stanu ciepłomierzy mieszkaniowych w cyklu miesięcznym (a nawet częściej) pozwalają na podejmowanie czynności przywracających prawidłowe działanie urządzeń możliwie szybko. W przypadku awarii, liczba okresów (miesiący), dla których niezbędne jest oszacowanie zużycia ciepła zostaje dzięki temu ograniczona, a jakość rozliczenia kosztów w skali roku zachowuje wysoką jakość.

LITERATURA

[1] Adamski M., Myszkowska A., Rozliczanie kosztów ogrzewania na przykładzie wybranego mieszkania, *Budownictwo i Inżynieria Środowiska* 9/2018, s. 7-14.

[2] Bartnicki G., Nowak B., Koniec sezonu grzewczego a efektywność energetyczna instalacji odbioru ciepła, *INSTAL* 4/2020, s. 2-11. DOI 10.36119/15.2020.4.1

[3] Bartnicki G., Nowak B., Model ARIMA w prognozowaniu zużycia gazu w cyklach miesięcznych. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN*. 2018, nr 103, s. 145-158. DOI: 10.24425/123712

[4] Celenza L., Dell'Isola M., Ficco G., Greco M., Grimaldi M., Economic and technical feasibility of metering and sub-metering systems for heat accounting, *International Journal of Energy Economics and Policy* 6/2016, s. 581-587.

[5] Dell'Isola M., Ficco G., Canale L., Palella B. I., Puglisi G., An IoT Integrated Tool to Enhance User Awareness on Energy Consumption in Residential Buildings, *Atmosphere* 10/2019 (743). DOI:10.3390/atmos10120743

[6] Dudziński K., Nowa dyrektywa wzmacnia możliwości oszczędnego gospodarowania ciepłem w budynkach mieszkalnych, *INSTAL* 2/2019, s. 26-28.

[7] Gans W., Alberini A., Longo A., Smart meter devices and the effect of feedback on residential electricity consumption. Evidence from a natural experiment in Northern Ireland, *Energy Economics*, 2013, vol. 36, s. 729-743. DOI:10.1016 / j.eneco.2012.11.022

[8] Levermore G.J., Building energy management systems: applications to low-energy HVAC and natural ventilation control, *E & FN Spon*, 2000.

[9] Michnikowski P., Szczechowiak E., Rozliczanie kosztów ogrzewania lokali uzależnione od rzeczywistego zużycia energii dla ogrzewania w budynkach wielorodzinnych, *Rynek Energii* 6/2013.

[10] Nikolaou T., Kolokotsa D., Stavrakakis G., Review on methodologies for energy benchmarking, rating and classification of buildings, *Advances in Building Energy Research* 5/2011, s. 53-70. DOI:10.1080/17512549.2011.582340

[11] Nowak B., Bartnicki G., Prognozowanie przedziału czasowego z maksymalnym w ciągu doby zużyciem gazu przez kotłownię. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN*. 2019, nr 109, s. 93-109. DOI: 10.24425/znigsme.2019.130166

[12] Ozmen, A., Yilmaz, Y. i Weber, G.W., Natural gas consumption forecast with MARS and CMARS models for residential users, *Energy Economics* 70/2018, s. 357-381. DOI: 10.1016 / j.eneco.2018.01.022

[13] Peeters L., Van der Veken J., Hens H., Helsen L., D'haeseleer W., Control of heating systems in residential buildings: current practice, *Energy Building* vol. 40, 2008, s. 1446-1457. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.02.016

[14] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne, t.j. Dz. U. z 2020 r. poz. 833 z późn. zm.

[15] Zalecenie Komisji (UE) 2019/1660 z dnia 25 września 2019 r. dotyczące wdrożenia nowych przepisów z zakresu opomiarowania i rozliczeń zawartych w dyrektywie 2012/27/UE w sprawie efektywności energetycznej, *Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej*, L 275/121 (28.10.2019)

[16] Zaleski, J., Modele stochastyczne i symulacja komputerowa. Zastosowanie do systemów zaopatrzenia w wodę, PWN, Warszawa 2004.