



WYDAWNICTWO POLSKIEJ AKADEMII NAUK

MONOGRAFIE KOMITETU INŻYNIERII ŚRODOWISKA

vol. 159



STEROWANIE PROGNOZOWE DOSTAWĄ CIEPŁA NA POTRZEBY OGRZEWANIA

Tomasz Cholewa

WARSZAWA 2019

**POLSKA AKADEMIA NAUK
KOMITET INŻYNIERII ŚRODOWISKA**

MONOGRAFIE

Nr 159

**STEROWANIE PROGNOZOWE
DOSTAWĄ CIEPŁA NA POTRZEBY
OGRZEWANIA**

Tomasz Cholewa

WARSZAWA 2019

Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk 2019

© Komitet Inżynierii Środowiska PAN
ISBN 978-83-63714-58-1

Komitet Redakcyjny

prof. Anna Anielak
prof. Kazimierz Banasik
prof. January Bień
prof. Ryszard Błażejowski
prof. Michał Bodzek
dr hab. inż. Marcin Chodak
prof. Wojciech Dąbrowski
prof. Marzenna Dudzińska
prof. Marek Gromiec
dr hab. inż. Katarzyna Ignatowicz
prof. Janusz Jeżowiecki
prof. Katarzyna Juda-Rezler
prof. Małgorzata Kabsch-Korbutowicz,
dr hab. inż. Piotr Koszelnik
prof. Mirosław Krzemieniewski
prof. Izabela Majchrzak-Kucęba,
prof. Tadeusz Kuczyński
prof. Marian Kwietniewski
prof. Marian Mazur

prof. Korneliusz Miksch
dr hab. inż. Maciej Mrowiec
prof. Hanna Obarska-Pempkowiak
prof. Artur Pawłowski
dr hab. inż. Bernard Quant
prof. Czesława Rosik-Dulewska
prof. Jadwiga Rotnicka
prof. Marek Sozański
prof. Joanna Surmacz-Górska
prof. Krzysztof Szamałek
dr inż. Krystian Szczepański
mgr Andrzej Szweda-Lewandowski
prof. Kazimierz Szymański
prof. Maria Waclawek
prof. Józefa Wiater
prof. Tomasz Winnicki
prof. Krzysztof Wojdyga
mgr Krzysztof Zaręba
prof. Mirosław Żukowski

Redaktor Naczelny

prof. Lucjan Pawłowski

Recenzent wydawniczy

prof. dr hab. inż. Krzysztof Wojdyga

Druk

TOP Agencja Reklamowa Agnieszka Łuczak
www.agencjatorp.pl

SPIS TREŚCI

WYKAZ GŁÓWNYCH OZNACZEŃ	5
1. WSTĘP	7
2. ZUŻYCIE ENERGII W BUDYNKACH I MOŻLIWOŚCI JEGO OBNIŻENIA	11
2.1. Struktura zużycia energii w budynkach	11
2.2. Sposoby zmniejszenia zużycia energii w budynkach	13
2.3. Podsumowanie i rekomendacje.....	16
3. METODY MODELOWANIA, PROGNOZOWANIA I STEROWANIA DOSTAWĄ CIEPŁA NA POTRZEBY OGRZEWANIA	19
3.1. Metoda stopniodni	20
3.2. Metody regresji liniowej lub wielomianowej	22
3.3. Metody sterowania predykcyjnego MPC (Model Predictive Control).....	26
3.4. Metody wykorzystujące sztuczne sieci neuronowe.....	27
3.5. Sterownie dostawą ciepła na potrzeby ogrzewania wykorzystywane w Polsce	30
3.6. Podsumowanie i rekomendacje.....	36
4. AUTORSKA METODA PROGNOZOWANIA ZAPOTRZEBOWANIA NA MOC CIEPLNĄ NA POTRZEBY OGRZEWANIA OBIEKTÓW.....	39
4.1. Założenia wstępne	39
4.2. Wpływ wiatru na zapotrzebowanie na moc cieplną.....	41
4.3. Wpływ nasłonecznienia lub zachmurzenia na zapotrzebowanie na moc cieplną	51

4.4. Model cieplny obiektu w formie równoważnej temperatury zewnętrznej	73
4.5. Wpływ użytkowników na zapotrzebowanie na moc cieplną	85
4.6. Weryfikacja autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną	91
4.6.1. Weryfikacja autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną dla budynków	93
4.6.2. Weryfikacja autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną dla podstawy cieplnych	103
4.6.3. Weryfikacja autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną dla systemu ciepłowniczego	109
4.7. Podsumowanie i rekomendacje.....	113
5. AUTORSKA METODA STEROWANIA PROGNOZOWEGO ZAPOTRZEBOWANIA NA MOC CIEPLNĄ NA POTRZEBY OGRZEWANIA OBIEKTÓW.....	115
5.1. Założenia wstępne i opis autorskiej metody sterowania prognozowego	115
5.2. Charakterystyka rynku docelowego.....	125
6. PODSUMOWANIE.....	129
LITERATURA	133

Wykaz głównych oznaczeń

H – współczynnik strat ciepła [kW/K]

H_{sr} – średni współczynnik strat ciepła [kW/K]

n – wstępna korekta temperatury zewnętrznej z uwagi na nasłonecznienie [°C]

N – nasłonecznienie [J/cm²]

Q_{prog} – prognozowana moc cieplna [kW]

Q_{RZ} – rzeczywista moc cieplna [kW]

t_e – temperatura zewnętrzna [°C]

t_e^N – korekta temperatury zewnętrznej z uwagi na nasłonecznienie [°C]

$t_e^{rów}$ – równoważna temperatura zewnętrzna [°C]

t_e^V – korekta temperatury zewnętrznej z uwagi na prędkość wiatru [°C]

t_i – temperatura wewnętrzna [°C]

$t_i^{rów}$ – równoważna temperatura wewnętrzna [°C]

t_{me} – średnia temperatura powietrza zewnętrznego [°C]

v – prędkość wiatru [m/s]

z – wstępna korekta temperatury zewnętrznej z uwagi na prędkość wiatru [°C]

1. Wstęp

Według Polityki energetycznej Polski do 2030 roku (*Polityka energetyczna Polski do 2030 roku*) konieczne jest zwiększenie efektywności energetycznej szczególnie przez odbiorców końcowych. Jest to również zgodne z nowelizacją ustawy o efektywności energetycznej, która nastąpiła 20 maja 2016 roku (*Ustawa z dnia 15 kwietnia 2011 roku*) i w której podkreśla się podstawowy udział zwiększenia efektywności energetycznej w zakresie energii finalnej przez odbiorców końcowych, szczególnie w sektorze budownictwa. Zatem obniżanie zużycia energii właśnie w tym sektorze zyskuje cały czas na znaczeniu, szczególnie w obliczu zobowiązań poszczególnych krajów członkowskich Unii Europejskiej, które wynikają z pakietu energetyczno-klimatycznego „3x20” w zakresie zwiększenia efektywności energetycznej.

Racjonalizacja zużycia ciepła powinna być uwzględniona w budynkach nowych już na etapie projektowania efektywnych energetycznie systemów ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej, a następnie kontynuowana poprzez edukację i pełne zaangażowanie mieszkańców w proces efektywnego wykorzystania dostarczanego ciepła.

W większości budynków istniejących, zmniejszenie zużycia ciepła zostało już zrealizowane poprzez wykonanie termomodernizacji przegród zewnętrznych budynku, często połączonej z pewnym zakresem modernizacji systemu ogrzewania (np. zamontowanie zaworów termostatycznych przy grzejnikach). Dlatego też kolejne działania modernizacyjne, które będą miały na celu dalsze zwiększanie poziomu efektywności energetycznej w tego typu budynkach, będą się teraz koncentrowały w szczególności na modernizacji systemu ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej, edukacji mieszkańców oraz poprawie sterowania i automatyzacji procesów dostawy, magazynowania i odbioru energii (*Cholewa i Siuta-Olcha, 2016*).

Rozwiązaniami preferowanymi są działania, które charakteryzują się krótkim czasem wykonania prac modernizacyjnych, brakiem utrudnień podczas realizacji prac modernizacyjnych dla użytkowników oraz możliwie wysokim efektem (zmniejszenie zużycia ciepła) przy możliwie najniższych nakładach inwestycyjnych. Zatem rozwiązanie to powinno charakteryzować się możliwie krótkim czasem zwrotu poniesionych nakładów inwestycyjnych (SPBT – Simple Pay Back Time).

Obecnie wykorzystywane układy centralnej regulacji instalacji ogrzewczych w budynkach są realizowane przy wykorzystaniu głównie centralnej, jakościowej regulacji pogodowej, która opiera się na pomiarze temperatury zewnętrznej oraz wewnętrznej w miejscu reprezentatywnym budynku. Następnie regulacja temperatury wewnętrznej w poszczególnych pomieszczeniach realizowana jest najczęściej miejscowo poprzez regulację ilościową przy wykorzystaniu zaworów termostatycznych czy też innych lokalnych regulatorów zintegrowanych z zaworami wyposażonymi w siłowniki. W przypadku budynków jednorodzinnych istnieje i jest często wykorzystywana przez użytkowników funkcja obniżenia temperatury wewnętrznej podczas ich nieobecności. Jednak ta opcja nie jest wykorzystywana przy regulacji centralnej w prawie wszystkich większych budynkach (większych od budynku jednorodzinnego). Poza tym wybór krzywej grzewczej jest wykonywany często w nieodpowiedni i niedokładny sposób, co nie odpowiada (nawet w sposób zbliżony) charakterystyce cieplnej danego obiektu i powoduje pogorszenie efektywności energetycznej pracy układu. Żaden z dostępnych na rynku regulatorów nie uwzględnia równocześnie aspektów prognozowania zużycia ciepła dla zmiennych warunków atmosferycznych, jak i profili zachowania mieszkańców, które powinny być połączone z ich edukacją. Edukacja użytkowników systemów ogrzewczych jest jednym z mniej kapitałochłonnych działań, które pozwala na zmniejszenie zużycia energii (*Dianshu i in.*, 2010; *Ouyang i in.*, 2007). Przykładowo dzięki przedstawieniu użytkownikom możliwości oszczędności energii w gospodarstwach domowych można zmniejszyć jej zużycie nawet o 10% (*Ouyang i Hokao*, 2009).

Dlatego też celem niniejszej rozprawy jest przedstawienie autorskiej metody prognozowania dostawy ciepła na potrzeby ogrzewania do obiektów istniejących, jak i nowopowstających oraz zaproponowanie na tej podstawie metody sterowania prognozowego dostawą ciepła do obiektów.

Zastosowanie takiego systemu regulacji pozwala odpowiednio wcześniej uwzględnić w dostawie ciepła na potrzeby ogrzewania zmieniające się warunki atmosferyczne, jak i preferencje użytkowników/mieszkańców z zakresu komfortu cieplnego, co przy uwzględnieniu pojemności cieplnej oraz dynamiki przepływu ciepła w budynku może pozwolić na uzyskanie obniżenia zużycia ciepła przy zachowaniu komfortu cieplnego w pomieszczeniach ogrzewanych. Wynika to między innymi z faktu, że obecnie powszechnie stosowana jest regulacja pogodowa, która jest regulacją nadążną i steruje dostawą ciepła uwzględniając tylko aktualną wartość temperatury zewnętrznej, co nie pozwala w pełni dosto-

sować dostawy ciepła do zmieniających się potrzeb cieplnych regulowanych obiektów. Dodatkowo poprawne prognozowanie zapotrzebowania na moc cieplną na potrzeby ogrzewania może pozwolić na poprawę efektywności pracy nie tylko konkretnego budynku, ale i całego systemu ciepłowniczego, ponieważ uwzględniając prognozę zapotrzebowania na moc cieplną można zracjonalizować pracę urządzeń wytwarzających, jak i odbierających ciepło.

Zakres rozprawy obejmuje przedstawienie wybranych możliwości zmniejszenia zużycia energii w istniejących budynkach oraz metod, które są wykorzystywane na potrzeby modelowania, prognozowania oraz sterowania dostawą ciepła na potrzeby ogrzewania budynków. Przedstawione są zarówno metody, które są obecnie w fazie intensywnych badań w celu wdrożenia ich do powszechnego zastosowania, jak i metody, które stosowane są już od wielu lat na potrzeby regulacji instalacji ogrzewczych (między innymi regulacja pogodowa).

Przedstawiono również wpływ różnych czynników zewnętrznych (temperatura powietrza zewnętrznego, prędkość wiatru, nasłonecznienie, zachmurzenie), jak i wewnętrznych (zachowania i preferencje użytkowników) na zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania oraz rekomendowano możliwie dokładny sposób uwzględnienia tych czynników w autorskiej metodzie prognozowania zapotrzebowania mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania obiektów.

W pracy przedstawiono także walidację autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania na ciepło, zarówno na przykładzie budynków wielorodzinnych i użyteczności publicznej, podstacji cieplnych, jak i miejskiego systemu ciepłowniczego, które znajdują się w województwie lubelskim.

Przedstawiono też sposób implementacji opracowanych algorytmów na potrzeby autorskiego systemu prognozowego sterowania dostawą ciepła na potrzeby ogrzewania oraz scharakteryzowano nowe funkcjonalności autorskiej metody sterowania prognozowego dostawą ciepła.

2. Zużycie energii w budynkach i możliwości jego obniżenia

2.1. Struktura zużycia energii w budynkach

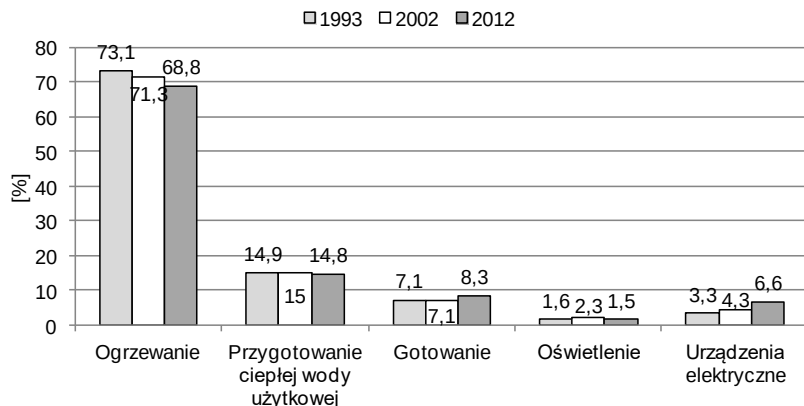
Przyjmuje się, że w Unii Europejskiej około 40% zużycia energii wykorzystywane jest w sektorze budownictwa mieszkaniowego, a 36% emisji CO₂ pochodzi z budynków mieszkalnych (De Rosa i in., 2014; Zhao i Magoulès, 2012). Pozostała ilość energii wykorzystywana jest w transporcie (około 31%) oraz w przemyśle (około 29%) (Żurawski, 2013). Podobne udziały analizowanych sektorów w całkowitym zużyciu energii w Unii Europejskiej zostały określone przez Ahern i Norton (2015) oraz Carvalho i in., (2015).

Z kolei analizując udział zużycia energii w budownictwie mieszkaniowym w skali świata, to wynosi on około 31% (Saidur i in., 2007; Hepbasli, 2012). Dlatego, z uwagi na znaczny udział sektora budownictwa mieszkaniowego w całkowitym zużyciu energii oraz wymagania związane z efektywnością energetyczną, należy poszukiwać i opracowywać nowe rozwiązania techniczne, aby zmniejszyć zużycie energii właśnie w tym sektorze.

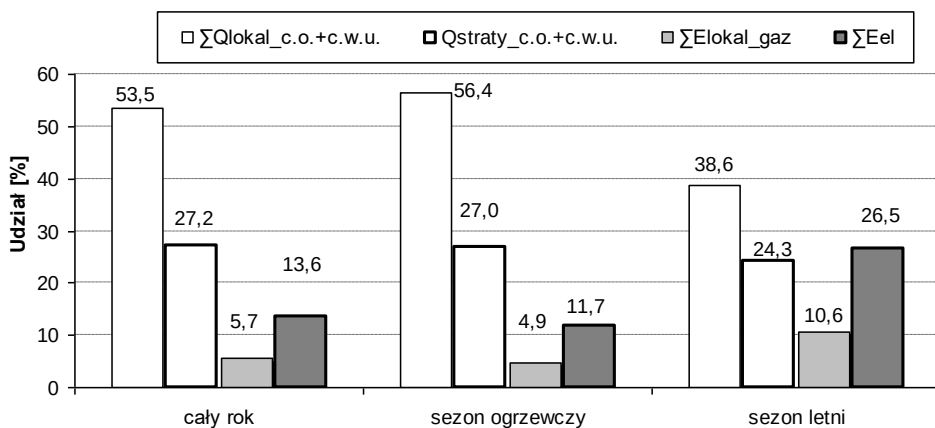
Należy jednak wyraźnie podkreślić, że powyższe udziały procentowe dotyczą budownictwa istniejącego, dlatego też proponowane rozwiązania w pierwszej kolejności powinny pozwalać na uzyskanie zmniejszenia zużycia energii w budynkach już istniejących.

Dodatkowo przy wyborze obszaru badawczego, w którym planuje się prowadzenie badań i analiz na potrzeby opracowania nowych rozwiązań z zakresu efektywności energetycznej, warto wziąć pod uwagę strukturę zużycia energii w budynku, co zostało pokazane dla budynków w strefie klimatu umiarkowanego na rysunku 2.1. Ponieważ uzyskanie 10% oszczędności zużycia energii w zakresie urządzeń elektrycznych nie może być traktowane na równi z wypracowaniem metody, która pozwala na uzyskanie 10% oszczędności energii w zakresie ogrzewania, co wynika z udziału poszczególnych celów w całkowitym zużyciu energii w budynku. Przykładowo, w budynkach w Polsce potrzeby energetyczne związane z ogrzewaniem stanowią około 70% całkowitego zużycia energii. Z kolei w Portugalii zużycie energii na potrzeby ogrzewania stanowi około 20%, co jest na podobnym poziomie, jak potrzeby energetyczne związane z przygotowaniem ciepłej wody w tym regionie świata (Carvalho i in., 2015).

Dlatego też do każdego obiektu w danej strefie klimatycznej należy podchodzić indywidualnie.



Rys. 2.1. Struktura zużycia energii w gospodarstwach domowych w Polsce w latach 1993–2012 (Cholewa i Siuta-Olcha, 2016)



Rys. 2.2. Średni udział poszczególnych składowych w całkowitym zużyciu energii ($\sum Q_{\text{lokal_c.o.}+\text{c.w.u.}}$ (energia wykorzystana na potrzeby c.o. i c.w.u.), $Q_{\text{straty_c.o.}+\text{c.w.u.}}$ (energia stracona w instalacji c.o. i c.w.u.), $\sum E_{\text{lokal_gaz}}$ (energia wykorzystana na potrzeby gotowania), $\sum E_{\text{el}}$ (energia wykorzystana do zasilania urządzeń elektrycznych w mieszkaniach)) w całkowitym zużyciu energii w budynku w odniesieniu do: roku, sezonu ogrzewczego oraz sezonu letniego (Cholewa i Siuta-Olcha, 2016)

W celu lepszego zobrazowania struktury zużycia energii w przykładowym budynku wielorodzinnym w Polsce, przedstawiono analizę dla budynku wielorodzinnego (64 mieszkania) z mieszkaniowymi węzłami cieplnymi w odniesie-

niu do roku, sezonu ogrzewczego oraz sezonu letniego (rysunek 2.2), która została wypracowana na podstawie badań eksploatacyjnych.

Na podstawie udziału łącznych potrzeb cieplnych związanych z ogrzewaniem oraz przygotowaniem ciepłej wody użytkowej, który stanowi około 80% całkowitego zużycia energii w budynku w skali roku, rekomenduje się ukierunkowanie prac badawczych szczególnie na zagadnienia związane z ogrzewaniem pomieszczeń, jak i przygotowaniem ciepłej wody użytkowej.

Szczególnie, że zużycie energii związane z przygotowaniem ciepłej wody użytkowej jest w wielu krajach na drugim miejscu (zaraz po ogrzewaniu) w bilansie energetycznym dla budynków. Przykładowo ciepło związane z przygotowaniem ciepłej wody użytkowej stanowi około 14% całkowitego zużycia energii w Unii Europejskiej oraz około 18% w USA (*Perez-Lombard i in., 2008*). Jednak udział ciepła związanego z przygotowaniem ciepłej wody w całkowitym bilansie energii w danym budynku będzie się zwiększał, ponieważ obserwuje się ciągły wzrost wymagań związanych z ochroną cieplną budynków, jak i systemami ogrzewania, co powoduje spadek zużycia energii na potrzeby centralnego ogrzewania (*Guo and Goumba, 2018*).

2.2. Sposoby zmniejszenia zużycia energii w budynkach

Biorąc powyższe pod uwagę przedstawiono w niniejszym rozdziale możliwości zmniejszenia zużycia ciepła na potrzeby ogrzewania i przygotowania ciepłej wody, które są w szczególności ukierunkowane na ich aplikację w budynkach istniejących.

W dostępnej literaturze przedmiotu jest wiele publikacji, w których przedstawiane są różne strategie modernizacji istniejących budynków, ale dotyczą one głównie izolacji cieplnej przegród zewnętrznych obiektu (*Bianco i in., 2015; Matic i in., 2015; Nik i in., 2016 Rinquet i in., 2017*). W tym zakresie, są też badania w których przedstawione są nowoczesne materiały izolacyjne takie, jak: pianki zamkniętokomórkowe (*Aditya, 2017*), aerożele (*Geryło i Pieruska, 2010; Steidl, 2011; Lucchi i in., 2017*) i próżniowe płyty izolacyjne – VIPs (*Bochenek, 2012; Mirosz i Wojdyga, 2015; Johansson i in., 2016; Wojdyga, 2016*) czy też badania pokazujące dobór optymalnej grubości izolacji (*Fokaides i Papadopoulos, 2014*). Jednak tego typu działania modernizacyjne charakteryzują się dość długim czasem zwrotu poniesionych nakładów inwestycyjnych (od 5,5 do

12,1 lat) (Axaopoulos i in., 2015), dlatego też powinny być one odpowiednio dobrane i zintegrowane między sobą przy wykorzystaniu na przykład metody optymalizującej koszty przeprowadzenia modernizacji (Ascione i in., 2015).

Innym prostym oraz tanim rozwiązaniem dotyczącym obudowy budynku, które pozwala na uzyskanie oszczędności w zakresie zużycia ciepła oraz poprawy warunków komfortu cieplnego w pomieszczeniach w budynku istniejącym, jest nałożenie innowacyjnego wykończenia wewnętrznego oraz zewnętrznego powierzchni przegród, co zostało opisane przez Marino i in. (2015).

Z drugiej strony oszczędności zużycia ciepła w budynkach istniejących mogą być też osiągnięte przy wykorzystaniu odpowiednich urządzeń regulacyjnych czy też odpowiedniej strategii sterowania systemami ogrzewczymi (Peters i in., 2008; Han i in., 2010; Manjarres i in., 2017; Schmela i in., 2017; Macarulla i in., 2017). Przykładowo, Cockroft i in. (2017) pokazali, że dzięki zastosowaniu dodatkowej regulacji strefowej można osiągnąć około 20% zmniejszenia zużycia ciepła.

Innym powszechnie znanym rozwiązaniem, które jest wykorzystywane na potrzeby regulacji miejscowej instalacji ogrzewania, są zawory termostaticzne z nastawą wstępną. Są one stosowane na potrzeby miejscowej regulacji temperatury wewnętrznej w pomieszczeniu ogrzewanym oraz na potrzeby regulacji hydraulicznej instalacji ogrzewczej przy wykorzystaniu nastaw wstępnych (Xu i in., 2008; Xu i in., 2011; Semprini i in., 2015; Mauria, i in., 2016; Muniak, 2014; Muniak, 2015; Cholewa i in., 2017).

Zastosowanie zaworów termostaticznych (wyposażonych w głowice termostaticzne) w budynku wraz z wykonaniem poprawnego równoważenia hydraulicznego przy wykorzystaniu nastaw wstępnych może pozwolić na uzyskanie oszczędności zużycia ciepła nawet na poziomie 20,8% przy średnim czasie zwrotu poniesionych nakładów inwestycyjnych równym 1,5 sezonu ogrzewczego. Zauważono jednak, że jeżeli przy montażu zaworów termostaticznych nie wykona się prawidłowego równoważenia hydraulicznego instalacji ogrzewczej (na przykład z powodów finansowych czy też braku dokumentacji technicznej) oszczędności zużycia ciepła będą niższe, średnio o 10% (Cholewa i in., 2017).

Należy dodatkowo zwrócić uwagę, że w przypadku większych budynków, w których ciśnienie dyspozycyjne przekracza 25–30 kPa (w zależności od zastosowanej miejscowej armatury regulacyjnej) zastosowanie samych zaworów termostaticznych z nastawą wstępną nie pozwala na poprawne zrównoważenie instalacji ogrzewczej i może prowadzić do nadmiernego zużycia ciepła oraz

pogorszenia komfortu cieplnego. W takich przypadkach stosuje się dodatkowe strefowe zawory równoważące, najczęściej w formie podpionowych zaworów różnicy ciśnienia, które obniżają ciśnienie dyspozycyjne w danej strefie instalacji ogrzewczej i dzięki temu umożliwiają prawidłową pracę miejscowej regulacji przy poszczególnych odbiornikach ciepła. Zastosowanie zaworów podpionowych różnicy ciśnienia w istniejącym systemie ogrzewania, który nie jest zrównoważony hydraulicznie, pozwala na uzyskanie oszczędności zużycia ciepła na poziomie około 18% przy czasie zwrotu poniesionych nakładów inwestycyjnych równym około 3 sezonów ogrzewczych, co zostało szczegółowo omówione również dla innych przypadków eksploatacyjnych przez *Cholewa i in.* (2018).

Z kolei w przypadku instalacji ciepłej wody użytkowej, możliwe jest zmniejszenie zużycia ciepła zarówno poprzez zastosowanie innowacyjnych rozwiązań z zakresu materiałów PCM (*Deng i in.*, 2018; *Feliński i Sekret*, 2017; *Sharif i in.*, 2015; *Teamah i in.*, 2018) czy też odnawialnych źródeł energii (*Aguilar i in.*, 2016; *Correa i Cuevas*, 2018; *Cunha i Eames*, 2018; *Ju i in.*, 2018; *Liu i in.*, 2017; *Niemelä i in.*, 2018; *Wang i in.*, 2017).

Uwzględniając fakt, że w wielu krajach (szczególnie skandynawskich) system ciepłowniczy przechodzi kolejną przemianę z niskotemperaturowego (temperatura zasilania 55°C) na ultra niskotemperaturowy (temperatura zasilania 35–45°C), realizowanych jest wiele prac badawczych dotyczących odpowiedniego przygotowania ciepłej wody użytkowej, biorąc jednocześnie pod uwagę aspekty związane z rozwojem bakterii *Legionella* (*Yang i in.*, 2016a; *Yang i in.*, 2016b).

Zwrócono również uwagę na fakt, że wiele działań modernizacyjnych związanych z systemem przygotowania ciepłej wody użytkowej jest dedykowanych tylko do budynków jednorodzinnych czy też rekreacji indywidualnej (*Binks i in.*, 2016; *Binks i in.*, 2017; *Kapsalis i in.*, 2018; *Kordana i in.*, 2014), a proponowane działania modernizacyjne dla budynków większych są skoncentrowane głównie na wymianie istniejącego źródła ciepła (*Las-Heras-Casas i in.*, 2018) czy też zastosowaniu instalacji wspomagającej przygotowanie ciepłej wody użytkowej przy wykorzystaniu kolektorów słonecznych (*Dascalaki i in.*, 2016; *Salata i in.*, 2017). Niewiele jest za to sprawdzonych działań w zakresie istniejących instalacji przygotowania ciepłej wody, które charakteryzowałyby się prostym i jasnym sposobem wdrożenia, krótkim czasem wdrożenia i zwrotu nakładów inwestycyjnych, a przy tym pozwalałyby na uzyskanie oszczędności zużycia ciepła. Dlatego też *Cholewa i in.* (2019) zaproponowali działania modernizacyjne w zakresie instalacji przygotowania ciepłej wody użytkowej, które

pozwalają osiągnąć oszczędności zużycia ciepła od 6,0 do 14% dzięki zastosowaniu zaworów ograniczających przepływ cyrkulacji ciepłej wody oraz od 8,5% do 49% dzięki obniżeniu temperatury ciepłej wody w godzinach nocnych.

Obecnie, jedną z coraz częściej stosowanych możliwości zmniejszenia zużycia ciepła w budynkach istniejących jest edukacja użytkowników systemów ogrzewczych, co zostało podkreślone przez wielu naukowców (*Emery i Kippenhan, 2006; Faruqui i in., 2010; Gadenne i in., 2011; Galvin, 2013; Santin i in., 2009; Ueno i in., 2006; Vassileva i in., 2012; Vassileva i in., 2013; Yu i in., 2011; Yun i Steemers, 2011*).

Jedną z form działań edukacyjnych w tym zakresie jest dostarczenie informacji użytkownikom o indywidualnym zużyciu ciepła na potrzeby ogrzewania czy też przygotowania ciepłej wody poprzez zastosowanie indywidualnego systemu służącego do rozliczania zużycia ciepła (*Celenza i in., 2015; Liu i in., 2011; Liu i in., 2012; Pakanen i Karjalainen, 2006; Siggelsten i Olander, 2013; Siggelsten, 2014; Yan i in., 2011; Yao i in., 2008*), co może pozwolić na wzrost efektywności energetycznej w budynkach istniejących, jak i projektowanych (*Cholewa i Siuta-Oлча, 2015; Maljković i Balen, 2017; Savickas i in., 2015*).

2.3. Podsumowanie i rekomendacje

Struktura zużycia energii w danym budynku pokazuje, na jakie cele wykorzystywane jest najwięcej energii, dlatego w przypadku klimatu umiarkowanego większa część ciepła jest wykorzystywana na potrzeby ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej. Dlatego biorąc to pod uwagę oraz fakt, że w budynkach zużywa się około 40% całkowitej ilości produkowanej energii, rekomendowane jest szukanie nowych możliwości zmniejszenia zużycia ciepła na potrzeby ogrzewania i przygotowania ciepłej wody, które są w szczególności ukierunkowane na ich aplikację w budynkach istniejących.

Uwzględniając te przesłanki, przedstawiono (rozdział 2.2) szereg możliwości obniżenia zużycia ciepła na potrzeby ogrzewania, jak i przygotowania ciepłej wody użytkowej. Jednak równocześnie zauważono, że są one przedstawione w artykułach naukowych (głównie anglojęzycznych) i dlatego osobom, które są odpowiedzialne za przeprowadzenie takich działań w poszczególnych spółdzielniach mieszkaniowych, trudno jest na tej podstawie porównać, wybrać i następnie wdrożyć konkretne działania modernizacyjne.

Dlatego też w monografii (*Cholewa i Siuta-Olcha, 2016*), która była zrealizowana w ramach projektu badawczego IP2012 007772 pt.: „Racjonalizacja zużycia energii w sektorze mieszkaniowym na podstawie badań eksperymentalnych i symulacyjnych”, finansowanego ze środków budżetowych na naukę w latach 2013–2015 (Kierownik projektu: dr inż. Tomasz Cholewa, Politechnika Lubelska), przedstawiono szereg wyników długoterminowych badań eksploatacyjnych, umożliwiających określenie i sprawdzenie wpływu różnych przedsięwzięć modernizacyjnych na zużycie energii, szczególnie w istniejących budynkach wielorodzinnych. Do każdego rozpatrywanego przypadku wybierano reprezentatywną grupę budynków, aby zakres przeprowadzonych prac modernizacyjnych pozwolił, w możliwie jednoznaczny sposób, pokazać wpływ danego działania modernizacyjnego na zużycie ciepła w danej grupie budynków, a nie był tylko przypadkowym wynikiem otrzymanym dla pojedynczego obiektu. Na tej podstawie rekomendowano wiele działań modernizacyjnych i pokazano, jaki poziom zmniejszenia zużycia ciepła można osiągnąć poprzez zastosowanie danego działania modernizacyjnego w zakresie systemu ogrzewania czy też przygotowania ciepłej wody.

Należy jednak w tym miejscu podkreślić, że przedstawione w monografii (*Cholewa i Siuta-Olcha, 2016*) badania opierały się na działaniach modernizacyjnych, które zostały już przeprowadzone w analizowanych obiektach, a mimo wszystko zarządcy nieruchomości oraz mieszkańcy oczekują teraz wdrażania nowych (kolejnych) rozwiązań, które pozwoliłyby jeszcze bardziej obniżyć zużycie ciepła (obniżyć koszty ogrzewania i przygotowania ciepłej wody) przy zachowaniu komfortu cieplnego w pomieszczeniach ogrzewanych. Takie sugestie autor rozprawy otrzymywał podczas dyskusji z zarządcami poszczególnych nieruchomości, wspólnot, spółdzielni, którzy podkreślają dodatkowo, że nowe działania modernizacyjne, aby mogły być wdrożone w ich zasobach mieszkaniowych, powinny się charakteryzować:

- łatwością wdrożenia do istniejącego układu ogrzewczego,
- zrozumiałym (z fizycznego punktu widzenia) sposobem działania, który często należy wytłumaczyć w pierwszej kolejności zarządcy decydującemu się na takie działanie modernizacyjne i często w drugiej kolejności również mieszkańcom danego obiektu, wspólnoty czy też spółdzielni,

- brakiem uciążliwości podczas montażu (możliwie krótki czas montażu), jak i późniejszej eksploatacji dla mieszkańców i zarządców nieruchomości,
- szybkim czasem zwrotu poniesionych nakładów inwestycyjnych,
- możliwością powszechnego zastosowania (efekt skali).

Dlatego też biorąc powyższe informacje pod uwagę, rekomendowane są przede wszystkim działania z zakresu poprawy procesu sterowania dostawą ciepła na potrzeby ogrzewania, który powinien uwzględniać ciągłą edukacją mieszkańców w tym zakresie w celu świadomego angażowania ich w cały proces związany z dostawą ciepła do obiektów.

3. Metody modelowania, prognozowania i sterowania dostawą ciepła na potrzeby ogrzewania

Jak podkreślono w rozdziale 2 niniejszej rozprawy zmniejszenie zużycia ciepła w budynkach istniejących, jak i nowopowstających można osiągnąć dzięki zastosowaniu dokładnej, a przy tym możliwie łatwej w implementacji metody prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną, która będzie wykorzystywana do sterowania prognozowego dostawą ciepła na potrzeby ogrzewania do obiektów (budynek, podstacja ciepła czy też miejski system ciepłowniczy).

Należy jednak zauważyć, że na wielkość zapotrzebowania mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania wpływają liczne parametry takie, jak: konstrukcja budynku, lokalny klimat zewnętrzny, rodzaj i stan techniczny instalacji ogrzewczej czy też zachowania i preferencje użytkowników. Dlatego też opracowanych zostało wiele metod pozwalających na wyznaczenie zapotrzebowania na moc cieplną zarówno na potrzeby projektowania instalacji ogrzewczych w danym obiekcie, jak i na potrzeby prognozowania długo- lub krótkoterminowego (Ahn i Cho, 2017; Amasyali i El-Gohary, 2018; Andrić in., 2017; Belic, 2015; Chen i in., 2012; Frayssinet i in., 2018; Hopkowicz, 2005; Hopkowicz, 2007; Hopkowicz i Pytel, 2009; Kubicka i Szlęk, 2014; Idowu, 2016; Misiorek i Weron, 2004; Olofsson i Andersson, 2001; Ottesen i Tomasgard, 2015; Popiołek i Bartosz, 2010; Spoladore i in., 2016; Swan i Ugursal, 2009; Verdejo i in., 2017; Vogler–Finck, 2017).

Mogą być to metody statyczne czy też dynamiczne, co zostało przedstawione w klarowny sposób przez Żukowskiego (2012).

Metody te opierają się na różnych podejściach do problemu i uwzględniają różne czynniki zewnętrzne, jak i wewnętrzne, co może wpływać na (Sondereggera, 1985):

- dokładność wyników obliczeń,
- wszechstronność i uniwersalność zastosowania,
- szybkość i koszty wykonania obliczeń.

Stąd wiele z opracowanych metod opiera się na wykorzystaniu skomplikowanych algorytmów komputerowych, które pozwalają prognozować zapotrzebowanie na moc cieplną z dużą dokładnością przy zmiennych czynnikach zewnętrznych (temperatura zewnętrzna, prędkość wiatru, nasłonecznienie), jak i we-

wewnętrznych. Jednak ich wdrożenie w danym obiekcie oraz późniejsza obsługa wymaga znacznych nakładów finansowych oraz dużej ilości czasu (Ciulla i in., 2016). Przykładowo w często stosowanych modelach adaptacyjnych, które wykorzystują do analizy informacje pozyskane w przeszłości, należy wyznaczyć przebiegi zmiennych prognozowanych oraz weryfikujących je błędów prognoz (Skoczypiec, 2012; Tłuczak, 2009).

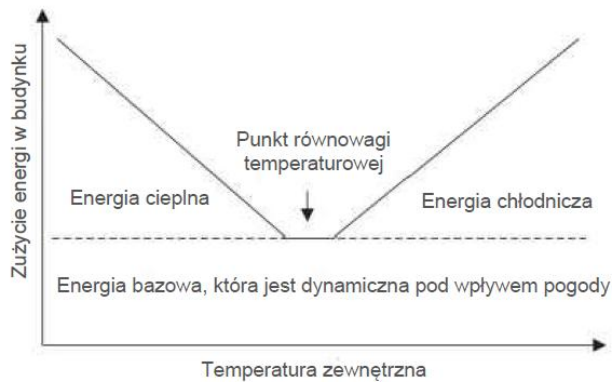
Alternatywą są uproszczone metody, które pozwalają prognozować zapotrzebowanie na moc cieplną z mniejszą, ale wciąż akceptowalną dokładnością. Dlatego też przewagą tych rozwiązań jest łatwiejsza implementacja oraz niższy koszt wdrożenia (Dotzauer, 2002; De Rosa i in., 2014).

Jednak bardzo istotną kwestią w tym zakresie jest odpowiedni dobór właściwego sposobu obliczania równania czy też innego algorytmu, który będzie służył do zaprogramowania urządzenia sterującego w danym obiekcie, ponieważ powinno ono odpowiednio zoptymalizować dostawę ciepła na potrzeby ogrzewania pomieszczeń przy zachowaniu komfortu cieplnego. Dlatego często w praktyce eksploatacyjnej wykonuje się prognozowanie zapotrzebowania na ciepło różnymi metodami, aby wybrać dla danego obiektu odpowiedni sposób sterowania.

Dlatego też w niniejszym rozdziale przedstawiono i krótko scharakteryzowano wybrane metody, które są wykorzystywane na potrzeby modelowania, prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną czy też sterowania dostawą ciepła.

3.1. Metoda stopniodni

W metodzie stopniodni wykorzystuje się podejście ekstrapolacji statystycznej historycznych danych pogody (głównie temperatury zewnętrznej) do przewidywania przyszłych warunków zewnętrznych. Zakłada się również, że zapotrzebowanie mocy na ogrzewanie lub chłodzenie jest proporcjonalne do obszaru poniżej lub powyżej punktu równowagi temperaturowej, co zostało pokazane na rysunku 3.1.



Rys. 3.1. Punkt równowagi temperatury w przykładowym budynku (Guan, 2009)

Punkt równowagi temperaturowej powinien być określony dla każdego budynku indywidualnie, ponieważ wtedy definiowana jest temperatura poniżej której konieczne jest ogrzewanie budynku na potrzeby utrzymania temperatury komfortu cieplnego. Podobnie, indywidualnie dla budynku, wyznacza się punkt chłodzenia, czyli temperaturę, powyżej której wymagane jest chłodzenie w celu utrzymania temperatury komfortu cieplnego. Należy jednak podkreślić, że te dwa punkty równowagi zazwyczaj są różne od siebie.

W krajach europejskich przyjmuje się różne wartości tego parametru, przykładowo w Anglii od $15,5^{\circ}\text{C}$ do $18,5^{\circ}\text{C}$, w Szwecji lub Danii na poziomie 17°C (Dopke, 2010).

Metoda stopniodni jest dość często używana na potrzeby szybkiego określenia zapotrzebowania mocy na ogrzewanie czy też chłodzenie budynku, ponieważ zakłada liniową zależność między zapotrzebowaniem mocy na potrzeby ogrzewania/chłodzenia, co wynika z wartości temperatury powietrza wewnętrznego względem temperatury punktu równowagi dla danego budynku.

Zatem metoda stopniodni jest prostym sposobem do analizy różnych warunków pogodowych wpływających na szacunkowe zapotrzebowania energetyczne budynków i jest szczególnie polecana do aplikacji w systemach wykorzystywanych w sposób ciągły. Liczba dni wyższych niż temperatura punktu równowagi jest niezależna od specyfiki budynku - jest stałą proporcjonalności, która tworzy specyfikę i przekształca stopniodni na zapotrzebowania na energię.

Mimo tych zalet, metoda ta nie jest metodą dokładną, ponieważ nie uwzględnia wielu innych czynników wpływających na zapotrzebowanie mocy cieplnej na

potrzeby ogrzewania oraz nie powinna być stosowana w klimacie o podwyższonej wilgotność powietrza (Cox i in., 2015).

Dlatego też nie rekomenduje się jej zastosowania w przypadku prognozowania zapotrzebowania mocy cieplnej na potrzeby sterowania dostawą ciepła na cele ogrzewcze w danym budynku.

Jedną z dalszych modyfikacji tej powszechnie stosowanej w praktyce inżynierskiej metody do wstępnego szacowania zużycia ciepła jest metoda stopniodni o zmiennej podstawie, w której to uwzględnia się już zyski od promieniowania słonecznego oraz od źródeł wewnętrznych (Al-Homoud, 2001).

3.2. Metody regresji liniowej lub wielomianowej

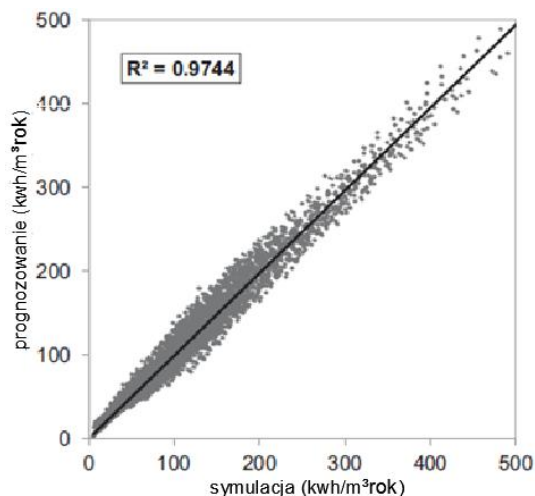
W tego typu metodach (nazywanych również metodami empirycznymi lub metodami „czarnej skrzynki”) określa się w odpowiedni sposób zależności pomiędzy zapotrzebowaniem na moc cieplną na potrzeby ogrzewania (rozumianym jako zmienną zależną) a zmiennymi objaśniającymi, czyli czynnikami zewnętrznymi (np. temperatura zewnętrzna, nasłonecznienie, prędkość wiatru) czy też wewnętrznymi (np. liczba i zachowania użytkowników). Zatem podstawowym celem analizy regresji jest znalezienie właściwego modelu matematycznego oraz określenie najlepszego dopasowania współczynników z wyróżnionych danych.

Dużą zaletą tych metod jest fakt, że znany jest wpływ danych wejściowych na wyjściowe i dlatego użycie tej metody jest jasnym i realnym sposobem na opracowanie modelu prognozowania zapotrzebowania mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania, ponieważ uzyskuje się fizyczne zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami, co jest tak bardzo pożądane przez zarządców nieruchomości. Dlatego też metoda regresji liniowej lub wielomianowej wykorzystywana jest z dobrymi wynikami korelacji między modelem a analizowanym zbiorem danych, co ma miejsce szczególnie w przypadku możliwości wykorzystania dużej bazy informacji wejściowych (Bøhm i Danig, 2004; Catalina i in., 2013; Fang i Lahdelma, 2016; Li i in., 2016; Wang i in., 2015).

Należy jednak pamiętać, że w przypadku wykorzystania analizy regresji należy otrzymane wyniki odpowiednio udokumentować, między innymi poprzez udzielenie odpowiedzi na następujące pytania (Schellong, 2011):

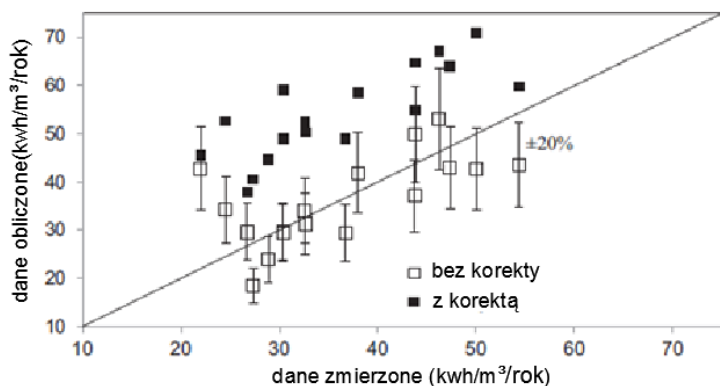
- czy można zaobserwować liniową zależność między zmiennymi wejściowymi a wyjściowymi?
- które ze zmiennych wejściowych są istotne i niezbędne?
- czy dane wejściowe są spójne lub czy występują jakieś zewnętrzne zakłócenia?

Przykładowo *Catalina i in.* (2013) zastosowali bardziej skomplikowaną metodę najmniejszych kwadratów z iteracyjnym poprawianiem wag (IRLS – Iteratively Reweighted Least Squares), która jest oparta na prostszej i bardziej powszechnej metodzie najmniejszych kwadratów. W metodzie IRLS dostosowuje się wagi do współczynników klasycznego schematu regresji, w celu zmniejszenia wpływu odstających reszt i dzięki temu uzyskuje się lepsze dopasowanie opracowywanej krzywej. Autorzy (*Catalina i in.*, 2013) po przeprowadzeniu wielu analiz stwierdzili, że należy wybrać trzy modele wejściowe, ponieważ większa liczba wejść skomplikowałaby za bardzo schemat obliczeniowy oraz utrudniła jego użycie. Z kolei przy mniejszej ilości wejść (niż trzy) błędy obliczeniowe byłyby za duże. Na rysunku 3.2 przedstawiono dane uzyskane z symulacji oraz przy wykorzystaniu opracowanego modelu prognozowania, które charakteryzowały się dobrą korelacją oraz średnim błędem względnym na poziomie 10,03%.



Rys. 3.2. Porównanie danych prognozowych z danymi symulacyjnymi (*Catalina i in.*, 2013)

Dodatkową weryfikację opracowanego modelu przeprowadzono na podstawie danych eksperymentalnych pochodzących z 17 budynków wielorodzinnych o zróżnicowanych parametrach konstrukcyjnych oraz różnej lokalizacji. Stwierdzono, że wprowadzenie korekty do opracowanego wcześniej modelu, która uwzględnia zachowania użytkowników, pozwoliło na uzyskanie wyższej dokładności obliczeń przy średnim błędzie względnym równym 20,2% (rysunek 3.3).



Rys. 3.3. Porównanie danych prognozowych z eksperymentalnymi (*Catalina i in., 2013*)

Fanga i Lahdelma (2016) opracowali model stanowiący połączenie regresji liniowej z modelem SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average czyli Sezonowy Model Autoregresyjny ze Średnią Kroczącą). Model SARIMA jest zatem pochodną modelu ARIMA, który jest jedną z podstawowych technik prognozowania w zakresie szeregów czasowych. Zakłada się, że serie czasowe są nieruchome, jeśli właściwości statystyczne modelu są stałe w czasie.

Jednak zastosowanie modelu SARIMA (rozszerzenie modelu ARIMA) pozwala na poprawę dokładności przewidywania zapotrzebowania mocy ciepłej dzięki usunięciu cech sezonowej zmienności. Model SARIMA przypisuje również większą wagę do bardziej aktualnych danych, dlatego jest bardziej odpowiedni na potrzeby wykonania krótkoterminowych prognoz (*Deb i in., 2017*). Dokładność prognozowania zapotrzebowania mocy ciepłej przy zastosowaniu proponowanej metody była na wysokim poziomie, ponieważ średni błąd względny wynosił 5,58%, co można również zobaczyć na rysunku 3.4.



Rys. 3.4. Porównanie rzeczywistego zapotrzebowania mocy cieplnej oraz mocy cieplnej prognozowanej w oparciu o model SARIMA w połączeniu z regresją liniową (Fang i Lahdelma, 2016)

Innym rozwiązaniem, które wykorzystuje model regresji na potrzeby prognozowania zapotrzebowania mocy cieplnej jest metoda zaproponowana przez Jaffal i in. (2009). W modelu uwzględnia się wielowymiarową powierzchnię, która jest uproszczoną funkcją wielomianową ze zmiennymi w postaci parametrów przegród zewnętrznych. Parametry te mogą być określane przy wykorzystaniu analizy regresji, gdzie dane wejściowe otrzymywane są najczęściej z symulacji dynamicznych.

Z kolei metoda opracowana przez Dahl i in. (2017) wykorzystywana była wraz z prognozą meteorologiczną na potrzeby prognozowania zapotrzebowania na ciepło w celu usprawnienia pracy wymiennikowni ciepła. Uwzględnienie dynamicznych niepewności pogodowych pozwoliło na zoptymalizowanie procesu sterowania temperaturą na zasileniu systemu o mocy około 14 MW poprzez obniżenie temperatury zasilania w porównaniu do aktualnie stosowanej tabeli temperaturowej. Dzięki temu procesowi możliwe jest obniżenie strat ciepła na przesyle w sieci ciepłowniczej i odpowiednie utrzymywanie temperatury zasilania (bez konieczności skokowego jej obniżenia czy też podwyższenia), ponieważ chwilowe wahania zapotrzebowania na ciepło pokrywane są przez zmianę przepływu czynnika roboczego (regulacja ilościowa).

Jachura i Sekret (2015) zaproponowali dostosowania pracy analizowanego systemu ciepłowniczego do bieżącego zapotrzebowania na ciepło u odbiorcy końcowego, co poparli szeregiem równań korelacyjnych pomiędzy równoważną temperaturą zewnętrzną a współczynnikiem wykorzystania mocy. Zależności

przedstawiono zarówno dla dnia roboczego, jak i weekendu oraz trzech okresów czasu, co pozwoliło na pokazanie wpływu użytkowników na zapotrzebowanie mocy ciepłej dla analizowanego systemu ciepłowniczego.

3.3. Metody sterowania predykcyjnego MPC (Model Predictive Control)

Sterowanie predykcyjne (MPC) jest wieloczynnikową metodą sterowania, która bazuje na indywidualnie opracowanym modelu dla danego obiektu sterowania. Zazwyczaj jest to kompleksowy model danego obiektu, który poza obudową poszczególnych stref budynku uwzględnia również komponenty instalacji ogrzewczych. Złożoność modelu i następnie jego proces walidacji mają decydujący wpływ na jego późniejszą dokładność podczas procesu prognozowania zapotrzebowania na moc ciepłą na potrzeby ogrzewania czy też chłodzenia pomieszczeń. Mogą być to modele proste w formie zależności liniowych, jak i zaawansowane modele, które są wykonywane w takich programach, jak: TRN-SYS, EnergyPlus, Matlab czy też Simulink (Afram i Janabi-Sharifi, 2014).

Do zalet tej metody sterowania można zaliczyć możliwość:

- przewidywania działań kontrolnych zamiast kontroli korekcyjnej,
- uwzględnienia zmieniającej się w czasie dynamiki obiektu,
- uwzględnienia zmieniających się w czasie zakłóceń,
- uzyskania oszczędności zużycia ciepła,
- nadzoru i wpływu na realizowany proces regulacji.

Regulatory MPC zostały zastosowane już z powodzeniem w wielu różnych systemach grzewczo-klimatyzacyjnych zarówno w jednokondygnacyjnych budynkach biurowych (Ma i in., 2011), w budynku przemysłowym (Rehrl i Horn, 2011), w apartamencie (Balan i in., 2011), w budynkach uczelni (Ferkl i Siroky, 2010; Prívará i in., 2011; Siroky i in., 2011), w pomieszczeniach testowych (Henze i in., 2005; Karlsson i Hagentoft, 2011; Morosan i in., 2010) oraz w wielokondygnacyjnym budynku biurowym (Henze i in., 1997).

Należy jednak podkreślić, że wykonanie oraz walidacja modelu danego budynku jest pracochłonnym zadaniem i wymaga specjalistycznej wiedzy z zakresu MPC oraz indywidualnego podejścia do każdego obiektu, co znacznie utrudnia aplikację tej metody na szeroką skalę.

3.4. Metody wykorzystujące sztuczne sieci neuronowe

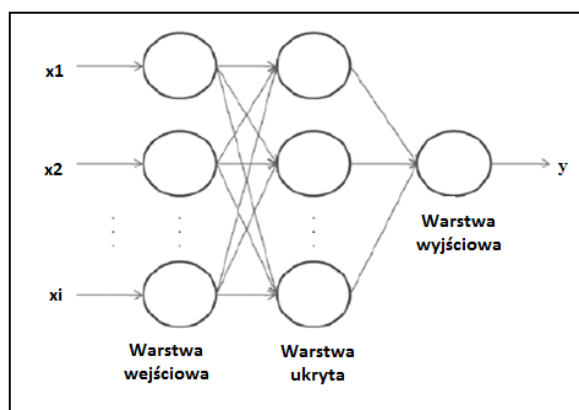
Sztuczne sieci neuronowe (ANNs – Artificial Neural Networks) są często wykorzystywaną metodą sztucznej inteligencji przy krótko-, średnio-, jak i długoterminowym prognozowaniu zapotrzebowania mocy cieplnej czy też zużycia ciepła.

Model sztucznych sieci neuronowych działa podobnie jak model „czarnej skrzynki”, gdyż nie wymaga szczegółowych informacji na temat systemu, ponieważ uczy się zależności między parametrami wejściowymi a kontrolowanymi i niekontrolowanymi przez badanie wcześniej zarejestrowanych danych.

Metodę ANN można również porównywać z metodą regresji wielokrotnej, jednak w przypadku ANN nie ma potrzeby przyjmowania żadnych założeń dotyczących modelowanego systemu. Dlatego też proces „uczenia się” sieci można określić jako korektę wag i zmiennych aktywacji na potrzeby osiągnięcia pożądanej funkcji. Zatem sieć neuronowa składa się z połączonych ze sobą neuronów jako elementów przetwarzających (Simon, 2011; Ling, 2017).

Warstwa pomiędzy warstwą wejściową (input layer) a warstwą wyjściową (output layer) określana jest jako warstwa ukryta (hidden layer), co można zobaczyć na rysunku 3.5. Wartości wejściowe są liniowo połączone, a uzyskany wynik jest wykorzystywany jako argument funkcji nieliniowej aktywacji. Kombinacja ta wykorzystuje wagi przypisane do każdego z połączeń, a także stały cel. Z kolei szacowanie ciężaru nazywa się szkoleniem sieci.

Dlatego też metoda ta może charakteryzować się wysoką dokładnością, szczególnie przy rozwiązywaniu nieliniowych problemów.



Rys. 3.5. Przykładowa, trójwarstwowa sztuczna sieć neuronowa (Park i in., 2010)

W ostatnich latach naukowcy stosowali metody ANN do analizy różnych rodzajów zużycia energii w obiektach przy zróżnicowanych warunkach, w szczególności zmienne obciążenie cieplne/chłodnicze, zużycie energii elektrycznej, czy też parametrów użytkowania (Argiriou i in., 2000; Fischer, 2008; Kargiriou, 2000; Kargiriou i in., 2000; Marvuglia i Messineo, 2012; Sajjadi i in., 2016; Vasičkaninová i in., 2011; Rodrigues, 2014; Wang i Srinivasan, 2017).

Tak częste stosowanie metodyki sieci neuronowych na potrzeby prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną związane jest z wysoką dokładnością tych metod (współczynnik determinacji R^2 na poziomie nawet powyżej 0,9) (Biswas i in., 2016).

Z kolei jako algorytm szkoleniowy w prognozowaniu obciążenia najczęściej stosowany jest algorytm propagacji wstecznej, który określa zmianę danej wartości jako zależnej od poprzedniej wartości, czyli na dane zdarzenie bezpośrednio wpływa tylko zdarzenie, które je poprzedza. Taki układ pozwala na osiągnięcie (po pewnym czasie działania sieci neuronowej) wysokiej dokładności prognozowanej wartości w porównaniu do wartości rzeczywistej.

Najprostsza aplikacja propagacji wstecznej jest poprzez szkolenie aktualizacji obciążenia i stroniczości sieci w kierunku, w którym funkcja wydajności zmniejsza się najszybciej (w kierunku ujemnego gradientu), aby wynik zbliżał się do wartości docelowej (Caruana i in., 2001; Zhao i Magoulès, 2012).

Przykładowo, w analizach wykonanych przez Kalogirou (2006) wykorzystany był algorytm wstecznej propagacji sieci neuronowych, do przewidywania wymaganego obciążenia cieplnego budynków, który następnie został przetestowany na 225 budynkach. Wykorzystano algorytm propagacji wstecznej, ponieważ pozwala on poprawić wydajność sieci neuronowej dzięki zmniejszeniu całkowitego błędu. Jednak należy podkreślić, że podczas szkolenia modelu należy dysponować reprezentatywnym zbiorem parametrów wejściowych i wyjściowych.

Chmielnicki (2010) zaproponował wykorzystanie regulatora neuronowego na potrzeby regulacji węzłów ciepłowniczych, co może pozwolić na redukcję zużycia ciepła przy zapewnieniu komfortu cieplnego w pomieszczeniach ogrzewanych, ograniczenie czasu pracy poszczególnych urządzeń (wydłużenie ich żywotności), eliminację zjawiska przeregulowania oraz skrócenie czasu regulacji. Jako wielkości wejściowe zaproponowano szereg parametrów, do których można zaliczyć: temperatury czynnika roboczego na wejściach i wyjściach

z wymiennika, temperatura zadana czynnika ogrzewanego na wyjściu z wymiennika, maksymalna temperatura czynnika grzejącego na wyjściu z wymiennika, strumień czynnika grzejącego oraz położenie grzybka zaworu regulacyjnego (pomiar sygnału zwrotnego z siłownika). Natomiast jako wielkość wyjściową zaproponowano wymagane położenie grzybka zaworu regulacyjnego. Z kolei zadanie sieci neuronowej ma polegać na znalezieniu korelacji między wielkościami wejściowymi i wielkością wyjściową. W czasie pracy układu sieć podlega nieustannemu procesowi uczenia. Polega on na zapamiętywaniu kolejnych zbiorów prawidłowo powiązanych wielkości, przy których wielkość regulowana oraz wartość zadana są sobie równe.

Ekici i Aksoy (2009) na potrzeby prognozy obciążenia cieplnego w 3 analizowanych budynkach, zastosowali ten sam model co *Kalogirou* (2006). Na potrzeby szkolenia sieci wykorzystano dane wejściowe w formie orientacji budynku względem strony świata, grubości izolacji cieplnej, a jako daną wyjściową przyjęto zapotrzebowanie na ciepło w danym budynku. Przy tych analizach zauważono, że jedną z głównych zalet metody ANN jest łatwość i szybkość rozwiązywania złożonych problemów przez zaniebywanie niektórych parametrów (na przykład temperatura zewnętrzna, właściwości cieplne materiałów konstrukcyjnych, promieniowanie słoneczne), które są niezbędne w przypadku innych metod stosowanych na potrzeby prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną.

Paudel i in. (2014) zaprezentowali w swojej pracy wykorzystanie metody sztucznej sieci neuronowej do prognozowania krótkoterminowego zapotrzebowania na ciepło budynku. W modelu uwzględniono również profil obecności ludzi w budynku oraz dynamiczną charakterystykę budynku w celu określenia opóźnienia czasowego, co pozwoliło na zwiększenie dokładności proponowanego podejścia. Podczas walidacji tej metody osiągnięto minimalny błąd prognozowania zapotrzebowania na ciepło na poziomie 2,57%.

Xie i in. (2017) wykorzystywali sieć neuronową na potrzeby prognozowania zużycia ciepła i zauważyli, że zbyt duża ilość danych wejściowych nie zawsze pozwala poprawić dokładność prognozowania. Stwierdzono, że dla analizowanego przypadku uwzględnienie prędkości wiatru podczas wykonywania prognozowania ma pozytywny wpływ na uzyskiwane wyniki, ale równoczesne uwzględnienie prędkości wiatru oraz promieniowania słonecznego przynosi odwrotny skutek w postaci pogorszenia dokładności prognozowania.

Zastosowanie sieci neuronowych przy prognozowaniu zapotrzebowania mocy cieplnej w sieciach ciepłowniczych, gdzie występują znaczne opóźnienia dostarczenia wymaganej mocy cieplnej ze względu na odległość pomiędzy źródłem ciepła a odbiorcami, posiada przewagę nad innymi metodami prognozowania, która wynika ze zdolności sieci neuronowych do uczenia się oraz szybkiej adaptacji do zmiennych warunków (Dudek, 2005; Peng i Fu, 2014; Popescu i in., 2008; Wojdyga, 2007). Należy jednak zauważyć, że większość systemów ciepłowniczych w Polsce dysponuje już przynajmniej pomiarem ilości ciepła dostarczonego z sieci ciepłowniczej przy wykorzystaniu inteligentnych liczników ciepła, które archiwizują na bieżąco dane o zużyciu ciepła, co pozwala na lokalizację awarii, usprawnienie działania sieci, wykonanie dodatkowych analiz oraz może dostarczyć wielu danych na potrzeby prognozowania zapotrzebowania na ciepło (Federowicz i in., 2002; Frost i Sullivan, 2010; Janowicz, 2011).

Johansson i in. (2017) przy opracowywaniu metody prognozowania zapotrzebowania na ciepło w systemie ciepłowniczym wykorzystali algorytmy uczenia maszynowego (Machine Learning Algorithms), które są jedną z odmian sieci neuronowych. Podczas wykonywania badań zauważono, że krótkookresowa predykcja zapotrzebowania na moc cieplną przy uwzględnieniu zdolności regulacyjnej systemu może pozwolić na: racjonalną i stabilną pracę źródeł ciepła, dokładne szacowanie wymaganej mocy cieplnej i czasu pracy jednostek wytwarzających ciepło oraz szybsze wykrywanie awarii systemu.

3.5. Sterownie dostawą ciepła na potrzeby ogrzewania wykorzystywane w Polsce

Sterowanie dostawą ciepła do danego budynku zależy od rodzaju źródła ciepła, które zostało przewidziane na potrzeby zasilania w ciepło instalacji ogrzewania, przygotowania ciepłej wody użytkowej czy też ciepła technologicznego.

W przypadku, gdy dany budynek zasilany jest z sieci ciepłowniczej, to z uwagi na rozbudowaną strukturę miejskich systemów ciepłowniczych i potrzebę dostarczenia ciepła o odpowiednich parametrach (ciśnienie, temperatura) na znaczne odległości, zalecane jest zastosowanie układów regulacji na każdym poziomie systemu ciepłowniczego (Chmielnicki W., 2008).

Dlatego też obecnie stosowane poziomy regulacji w układach zasilanych z sieci ciepłowniczej można podzielić na:

- regulację centralną w ciepłowni czy też elektrociepłowni,
- regulację węzłową (w węzłach ciepłych) rozumianą jako centralna regulacja dla danego budynku,
- regulację miejscową (u poszczególnych odbiorców ciepła – mieszkańcy, najemcy lokali).

Z kolei w przypadku budynków, w których jako centralne źródło ciepła stosuje się kotły grzewcze na paliwo stałe, ciekłe lub gazowe, pompy ciepła czy też inne centralne źródła ciepła, wyodrębnia się następujące poziomy regulacji:

- regulację centralną w źródle ciepła dla danego budynku,
- regulację miejscową (u poszczególnych odbiorców ciepła – mieszkańcy, najemcy lokali).

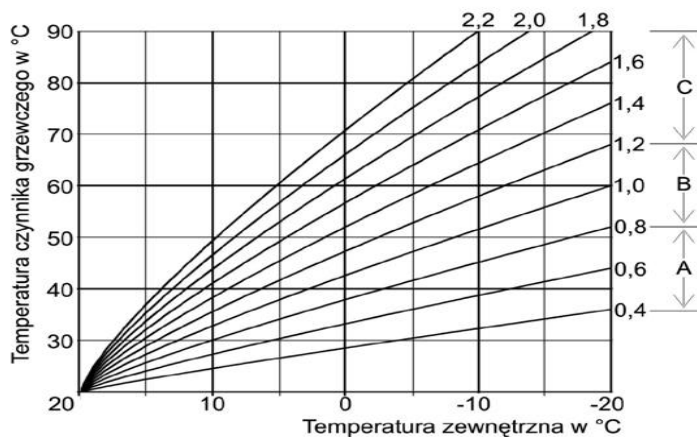
Regulacja centralna w ciepłowni czy też elektrociepłowni jest najczęściej regulacją jakościowo-ilościową parametrów nośnika ciepła i umożliwia ona zmianę natężenia przepływu czynnika grzewczego i temperatury w sieci ciepłowniczej. Regulacja parametrów wody sieciowej (temperatura, przepływ) powinna być realizowana indywidualnie dla każdego systemu ciepłowniczego, na podstawie indywidualnie opracowanej tabeli regulacyjnej, która uwzględnia wielkość temperatury zasilania oraz powrotu czynnika grzewczego w zależności od uśrednionej temperatury zewnętrznej, zachmurzenia, jak i prędkości wiatru. Dodatkowo z uwagi na potrzebę przygotowania ciepłej wody użytkowej w okresie letnim, minimalna temperatura czynnika grzewczego wypływającego ze źródła powinna wynosić nie mniej niż 70°C (*Chmielnicki W., 2008*).

Z kolei regulacja węzłowa odbywa się poprzez odpowiednią zmianę parametrów pracy węzła ciepłowniczego, którego zadaniem jest bezpośrednia transformacja istniejących parametrów czynnika sieciowego za pomocą zespołu przewodów oraz urządzeń w celu dostarczenia odpowiedniej ilości ciepła z zewnętrznej sieci ciepłej do instalacji wewnętrznych.

Obecnie najczęściej stosowane są węzły wymiennikowe z uwagi na mniejsze ograniczenia aplikacyjne w budynkach i bardziej sprawną regulację dostawy ciepła w porównaniu do węzłów bezpośredniego połączenia (*Żarski, 1997; Żarski, 2014*). W węzłach dwufunkcyjnych tego typu jest też możliwość obniżenia mocy zamówionej dzięki zastosowaniu priorytetu przygotowania ciepłej wody (*Śnieżyk, 2006; Miniewicz i Bugaj, 2007*). Dodatkowo w węzłach wymienniko-

wych zainstalowany jest regulator różnicy ciśnień i przepływu, którego zadaniem jest utrzymanie zadanej różnicy ciśnienia między zasilaniem a powrotem oraz nie dopuszczenie do przekroczenia maksymalnego zadanego przepływu (Chmielnicki W. 2009a; Chmielnicki W. 2009b).

Zatem obecnie regulacja centralna w źródle ciepła dla danego budynku czy też regulacja węzłowa dostawy ciepła na potrzeby ogrzewania odbywa się w większości budynków w Polsce przy wykorzystaniu regulacji pogodowej, czyli centralnej regulacji jakościowej, nadążnej. Regulacja ta polega na zmianie temperatury wody zasilającej w zależności od temperatury powietrza zewnętrznego. Przy indywidualnym określeniu zależności temperatury wody zasilającej od temperatury powietrza zewnętrznego, czyli charakterystyki regulacyjnej instalacji centralnego ogrzewania, należy uwzględnić (poza charakterystyką cieplną obiektu, która wynika między innymi z zastosowanych materiałów izolacyjnych jego obudowy) również rodzaj zastosowanych grzejników oraz rodzaj instalacji ogrzewczej. Charakterystyki regulacyjne instalacji ogrzewczej można dowolnie nastawiać w dostępnych na rynku regulatorach pogodowych, ponieważ są one w nim już zaprogramowane, co zostało przedstawione dla przykładowego urządzenia na rysunku 3.6.



Rys. 3.6. Charakterystyki regulacyjne dla przykładowego regulatora pogodowego (www.samson.com.pl)

W celu realizacji procesu regulacji temperatury czynnika w instalacji centralnego ogrzewania wykorzystuje się najczęściej zawór regulacyjny z napędem, czujnik temperatury wody zasilającej instalację, regulator pogodowy oraz czujnik temperatury powietrza zewnętrznego. Jako dodatkowe wyposażenie może być

zastosowany czujnik prędkości wiatru, czujnik intensywności promieniowania słonecznego czy też czujnik temperatury wewnętrznej, który umieszczany jest w reprezentatywnym pomieszczeniu ogrzewanym.

Natomiast w zakresie montażu czujnika temperatury zewnętrznej rekomenduje się uwzględnić następujące wytyczne (*Mizielińska i Olszak, 2005*):

- powinien być umieszczony na ścianie zewnętrznej od strony północnej lub północno-wschodniej,
- nie należy umieszczać go nad oknami, drzwiami, wywietrznikami, a odległość od tych otworów z boku powinna wynosić minimum 1 m,
- nie powinien znajdować się pod balkonami, okapami itp.,
- minimalna wysokość zamontowania nad poziomem terenu to 2,5 m i jednocześnie nie wyżej niż połowa wysokości budynku.

Regulacja pogodowa w budynkach w Polsce jest realizowana najczęściej poprzez wykorzystanie produktów, które są dostarczane przez poniżej przedstawione podmioty gospodarcze:

1. *Firma Danfoss* (www.danfoss.pl) - posiada w swojej ofercie regulatory pogodowe do zainstalowania w węzłach cieplnych w zakresie obiegów ogrzewania i ciepłej wody użytkowej. Zakres tych urządzeń obejmuje bardzo proste regulatory elektroniczne z tradycyjnym analogowym sterowaniem jak również bardziej zaawansowane regulatory elektroniczne z pełnym sterowaniem cyfrowym. Podstawową cechą wszystkich regulatorów jest łatwość sterowania. Bardziej zaawansowane regulatory ECL Comfort z inteligentną technologią klucza -USB, graficznym wyświetlaczem regulatora umożliwiają szybki i łatwy przegląd układu. Jednak w swojej ofercie firma Danfoss nie posiada rozwiązania o proponowanych funkcjach w ramach autorskiej metody regulacji prognozowej, która jest opisana w treści niniejszej pracy (rozdział 4).

2. *Firma Samson* (www.samson.com.pl)- również posiada w swojej ofercie regulatory pogodowe z serii TROVIS, które są regulatorami cyfrowymi do węzłów cieplnych i realizują regulację stałowartościową i nadążną. Jednak w swojej ofercie firma Samson nie posiada rozwiązania o proponowanych funkcjach w ramach autorskiej metody regulacji prognozowej, która jest opisana w treści niniejszej pracy (rozdział 4).

3. *Firma Simens* (www.new.siemens.com/pl) – posiada w swojej ofercie zarówno regulatory pogodowe, jak i swobodnie programowalne sterowniki dla kotłów, węzłów ciepłowniczych, jak i bardziej złożonych układów ogrzewania i klima-

tyzacji. Posiada również gotowe systemy automatyki mieszkaniowej ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji z rejestracją zużycia. Jednak w swojej ofercie firma Simens nie posiada rozwiązania o proponowanych funkcjach w ramach autorskiej metody regulacji prognozowej, która jest opisana w treści niniejszej rozprawy (rozdział 4).

Należy jednak podkreślić, że w omawianym procesie regulacji centralnej pogodowej w budynku nie uwzględnia się zazwyczaj wpływu nasłonecznienia czy też wewnętrznych zysków ciepła. Dlatego regulacja centralna nie jest wystarczająca, aby odpowiednio regulować temperaturę w poszczególnych pomieszczeniach ogrzewanych i wymagane jest również zastosowanie regulacji miejscowej czy też regulacji strefowej dla grupy pomieszczeń (dotyczy rozległych budynków, w których jest potrzeba wyodrębnienia niezależnych stref regulacji instalacji ogrzewczej z uwagi na niekompatybilne potrzeby cieplne).

Regulacja strefowa, która obejmuje wybrane strefy instalacji, polega na utrzymaniu temperatury powietrza wewnętrznego w poszczególnych grupach pomieszczeń (strefach) zgodnie z programem czasowym, który może być odmienny dla każdej ze stref.

Z kolei regulacja miejscowa w wodnej instalacji ogrzewczej jest realizowana najczęściej przez zawory termostaticzne montowane przy grzejnikach, które są proporcjonalnymi regulatorami temperatury typu (P) o bezpośrednim działaniu ciągłym bez wzmacniacza i służą do indywidualnej regulacji temperatury powietrza w pomieszczeniu ogrzewanym. Pozwalają one na utrzymanie średniej temperatury powietrza wewnętrznego w pomieszczeniu ogrzewanym, która została nastawiona na głowicy termostaticznej przez użytkownika systemu, poprzez zmianę natężenia przepływu nośnika ciepła przez grzejnik. Głowice termostaticzne mogą być nastawiane ręcznie, jak i automatycznie, ponieważ nowoczesne głowice termostaticzne posiadają dodatkowo elektroniczny moduł nastawczy, który umożliwia indywidualne programowanie poziomów temperatury wewnętrznej w pomieszczeniu ogrzewanym.

Poza regulacją pogodową dostawy ciepła na potrzeby ogrzewania do budynków w Polsce stosowana jest również w niewielu obiektach regulacja prognozowa. W przypadku regulacji prognozowej zauważalną pozycję na rynku ma firma eGain (www.egain.io/pl), która wywodzi się ze Szwecji. Firma w swojej ofercie posiada system prognozowania zużycia ciepła, który uwzględnia wpływ wiatru i nasłonecznienie. W budynku zainstalowany jest regulator, który wyposażony jest w odbiorniki prognozy pogody, która podlega codziennej aktualizacji.

cji. Na potrzeby regulacji dostawy ciepła uwzględnia się również cechy budynku (między innymi: usytuowanie, kształt i wysokość, system wentylacji, zład instalacji c.o., udział powierzchni przeszklonych), które służą jako dane wejściowe wykorzystywane do obliczeń temperatury równoważnej. Przy wykorzystaniu połączenia przez sieć GSM przesyłane są wartości równoważnej temperatury zewnętrznej na najbliższy okres prognozowania dostawy ciepła, które są wykorzystywane przez regulator jako parametr regulacyjny zamiast temperatury wewnętrznej. Ponadto w układzie regulacji zamontowany jest również czujnik temperatury zewnętrznej, ponieważ w przypadku awarii systemu regulacji prognozowej proces regulacji przebiega według jego wskazań, czyli wcześniej zastosowanej regulacji pogodowej. Dodatkowo w wybranych pomieszczeniach danego budynku (zazwyczaj 2–4 pomieszczenia) montuje się rejestratory klimatu mierzące temperaturę wewnętrzną oraz wilgotność względną powietrza, których wskazania są uwzględniane w analizowanym procesie regulacji. Zastosowanie takiego sposobu regulacji może prowadzić do uzyskania redukcji zużycia ciepła na potrzeby ogrzewania budynków (*Adamski M. i Ruszczyk J., 2012*).

Jednak jest to rozwiązanie, które wymaga wprowadzenia modelu budynku (przynajmniej uproszczonego) na podstawie dokumentacji projektowej, a nie w sposób automatyczny dla danego obiektu. Dodatkowo rozwiązanie to nie uwzględnia profili zachowań mieszkańców, co znacznie limituje jego funkcjonalność. Poza tym przy prognozowaniu zapotrzebowania na ciepło uwzględnia się w tym systemie temperaturę powietrza wewnętrznego w co najmniej dwóch reprezentatywnych mieszkaniach, co z kolei może powodować znaczne problemy związane z zapewnieniem komfortu cieplnego w innych lokalach. Rozwiązania firmy eGain są dedykowane do budynków mieszkalnych, z kolei proponowana w ramach tej pracy metoda sterowania ciepłem dostarczonym na potrzeby ogrzewcze będzie mogła być zastosowana również w innych typach obiektów (m.in.: użyteczności publicznej, zamieszkania zbiorowego), które posiadają wodną instalację ogrzewczą.

3.6. Podsumowanie i rekomendacje

Jednym ze sposobów ograniczenia zużycia ciepła w budynkach nowoprojektowanych, jak i istniejących jest odpowiednie sterowanie dostawą ciepła na różne cele z uwzględnieniem preferencji użytkowników.

Obecnie sterowanie systemami ogrzewania, w których czynnikiem roboczym jest woda, a ciepło oddawane jest w pomieszczeniach ogrzewanych za pomocą grzejników konwekcyjnych, odbywa się w większości przypadków przy wykorzystaniu centralnej (dla obiektu), jakościowej regulacji pogodowej, która opiera się o pomiar temperatury powietrza zewnętrznego i została szczegółowo omówiona w rozdziale 3.5. Następnie regulacja temperatury wewnętrznej w poszczególnych pomieszczeniach realizowana jest najczęściej miejscowo poprzez regulację ilościową przy wykorzystaniu przygrzejnikowych zaworów termostatycznych, czy też innych lokalnych regulatorów zintegrowanych z zaworami wyposażonymi w siłowniki.

Na potrzeby centralnej regulacji pogodowej wykorzystywane są krzywe grzewcze, które są zaprogramowane przez producenta danego regulatora i wybór jednej z nich dla danego budynku odbywa się często w sposób uznaniowy (w lepszym wypadku na podstawie dokumentacji projektowej danego obiektu) przez osobę mającą uprawnienia serwisowe do danego urządzenia. W przypadku, gdy wybór krzywej grzewczej w regulatorze pogodowym nie odpowiada rzeczywistej charakterystyce cieplnej danego obiektu, powoduje to pogorszenie efektywności energetycznej pracy systemu ogrzewania i prowadzi do nieświadomego wzrostu zużycia energii i/lub pogorszenia warunków komfortu cieplnego w pomieszczeniach ogrzewanych.

Z drugiej strony dostępne są zaawansowane rozwiązania tzw. model predictive control (MPC) (*Prívará i in., 2011; Široký i in., 2011*), które zostały omówione w bardziej szczegółowy sposób w rozdziale 3.3. W rozwiązaniach MPC mierzy się wiele parametrów w poszczególnych pomieszczeniach (m.in.: temperaturę powietrza wewnętrznego, wilgotność, prędkość przepływu powietrza), jak i w poszczególnych częściach systemu ogrzewczego czy też klimatyzacyjnego (temperatura czynnika, prędkość czy też strumień czynnika roboczego), które to służą w pierwszej kolejności do czasochłonnej (zależy głównie od ilości pomieszczeń w budynku, ale najczęściej 1–2 lata) kalibracji modelu budynku, układu ogrzewczego i preferencji użytkowników, a następnie do prognozowania zużycia ciepła/chłodu na poszczególne cele z odpowiednim wyprzedzeniem.

Takie rozwiązanie pozwala na uzyskanie oszczędności zużycia ciepła (*Freire i in.*, 2008), jak i na obniżenie szczytowego zapotrzebowania na ciepło (*Rijksen i in.*, 2010). Jednak z uwagi na czasochłonność procesu kalibracji oraz znaczne nakłady inwestycyjne (duża liczba aparatury kontrolno-pomiarowej) jest to rozwiązanie nadal bardzo rzadko spotykane. Należy tu podkreślić, że ten czasochłonny proces kalibracji przeprowadzany jest w tym przypadku dla każdego budynku/systemu oddzielnie i muszą w nim uczestniczyć dodatkowe osoby, które posiadają doświadczenie z zakresu optymalizacji systemów ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji. Dodatkowo należy zauważyć, że rozwiązania wykorzystujące MPC nie są stosowane w budynkach istniejących (szczególnie wielorodzinnych) z uwagi na potrzebę przewidzenia dodatkowych urządzeń pomiarowych w poszczególnych pomieszczeniach, co jest możliwe do wykonania ewentualnie na etapie projektowym, a nie eksploatacyjnym.

Na podstawie powyższego można stwierdzić, że dostępne rozwiązania układów sterowania instalacji ogrzewczych nie uwzględniają wszystkich czynników zewnętrznych (temperatura powietrza zewnętrznego, prędkość wiatru, nasłonecznienie lub zachmurzenie), zachowania/preferencji mieszkańców (czynnik wewnętrzny) na potrzeby prognozowania zużycia ciepła. Nie pozwalają również w prosty, automatyczny sposób (bez konieczności wnikania w dokumentację techniczną obiektu czy też zastosowania szeregu różnych, dodatkowych, urządzeń pomiarowych) na opracowanie dokładnego modelu cieplnego obiektu, który będzie służył na potrzeby prognozowania zapotrzebowania mocy cieplnej.

Dlatego też poszukiwane i rekomendowane są w pierwszej kolejności rozwiązania możliwe do szerokiego (powszechnego) zastosowania przy możliwie krótkim czasie instalacji i zwrotu nakładów inwestycyjnych (*Monetti i in.*, 2015), które wymagają możliwie małego zaangażowania ze strony Inwestora na etapie wdrożenia, jak i późniejszej eksploatacji.

Biorąc to pod uwagę zasadnym jest opracowanie, zoptymalizowanie oraz przetestowanie metody prognozowania dostawy ciepła na potrzeby ogrzewania obiektów (budynek, podstacja ciepła, kotłownia osiedlowa), która bazuje na innowacyjnych algorytmach obliczeniowych zarówno w zakresie uzyskania dokładnego modelu cieplnego indywidualnie dla każdego obiektu, jak i prognozowania zapotrzebowania mocy cieplnej uwzględniającego prognozę pogody oraz zachowania użytkowników systemu ogrzewczego, co zostało pokazane w rozdziale 4.

Dodatkowo zakłada się, że praca proponowanego systemu sterowania prognozowego realizowana jest bez konieczności szczegółowej znajomości parametrów z zakresu budynku (współczynniki przenikania ciepła, powierzchnia przegród), instalacji ogrzewczej oraz bez potrzeby instalowania dodatkowych urządzeń w poszczególnych pomieszczeniach budynku, co zostało przedstawione w sposób bardziej szczegółowy w rozdziale 5.

4. Autorska metoda prognozowania zapotrzebowania na moc ciepłą na potrzeby ogrzewania obiektów

4.1. Założenia wstępne

Biorąc pod uwagę informacje przedstawione w rozdziale 3.6, gdzie podkreślono jakie luki badawcze występują, postanowiono opracować nową metodę prognozowania zapotrzebowania na moc ciepłą na potrzeby ogrzewania budynków, która będzie uwzględniała w prosty i równocześnie dokładny sposób najważniejsze czynniki zewnętrzne (temperatura powietrza zewnętrznego, prędkość wiatru, nasłonecznienie lub zachmurzenie) oraz czynniki wewnętrzne (zachowania/preferencje mieszkańców) na potrzeby prognozowania zużycia ciepła. Dlatego też w pierwszej kolejności będą opracowane algorytmy obliczeniowe, które pozwolą na otrzymanie rzeczywistego modelu cieplnego danego obiektu (rozdział 4.4) w formie równoważnej temperatury zewnętrznej ($t_e^{równ}$) uwzględniającej wpływ prędkości wiatru (rozdział 4.2) oraz nasłonecznienia lub zachmurzenia (rozdział 4.3). Ważnym aspektem przy wyznaczaniu rzeczywistego modelu cieplnego obiektu (budynek, podstacja ciepła, kotłownia osiedlowa) będzie uwzględnienie tylko danych (obejmujących zużycie ciepła i parametry meteorologiczne) pochodzących z okresów czasu, w których wpływ użytkowników systemu ogrzewczego (np. zmiana ustawień na zaworach termostatycznych) na zużycie ciepła jest zminimalizowany.

Poza rzeczywistym (opracowywanym na podstawie badań eksploatacyjnych) modelem cieplnym danego obiektu (rozdział 4.4), który będzie odpowiadał za właściwe uwzględnienie wpływu czynników zewnętrznych na zużycie ciepła, istotnym aspektem jest również odpowiednie uwzględnienie wpływu czynników wewnętrznych (zachowania i preferencje użytkowników systemu) na potrzeby cieplne obiektu. Dlatego też opracowane zostaną algorytmy obliczeniowe, za pomocą których będzie wypracowywany indywidualnie dla każdego obiektu profil zastępczej temperatury wewnętrznej (rozdział 4.5), który obejmuje całość procesów cieplnych w obiekcie związanych z zachowaniami użytkowników. Zakłada się, że profil równoważnej temperatury wewnętrznej będzie następnie aktualizowany w celu uzyskania możliwie wysokiej dokładności prognozowania zużycia ciepła.

Następnie uwzględniając prognozę pogody dla danej lokalizacji będzie można wyznaczyć prognozowaną równoważną temperaturę zewnętrzną ($t_e^{rów}$) oraz wewnętrzną ($t_i^{rów}$) dla danego obiektu i w ten sposób dostosować dostawę ciepła na cele ogrzewcze do zmieniających się warunków zewnętrznych i wewnętrznych, a to z kolei pozwoli na zmniejszenie zużycia ciepła.

Należy podkreślić, że w konkurencyjnych technologiach centralnej regulacji instalacji ogrzewczej nie jest stosowane prognozowanie zużycia ciepła na cele ogrzewcze z równoległym wykorzystaniem rzeczywistego modelu budynku oraz odpowiednio dobranego profilu równoważnej temperatury wewnętrznej, która w inteligentny sposób uwzględnia preferencje i zachowania użytkowników systemu (profile zachowań mieszkańców).

W celu opracowania zaawansowanych algorytmów obliczeniowych na potrzeby rzeczywistego, dokładnego modelu cieplnego wykonywanego indywidualnie dla każdego obiektu oraz na potrzeby uwzględnienia wpływu użytkowników systemu ogrzewczego wykorzystano rzeczywiste, archiwalne, godzinowe dane eksploatacyjne dotyczące ilości ciepła dostarczanego na potrzeby ogrzewania do budynków oraz podstacji ciepłych zlokalizowanych na terenie miasta Lublin i Świdnik.

Dane te były pobrane z systemu monitoringu węzłów ciepłych na podstawie uzgodnień, umów współpracy oraz umów o zachowaniu poufności zawartych w 2015 roku pomiędzy Przedsiębiorstwami Energetyki Ciepłej w Lublinie (LPEC) i w Świdniku a Politechniką Lubelską, z ramienia której osobą odpowiedzialną za uzgodnienia i prace badawcze był wyznaczony autor niniejszej rozprawy.

W badaniach uwzględniono 25 budynków wielorodzinnych, 16 budynków użyteczności publicznej (między innymi szkoły, szpitale, budynki biurowe, sklepy, supermarkety), 6 podstacji ciepłych oraz 2 miejskie systemy ciepłownicze w okresie ostatnich 3 sezonów ogrzewczych (2015/2016, 2016/2017, 2017/2018).

Jednak na potrzeby niniejszej rozprawy wybrano tylko niektóre obiekty, aby pokazać na ich przykładzie autorskie podejście do problemu prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną na potrzeby ogrzewania obiektów.

Poza godzinowymi danymi związanymi ze zużyciem ciepła w analizowanych obiektach, w analizie wykorzystano również następujące czynniki atmosferyczne, w szczególności:

- średnią prędkość wiatru w danej godzinie, [m/s],
- maksymalną (podmuch) prędkość wiatru w danej godzinie, [m/s],
- średnie zachmurzenie w danej godzinie określone przy użyciu 9-stopniowej (oktanowej) skali, [oktant],
- średnie nasłonecznienie w danej godzinie, [J/cm²].

W celu ujednolicenia metodyki badań, w analizach uwzględniano okres od 1 października do 30 kwietnia danego roku (np. od 1 października 2015 do 30 kwietnia 2016), czyli z każdego sezonu ogrzewczego otrzymano 5112 godzinowych odczytów.

4.2. Wpływ wiatru na zapotrzebowanie na moc cieplną

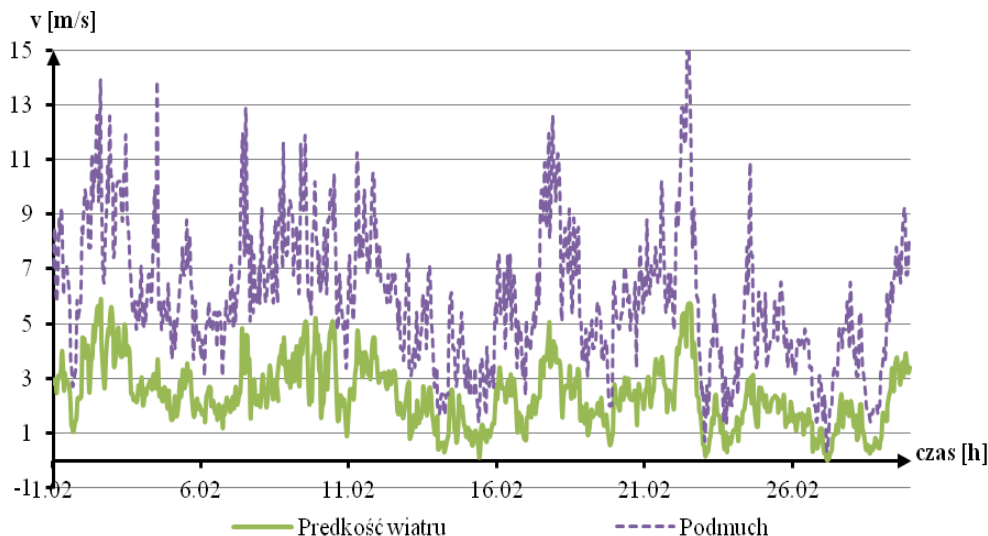
Wpływ prędkości wiatru na zapotrzebowanie mocy cieplnej związany jest ze wzrostem współczynnika przejmowania ciepła na drodze konwekcji na zewnętrznej ścianie budynku, który rośnie wraz ze wzrostem prędkości wiatru oraz wzrostem podciśnienia w układach wentylacji naturalnej czy też mechanicznej, co powoduje zwiększenie krotności wymiany powietrza i związanych z tym dodatkowych nakładów energetycznych na podgrzanie powietrza infiltrującego.

Przykładowo w przedziale prędkości około 5–10 m/s, gdy prędkość wiatru wzrasta o każdy kolejny 1 m/s następuje obniżenie odczuwalnej temperatury zewnętrznej o około 3–4°C (*Wojdyga, 2008; Hopkiewicz i Pytel, 2015*). Jednak z uwagi na różną konstrukcję, szczelność oraz usytuowanie należy każdy z budynków rozpatrywać indywidualnie, ponieważ może on charakteryzować się inną odpowiedzią układu na dane warunki atmosferyczne związane z prędkością wiatru.

Dlatego też w ramach tego rozdziału przeanalizowany będzie szczegółowo jeden z głównych czynników zewnętrznych wpływających na zużycie ciepła (poza wartością temperatury powietrza zewnętrznego), jakim jest prędkość wiatru.

W sezonie ogrzewczym 2015/2016 większość danych dotyczących prędkości wiatru mieściła się w zakresie od około 1 do 13 m/s, przy czym ponad 60% mieści się w zakresie od 1,5 do 4,7 m/s. Średnia prędkość wiatru dla analizowanego okresu wynosiła 2,2 m/s, przy czym najwyższa wartość wynosiła 17,7 m/s.

Przykładowo na rysunku 4.1 przedstawiono średnią oraz maksymalną prędkość wiatru w danej godzinie dla miesiąca lutego w 2016 roku.



Rys. 4.1. Średnia prędkość wiatru i maksymalna prędkość wiatru (podmuch) w danej godzinie w lutym 2016 roku

W sezonie ogrzewczym 2016/2017 prędkości wiatru były poniżej 15,6 m/s, z czego 21% stanowiły wartości poniżej 3 m/s, 43% z zakresu $3 \leq v < 6$ m/s oraz 36% powyżej 6 m/s. Z kolei w sezonie ogrzewczym 2017/2018 prędkości wiatru były poniżej 19,0 m/s, z czego 17% stanowiły wartości poniżej 3 m/s, 49% z zakresu $3 \leq v < 6$ m/s oraz 34% powyżej 6 m/s. Biorąc te dane pod uwagę można zauważyć, że zakres i rozkład prędkości wiatru jest podobny w analizowanych sezonach ogrzewczych.

W celu oceny wpływu prędkości wiatru na zapotrzebowanie na moc cieplną na potrzeby ogrzewania dla wybranych do analizy budynków opracowano (na podstawie danych z całego sezonu ogrzewczego) równania regresji oraz współczynniki determinacji (R^2). W pierwszej kolejności opracowano zależności dla prędkości wiatru: $v < 3$ m/s, dla $3 \leq v < 6$ m/s oraz dla $v > 6$ m/s oraz czterech zakresów danych godzinowych:

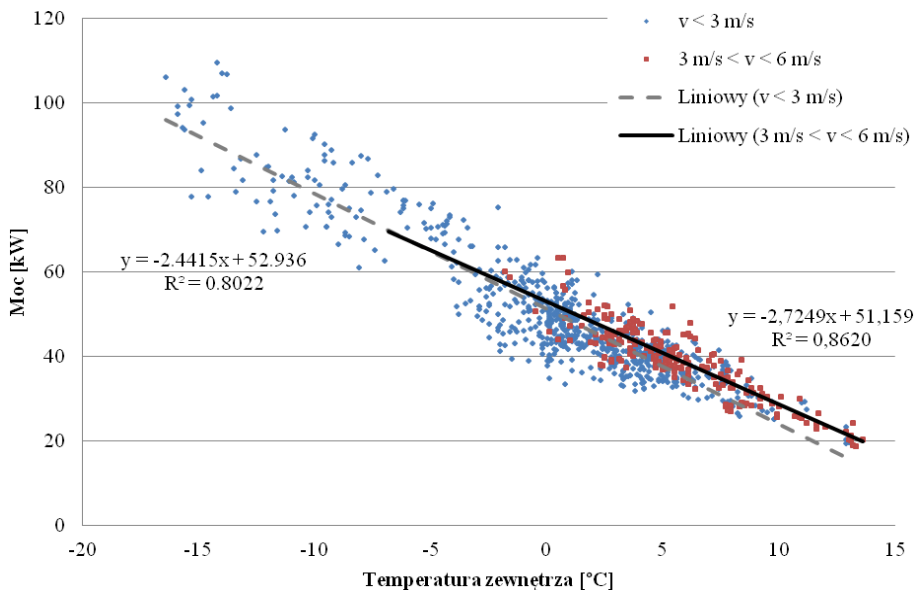
- dla całej doby,
- dla godzin 6–18 (dzień), czyli danych charakteryzujących dzień,

- dla godzin 18–6, czyli danych charakteryzujących wieczór i noc
- dla godzin 23–4, czyli danych charakteryzujących noc.

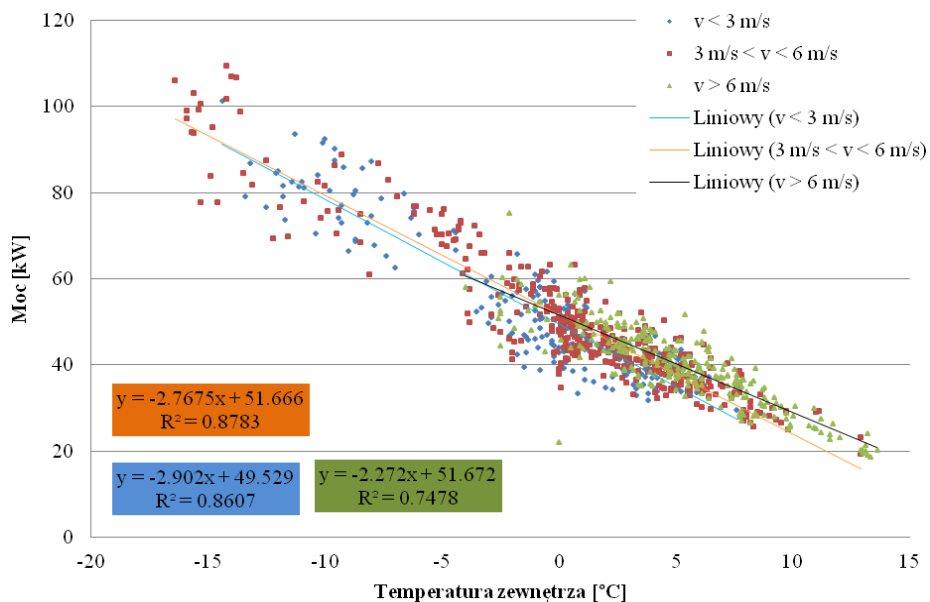
Analizę tę przeprowadzono dodatkowo dla dwóch wariantów, ponieważ rozpatrywano zarówno średnią prędkość wiatru w danej godzinie, jak i maksymalną prędkość wiatru (podmuch) w danej godzinie.

Po przeprowadzeniu analizy dla zakresów prędkości wiatru ($v < 3$ m/s, dla $3 \leq v < 6$ m/s oraz dla $v \geq 6$ m/s), skonkretyzowano zależności dla węższych zakresów, które charakteryzowały już poszczególne prędkości wiatru $v = 1$ m/s, $v = 2$ m/s, $v = 3$ m/s... $v = 9$ m/s, $v \geq 10$ m/s. Przykładowo, dane przyporządkowane do prędkości wiatru $v = 2$ m/s były z zakresu od 1,5 m/s do 2,5 m/s.

Przykładowe wyniki tej analizy przedstawiono dla budynku wielorodzinnego nr 1 na rysunkach 4.2 oraz 4.3, gdzie można zauważyć, że wraz ze wzrostem prędkości wiatru rośnie zapotrzebowanie na moc cieplną na potrzeby ogrzewania.



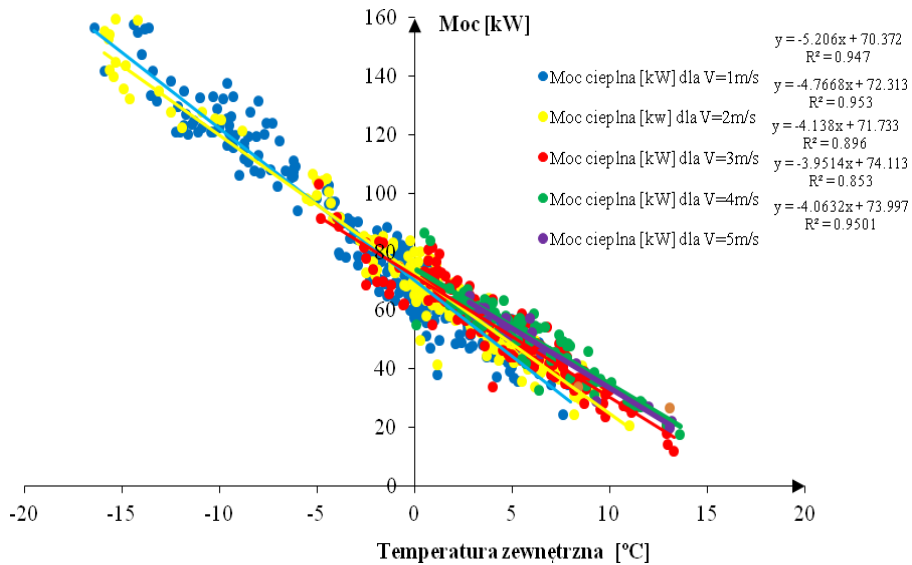
Rys. 4.2. Moc cieplna w funkcji temperatury zewnętrznej w zależności od średniej prędkości wiatru w przedziałach $v < 3$ m/s, $3 \div 6$ m/s dla godzin 23÷4 dla budynku wielorodzinnego nr 1



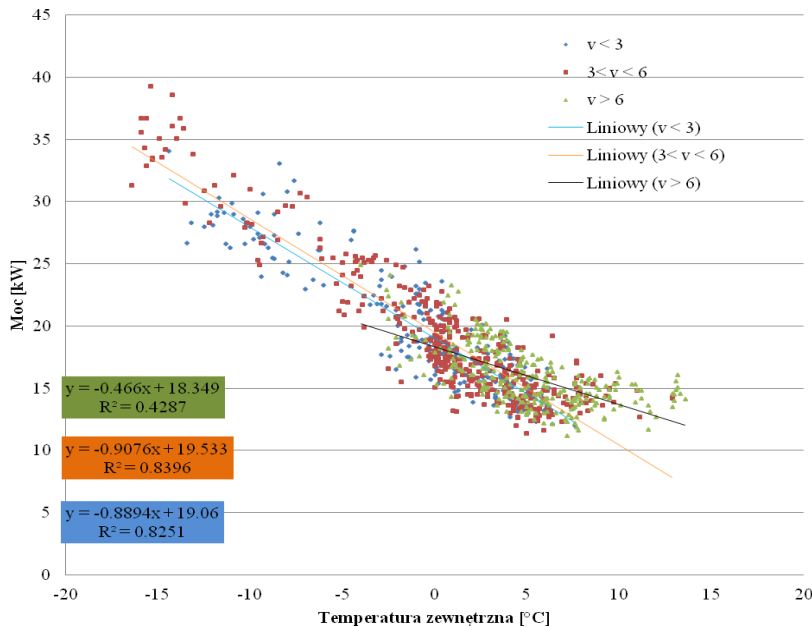
Rys. 4.3. Moc cieplna w funkcji temperatury zewnętrznej w zależności od maksymalnej prędkości wiatru w przedziałach $v < 3 \text{ m/s}$, $3 \div 6 \text{ m/s}$, $v > 6 \text{ m/s}$ dla godzin 23÷4 dla budynku wielorodzinnego nr 1

Podobną zależność wpływu prędkości wiatru na zużycie ciepła na potrzeby ogrzewania można zaobserwować dla budynku wielorodzinnego nr 2 (rysunek 4.4), dla budynku wielorodzinnego nr 3 (rysunek 4.5), jak i budynku użyteczności publicznej nr 1 – sąd (rysunek 4.6).

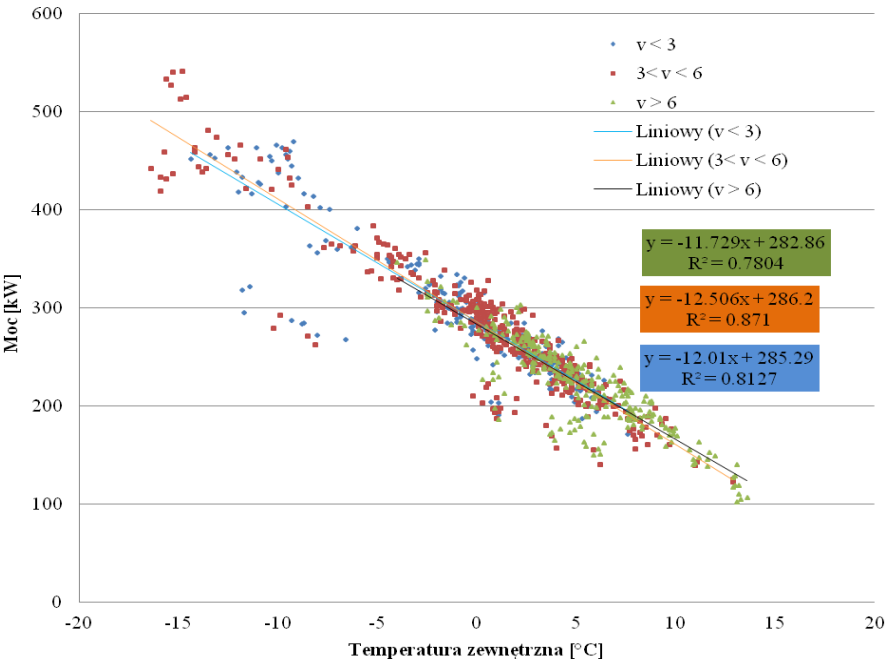
Należy jednak podkreślić, że każdy z budynków odmiennie reaguje na dane warunki pogodowe (w tym między innymi prędkość wiatru), co jest związane między innymi z konstrukcją budynku, orientacją względem strony świata, szczelnością budynku, zastosowanym systemem wentylacji i jego sprawnością, jak i preferencjami i zachowaniem użytkowników systemu (w szczególności przyzwyczajeniami związanymi z regulacją temperatury powietrza wewnętrznego, jak i otwieraniem okien w celu przewietrzania pomieszczeń). Dlatego też zasadnym jest wykonanie analizy i opracowanie rzeczywistych zależności pomiędzy zapotrzebowaniem na moc cieplną na potrzeby ogrzewania a prędkością wiatru indywidualnie dla danego obiektu (budynek, podstacja ciepłna, system ciepłowniczy).



Rys. 4.4. Moc ciepła w funkcji temperatury zewnętrznej w zależności od średniej prędkości wiatru dla godzin 23÷4 dla budynku wielorodzinnego nr 2



Rys. 4.5. Moc ciepła w funkcji temperatury zewnętrznej w zależności od maksymalnej prędkości wiatru w przedziałach $v < 3$ m/s, $3 < v < 6$ m/s, $v > 6$ m/s dla godzin 23÷4 dla budynku wielorodzinnego nr 3



Rys. 4.6. Moc cieplna w funkcji temperatury zewnętrznej w zależności od maksymalnej prędkości wiatru w przedziałach $v < 3$ m/s, $3 \div 6$ m/s, $v > 6$ m/s dla godzin 23÷4 dla budynku użyteczności publicznej nr 1- sąd

Tab. 4.1. Zestawienie współczynników determinacji dla budynku wielorodzinnego nr 1

Czas	Prędkość wiatru	$v < 3\text{m/s}$	$3 \div 6 \text{ m/s}$	$v > 6\text{m/s}$
Cała doba	średnia	$R^2 = 0,8549$	$R^2 = 0,7785$	$R^2 = 0,8405$
	maksymalna	$R^2 = 0,8497$	$R^2 = 0,8579$	$R^2 = 0,8086$
6–18	średnia	$R^2 = 0,8562$	$R^2 = 0,7828$	$R^2 = 0,8760$
	maksymalna	$R^2 = 0,8695$	$R^2 = 0,8484$	$R^2 = 0,8230$
18–6	średnia	$R^2 = 0,8482$	$R^2 = 0,7820$	$R^2 = 0,9370$
	maksymalna	$R^2 = 0,8378$	$R^2 = 0,8642$	$R^2 = 0,7893$
23–4	średnia	$R^2 = 0,8620$	$R^2 = 0,8022$	-
	maksymalna	$R^2 = 0,8607$	$R^2 = 0,8783$	$R^2 = 0,7478$

Tab. 4.2. Zestawienie współczynników determinacji dla budynku wielorodzinnego nr 2

Czas	Prędkość wiatru	$v < 3\text{m/s}$	$3 \div 6 \text{ m/s}$	$v > 6\text{m/s}$
Cała doba	średnia	$R^2 = 0,8954$	$R^2 = 0,8222$	$R^2 = 0,9581$
	maksymalna	$R^2 = 0,9030$	$R^2 = 0,9001$	$R^2 = 0,8541$
6–18	średnia	$R^2 = 0,9176$	$R^2 = 0,8890$	$R^2 = 0,9483$
	maksymalna	$R^2 = 0,9188$	$R^2 = 0,9167$	$R^2 = 0,9100$
18–6	średnia	$R^2 = 0,9219$	$R^2 = 0,8208$	$R^2 = 0,9984$
	maksymalna	$R^2 = 0,9275$	$R^2 = 0,9287$	$R^2 = 0,8357$
23–4	średnia	$R^2 = 0,9421$	$R^2 = 0,8710$	-
	maksymalna	$R^2 = 0,9512$	$R^2 = 0,9491$	$R^2 = 0,8613$

Tab. 4.3. Zestawienie współczynników determinacji dla budynku wielorodzinnego nr 3

Czas	Prędkość wiatru	$v < 3\text{m/s}$	$3 \div 6 \text{ m/s}$	$v > 6\text{m/s}$
Cała doba	średnia	$R^2 = 0,7818$	$R^2 = 0,4051$	$R^2 = 0,4864$
	maksymalna	$R^2 = 0,8004$	$R^2 = 0,7799$	$R^2 = 0,5472$
6–18	średnia	$R^2 = 0,7681$	$R^2 = 0,4393$	$R^2 = 0,4136$
	maksymalna	$R^2 = 0,7823$	$R^2 = 0,7579$	$R^2 = 0,5867$
18–6	średnia	$R^2 = 0,8092$	$R^2 = 0,3538$	$R^2 = 0,9248$
	maksymalna	$R^2 = 0,8253$	$R^2 = 0,8176$	$R^2 = 0,4663$
23–4	średnia	$R^2 = 0,8168$	$R^2 = 0,3927$	-
	maksymalna	$R^2 = 0,8251$	$R^2 = 0,8396$	$R^2 = 0,4287$

Tab. 4.4. Zestawienie współczynników determinacji dla budynku użyteczności publicznej nr 1 – sąd

Czas	Prędkość wiatru	$v < 3\text{ m/s}$	$3 \div 6\text{ m/s}$	$v > 6\text{ m/s}$
Cała doba	średnia	$R^2 = 0,8584$	$R^2 = 0,7853$	$R^2 = 0,9772$
	maksymalna	$R^2 = 0,8420$	$R^2 = 0,8544$	$R^2 = 0,8378$
6–18	średnia	$R^2 = 0,8550$	$R^2 = 0,7968$	$R^2 = 0,9855$
	maksymalna	$R^2 = 0,8472$	$R^2 = 0,8400$	$R^2 = 0,8532$
18–6	średnia	$R^2 = 0,8569$	$R^2 = 0,7604$	$R^2 = 0,9770$
	maksymalna	$R^2 = 0,8207$	$R^2 = 0,8714$	$R^2 = 0,8042$
23–4	średnia	$R^2 = 0,8462$	$R^2 = 0,7657$	-
	maksymalna	$R^2 = 0,8127$	$R^2 = 0,8710$	$R^2 = 0,7804$

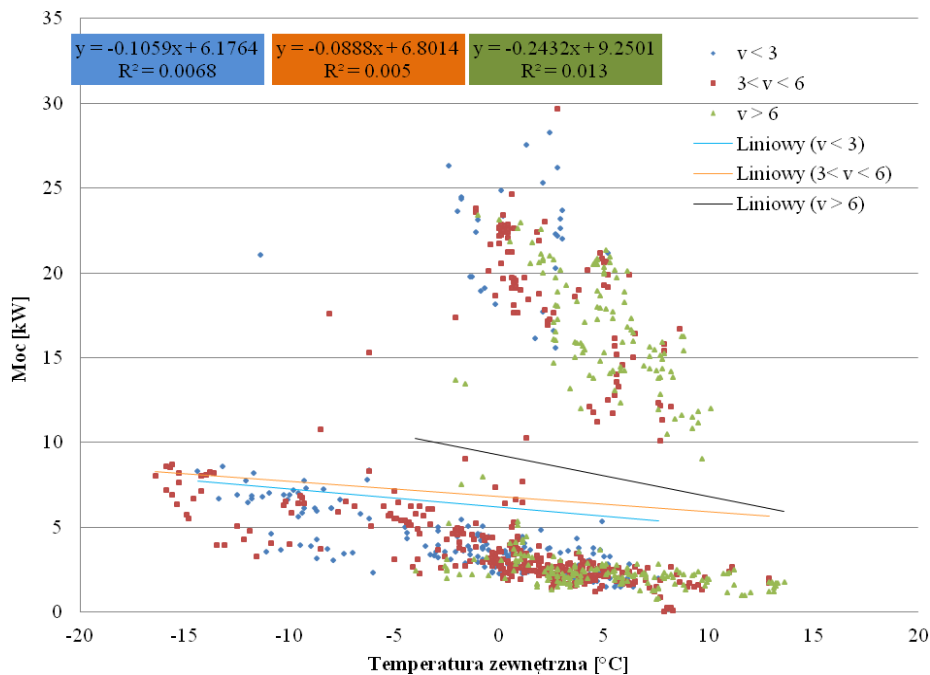
Z kolei analizując zbiorcze zestawienia współczynników determinacji (R^2), które zostały przedstawione dla analizowanych w tym rozdziale budynków w tabelach 4.1–4.4 można stwierdzić, że najwyższe współczynniki determinacji uzyskano dla wyników z godzin nocnych przy maksymalnej prędkości wiatru.

Wyniki to z faktu, że właśnie w godzinach nocnych zminimalizowane są pozostałe czynniki zewnętrzne, jak i wewnętrzne, które mogą zakłócać poprawne zdefiniowanie wpływu prędkości wiatru na zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania obiektów. W ten sposób minimalizuje się wpływ zysków od promieniowania słonecznego oraz zysków wewnętrznych generowanych przez użytkowników obiektów. Minimalizuje się również wpływ zachowań i preferencji użytkowników odnośnie temperatury powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach ogrzewanych, ponieważ użytkownicy w tych godzinach (23.00–4.00) już tylko ewentualnie w minimalnym stopniu zmieniają ustawienia w zakresie temperatury wewnętrznej (np. poprzez zmianę ustawień głowicy termostatycznej).

Z kolei uwzględnienie maksymalnej prędkości wiatru w analizie zamiast średniej prędkości wiatru pozwala w większości analizowanych przypadków na uzyskanie wyższych wartości współczynników determinacji. Poza tym maksymalna prędkość wiatru jest podawana częściej w prognozach pogody niż średnia prędkość wiatru w danej godzinie, dlatego też ten parametr jest łatwiejszy do

uzyskania przy dalszych analizach, a przy tym pozwala na otrzymanie bardziej dokładnych zależności.

Dodatkowo należy zauważyć, że w powyższej analizie uzyskano wysokie wartości współczynników determinacji, co niestety nie ma miejsca we wszystkich typach obiektów. Przykładowo, podczas próby skorelowania mocy cieplnej z temperaturą powietrza zewnętrznego (rysunek 4.7) dla analizowanych zakresów prędkości wiatru ($v < 3$ m/s, dla $3 \leq v < 6$ m/s oraz dla $v \geq 6$ m/s) dla budynku użyteczności publicznej nr 2 (sklep RTV) oraz dla budynku użyteczności publicznej nr 3 (sklep wielkopowierzchniowy) uzyskano bardzo niskie wartości współczynników determinacji (tabela 4.5 oraz tabela 4.6).



Rys. 4.7. Moc cieplna w funkcji temperatury zewnętrznej w zależności od maksymalnej prędkości wiatru w przedziałach $v < 3$ m/s, $3 \leq v < 6$ m/s, $v \geq 6$ m/s dla godzin 23÷4 dla budynku użyteczności publicznej nr 2 – sklep RTV

Tab. 4.5. Zestawienie współczynników determinacji dla budynku użyteczności publicznej nr 2 – sklep RTV

Czas	Prędkość wiatru	$v < 3\text{m/s}$	$3 \div 6 \text{ m/s}$	$v > 6\text{m/s}$
Cała doba	średnia	$R^2 = 0,0634$	$R^2 = 0,0558$	$R^2 = 0,0009$
	maksymalna	$R^2 = 0,0454$	$R^2 = 0,0528$	$R^2 = 0,1185$
6–18	średnia	$R^2 = 0,1168$	$R^2 = 0,0666$	$R^2 = 0,0045$
	maksymalna	$R^2 = 0,0741$	$R^2 = 0,0865$	$R^2 = 0,1699$
18–6	średnia	$R^2 = 0,0118$	$R^2 = 0,0365$	$R^2 = 0,2010$
	maksymalna	$R^2 = 0,0309$	$R^2 = 0,0189$	$R^2 = 0,0101$
23–4	średnia	$R^2 = 0,0019$	$R^2 = 0,0511$	-
	maksymalna	$R^2 = 0,0068$	$R^2 = 0,0050$	$R^2 = 0,0130$

Tab. 4.6. Zestawienie współczynników determinacji dla budynku użyteczności publicznej nr 3 – sklep wielkopowierzchniowy

Czas	Prędkość wiatru	$v < 3\text{m/s}$	$3 \div 6 \text{ m/s}$	$v > 6\text{m/s}$
Cała doba	średnia	$R^2 = 0,056$	$R^2 = 0,120$	$R^2 = 0,137$
	maksymalna	$R^2 = 0,015$	$R^2 = 0,079$	$R^2 = 0,078$
6–18	średnia	$R^2 = 0,121$	$R^2 = 0,172$	$R^2 = 0,255$
	maksymalna	$R^2 = 0,053$	$R^2 = 0,021$	$R^2 = 0,016$
18–6	średnia	$R^2 = 0,050$	$R^2 = 0,108$	$R^2 = 0,084$
	maksymalna	$R^2 = 0,013$	$R^2 = 0,181$	$R^2 = 0,161$
23–4	średnia	$R^2 = 0,473$	$R^2 = 0,433$	-
	maksymalna	$R^2 = 0,474$	$R^2 = 0,528$	$R^2 = 0,507$

Tak niskie wartości współczynników determinacji wynikają między innymi z rodzaju systemu ogrzewczego, który był zastosowany w danym obiekcie oraz sposobu regulacji dostawy ciepła na potrzeby ogrzewania.

Jeśli w budynku zainstalowany jest tradycyjny system ogrzewania wodnego z grzejnikami konwekcyjnymi, które są zasilane jednostronnie bocznie z pionów

czy też odpodłogowo z rozdzielaczy to zauważono, że otrzymywane współczynniki determinacji dla wypracowanych równań regresji były wysokie (najczęściej powyżej $R^2=0,80$). W tego typu układach najczęściej występuje również regulator pogodowy dostawy ciepła na potrzeby ogrzewania, który pozwala na ciągłą i płynną regulację dostawy ciepła. Nie występują tu nagłe przerwy w dostawie ciepła do całego budynku (regulacja on-off), dlatego jest możliwość dokładnego uzależnienia mocy cieplnej od czynników zewnętrznych (temperatura powietrza zewnętrznego, prędkość wiatru, nasłonecznienie), co może być wykorzystane na potrzeby prognozowania dostawy ciepła do obiektów.

Z kolei w budynkach (w szczególności użyteczności publicznej), w których ciepło dostarczane jest w formie czynnika ogrzewczego do aparatów grzewczo-wentylacyjnych, central wentylacyjnych czy też klimatyzacyjnych lub urządzeń typu split oraz w których wpływ dodatkowych zysków ciepła od ludzi i innych procesów jest trudny do przewidzenia, nie uzyskuje się odpowiednio wysokich wartości współczynników determinacji, które mogłyby pozwolić na prognozowanie dostawy ciepła na potrzeby ogrzewania w zależności od czynników zewnętrznych (czynniki atmosferyczne) oraz czynników wewnętrznych (zachowania i preferencje użytkowników) przy wykorzystaniu tej metody.

W tego typu budynkach najczęściej dostawa ciepła na potrzeby ogrzewania nie jest realizowana w sposób ciągły i płynny przy wykorzystaniu krzywej grzewczej, a odbywa się w trybie włącz-wyłącz (on-off). Zatem urządzenia grzewcze w tego typu przypadkach są włączane, gdy temperatura powietrza wewnętrznego spadnie poniżej założonego poziomu, co nie jest uzależnione w sposób bezpośredni od wartości temperatury powietrza zewnętrznego, prędkości wiatru czy też zysków od promieniowania słonecznego.

4.3. Wpływ nasłonecznienia lub zachmurzenia na zapotrzebowanie na moc cieplną

Promieniowanie słoneczne działające na obudowę budynku ma wpływ na chwilowe zapotrzebowania na moc cieplną w okresie całego sezonu grzewczego. Zacienienie budynków jest czynnikiem osłabiającym pozyskiwanie ciepła promieniowania słonecznego. Dodatkowo wpływ na natężenie promieniowania słonecznego może mieć zmętnienie atmosfery spowodowane zjawiskami naturalnymi, takimi jak zachmurzenie czy zanieczyszczenie pyłami pochodzącymi

z terenów zurbanizowanych oraz wymiana ciepła przez promieniowanie pomiędzy ścianą budynku a powierzchnią ziemi, warstwą otaczającego powietrza czy też kopułą nieboskłonu.

Dlatego też prace badawcze opisane w ramach tego rozdziału są ukierunkowane na określenie wpływu kolejnego z głównych czynników zewnętrznych oddziałujących na zużycie ciepła na potrzeby ogrzewania (poza wartością temperatury powietrza zewnętrznego oraz prędkością wiatru), jakim są zyski ciepła od promieniowania słonecznego.

Wpływ tego czynnika zewnętrznego może być uwzględniony, biorąc pod uwagę nasłonecznienie lub zachmurzenie.

Dlatego też ważnym aspektem jest wypracowanie uniwersalnego algorytmu obliczeniowego, który będzie pozwalał na wyznaczenie właściwego (o możliwie wysokim współczynniku determinacji) oraz możliwie miarodajnego równania korygującego temperaturę powietrza zewnętrznego z uwagi na nasłonecznienie lub zachmurzenie indywidualnie dla każdego obiektu.

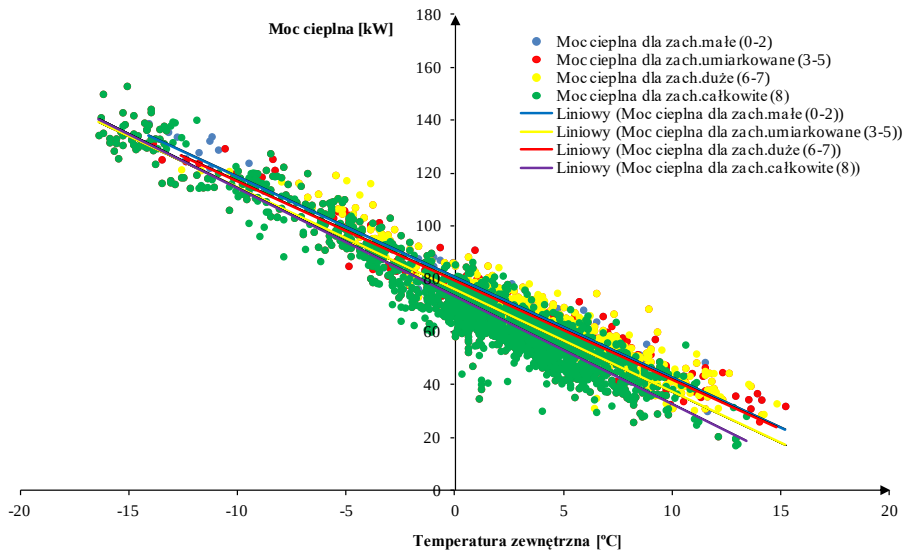
Na potrzeby wyznaczenia korekty temperatury zewnętrznej w zależności od stopnia zachmurzenia określone zostaną zależności mocy cieplnej dostarczanej do obiektu względem temperatury zewnętrznej dla zachmurzenia z zakresu: 0–2 oktant (zachmurzenie małe); 3–5 oktant (zachmurzenie umiarkowane); 6–7 (zachmurzenie duże); 8 (zachmurzenie całkowite) przy prędkościach wiatru w zakresach $v < 3$ m/s, $3 \leq v < 6$ m/s oraz $v \geq 6$ m/s.

Z kolei na potrzeby wyznaczenia korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na nasłonecznienie (opisanej w rozdziale 4.4) zostaną określone zależności mocy cieplnej dostarczanej do obiektu względem temperatury zewnętrznej dla nasłonecznienia z zakresów: 0–35 J/cm²; 35–100 J/cm²; 100–200 J/cm²; >200 J/cm² przy prędkościach wiatru $v < 3$ m/s, $3 \leq v < 6$ m/s oraz dla $v \geq 6$ m/s i dwóch przedziałów godzinowych: całej doby oraz godzin od 10 do 14 (dzień- brak użytkowników w obiekcie).

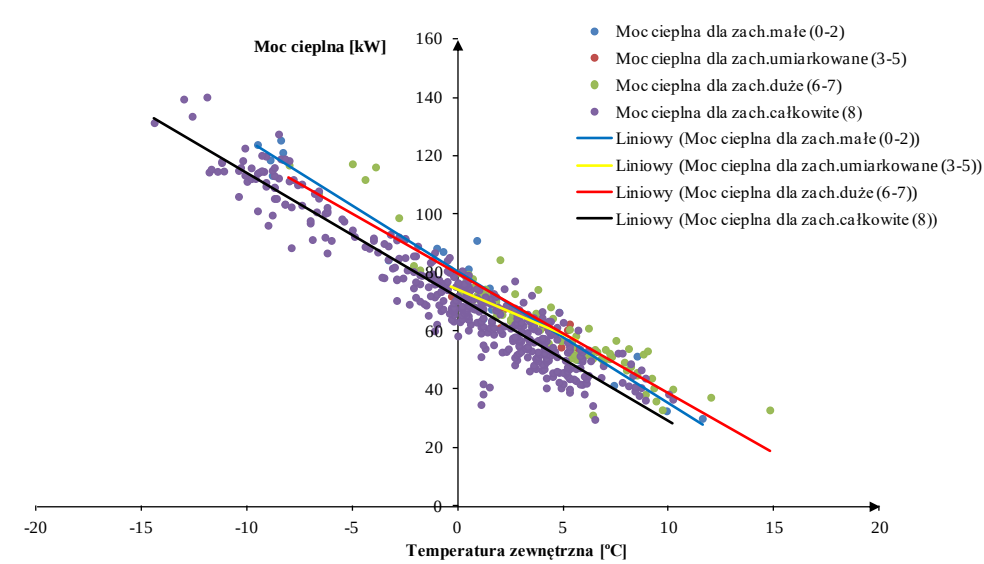
Na podstawie wyników tych analiz zostanie wybrany odpowiedni zakres danych oraz parametr (nasłonecznienie czy też zachmurzenie) charakteryzujący wpływ zysków ciepła od promieniowania słonecznego, które pozwalają w możliwie wysokim stopniu zminimalizować wpływ innych czynników zakłócających (między innymi prędkość wiatru czy też zachowania użytkowników systemu ogrzewczego).

W pierwszej kolejności poddano analizie, jaki wpływ na moc cieplną dostarczaną do obiektu na potrzeby ogrzewania wywiera poziom zachmurzenia

(rysunki 4.8-4.13), ponieważ występowanie zachmurzenia ma wpływ na zmniejszenie ilości promieniowania słonecznego, które dociera do powierzchni Ziemi, co jest przyczyną występowania mniejszych zysków ciepła od promieniowania słonecznego w ciągu dnia. Z kolei w nocy warstwy chmur przeciwdziałają wypromieniowaniu ciepła, co może ograniczać spadek temperatury powietrza zewnętrznego na obszarze zachmurzonym.



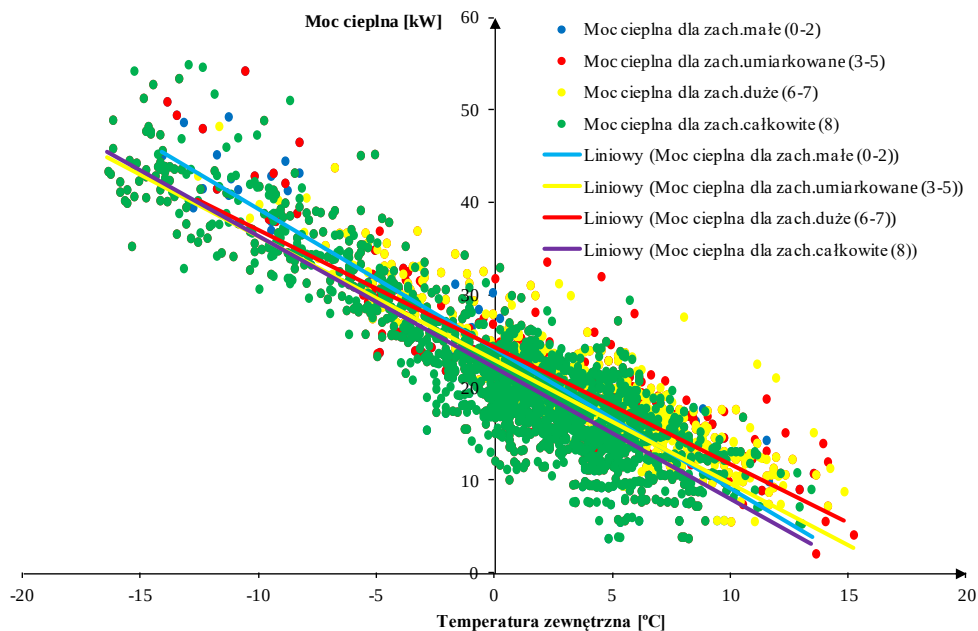
Rys. 4.8. Moc cieplna w zależności od temperatury zewnętrznej i zachmurzenia dla średniej prędkości wiatru poniżej 3 m/s dla budynku wielorodzinnego nr 4



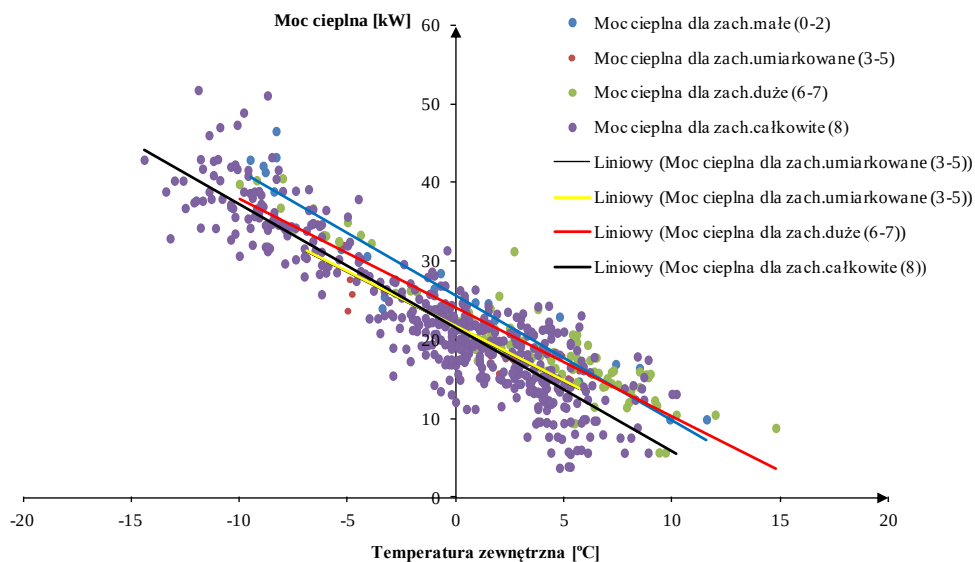
Rys. 4.9. Moc cieplna w zależności od temperatury zewnętrznej i zachmurzenia dla maksymalnej prędkości wiatru poniżej 3 m/s dla budynku wielorodzinnego nr 4

Tab. 4.7. Zestawienie współczynników determinacji dla budynku wielorodzinnego nr 4

Zachmurzenie	Prędkość wiatru	$v < 3\text{m/s}$	$3 \div 6 \text{ m/s}$	$v > 6\text{m/s}$
0÷2	średnia	$R^2 = 0,9537$	$R^2 = 0,8999$	-
	maksymalna	$R^2 = 0,9526$	$R^2 = 0,9579$	$R^2 = 0,9340$
3÷5	średnia	$R^2 = 0,8884$	$R^2 = 0,8828$	$R^2 = 0,9854$
	maksymalna	$R^2 = 0,7647$	$R^2 = 0,9102$	$R^2 = 0,9124$
6÷7	średnia	$R^2 = 0,8950$	$R^2 = 0,8993$	$R^2 = 0,9883$
	maksymalna	$R^2 = 0,8815$	$R^2 = 0,8899$	$R^2 = 0,9011$
8	średnia	$R^2 = 0,9075$	$R^2 = 0,7744$	$R^2 = 0,8821$
	maksymalna	$R^2 = 0,8969$	$R^2 = 0,9237$	$R^2 = 0,8112$



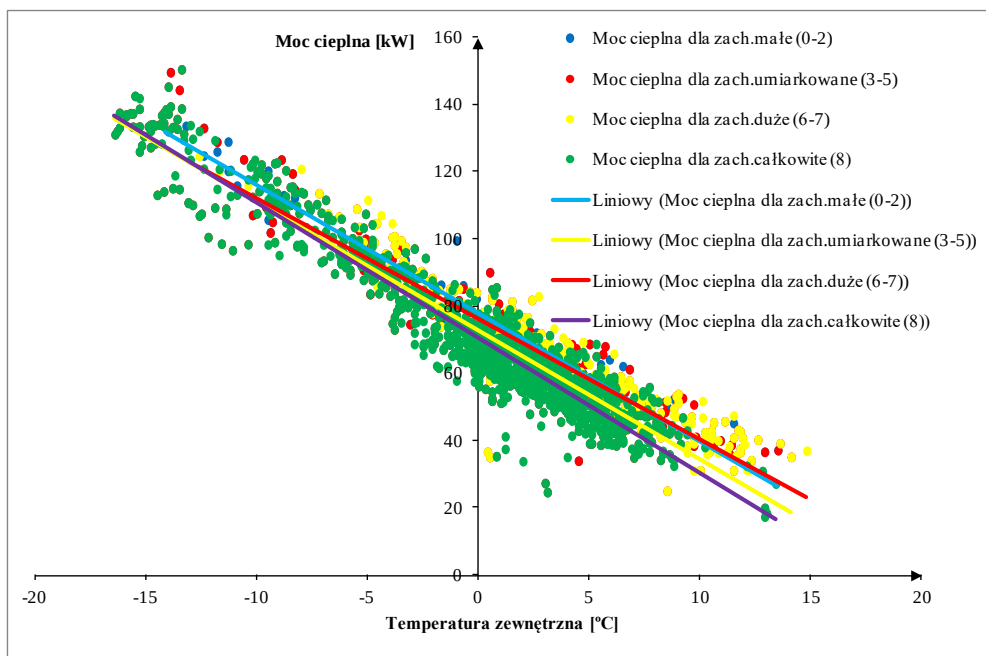
Rys. 4.10. Moc ciepła w zależności od temperatury zewnętrznej i zachmurzenia dla średniej prędkości wiatru poniżej 3 m/s dla budynku wielorodzinnego nr 5

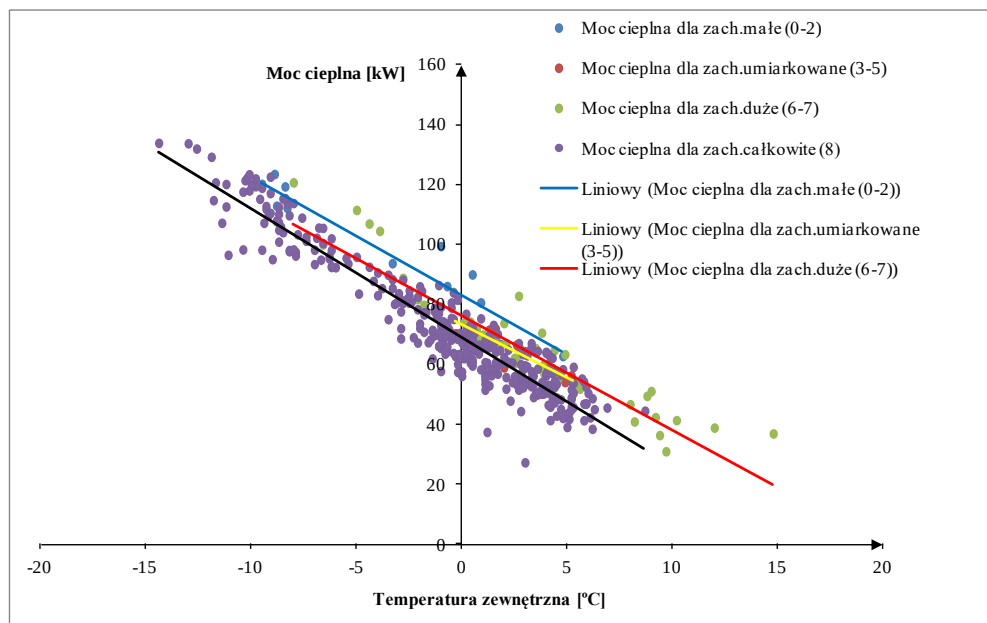


Rys. 4.11. Moc ciepła w zależności od temperatury zewnętrznej i zachmurzenia dla maksymalnej prędkości wiatru poniżej 3 m/s dla budynku wielorodzinnego nr 5

Tab. 4.8. Zestawienie współczynników determinacji dla budynku wielorodzinnego nr 5

Zachmurzenie	Prędkość wiatru	$v < 3\text{ m/s}$	$3 \div 6\text{ m/s}$	$v > 6\text{ m/s}$
0÷2	średnia	$R^2 = 0,8128$	$R^2 = 0,3178$	-
	maksymalna	$R^2 = 0,8690$	$R^2 = 0,8219$	$R^2 = 0,9156$
3÷5	średnia	$R^2 = 0,7807$	$R^2 = 0,7700$	$R^2 = 0,9532$
	maksymalna	$R^2 = 0,8669$	$R^2 = 0,7028$	$R^2 = 0,7740$
6÷7	średnia	$R^2 = 0,7822$	$R^2 = 0,6570$	$R^2 = 0,8721$
	maksymalna	$R^2 = 0,8453$	$R^2 = 0,7898$	$R^2 = 0,7382$
8	średnia	$R^2 = 0,7971$	$R^2 = 0,6576$	$R^2 = 0,6845$
	maksymalna	$R^2 = 0,8122$	$R^2 = 0,8024$	$R^2 = 0,6992$

**Rys. 4.12.** Moc cieplna w zależności od temperatury zewnętrznej i zachmurzenia dla średniej prędkości wiatru poniżej 3 m/s dla budynku wielorodzinnego nr 6



Rys. 4.13. Moc cieplna w zależności od temperatury zewnętrznej i zachmurzenia dla maksymalnej prędkości wiatru poniżej 3 m/s dla budynku wielorodzinnego nr 6

Tab. 4.9. Zestawienie współczynników determinacji dla budynku wielorodzinnego nr 6

Zachmurzenie	Prędkość wiatru	$v < 3\text{ m/s}$	$3 \div 6\text{ m/s}$	$v > 6\text{ m/s}$
0÷2	średnia	$R^2 = 0,9313$	$R^2 = 0,9558$	-
	maksymalna	$R^2 = 0,9257$	$R^2 = 0,9219$	$R^2 = 0,9716$
3÷5	średnia	$R^2 = 0,8945$	$R^2 = 0,9153$	$R^2 = 1$
	maksymalna	$R^2 = 0,8214$	$R^2 = 0,9041$	$R^2 = 0,9271$
6÷7	średnia	$R^2 = 0,8764$	$R^2 = 0,9057$	$R^2 = 0,5952$
	maksymalna	$R^2 = 0,8665$	$R^2 = 0,8661$	$R^2 = 0,913$
8	średnia	$R^2 = 0,9119$	$R^2 = 0,8089$	$R^2 = 0,9254$
	maksymalna	$R^2 = 0,9076$	$R^2 = 0,919$	$R^2 = 0,852$

W niniejszej analizie ważnym zagadnieniem jest zminimalizowanie w pierwszej kolejności wpływu innych czynników zewnętrznych, w szczególności prędkości wiatru. W poprzednim rozdziale (rozdział 4.2), w którym analizowany był wpływ prędkości wiatru, minimalizacja pozostałych czynników zarówno wewnętrznych, jak i zewnętrznych (zyski od promieniowania słonecznego) była

prostszy zadaniem, ponieważ wytypowano jako najbardziej miarodajne godziny nocne (23–4), w których to promieniowanie nie występuje.

Dlatego też w przypadku analizy związanej z zachmurzeniem analizowano dostarczaną, godzinową moc cieplną na potrzeby ogrzewania przy aktualnym zachmurzeniu i przy prędkości wiatru średniej czy też maksymalnej z zakresu $v < 3$ m/s, $3 \leq v < 6$ m/s oraz dla $v \geq 6$ m/s.

Biorąc pod uwagę zagadnienia metodyczne, najbardziej miarodajnymi danymi powinny być zależności pomiędzy mocą cieplną a poziomem zachmurzenia uzyskane przy maksymalnej prędkości wiatru i dla zakresu poniżej 3 m/s. Jest to związane z możliwym zminimalizowaniem wpływ czynnika zewnętrznego, jakim jest prędkość wiatru na moc cieplną na potrzeby ogrzewania danego obiektu, a przy tym możliwie dokładnym wyeksponowaniem wpływu zachmurzenia, co wynika również z otrzymanych współczynników determinacji dla analizowanych w tym rozdziale budynków wielorodzinnych nr 4–6 (tabele 4.7–4.9). Jednak na podstawie zależności przedstawionych na rysunkach 4.8–4.13 można stwierdzić, że nie otrzymano logicznych wyników w przypadku analizowanego aktualnie parametru (zachmurzenia), ponieważ wraz ze wzrostem stopnia zachmurzenia analizowane budynki wielorodzinne charakteryzowały się mniejszym poziomem zapotrzebowania na moc cieplną na potrzeby ogrzewania.

Z kolei logiczna zależność jest odwrotna, ponieważ wraz ze wzrostem zachmurzenia powinno wzrastać zapotrzebowanie na moc cieplną przy danej temperaturze powietrza zewnętrznego i przy możliwie zbliżonej prędkości wiatru, ponieważ obniżeniu ulega wartość promieniowania słonecznego, które dociera do analizowanego obiektu i generuje zyski ciepła.

Dodatkowo zachmurzenie określone jest w skali 0–8 oktant, co jest szacowane bez przyrządów pomiarowych i parametr ten nie uwzględnia aktualnej wysokości słońca na nieboskłonie, co ma wpływ na wielkość promieniowania słonecznego, jakie dociera do danego obiektu.

Z kolei w badaniach przeprowadzonych przez *Hopkiewicz i Pytel (2010)*, w których analizowano wpływ zachmurzenia na zapotrzebowanie mocy cieplnej dla jednej z magistrali ciepłowniczych w Krakowie, nie udało się jednoznacznie stwierdzić istotności wpływu zachmurzenia na zapotrzebowanie mocy cieplnej dla każdego z analizowanych przypadków.

Na podstawie powyższych informacji oraz biorąc pod uwagę podobne zależności, które uzyskano w analizach przeprowadzonych przez autora rozprawy dla innych obiektów (nie przedstawionych w niniejszej rozprawie) uznano, że

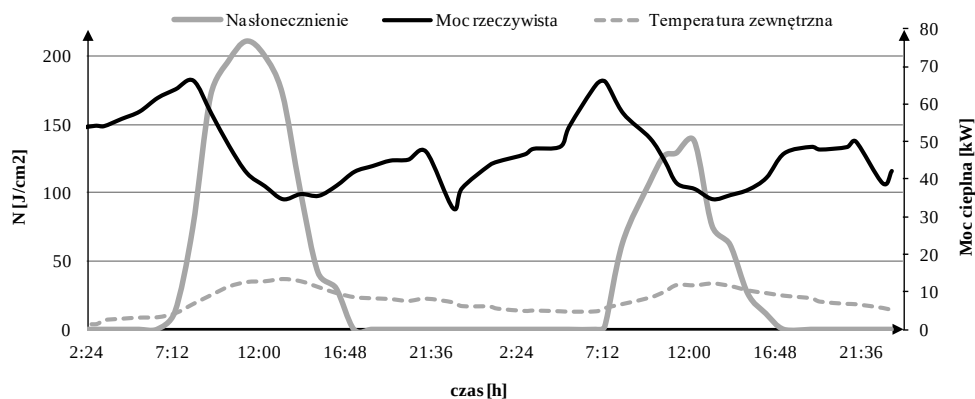
zachmurzenie nie jest parametrem miarodajnym przy uwzględnianiu zysków od promieniowania słonecznego i poddano analizie nasłonecznienie, co zostało przedstawione poniżej.

Podobnie jak w przypadku zachmurzenia, wpływ nasłonecznienia należy rozpatrywać równolegle z występującymi warunkami pogodowymi takimi, jak temperatura zewnętrzna oraz wiatr.

Dlatego też w analizie z uwagi na nasłonecznienie określono w pierwszej kolejności zależności mocy cieplnej dostarczanej do obiektu względem temperatury zewnętrznej dla nasłonecznienia z zakresów: 0–35 J/cm²; 35–100 J/cm²; 100–200 J/cm²; >200 J/cm² przy prędkościach wiatru (zarówno średnich, jak i maksymalnych) z trzech zakresów: $v < 3$ m/s, $3 \leq v < 6$ m/s oraz dla $v \geq 6$ m/s oraz biorąc pod uwagę wyniki pomiarów z całej doby, co zostało pokazane na przykładzie budynku użyteczności publicznej nr 4 (budynek gimnazjum) oraz budynku wielorodzinnego nr 7.

Z uwagi, iż promieniowanie słoneczne nie wpływa w każdym obiekcie bezpośrednio na aktualną moc cieplną, przeanalizowano dodatkowe dwa warianty z przesunięciem mocy cieplnej względem nasłonecznienia o jedną i dwie godziny do przodu, czyli np. skorelowanie nasłonecznienia z godziny 12.00 z mocą cieplną z godziny 13.00 (jeśli analiza dotyczy przypadku z 1h do przodu) czy też z mocą cieplną z godziny 14.00 (jeśli analiza dotyczy przypadku z 2h do przodu). Takie podejście wynika między innymi z akumulacyjności cieplnej obiektu i związanym z tym opóźnionym czasem odpowiedzi układu (np. budynku) na aktualne zyski ciepła od promieniowania słonecznego, co można zaobserwować na rysunku 4.14.

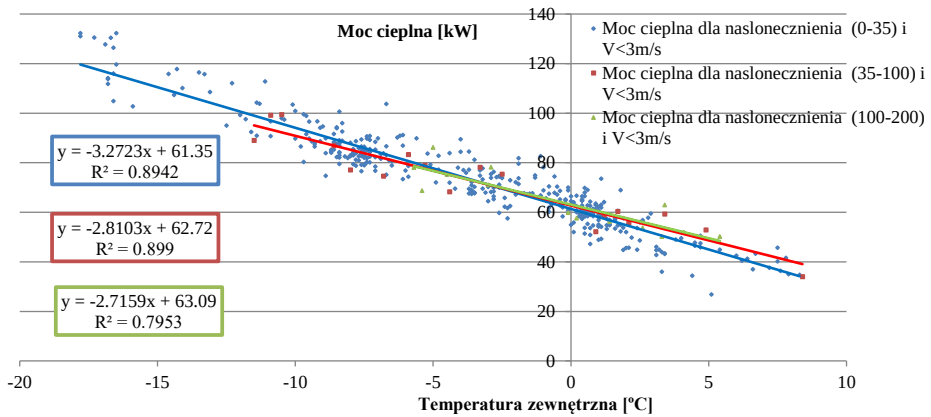
Na rysunku 4.14 można zauważyć znaczną zmienność zapotrzebowania mocy cieplnej, w zależności od nasłonecznienia i temperatury zewnętrznej. Widoczny jest związek pomiędzy zapotrzebowaniem na ciepło a zyskami ciepła od promieniowania słonecznego, ponieważ zapotrzebowanie na moc cieplną maleje, gdy występują największe zyski od nasłoneczniania. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że zazwyczaj w metodach przeznaczonych do obliczania zapotrzebowania na ciepło zyski od promieniowania słonecznego uwzględniane są ewentualnie jako średnia z danego miesiąca, co nie daje możliwości dokładnego odzwierciedlenia zapotrzebowania na moc cieplną i może skutkować wzrostem temperatury wewnątrz budynku, a co za tym idzie negatywnym wpływem na komfort cieplny użytkowników obiektu.



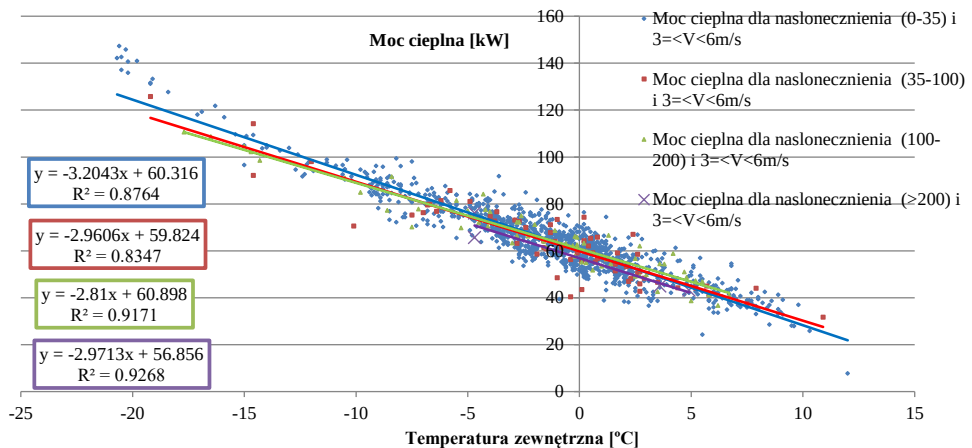
Rys. 4.14. Zapotrzebowanie mocy cieplnej w zależności od temperatury powietrza zewnętrznego i nasłonecznienia

Dlatego istotnym zagadnieniem jest poprawne uwzględnienie wpływu promieniowania słonecznego przy prognozowaniu zapotrzebowania na moc ciepłą indywidualnie dla każdego z obiektów, ponieważ można dzięki temu zmniejszyć moc ciepłą dostarczaną do układu z odpowiednim wyprzedzeniem i uzyskać oszczędności zużycia ciepła.

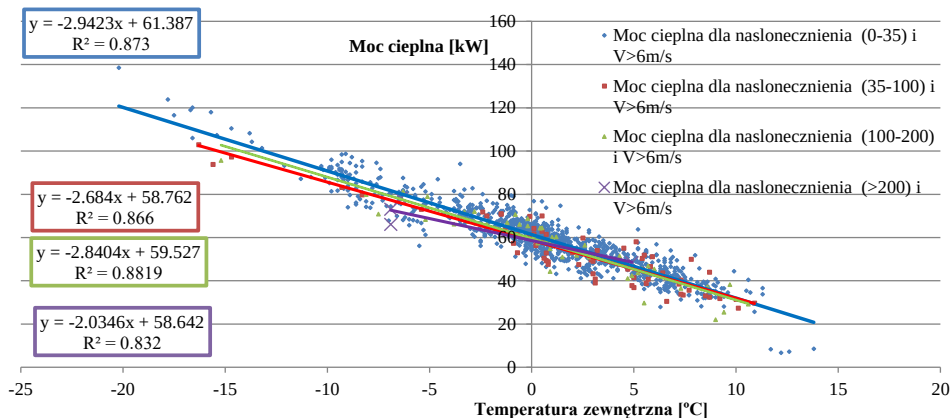
Biorąc to pod uwagę przedstawiono (rysunki 4.15–4.17) zależności aktualnej mocy cieplnej od nasłonecznienia dla budynku użyteczności publicznej nr 4 (budynek gimnazjum). Dodatkowo pokazano dla analizowanego budynku zależność mocy cieplnej o 1h do przodu (rysunek 4.18) oraz o 2h do przodu (rysunek 4.19) względem nasłonecznienia. Z kolei wszystkie współczynniki determinacji dla opracowanych równań regresji liniowej zestawiono w tabelach 4.10–4.12.



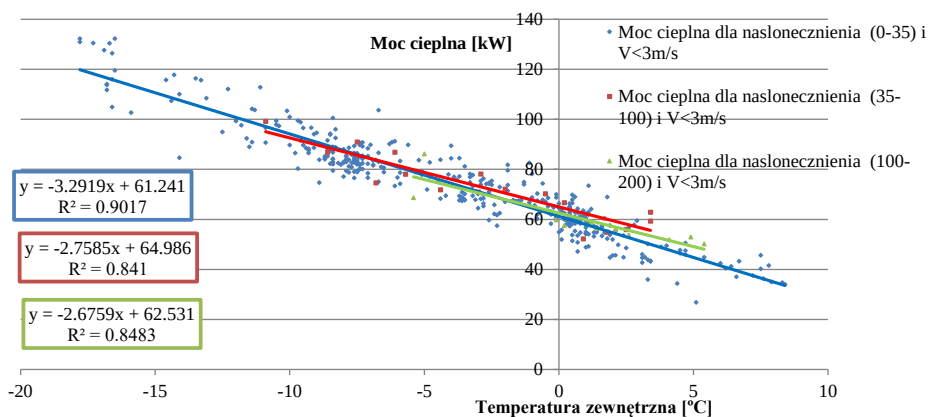
Rys. 4.15. Zależność między temperaturą zewnętrzną a aktualną mocą ciepłą dla poszczególnych zakresów nasłonecznienia i maksymalnej prędkości wiatru $v < 3 \text{ m/s}$ dla budynku użyteczności publicznej nr 4



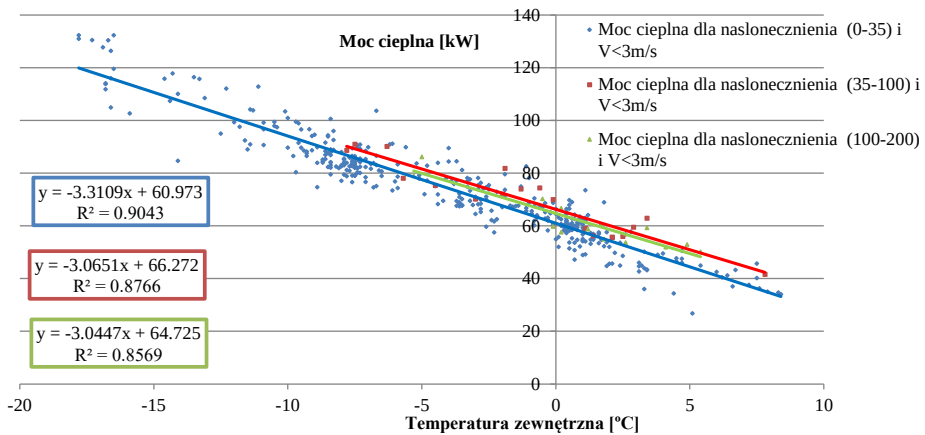
Rys. 4.16. Zależność między temperaturą zewnętrzną a aktualną mocą ciepłą dla poszczególnych zakresów nasłonecznienia i maksymalnej prędkości wiatru $3 < v < 6 \text{ m/s}$ dla budynku użyteczności publicznej nr 4



Rys. 4.17. Zależność między temperaturą zewnętrzną a aktualną mocą cieplną dla poszczególnych zakresów nasłonecznienia i maksymalnej prędkości wiatru $v > 6 \text{ m/s}$ dla budynku użyteczności publicznej nr 4



Rys. 4.18. Zależność między temperaturą zewnętrzną a mocą cieplną o 1h do przodu dla poszczególnych zakresów nasłonecznienia i maksymalnej prędkości wiatru $v < 3 \text{ m/s}$ dla budynku użyteczności publicznej nr 4



Rys. 4.19. Zależność między temperaturą zewnętrzną a mocą cieplną o 2h do przodu dla poszczególnych zakresów nasłonecznienia i maksymalnej prędkości wiatru $v < 3$ m/s dla budynku użyteczności publicznej nr 4

Tab. 4.10. Zestawienie współczynników determinacji dla budynku użyteczności publicznej nr 4 przy prędkości wiatru poniżej 3 m/s

Nasłonecznienie	Prędkość wiatru	Aktualna moc cieplna	Moc cieplna o 1h do przodu	Moc cieplna o 2h do przodu
0–35 J/cm ²	średnia	0,8850	0,8873	0,8905
	maksymalna	0,8942	0,9017	0,9043
35–100 J/cm ²	średnia	0,8696	0,8689	0,8805
	maksymalna	0,8990	0,8410	0,8766
100–200 J/cm ²	średnia	0,8962	0,8876	0,8779
	maksymalna	0,7953	0,8483	0,8569
>200 J/cm ²	średnia	0,9465	0,9711	0,9739
	maksymalna	-	-	-

Tab. 4.11. Zestawienie współczynników determinacji dla budynku użyteczności publicznej nr 4 przy prędkości wiatru $3 \leq v < 6$ m/s

Nasłonecznienie	Prędkość wiatru	Aktualna moc cieplna	Moc cieplna o 1h do przodu	Moc cieplna o 2h do przodu
0–35 J/cm ²	średnia	0,8435	0,8447	0,8459
	maksymalna	0,8764	0,8753	0,8774
35–100 J/cm ²	średnia	0,8219	0,8521	0,8311
	maksymalna	0,8347	0,8752	0,8588
100–200 J/cm ²	średnia	0,8851	0,8818	0,8639
	maksymalna	0,9171	0,8789	0,8659
>200 J/cm ²	średnia	0,9244	0,8272	0,9427
	maksymalna	0,9268	0,9977	-

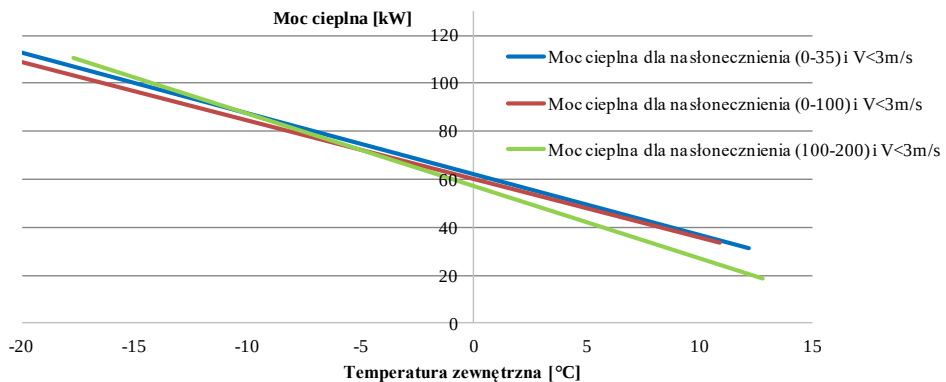
Tab. 4.12. Zestawienie współczynników determinacji dla budynku użyteczności publicznej nr 4 przy prędkości wiatru powyżej 6 m/s

Nasłonecznienie	Prędkość wiatru	Aktualna moc cieplna	Moc cieplna o 1h do przodu	Moc cieplna o 2h do przodu
0–35 J/cm ²	średnia	0,6807	0,7828	0,8027
	maksymalna	0,8730	0,8706	0,8703
35–100 J/cm ²	średnia	-	0,9569	0,5363
	maksymalna	0,8660	0,8471	0,8775
100–200 J/cm ²	średnia	-	-	-
	maksymalna	0,8819	0,8832	0,8918
>200 J/cm ²	średnia	-	-	-
	maksymalna	0,8320	0,7882	0,9333

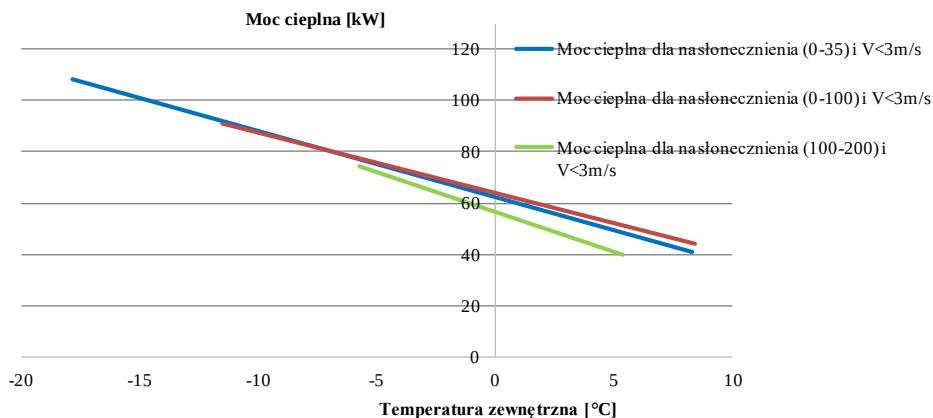
Na podstawie uzyskanych wyników (rysunki 4.15–4.17 oraz tabele 4.10–4.12) dla analizowanego budynku użyteczności publicznej nr 4 można zauważyć, że logiczne zależności (spadek zapotrzebowania mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania wraz ze wzrostem nasłonecznienia) pomiędzy zapotrzebowaniem na moc cieplną a wielkością nasłonecznienia otrzymano dla maksymalnej prędkości wiatru poniżej 3 m/s oraz w zakresie $3 \leq v < 6$ m/s, zarówno dla aktualnej mocy cieplnej, jak i o 1h do przodu. Z kolei dla maksymalnej prędkości wiatru powyżej 6 m/s oraz dla przypadku, gdzie wykorzystano moc cieplną o 2h do przodu

nie uzyskano logicznych zależności, ponieważ wraz ze wzrostem nasłonecznienia zwiększało się zapotrzebowanie na moc cieplną na potrzeby ogrzewania. Dodatkowo analizując współczynniki determinacji uzyskane dla opracowanych równań regresji liniowej dla analizowanego budynku użyteczności publicznej nr 4 można zauważyć, że wyższe wartości uzyskano w większości przypadków dla maksymalnej prędkości wiatru poniżej 3 m/s oraz aktualnej mocy cieplnej czy też mocy cieplnej o 1h do przodu względem aktualnego nasłonecznienia.

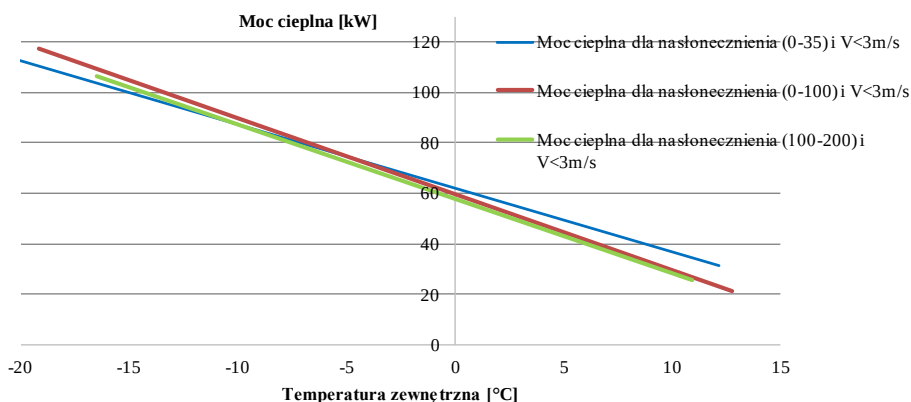
Podobne wnioski można wyciągnąć na podstawie zależności uzyskanych dla budynku wielorodzinnego nr 7, co zostało przedstawione na rysunkach 4.20–4.25 oraz w tabelach 4.13–4.15, ponieważ również w przypadku tego obiektu zaobserwowano logiczne zależności pomiędzy wzrostem nasłonecznienia a zapotrzebowaniem mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania, zarówno przy średniej, jak i maksymalnej prędkości wiatru poniżej 3 m/s. Najwyższe współczynniki determinacji dla opracowanych równań regresji liniowej uzyskano dla maksymalnej prędkości wiatru poniżej 3 m/s oraz aktualnej mocy cieplnej (tabele 4.13–4.15).



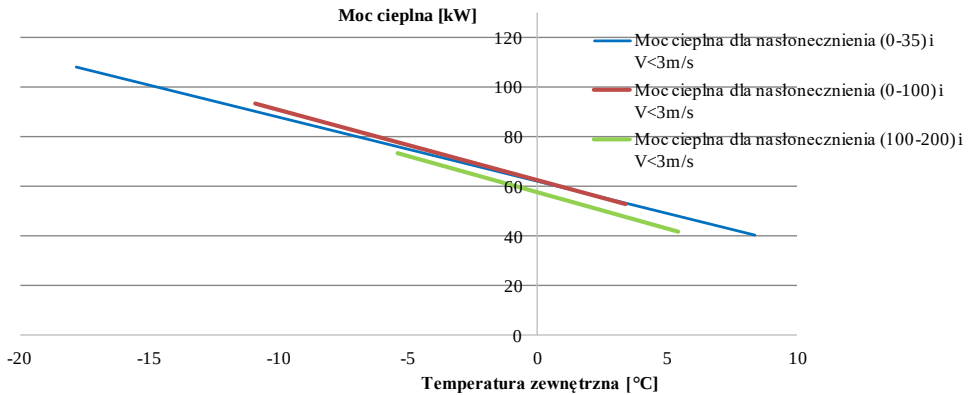
Rys. 4.20. Zależność między temperaturą zewnętrzną a aktualną mocą cieplną dla poszczególnych zakresów nasłonecznienia i średniej prędkości wiatru $v < 3$ m/s dla budynku wielorodzinnego nr 7



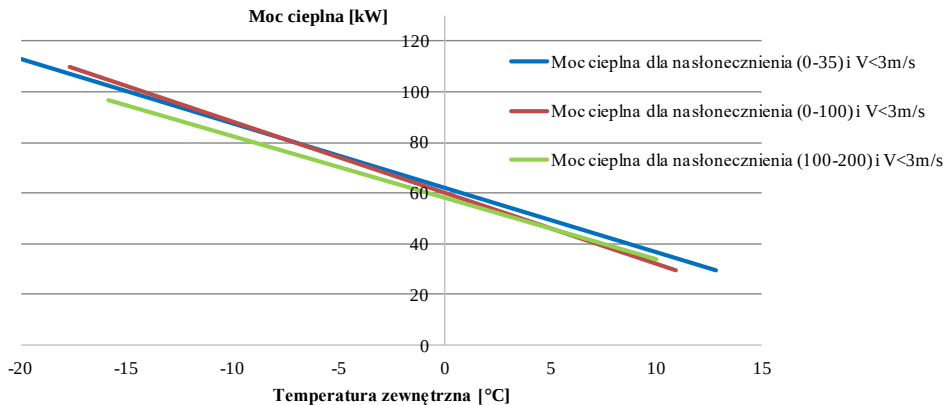
Rys. 4.21. Zależność między temperaturą zewnętrzną a aktualną mocą cieplną dla poszczególnych zakresów nasłonecznienia i maksymalnej prędkości wiatru $v < 3$ m/s dla budynku wielorodzinnego nr 7



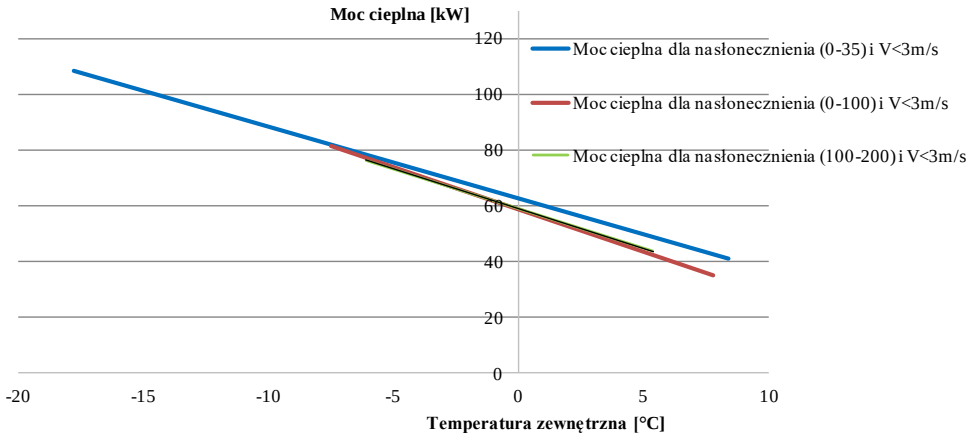
Rys. 4.22. Zależność między temperaturą zewnętrzną a mocą cieplną o 1h do przodu dla poszczególnych zakresów nasłonecznienia i średniej prędkości wiatru $v < 3$ m/s dla budynku wielorodzinnego nr 7



Rys. 4.23. Zależność między temperaturą zewnętrzną a mocą cieplną o 1h do przodu dla poszczególnych zakresów nasłonecznienia i maksymalnej prędkości wiatru $v < 3$ m/s dla budynku wielorodzinnego nr 7



Rys. 4.24. Zależność między temperaturą zewnętrzną a mocą cieplną o 2h do przodu dla poszczególnych zakresów nasłonecznienia i średniej prędkości wiatru $v < 3$ m/s dla budynku wielorodzinnego nr 7



Rys. 4.25. Zależność między temperaturą zewnętrzną a mocą cieplną o 2h do przodu dla poszczególnych zakresów nasłonecznienia i maksymalnej prędkości wiatru $v<3$ m/s dla budynku wielorodzinnego nr 7

Tab. 4.13. Zestawienie współczynników determinacji dla budynku wielorodzinnego nr 7 przy prędkości wiatru poniżej 3 m/s

Nasłonecznienie	Prędkość wiatru	Aktualna moc cieplna	Moc cieplna o 1h do przodu	Moc cieplna o 2h do przodu
0–35 J/cm ²	średnia	0,806	0,807	0,808
	maksymalna	0,831	0,834	0,834
35–100 J/cm ²	średnia	0,707	0,797	0,781
	maksymalna	0,833	0,794	0,815
100–200 J/cm ²	średnia	0,761	0,602	0,580
	maksymalna	0,773	0,522	0,491
>200 J/cm ²	średnia	0,041	0,474	0,738
	maksymalna	---	---	---

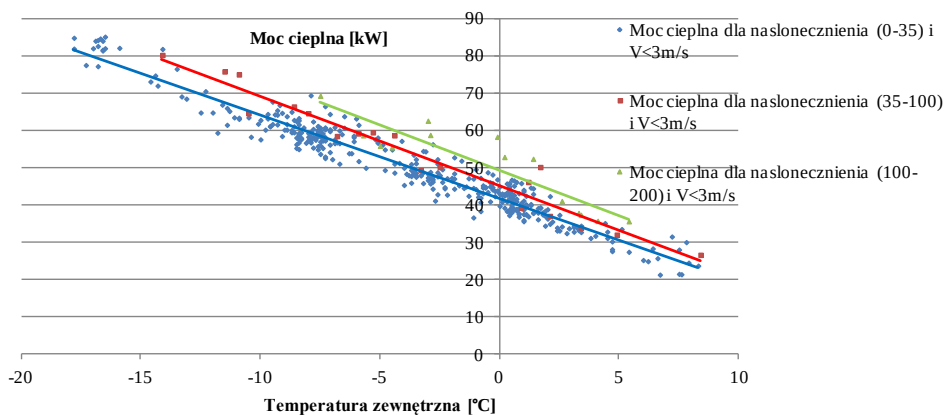
Tab. 4.14. Zestawienie współczynników determinacji dla budynku wielorodzinnego nr 7 przy prędkości wiatru $3 \leq v < 6$ m/s

Nasłonecznienie	Prędkość wiatru	Aktualna moc cieplna	Moc cieplna o 1h do przodu	Moc cieplna o 2h do przodu
0–35 J/cm ²	średnia	0,799	0,790	0,785
	maksymalna	0,775	0,771	0,771
35–100 J/cm ²	średnia	0,774	0,815	0,812
	maksymalna	0,636	0,763	0,749
100–200 J/cm ²	średnia	0,701	0,522	0,776
	maksymalna	0,780	0,664	0,618
>200 J/cm ²	średnia	0,966	0,640	0,905
	maksymalna	0,111	0,587	---

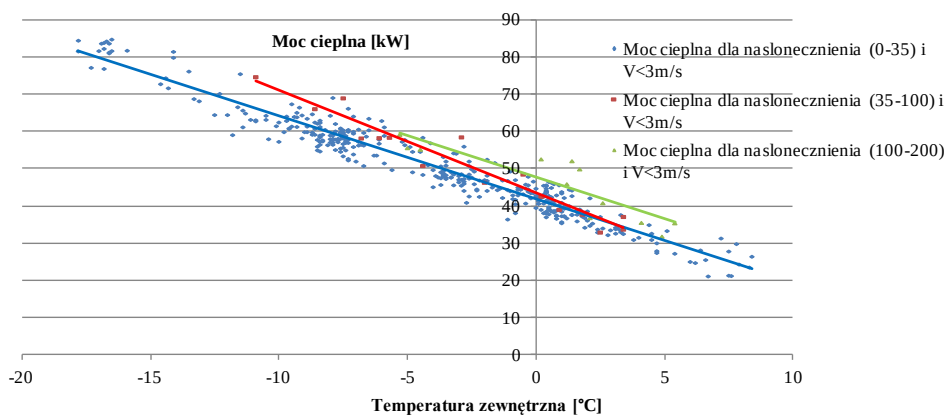
Tab. 4.15. Zestawienie współczynników determinacji dla budynku wielorodzinnego nr 7 przy prędkości wiatru powyżej 6 m/s

Nasłonecznienie	Prędkość wiatru	Aktualna moc cieplna	Moc cieplna o 1h do przodu	Moc cieplna o 2h do przodu
0–35 J/cm ²	średnia	0,378	0,263	0,262
	maksymalna	0,813	0,810	0,808
35–100 J/cm ²	średnia	---	0,242	1,000
	maksymalna	0,759	0,829	0,845
100–200 J/cm ²	średnia	---	---	---
	maksymalna	0,708	0,673	0,726
>200 J/cm ²	średnia	---	---	---
	maksymalna	0,862	0,554	0,763

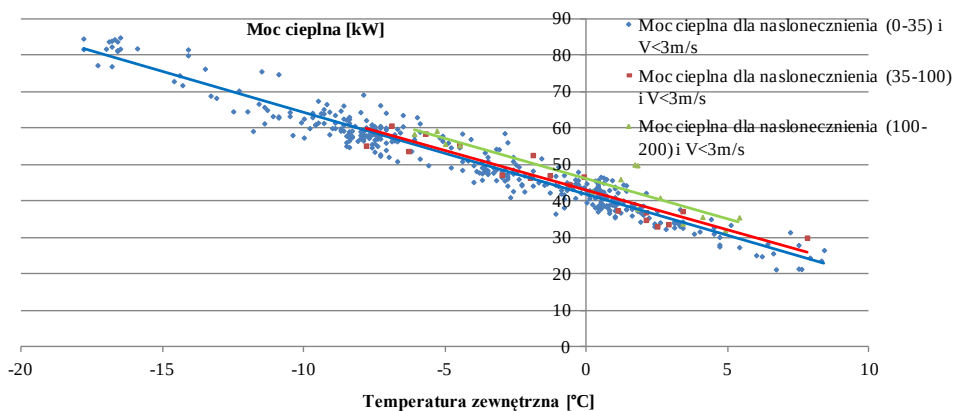
Natomiast w przypadku analizy wyników badań (rysunek 4.26–4.28), które przedstawiają wpływ nasłonecznienia na zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania dla budynku wielorodzinnego nr 8, nie stwierdzono logicznej korelacji pomiędzy wzrostem nasłonecznienia a zapotrzebowaniem mocy cieplnej, ponieważ w przypadku tego budynku wraz ze wzrostem nasłonecznienia rosło również zapotrzebowanie na moc cieplną na potrzeby ogrzewania.



Rys. 4.26. Zależność między temperaturą zewnętrzną a aktualną mocą cieplną dla poszczególnych zakresów nasłonecznienia i maksymalnej prędkości wiatru $v < 3 \text{ m/s}$ dla budynku wielorodzinnego nr 8 przy uwzględnieniu danych z całej doby



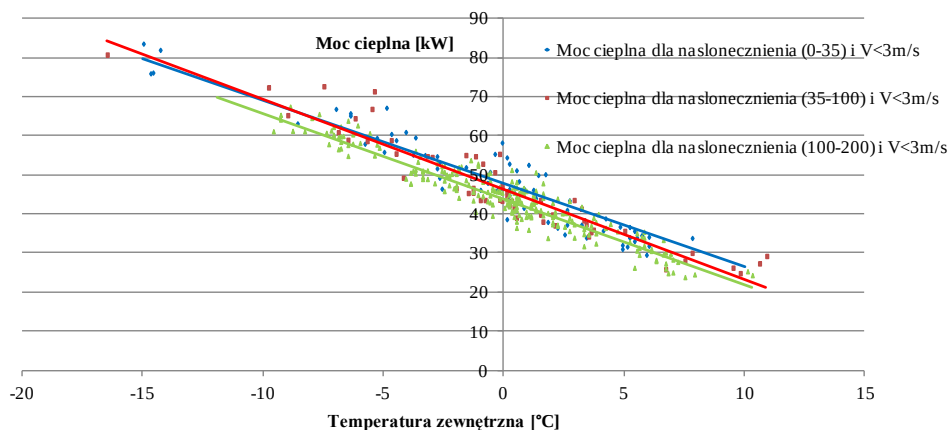
Rys. 4.27. Zależność między temperaturą zewnętrzną a mocą cieplną o 1h do przodu dla poszczególnych zakresów nasłonecznienia i maksymalnej prędkości wiatru $v < 3 \text{ m/s}$ dla budynku wielorodzinnego nr 8 przy uwzględnieniu danych z całej doby



Rys. 4.28. Zależność między temperaturą zewnętrzną a mocą cieplną o 2h do przodu dla poszczególnych zakresów nasłonecznienia i maksymalnej prędkości wiatru $v < 3$ m/s dla budynku wielorodzinnego nr 8 przy uwzględnieniu danych z całej doby

Dlatego też zawężono zakres danych (z całej doby do danych z godzin 10–14), które były wykorzystywane na potrzeby opracowania równań regresji liniowej pomiędzy temperaturą zewnętrzną a mocą cieplną dla nasłonecznienia z zakresów: $0\text{--}35$ J/cm²; $35\text{--}100$ J/cm²; $100\text{--}200$ J/cm²; >200 J/cm² przy prędkościach wiatru (zarówno średnich jak i maksymalnych) z trzech zakresów: $v < 3$ m/s, $3 \leq v < 6$ m/s oraz dla $v \geq 6$ m/s, co zostało przedstawione na rysunku 4.29. Zawężenie zakresu danych (z całej doby do danych z godzin 10–14) pozwoliło na uzyskanie logicznych zależności, które charakteryzują wpływ nasłonecznienia na zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania dla analizowanego budynku wielorodzinnego nr 8.

Najwyższe współczynniki determinacji (tabela 4.16) uzyskano również dla maksymalnej prędkości wiatru poniżej 3 m/s oraz aktualnej mocy cieplnej.



Rys. 4.29. Zależność między temperaturą zewnętrzną a aktualną mocą cieplną dla poszczególnych zakresów nasłonecznienia i maksymalnej prędkości wiatru $v < 3$ m/s dla budynku wielorodzinnego nr 8 przy uwzględnieniu danych z godzin 10-14

Tab. 4.16. Zestawienie współczynników determinacji dla budynku wielorodzinnego nr 8 przy prędkości wiatru poniżej 3 m/s przy uwzględnieniu danych z godzin 10-14

Nasłonecznienie	Prędkość wiatru	Aktualna moc cieplna	Moc cieplna o 1h do przodu	Moc cieplna o 2h do przodu
0–35 J/cm ²	średnia	0,9279	0,9296	0,926
	maksymalna	0,9411	0,9405	0,9395
35–100 J/cm ²	średnia	0,9169	0,8969	0,8919
	maksymalna	0,9474	0,9351	0,8872
100–200 J/cm ²	średnia	0,9049	0,8406	0,8359
	maksymalna	0,8172	0,7837	0,8365
>200 J/cm ²	średnia	0,8594	0,8478	0,9875
	maksymalna	---	---	---

Dzięki takiemu podejściu (zawężenie zakresu danych uwzględnianych w analizie z całej doby do danych z godzin 10–14) jeszcze bardziej minimalizuje się wpływ użytkowników układu na opracowywany model cieplny obiektu, ponieważ większość osób (szczególnie pracujących) jest poza domem w tych godzinach i nie zmienia ustawień zaworów termostatycznych, jak i nie generuje

dotatkowych wewnętrznych zysków ciepła, które mogą wpływać na dokładność opracowywanego modelu cieplnego.

Takie podejście jest warte rozważenia i uwzględniania w algorytmach obliczeniowych przy uwzględnianiu wpływu nasłonecznienia na moc cieplną, szczególnie w budynkach mieszkalnych wielorodzinnych, ponieważ w budynkach użyteczności publicznej użytkownicy przebywają i korzystają z systemu ogrzewczego przez większą część dnia, kiedy to równolegle mogą występować zyski od promieniowania słonecznego.

Podsumowując stwierdza się, że uzasadnione i rekomendowane jest wykorzystywanie tylko danych dla maksymalnej prędkości wiatru poniżej 3 m/s z godzin 10–14 (szczególnie w budynkach wielorodzinnych) w celu poprawnego uwzględniania wpływu nasłonecznienia na zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania obiektów. Dzięki takiemu podejściu obliczeniowemu minimalizuje się wpływ użytkowników systemu oraz wpływ prędkości wiatru, który w większości przypadku występuje równolegle wraz z nasłonecznieniem i zakłóca czy też uniemożliwia właściwe uwzględnienie wpływu promieniowania słonecznego na zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania obiektów.

Z kolei przy wyborze wykonywania korelacji aktualnej czy też przesuniętej (o 1h czy też 2h do przodu) mocy cieplnej względem nasłonecznienia należy wziąć pod uwagę specyfikę każdego obiektu indywidualnie, ponieważ każdy obiekt może reagować inaczej na zyski ciepła od promieniowania słonecznego, co należy uwzględnić (najlepiej eksperymentalnie) podczas wykonywania tych obliczeń. Jednak zauważono, że w przypadku budynków, najczęściej uzyskuje się logiczne oraz charakteryzujące się najwyższym współczynnikiem determinacji zależności dla aktualnej mocy cieplnej lub mocy cieplnej o 1h do przodu względem nasłonecznienia.

4.4. Model cieplny obiektu w formie równoważnej temperatury zewnętrznej

Biorąc pod uwagę fakt, że każdy z budynków czy też innych obiektów regulacji (system ciepłowniczy, podstacja cieplna) odmiennie reaguje na dane warunki pogodowe (prędkość wiatru, promieniowanie słoneczne), zasadnym jest

opracowanie rzeczywistego modelu cieplnego danego obiektu na podstawie danych eksploatacyjnych.

Zgodnie z autorską metodyką w pierwszej kolejności będą opracowane algorytmy obliczeniowe, które będą pozwalały na otrzymanie rzeczywistego modelu cieplnego danego obiektu w formie równoważnej temperatury zewnętrznej ($t_e^{rów}$) uwzględniającej wpływ prędkości wiatru (opisany w rozdziale 4.2) oraz wpływ nasłonecznienia (opisany w rozdziale 4.3).

Zatem równanie określające równoważną temperaturę zewnętrzną $t_e^{rów}$ dla danego obiektu będzie zawierało korektę z uwagi na prędkość wiatru (t_e^V) oraz korektę z uwagi na nasłonecznienie (t_e^N) zgodnie z zależnością 4.1.

$$t_e^{rów} = t_e - t_e^V + t_e^N \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4.1)$$

Ważnym aspektem przy wyznaczaniu korekty z uwagi na prędkość wiatru oraz korekty z uwagi na nasłonecznienie będzie uwzględnienie tylko danych (obejmujących zużycie ciepła i parametry meteorologiczne) pochodzących z okresów czasu, w których wpływ użytkowników systemu ogrzewczego (np. zmiana ustawień na zaworach termostatycznych) na zużycie ciepła jest zminimalizowany.

Przykład wyznaczania korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na prędkość wiatru oraz z uwagi na nasłonecznienie według autorskiej metody został opisany poniżej dla przykładowego budynku wielorodzinnego nr 9.

Korekta temperatury zewnętrznej z uwagi na prędkość wiatru

Do wyznaczenia korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na prędkość wiatru (t_e^V) należy brać pod uwagę tylko dane z godzin 23.00-4.00 dla maksymalnej prędkości wiatru. Jest to związane z faktem, że właśnie dla tych godzin i tej prędkości wiatru otrzymano największe wartości współczynnika determinacji (R^2) oraz przywołany zakres danych jest w największym stopniu logiczny, z uwagi na fakt, że wtedy w dużej mierze eliminuje się wpływ innych czynników zakłócających takich, jak nasłonecznienie czy zmiana ustawień na zaworach termostatycznych przez użytkowników (czynnik ludzki), co zostało odpowiednio uargumentowane w rozdziale 4.2.

Dlatego też w związku z potrzebą przeprowadzenia korekty w sposób jak najbardziej dokładny, należy wykorzystać równania regresji, które zostały określone dla poszczególnych prędkości wiatru ($v=1$ m/s, $v=2$ m/s,...), a nie zakresów prędkości ($v < 3$ m/s, $3 < v < 6$ m/s, $v > 6$ m/s) indywidualnie dla danego obiektu.

W pierwszej kolejności za pomocą indywidualnie (dla danego obiektu) opracowanych równań regresji dla poszczególnych prędkości wiatru oblicza się moc cieplną w zależności od temperatury zewnętrznej z zakresu $-20^{\circ}\text{C} \div +10^{\circ}\text{C}$ (przykład dla sezonu ogrzewczego w III strefie klimatycznej), co zostało przedstawione w tabeli 4.17.

Następnie indywidualnie dla danego budynku należy ocenić, które dane należy uwzględnić w dalszej analizie, czyli należy wybrać odpowiedni, logiczny (zaznaczony na zielono- patrz tabela 4.17), możliwie duży zakres danych, dla których wraz ze wzrostem prędkości wiatru rośnie moc cieplna dostarczana do obiektu.

Po wyborze wartości logicznych do dalszych obliczeń, następnym krokiem jest określenie wartości wstępnej korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na prędkość wiatru. Wartość wstępnej korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na prędkość wiatru (z) jest wielkością obniżenia temperatury zewnętrznej dla równania regresji dla mniejszej prędkości wiatru w celu uzyskania takiej samej wartości mocy cieplnej jak z równania, w którym prędkość wiatru ma już wyższą wartość. Przykład tego typu obliczeń został przedstawiony dla określenia wartości wstępnej korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na prędkość wiatru (z) dla równań regresji wyznaczonych dla prędkości $v = 1 \text{ m/s}$ i $v = 2 \text{ m/s}$ dla analizowanego budynku wielorodzinnego nr 9 (równanie 4.2).

$$z = t_e - \frac{(-1,2036 \cdot t_e + 16,882 - 15,555)}{-1,255,8} \quad (4.2)$$

gdzie:

z – wstępna korekta temperatury zewnętrznej z uwagi na prędkość wiatru [$^{\circ}\text{C}$],

t_e – temperatura zewnętrzna [$^{\circ}\text{C}$].

Według tego schematu obliczono wartość przedstawioną w trzeciej kolumnie tabeli 4.18 dla prędkości $v = 2 \text{ m/s}$. Kolejne wartości wstępnej korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na prędkość wiatru (z) obliczano w analogiczny sposób, podstawiając odpowiednią temperaturę zewnętrzną i wartości liczbowe z równań korelacyjnych dla właściwych prędkości wiatru. Należy zauważyć, że pierwsza kolumna dla prędkości wiatru $v = 1 \text{ m/s}$ jest pusta, ponieważ jest punktem odniesienia dla wstępnej korekty dla prędkości wiatru $v = 2 \text{ m/s}$.

Tab. 4.17. Zestawienie wartości mocy cieplnych obliczonych za pomocą opracowanych równań regresji liniowej dla poszczególnych prędkościami wiatru i danej temperatury zewnętrznej dla budynku wielorodzinnego nr 9

	v=1 m/s	v=2 m/s	v=3 m/s	v=4 m/s	v=5 m/s	v=6 m/s	v=7 m/s	v=8 m/s	v=9 m/s	v=10 m/s
t_e [°C]	$y = -$ 1,2558x + 15,555	$y = -$ 1,2036x + 16,882	$y = -$ 1,2882x + 17,623	$y = -$ 1,1976x + 18,401	$y = -$ 1,0793x + 18,045	$y = -$ 0,9135x + 17,296	$y = -$ 0,8913x + 17,576	$y = -$ 0,8604x + 17,776	$y = -$ 0,8212x + 18,525	$y = -$ 0,8194x + 19,109
10	2,997	4,846	4,741	6,425	7,252	8,161	8,663	9,172	10,313	10,915
9	4,2528	6,0496	6,0292	7,6226	8,3313	9,0745	9,5543	10,0324	11,1342	11,734
8	5,5086	7,2532	7,3174	8,8202	9,4106	9,988	10,4456	10,8928	11,9554	12,554
7	6,7644	8,4568	8,6056	10,0178	10,4899	10,9015	11,3369	11,7532	12,7766	13,373
6	8,0202	9,6604	9,8938	11,2154	11,5692	11,815	12,2282	12,6136	13,5978	14,193
5	9,276	10,864	11,182	12,413	12,6485	12,7285	13,1195	13,474	14,419	15,012
4	10,5318	12,0676	12,4702	13,6106	13,7278	13,642	14,0108	14,3344	15,2402	15,831
3	11,7876	13,2712	13,7584	14,8082	14,8071	14,5555	14,9021	15,1948	16,0614	16,651
2	13,0434	14,4748	15,0466	16,0058	15,8864	15,469	15,7934	16,0552	16,8826	17,470
1	14,2992	15,6784	16,3348	17,2034	16,9657	16,3825	16,6847	16,9156	17,7038	18,290
0	15,555	16,882	17,623	18,401	18,045	17,296	17,576	17,776	18,525	19,109
-1	16,8108	18,0856	18,9112	19,5986	19,1243	18,2095	18,4673	18,6364	19,3462	19,928
-2	18,0666	19,2892	20,1994	20,7962	20,2036	19,123	19,3586	19,4968	20,1674	20,748
-3	19,3224	20,4928	21,4876	21,9938	21,2829	20,0365	20,2499	20,3572	20,9886	21,567
-4	20,5782	21,6964	22,7758	23,1914	22,3622	20,95	21,1412	21,2176	21,8098	22,387
-5	21,834	22,9	24,064	24,389	23,4415	21,8635	22,0325	22,078	22,631	23,206
-6	23,0898	24,1036	25,3522	25,5866	24,5208	22,777	22,9238	22,9384	23,4522	24,025
-7	24,3456	25,3072	26,6404	26,7842	25,6001	23,6905	23,8151	23,7988	24,2734	24,845
-8	25,6014	26,5108	27,9286	27,9818	26,6794	24,604	24,7064	24,6592	25,0946	25,664
-9	26,8572	27,7144	29,2168	29,1794	27,7587	25,5175	25,5977	25,5196	25,9158	26,484
-10	28,113	28,918	30,505	30,377	28,838	26,431	26,489	26,38	26,737	27,303
-11	29,3688	30,1216	31,7932	31,5746	29,9173	27,3445	27,3803	27,2404	27,5582	28,122
-12	30,6246	31,3252	33,0814	32,7722	30,9966	28,258	28,2716	28,1008	28,3794	28,942
-13	31,8804	32,5288	34,3696	33,9698	32,0759	29,1715	29,1629	28,9612	29,2006	29,761
-14	33,1362	33,7324	35,6578	35,1674	33,1552	30,085	30,0542	29,8216	30,0218	30,581
-15	34,392	34,936	36,946	36,365	34,2345	30,9985	30,9455	30,682	30,843	31,400
-16	35,6478	36,1396	38,2342	37,5626	35,3138	31,912	31,8368	31,5424	31,6642	32,219
-17	36,9036	37,3432	39,5224	38,7602	36,3931	32,8255	32,7281	32,4028	32,4854	33,039
-18	38,1594	38,5468	40,8106	39,9578	37,4724	33,739	33,6194	33,2632	33,3066	33,858
-19	39,4152	39,7504	42,0988	41,1554	38,5517	34,6525	34,5107	34,1236	34,1278	34,678
-20	40,671	40,954	43,387	42,353	39,631	35,566	35,402	34,984	34,949	35,497

Tab. 4.18. Wartości wstępnej korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na prędkość wiatru (z) dla budynku wielorodzinnego nr 9

Prędkość wiatru	$v=1$ m/s	$v=2$ m/s	$v=3$ m/s	$v=4$ m/s
t_e [°C]	$y = -1,2558x + 15,555$	$y = -1,2036x + 16,882$	$y = -1,2882x + 17,623$	$y = -1,1976x + 18,401$
2		1,13983118	0,475075	0,744605
1		1,09826405	0,545364	0,674274
0		1,05669693	0,615653	0,603943
-1		1,0151298	0,685942	0,533613
-2		0,97356267	0,756231	0,463282
-3		0,93199554	0,82652	0,392951
-4		0,89042841	0,89681	0,322621
-5		0,84886128	0,967099	0,25229
-6		0,80729416	1,037388	0,181959
-7		0,76572703	1,107677	0,111629
-8		0,7241599	1,177966	0,041298

Kolejnym krokiem jest wyznaczenie sumy wartości wstępnych korekt temperatury zewnętrznej z uwagi na prędkość wiatru, czyli wartość wstępnej korekty dla niższej prędkości wiatru należy dodać do wartości wstępnej korekty dla wyższej prędkości wiatru, co zostało przedstawione w tabeli 4.19. Zatem wartości w kolumnie drugiej dla wiatru o prędkości $v = 2$ m/s przepisano z tabeli 4.18, a wartość w kolumnie 3 jest sumą wartości korekty niższej, czyli dla $v = 2$ m/s i wartości korekty wyższej $v = 3$ m/s z tabeli 4.18.

Tab. 4.19. Suma wartości wstępnej korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na prędkość wiatru (z) dla budynku wielorodzinnego nr 9

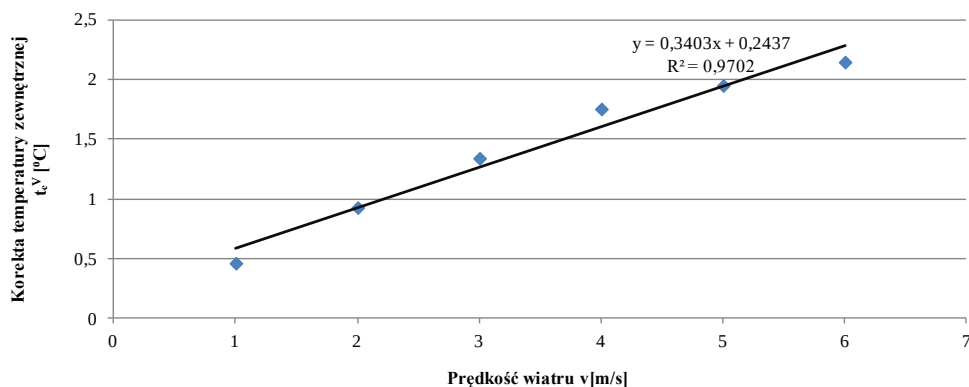
t_e [°C]	$v = 2$ m/s	$v = 3$ m/s	$v = 4$ m/s
2	1,139831	1,614906	2,359511
1	1,098264	1,643628	2,317902
0	1,056697	1,67235	2,276293
-1	1,01513	1,701072	2,234685
-2	0,973563	1,729794	2,193076
-3	0,931996	1,758516	2,151467
-4	0,890428	1,787238	2,109859
-5	0,848861	1,81596	2,06825
-6	0,807294	1,844682	2,026641
-7	0,765727	1,873404	1,985033
-8	0,72416	1,902126	1,943424

W ostatnim etapie, gdy z uwagi na wybór logicznych danych nie uwzględniono jakiegś prędkości wiatru, to poprzez interpolację możliwe jest utworzenie większej liczby danych do analizy, co zostało przedstawione w tabeli 4.20.

Z otrzymanych wstępnych wartości korekt temperatury zewnętrznej z uwagi na prędkość wiatru wyznacza się średnią dla poszczególnych wartości prędkości wiatru (ostatni wiersz w tabeli 4.20), na podstawie których sporządza się wykres punktowy zależności korekty temperatury zewnętrznej od prędkości wiatru (rysunek 4.30).

Tab. 4.20. Wyznaczenie średnich wartości wstępnej korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na prędkość wiatru (v) dla budynku wielorodzinnego nr 9

t_e [°C]	$v=1,5$ m/s	$v=2$ m/s	$v=2,5$ m/s	$v=3$ m/s	$v=3,5$ m/s	$v=4$ m/s
2	0,569	1,139	1,377	1,614	1,987	2,359
1	0,549	1,098	1,370	1,643	1,980	2,317
0	0,528	1,056	1,364	1,672	1,974	2,276
-1	0,507	1,015	1,358	1,701	1,967	2,234
-2	0,486	0,973	1,351	1,729	1,961	2,193
-3	0,465	0,931	1,345	1,758	1,954	2,151
-4	0,445	0,890	1,338	1,787	1,948	2,109
-5	0,424	0,848	1,332	1,815	1,942	2,068
-6	0,403	0,807	1,325	1,844	1,935	2,026
-7	0,382	0,765	1,319	1,873	1,929	1,985
-8	0,362	0,724	1,313	1,902	1,922	1,943
Średnia	0,465	0,931	1,345	1,758	1,954	2,151



Rys. 4.30. Wyznaczenie równania obliczeniowego korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na prędkość wiatru (t_e^V) dla budynku wielorodzinnego nr 9

Przedstawione na rysunku 4.30 równanie regresji liniowej, które charakteryzuje się współczynnikiem determinacji $R^2=0,9702$, może służyć (po podstawieniu prędkości wiatru za wartość x) do wyznaczenia korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na prędkość wiatru dla analizowanego budynku wielorodzinnego nr 9. Należy jednak podkreślić, że tego typu zależności należy wyznaczać indywidualnie dla każdego obiektu, ponieważ każdy obiekt może inaczej reagować na czynnik zewnętrzny, jakim jest prędkość wiatru.

Korekta temperatury zewnętrznej z uwagi na nasłonecznienie

Do wyznaczenia korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na nasłonecznienie (t_e^N) należy brać pod uwagę tylko dane dla maksymalnej prędkości wiatru poniżej 3 m/s, najlepiej z godzin 10–14 (szczególnie w budynkach wielorodzinnych) lub z całej doby w celu poprawnego uwzględnienia wpływu nasłonecznienia na zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania obiektów przy minimalizacji wpływu innych czynników zakłócających (prędkość wiatru).

Z kolei w przypadku drugiego aspektu, czyli wyboru czy przy wyznaczaniu równań regresji liniowej korelować nasłonecznienie z aktualną mocą cieplną czy też z mocą cieplną przesuniętą o 1h czy też 2h do przodu, należy sprawdzić to indywidualnie dla każdego z analizowanych obiektów, za pomocą którego wariantu otrzymuje się bardziej logiczne zależności (wraz ze wzrostem nasłonecznienia maleje moc cieplna na potrzeby ogrzewania) przy możliwie wysokich współczynnikach determinacji opracowywanych równań.

Szczegółowe informacje odnośnie tych dwóch aspektów zostały przedstawione w rozdziale 4.3.

Dlatego też do wyznaczenia korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na nasłonecznienie (t_e^N) w sposób jak najbardziej dokładny należy wykorzystać równania regresji, które zostały opracowane dla poszczególnych zakresów nasłonecznienia (0–35 J/cm²; 35–100 J/cm²; 100–200 J/cm²; >200 J/cm²) i maksymalnej prędkości wiatru poniżej 3 m/s.

Podobnie jak miało to miejsce w przypadku wyznaczania korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na prędkość wiatru, w pierwszej kolejności za pomocą indywidualnie (dla danego obiektu) opracowanych równań regresji dla poszczególnych zakresów nasłonecznienia oblicza się moc cieplną w zależności od temperatury zewnętrznej z zakresu -20°C ÷ +10°C (przykład dla sezonu ogrzewczego w III strefie klimatycznej), co zostało przedstawione w tabeli 4.21.

Tab. 4.21. Zestawienie wartości mocy cieplnych obliczonych za pomocą opracowanych równań regresji liniowej dla poszczególnych zakresów nasłonecznienia i danej temperatury zewnętrznej dla budynku wielorodzinnego nr 9

Nasłonecznienie	0–35 J/cm ²	35–100 J/cm ²	100–200 J/cm ²	>200 J/cm ²
t _e [°C]	$y = -1,18x + 17,808$	$y = -0,9205x + 17,38$	$y = -0,8768x + 18,071$	$y = -0,544x + 15,094$
10	6,008	8,175	9,303	9,654
9	7,188	9,0955	10,1798	10,198
8	8,368	10,016	11,0566	10,742
7	9,548	10,9365	11,9334	11,286
6	10,728	11,857	12,8102	11,83
5	11,908	12,7775	13,687	12,374
4	13,088	13,698	14,5638	12,918
3	14,268	14,6185	15,4406	13,462
2	15,448	15,539	16,3174	14,006
1	16,628	16,4595	17,1942	14,55
0	17,808	17,38	18,071	15,094
-1	18,988	18,3005	18,9478	15,638
-2	20,168	19,221	19,8246	16,182
-3	21,348	20,1415	20,7014	16,726
-4	22,528	21,062	21,5782	17,27
-5	23,708	21,9825	22,455	17,814
-6	24,888	22,903	23,3318	18,358
-7	26,068	23,8235	24,2086	18,902
-8	27,248	24,744	25,0854	19,446
-9	28,428	25,6645	25,9622	19,99
-10	29,608	26,585	26,839	20,534
-11	30,788	27,5055	27,7158	21,078
-12	31,968	28,426	28,5926	21,622
-13	33,148	29,3465	29,4694	22,166
-14	34,328	30,267	30,3462	22,71
-15	35,508	31,1875	31,223	23,254
-16	36,688	32,108	32,0998	23,798
-17	37,868	33,0285	32,9766	24,342
-18	39,048	33,949	33,8534	24,886
-19	40,228	34,8695	34,7302	25,43
-20	41,408	35,79	35,607	25,974

Kolejnym krokiem jest również wybór danych logicznych, które uwzględnią się w dalszej analizie i polega on na określeniu możliwie dużego zakresu danych (zaznaczone na zielono w tabeli 4.21), dla których wraz ze wzrostem nasłonecznienia obniża się moc cieplna dostarczana do obiektu na potrzeby ogrzewania.

Po wyborze odpowiedniego zakresu wartości logicznych oblicza się wartość wstępnej korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na nasłonecznienie. Wartość wstępnej korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na nasłonecznienie (n) jest wielkością podwyższenia temperatury zewnętrznej dla równania regresji dla niższego zakresu nasłonecznienia w celu uzyskania takiej samej wartości mocy cieplnej jak z równania, w którym nasłonecznienie jest już z wyższego zakresu. Przykładowo dla analizowanego budynku wielorodzinnego nr 9 przedstawiono sposób wyznaczania wartości wstępnej korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na nasłonecznienie (n) dla analizowanego budynku wielorodzinnego nr 9 (równanie 4.3) przy wykorzystaniu równań regresji liniowej wyznaczonych dla nasłonecznienia w zakresach 0–35 J/cm² i 35–100 J/cm².

$$n = \frac{(-0,9205 \cdot t_e + 17,38 - 17,808)}{-1,18} - t_e \quad (4.3)$$

gdzie:

n – wstępna korekta temperatury zewnętrznej z uwagi na nasłonecznienie [°C],

t_e – temperatura zewnętrzna [°C].

Przy wykorzystaniu powyższego równania obliczono wartości przedstawione w kolumnie 3 w tabeli 4.22 dla wielkości nasłonecznienia z zakresu 35–100 J/cm². Pozostałe wartości (dla zakresu nasłonecznienia powyżej 200 J/cm²) wstępnej korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na nasłonecznienie (n) obliczano w analogiczny sposób.

W kolumnie 2 w tabeli 4.22 nie ma danych dla zakresu nasłonecznienia 0–35 J/cm², ponieważ dane w niej zawarte były punktem odniesienia dla wielkości nasłonecznienia 35–100 J/cm². Z kolei wartości z kolumny 3 dla wielkości nasłonecznienia 35–100 J/cm² są punktem odniesienia dla wielkości nasłonecznienia powyżej 200 J/cm².

Tab. 4.22. Wartości wstępnej korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na nasłonecznienie (n) dla budynku wielorodzinnego nr 9

Nasłonecznienie	0–35 J/cm ²	35–100 J/cm ²	100–200 J/cm ²	>200 J/cm ²
t_e [°C]	$y = -1,18x + 17,808$	$y = -0,9205x + 17,38$	$y = -0,8768x + 18,071$	$y = -0,544x + 15,094$
-6		1,68220339		4,937533949
-7		1,902118644		5,346550788
-8		2,122033898		5,755567626
-9		2,341949153		6,164584465
-10		2,561864407		6,573601304
-11		2,781779661		6,982618142
-12		3,001694915		7,391634981
-13		3,221610169		7,80065182
-14		3,441525424		8,209668658
-15		3,661440678		8,618685497
-16		3,881355932		9,027702336
-17		4,101271186		9,436719174
-18		4,321186441		9,845736013
-19		4,541101695		10,25475285
-20		4,761016949		10,66376969

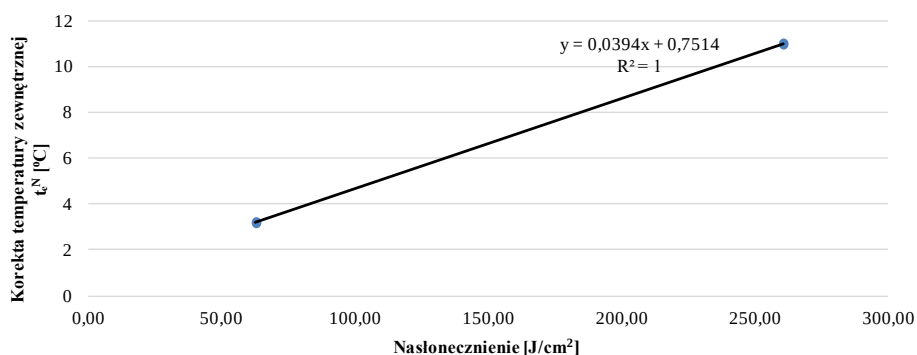
Kolejnym krokiem (analogicznie jak w przypadku opracowywania korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na prędkość wiatru) jest wyznaczenie sumy wartości wstępnych korekt temperatury zewnętrznej z uwagi na nasłonecznienie, czyli wartość wstępnej korekty dla niższego zakresu nasłonecznienia należy dodać do wartości wstępnej korekty dla wyższego zakresu nasłonecznienia, co zostało przedstawione w tabeli 4.23.

Następnie z otrzymanych wstępnych wartości korekt temperatury zewnętrznej z uwagi na nasłonecznienie wyznacza się średnią dla poszczególnych zakresów nasłonecznienia (ostatni wiersz w tabeli 4.23), na podstawie których sporządza się wykres punktowy zależności korekty temperatury zewnętrznej od nasłonecznienia (rysunek 4.31). Na potrzeby sporządzenia tego wykresu punktowego należy określić również średnie wartości nasłonecznienia w poszczególnych jego zakresach biorąc pod uwagę dane, na podstawie których wyznaczono wcześniej analizowane równania korelacyjne.

Tab. 4.23. Suma wartości wstępnej korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na nasłonecznienie (n) dla budynku wielorodzinnego nr 9

Nasłonecznienie	0–35 J/cm ²	35–100 J/cm ²	100–200 J/cm ²	>200 J/cm ²
t_e [°C]	$y = -1,18x + 17,808$	$y = -0,9205x + 17,38$	$y = -0,8768x + 18,071$	$y = -0,544x + 15,094$
-6		1,682		6,619737339
-7		1,902		7,248669432
-8		2,122033898		7,877601525
-9		2,341949153		8,506533618
-10		2,561864407		9,13546571
-11		2,781779661		9,764397803
-12		3,001694915		10,3933299
-13		3,221610169		11,02226199
-14		3,441525424		11,65119408
-15		3,661440678		12,28012617
-16		3,881355932		12,90905827
-17		4,101271186		13,53799036
-18		4,321186441		14,16692245
-19		4,541101695		14,79585455
-20		4,761016949		15,42478664
Średnia		3,221610169		11,02226199

Dla analizowanego budynku wielorodzinnego nr 9 średnie nasłonecznienie było na poziomie 3,2 J/cm², 62,7 J/cm², 149,9 J/cm² oraz 260,7 J/cm², odpowiednio dla zakresu 0–35 J/cm², 35–100 J/cm², 100–200 J/cm² oraz powyżej 200 J/cm².

**Rys. 4.31.** Wyznaczenie równania obliczeniowego korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na nasłonecznienie (t_e^N) dla budynku wielorodzinnego nr 9

Dzięki wyznaczeniu korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na prędkość wiatru (t_e^V) oraz z uwagi na nasłonecznienie (t_e^N), można opracować zależność pozwalającą na wyznaczenie równoważnej temperatury zewnętrznej ($t_e^{rów}$) zgodnie z zależnością 4.1.

Dlatego dla analizowanego budynku wielorodzinnego nr 9 zależność na określenie równoważnej temperatury zewnętrznej będzie miała postać równania 4.4.

$$t_e^{rów} = t_e - (0,3403 \cdot v + 0,2437) + (0,0394 \cdot N + 0,7514) [^{\circ}\text{C}] \quad (4.4)$$

gdzie:

t_e – temperatura zewnętrzna, [$^{\circ}\text{C}$],

v – maksymalna prędkość wiatru, [m/s],

N – nasłonecznienie, [J/cm^2].

Zależność ta pozwala na uwzględnienie wpływu czynników zewnętrznych (temperatura zewnętrzna, prędkość wiatru, nasłonecznienie) w formie modelu cieplnego obiektu jakim jest $t_e^{rów}$ na potrzeby późniejszego prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną na potrzeby ogrzewania indywidualnie dla danego obiektu.

Z uwagi na fakt, że przy opracowywaniu tego modelu cieplnego dla konkretnego obiektu bazuje się na rzeczywistych, aktualnych wynikach pomiarów lub rzeczywistych, archiwalnych danych pomiarowych oraz uwzględnia się w obliczeniach tylko odpowiednio wybrane dane (minimalizacja wpływu użytkowników systemu ogrzewczego), to indywidualnie opracowany model cieplny budynku, podstacji lub systemu ciepłowniczego będzie charakteryzował się wysoką dokładnością.

Jednak sam model cieplny w formie $t_e^{rów}$ to za mało, aby poprawnie i możliwie dokładnie określić prognozę zapotrzebowania na moc cieplną na potrzeby ogrzewania, ponieważ indywidualne zachowania i preferencje użytkowników powinny być również odpowiednio uwzględnione, co zostało opisane w ramach rozdziału 4.5.

4.5. Wpływ użytkowników na zapotrzebowanie na moc cieplną

Przedstawione w niniejszym rozdziale wyniki prac badawczych są ukierunkowane na przedstawienie sposobu określenia wpływu zachowań i preferencji użytkowników systemu ogrzewczego na zużycie ciepła dostarczanego do danego obiektu (budynek, podstacja ciepła czy też system ciepłowniczy) na potrzeby ogrzewania. Ma to na celu opracowanie uniwersalnych algorytmów obliczeniowych na potrzeby wyznaczenia i późniejszego wyboru (indywidualnie dla każdego z obiektów) odpowiedniego profilu równoważnej temperatury wewnętrznej ($t_i^{rów}$), która będzie uwzględniała aspekt związany z użytkownikami systemu przy prognozowaniu zużycia ciepła na potrzeby ogrzewania.

Na potrzeby wyznaczenia profili równoważnej temperatury wewnętrznej należy w pierwszej kolejności wyznaczyć eksperymentalnie rzeczywisty współczynnik strat ciepła H [kW/K], który jest charakterystyczny dla danego obiektu. Współczynnik ten można określić przy wykorzystaniu równania 4.5 oraz na podstawie danych archiwalnych odnośnie rzeczywistego zużycia ciepła na potrzeby ogrzewania najlepiej dla godzin nocnych (23–4), w których wpływ zmiennych zachowań użytkowników jest zminimalizowany (patrz rozdziały 4.2 oraz 4.3) oraz przy wykorzystaniu rzeczywistego modelu cieplnego danego obiektu ($t_e^{rów}$), dla którego metodyka została podana w rozdziale 4.4.

Współczynnik strat ciepła H [kW/K] można również odczytać z dokumentacji projektowej czy też związanej z audytem energetycznym (w przypadku budynku, który podlegały termomodernizacji). Jednak ten sposób nie jest rekomendowany do zastosowania, ponieważ nie uwzględnia rzeczywistej charakterystyki cieplnej obiektu już wykonanego i eksploatowanego.

Zatem rzeczywisty współczynnik strat ciepła H rekomenduje się wyznaczać przy wykorzystaniu równania 4.5.

$$H = \frac{Q_{RZ}}{(t_i - t_e^{rów})} \quad \left[\frac{kW}{K} \right] \quad (4.5)$$

gdzie:

Q_{RZ} – średnia, rzeczywista moc cieplna dostarczona do danego obiektu w ciągu danej godziny, [kW],

t_i – temperatura wewnętrzna przyjmowana do obliczeń, $t_i = 20^\circ\text{C}$,

$t_e^{rów}$ – równoważna temperatura zewnętrzna obliczona dla danej godziny według zależności opracowanej indywidualnie dla danego obiektu, $[\text{C}]$.

W tabeli 4.24 przedstawiono przykładowe zestawienie danych, które są uwzględniane przy określaniu współczynnika strat ciepła indywidualnie dla danego obiektu.

Tab. 4.24. Przykładowe obliczenia współczynnika strat ciepła H dla danego obiektu

Data odczytu	Q_{RZ} [kW]	t_e [°C]	Podmuch v [m/s]	Nasłonecznienie N [J/cm ²]	Rów. temp. zew. $t_e^{rów}$ [°C]	Temp. wew. t_i [°C]	Wsp. strat ciepła H [kW/K]
2017-02-05 09:00:04	18,40	1,1	7,8	16	-1,21	20	$18,40/[20-(-1,21)] = 0,867$
2017-02-05 10:00:04	17,20	1,4	6,8	34	0,26	20	$17,20/(20-0,26) = 0,871$
2017-02-05 11:00:04	16,50	1,4	6,8	60	1,02	20	$16,50/(20-1,02) = 0,869$

Z tak określonych (tabela 4.24) wartości współczynnika strat ciepła dla danego obiektu w poszczególnych dniach i godzinach całego sezonu ogrzewczego, należy wybrać odpowiedni zakres wyników, na podstawie których wyznacza się średni współczynnik strat ciepła dla danego obiektu (H_{sr}) i uwzględnia się go w dalszych analizach. Dlatego też w celu zminimalizowania wpływu użytkowników na wartość tego współczynnika, rekomendowane jest jego uśrednienie z godzin 23–4 i miesięcy najlepiej od stycznia do lutego włącznie, czyli danych z pełni sezonu ogrzewczego, kiedy to instalacja ogrzewcza zasilana jest w sposób ciągły.

Należy tu jednak podkreślić, że wartość średniego współczynnika strat ciepła dla danego obiektu (H_{sr}) należy zaktualizować w przypadku przeprowadzenia w obiekcie prac modernizacyjnych w zakresie obudowy budynku (np. termomodernizacja) czy też wewnętrznej instalacji ogrzewczej (np. izolacja przewodów przesyłowych), które to mogą wpływać na wartość projektowego obciążenia cieplnego i następnie na aktualne, jak i prognozowe zapotrzebowanie na moc cieplną podczas eksploatacji danego obiektu.

Po wyznaczeniu wartości średniego współczynnika strat ciepła indywidualnie dla danego obiektu (H_{sr}) można określić (przy wykorzystaniu równania 4.6) wartości godzinowe równoważnej temperatury wewnętrznej ($t_i^{rów}$). Przyjmuje się, że równoważna temperatura wewnętrzna ($t_i^{rów}$) będzie pozwalała określić i następnie uwzględnić (przy sterowaniu prognozowym) wpływ zachowań

mieszkańców związanych z preferowanym poziomem temperatury wewnętrznej oraz wewnętrznymi zyskami ciepła na zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania.

Nie należy jednak utożsamiać w sposób bezpośredni wartości ($t_i^{rów}$) z średnią wartością temperatury powietrza wewnętrznego w poszczególnych mieszkaniach/ czy też lokalach usługowych w danym obiekcie, którą można by uzyskać poprzez uśrednienie odczytów z zainstalowanych czujników temperatury powietrza w poszczególnych pomieszczeniach ogrzewanych. Jest to bowiem parametr ($t_i^{rów}$), który pozwala w sposób pośredni określić wpływ czynników wewnętrznych związanych z zachowaniami użytkowników systemu ogrzewczego na zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania.

$$t_i^{rów} = \frac{Q_{RZ}}{H_{sr}} + t_e^{rów} \quad [^{\circ}C] \quad (4.6)$$

gdzie:

Q_{RZ} – średnia, rzeczywista moc cieplna dostarczona do danego obiektu w ciągu danej godziny, [kW],

H_{sr} – średni współczynnik strat ciepła obliczony indywidualnie dla danego obiektu, [kW/K],

$t_e^{rów}$ – równoważna temperatura zewnętrzna obliczona dla danej godziny według zależności opracowanej indywidualnie dla danego obiektu, [$^{\circ}C$].

W tabeli 4.25 przedstawiono przykładowe zestawienie danych, które są uwzględniane przy określaniu równoważnej temperatury wewnętrznej ($t_i^{rów}$) indywidualnie dla danego obiektu.

Tab. 4.25. Przykładowe obliczenia równoważnej temperatury wewnętrznej ($t_i^{rów}$) dla danego obiektu

Data odczytu	Q_{RZ} [kW]	t_e [$^{\circ}C$]	Rów. temp. zew. $t_e^{rów}$ [$^{\circ}C$]	Wsp. strat ciepła H [kW/K]	Średni wsp. strat ciepła H_{sr} [kW/K]	Równoważna temperatu- ra wewnętrzna $t_i^{rów}$ [$^{\circ}C$]
2017-02-05 09:00:04	18,40	1,1	-1,21	0,867	0,921	18,40/0,921+(-1,21)=18,7
2017-02-05 10:00:04	17,20	1,4	0,26	0,871		17,20/0,921+0,26=18,9
2017-02-05 11:00:04	16,50	1,4	1,02	0,869		16,50/0,921+1,02=18,9

Na podstawie tak określonych (tabela 4.25) godzinowych wartości równoważnej temperatury wewnętrznej można opracować profil godzinowy równoważnej temperatury wewnętrznej, który zostanie następnie uwzględniony przy prognozowaniu zapotrzebowania na moc cieplną na potrzeby ogrzewania przy pomocy równania 4.7.

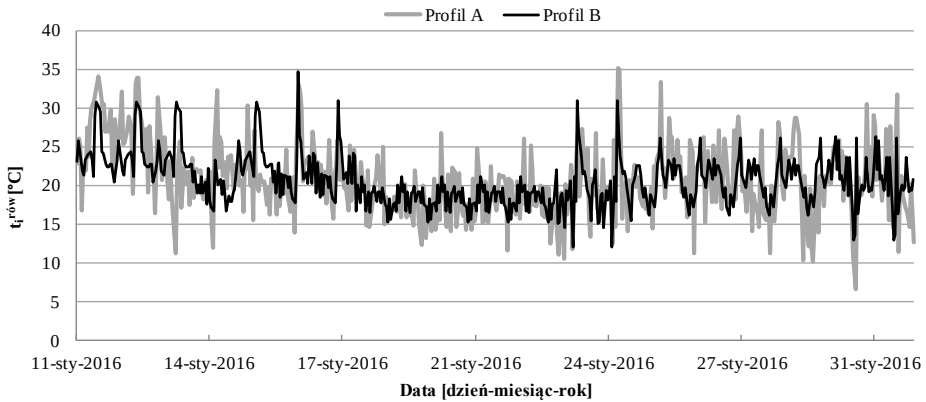
Jednak preferencje i zachowania użytkowników obiektów mogą być zmienne zarówno w trakcie doby, tygodnia czy też sezonu ogrzewczego, dlatego też zaproponowano, aby przy wyborze godzinowego profilu $t_i^{rów}$ (uwzględnianego przy prognozowaniu zapotrzebowania mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania – równanie 4.7) rozważać pięć przypadków:

- profil A: dla każdego dnia tygodnia niezależnie (poniedziałek, wtorek, środa, itd.);
- profil B: średni dla dnia podczas dni pracy (poniedziałek–piątek) oraz średni dla dnia podczas weekendu (sobota–niedziela);
- profil C: uśredniony z 1 doby wstecz;
- profil D: uśredniony z 2 dób wstecz;
- profil E: stała wartość temperatury wewnętrznej na poziomie 20°C.

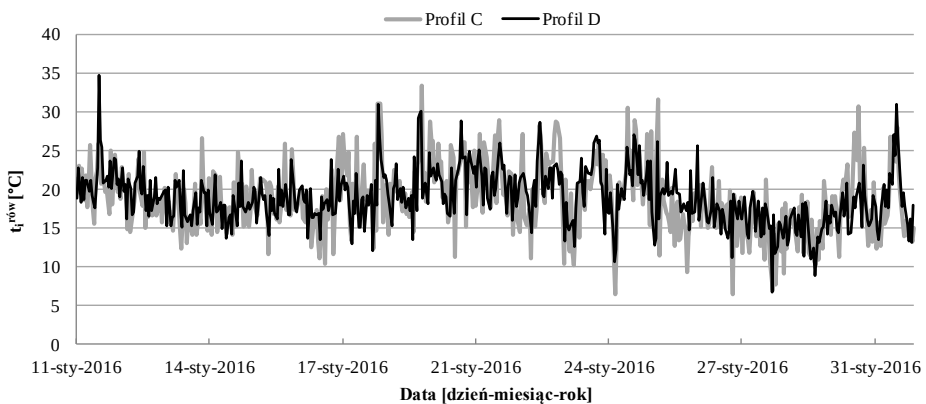
Przykładowo godzinową wartość równoważnej temperatury wewnętrznej ($t_i^{rów}$) przy prognozowaniu zapotrzebowania mocy cieplnej w piątek 15 marca o godzinie 11 przyjmuje się jako:

- dla profilu A: $t_i^{rów}$ o 7 dni wcześniej czyli z piątku 8 marca z godziny 11;
- dla profilu B: $t_i^{rów}$ uśrednione z godziny 11 w dni robocze z tygodnia wcześniej (czyli od 4 marca do 8 marca);
- dla profilu C: $t_i^{rów}$ z godziny 11 z poprzedniego dnia (czyli 14 marca);
- profil D: $t_i^{rów}$ uśrednione z godziny 11 z dwóch poprzednich dni (czyli 13 marca oraz 14 marca).

Zakłada się, że wybór odpowiedniego profilu równoważnej temperatury wewnętrznej, czyli pozwalającego na uzyskanie najbardziej dokładnej prognozy zużycia ciepła, będzie przeprowadzany w sposób automatyczny za pomocą odpowiednich algorytmów obliczeniowych indywidualnie dla każdego z obiektów. Przykładowe profile $t_i^{rów}$, które były wykorzystywane na potrzeby prognozowania zapotrzebowania mocy cieplnej w budynku wielorodzinnym nr 1, zostały przedstawione na rysunkach 4.32 oraz rysunku 4.33.

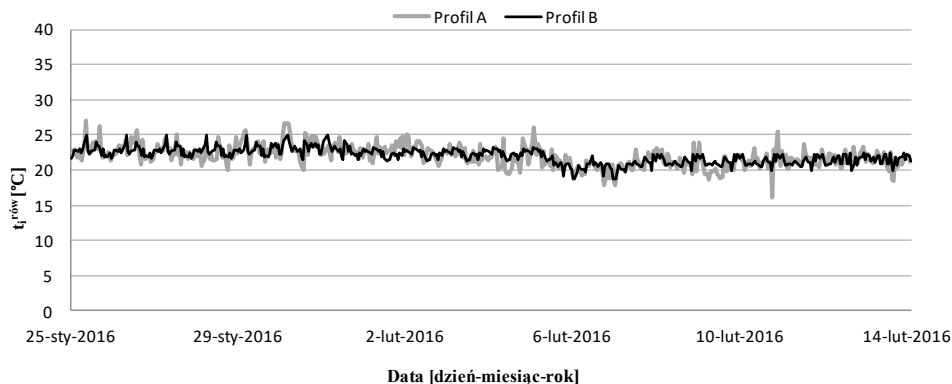


Rys. 4.32. Przykładowy profil A oraz profil B równoważnej temperatury wewnętrznej ($t_i^{r\acute{o}w}$) w budynku wielorodzinnym nr 1

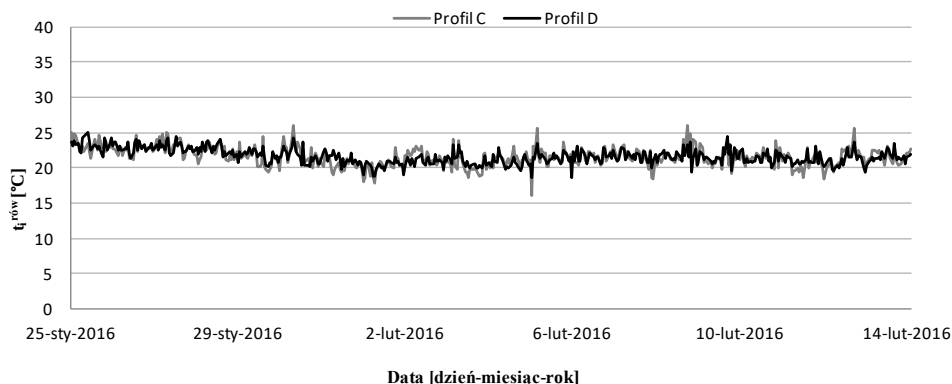


Rys. 4.33. Przykładowy profil C oraz profil D równoważnej temperatury wewnętrznej ($t_i^{r\acute{o}w}$) w budynku wielorodzinnym nr 1

Z kolei przykładowe profile równoważnej temperatury wewnętrznej w budynku użyteczności publicznej nr 5 (szkoła podstawowa) zostały przedstawione na rysunku 4.34 oraz 4.35.



Rys. 4.34. Przykładowy profil A oraz profil B równoważnej temperatury wewnętrznej ($t_i^{r\acute{o}w}$) w budynku użyteczności publicznej nr 5 (szkoła podstawowa)



Rys. 4.35. Przykładowy profil C oraz profil D równoważnej temperatury wewnętrznej ($t_i^{r\acute{o}w}$) w budynku użyteczności publicznej nr 5 (szkoła podstawowa)

Na podstawie profili równoważnej temperatury wewnętrznej ($t_i^{r\acute{o}w}$) można zauważyć, że w budynku mieszkalnym wielorodzinnym wahania tego parametru obliczeniowego są w szerszym zakresie niż w analizowanym budynku szkoły podstawowej. Wynika to między innymi z faktu, że w analizowanej szkole nie występowały zawory termostaticzne przy grzejnikach, dlatego też wpływ użytkowników na zapotrzebowanie na moc cieplną ograniczał się do zysków ciepła od ludzi czy też ewentualnego otwierania okien. Z kolei w budynkach mieszkalnych wielorodzinnych użytkownicy systemu wpływają w znacznie większym

stopniu na zapotrzebowanie mocy cieplnej poprzez zmianę ustawień głowic termostatycznych zamontowanych na zaworach termostatycznych przy grzejnikach czy też ustawień innych regulatorów temperatury powietrza wewnętrznego w poszczególnych mieszkaniach. Dodatkowo występują tu wewnętrzne zyski ciepła związane z gotowaniem, przygotowaniem ciepłej wody użytkowej czy też inną aktywnością użytkowników systemu, co może być uwzględnione w sposób pośredni przy prognozowaniu zapotrzebowania mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania w formie równoważnej temperatury wewnętrznej ($t_i^{rów}$).

4.6. Weryfikacja autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną

Na potrzeby weryfikacji autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną określono prognozowane zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania dla danego obiektu (Q_{PROG}) według równania 4.7, które następnie porównano z rzeczywistym zapotrzebowaniem mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania dla danego obiektu (Q_{RZ}) i określono średni błąd bezwzględny (równanie 4.8), średni błąd względny (równanie 4.9) oraz odchylenie standardowe (równanie 4.10).

$$Q_{PROG} = H_{sr} \cdot (t_i^{rów} - t_e^{rów}) \quad [kW] \quad (4.7)$$

gdzie:

H_{sr} – średni współczynnik strat ciepła, określony eksperymentalnie dla obiektu, [kW/K],

$t_i^{rów}$ – równoważna temperatura wewnętrzna (uwzględniająca całość procesów cieplnych w budynku, [°C],

$t_e^{rów}$ – równoważna temperatura zewnętrzna, [°C].

$$\Delta Q = |Q_{RZ} - Q_{PROG}| \quad [W] \quad (4.8)$$

Średni błąd bezwzględny (MAE- Mean Absolute Error), przedstawia o ile, w okresie prognozy, wartości rzeczywiste zmiennej prognozowanej (co do wartości bezwzględnej), będą odchodzić się od wartości predykcji.

Z kolei średni względny błąd procentowy (MAPE- Mean-Absolute Percentage Error) przedstawia średnią wielkość błędu prognozy dla danego okresu i jest wyrażony w procentach rzeczywistych wartości zmiennej prognozowanej.

$$\Delta q = \frac{|Q_{RZ} - Q_{PROG}|}{Q_{RZ}} \cdot 100 [\%] \quad (4.9)$$

Natomiast odchylenie standardowe (σ) pokazuje jak bardzo wartości błędu względnego prognozy są rozrzucone wokół wartości średniej (wzór 4.10).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (4.10)$$

gdzie:

σ – odchylenie standardowe, [-],

x_i – wynik pojedynczej i-tej próby np. błędu względnego,

$\bar{x}$ – średnia wartość ze wszystkich prób np. błędu względnego,

n – liczba prób.

W niniejszej analizie uwzględniono szereg wariantów, które wynikały z przyjętego do obliczeń profilu równoważnej temperatury wewnętrznej (profil A, B, C, D lub E), co zostało opracowane dla obiektów poddawanych analizie w sezonie ogrzewczym 2015/2016 (budynek wielorodzinny nr 1, budynek użyteczności publicznej nr 1 oraz nr 5, podstacja ciepłna nr 1 oraz miejski system ciepłowniczy).

Z kolei dla obiektów (budynek wielorodzinny nr 11 oraz nr 12, podstacja ciepłna nr 2), które analizowano w sezonach ogrzewczych 2016/2017 oraz 2017/2018), poza wariantową analizą odnośnie obliczeń profilu równoważnej temperatury wewnętrznej, wykonano również obliczenia wariantowe równoważnej temperatury zewnętrznej (t_e^{row}) z uwagi na sposób określania wpływu różnych czynników zewnętrznych, w szczególności:

- wariant 1: t_e^{row} uwzględnia tylko korektę z uwagi na prędkość wiatru;
- wariant 2: t_e^{row} uwzględnia korektę z uwagi na prędkość wiatru oraz nasłonecznienie korelowane z aktualną mocą ciepłą;
- wariant 3: t_e^{row} uwzględnia korektę z uwagi na prędkość wiatru oraz nasłonecznienie korelowane z mocą ciepłą o 1 godzinę do przodu;
- wariant 4: t_e^{row} uwzględnia korektę z uwagi na prędkość wiatru oraz nasłonecznienie korelowane z mocą ciepłą o 2 godziny do przodu;

- wariant 5: nie uwzględniono korekt z uwagi na wiatr czy też nasłonecznienie, a prognozowana moc cieplna była wyliczana w tym wariancie przy wykorzystaniu równania regresji pomiędzy mocą cieplną a temperaturą zewnętrzną, które było określone dla danego obiektu.

Mimo, że proponowana powyżej metoda prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną na potrzeby ogrzewania jest rekomendowana do zastosowania w szczególności w istniejących budynkach mieszkalnych, użyteczności publicznej czy też zamieszkania zbiorowego, to charakteryzuje się ona również wysoką dokładnością w przypadku podstacji cieplnych, jak i miejskich systemów ciepłowniczych, co zostało przedstawione poniżej.

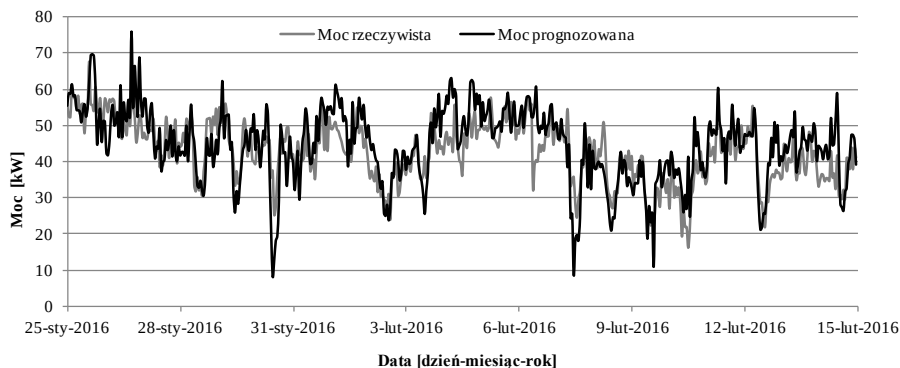
4.6.1. Weryfikacja autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną dla budynków

Na potrzeby weryfikacji proponowanej metody prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną na potrzeby ogrzewania budynków przedstawiono wyniki dla 5 przykładowych obiektów. W analizowanych budynkach zainstalowane są indywidualne węzły wymiennikowe dwufunkcyjne z bezpośrednim przygotowaniem ciepłej wody użytkowej w wymienniku ciepłej wody w sposób przepływowy. W każdej z analizowanych wymiennikowni zainstalowane są dwa ciepłomierze, z których jeden jest ciepłomierzem głównym, a drugi zainstalowany jest na zasileniu instalacji ogrzewczej danego budynku. Dlatego też możliwe było określenie rzeczywistego, godzinowego zapotrzebowania na moc cieplną na potrzeby centralnego ogrzewania (Q_{RZ}) w analizowanych budynkach.

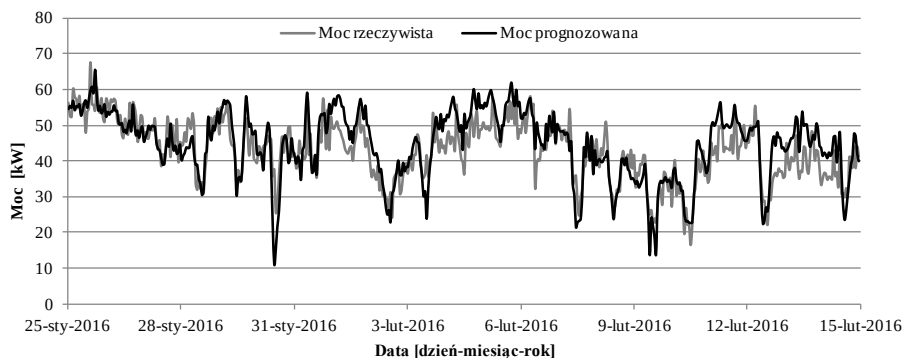
Dla budynku wielorodzinnego nr 1, budynku użyteczności publicznej nr 1 (sąd) oraz budynku użyteczności publicznej nr 5 (szkoła podstawowa) opracowano indywidualne modele cieplne w formie $t_e^{rów}$ na podstawie danych z pierwszej części sezonu ogrzewczego 2015/2016. Następnie przeprowadzono weryfikację autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną w tych budynkach w drugiej połowie sezonu ogrzewczego 2015/2016.

Z kolei dla budynków wielorodzinnych nr 11 oraz 12 opracowano indywidualne modele cieplne w formie $t_e^{rów}$ na podstawie danych z całego sezonu ogrzewczego 2016/2017, a weryfikację autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną przeprowadzono w sezonie ogrzewczym 2017/2018.

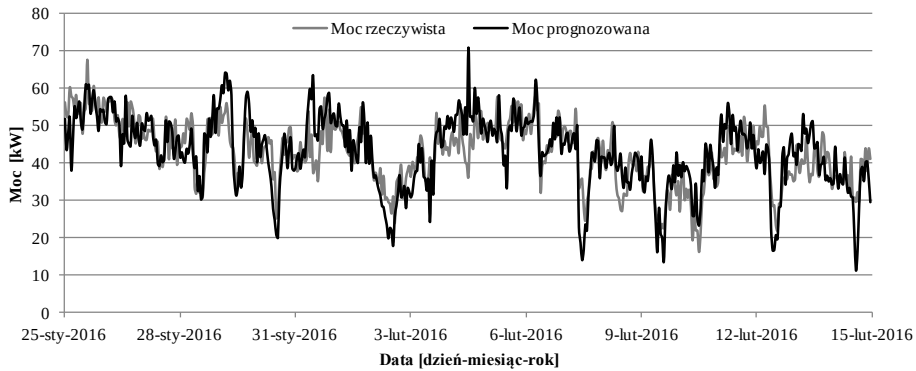
W celu klarowanego przedstawienia otrzymanych wyników, na rysunkach zamieszczano tylko wyniki z okresu od 25 stycznia do 14 lutego, co zostało w pierwszej kolejności wykonane dla analizowanego budynku wielorodzinnego nr 1 (rysunki 4.36–4.40).



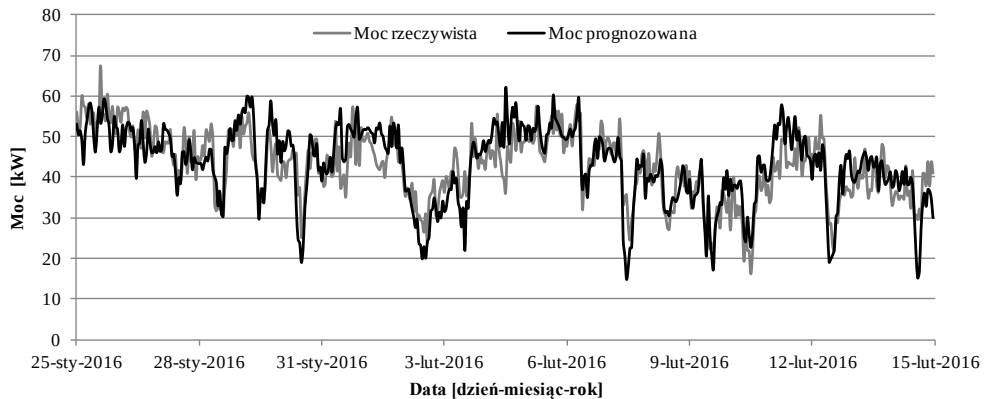
Rys. 4.36. Moc rzeczywista i prognozowana dla budynku wielorodzinnego nr 1 przy wykorzystaniu profilu A



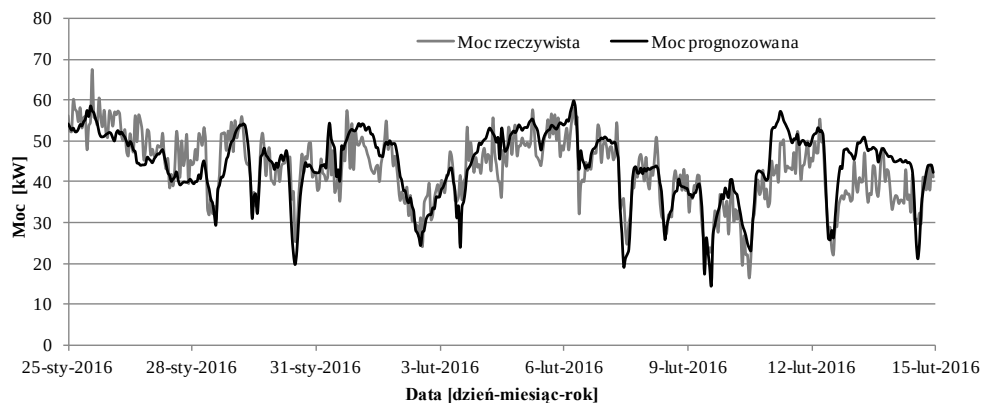
Rys. 4.37. Moc rzeczywista i prognozowana dla budynku wielorodzinnego nr 1 przy wykorzystaniu profilu B



Rys. 4.38. Moc rzeczywista i prognozowana dla budynku wielorodzinnego nr 1 przy wykorzystaniu profilu C



Rys. 4.39. Moc rzeczywista i prognozowana dla budynku wielorodzinnego nr 1 przy wykorzystaniu profilu D



Rys. 4.40. Moc rzeczywista i prognozowana dla budynku wielorodzinnego nr 1 przy wykorzystaniu profilu E

Tab. 4.26. Wartości błędu względnego prognozowania zapotrzebowania na moc ciepłą na potrzeby ogrzewania dla budynku wielorodzinnego nr 1

Błąd względny [%]	Profil A	Profil B	Profil C	Profil D	Profil E
Średni	13,7	<u>10,8</u>	12,2	11,0	11,5
Maksymalny	153,8	70,5	94,5	70,7	82,4
Odchylenie standardowe	13,23	9,22	14,93	8,56	6,96

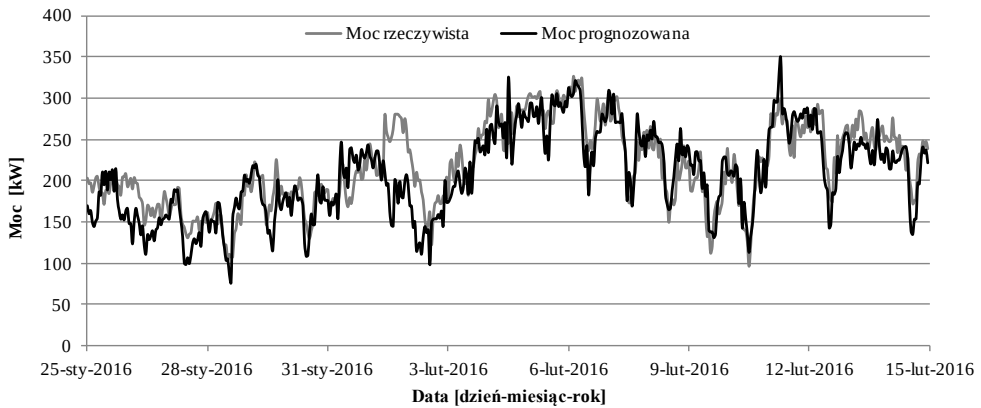
Na podstawie przedstawionych wyników dla budynku wielorodzinnego nr 1 (rysunki 4.36–4.40 oraz tabela 4.26) można stwierdzić, że najwyższą dokładność prognozy zapotrzebowania na moc ciepłą na potrzeby ogrzewania uzyskano dla profilu B, ponieważ dla tego przypadku średni błąd względny był na poziomie 10,8%.

Taką samą wartość dokładności prognozowania mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania uzyskano dla budynku użyteczności publicznej nr 1 (budynek sądu), jednak rekomendowanym profilem $t_i^{rów}$ nie był już profil B, a profil D, ponieważ przy jego wykorzystaniu uzyskano najniższą wartość średniego błędu względnego prognozy (tabela 4.27).

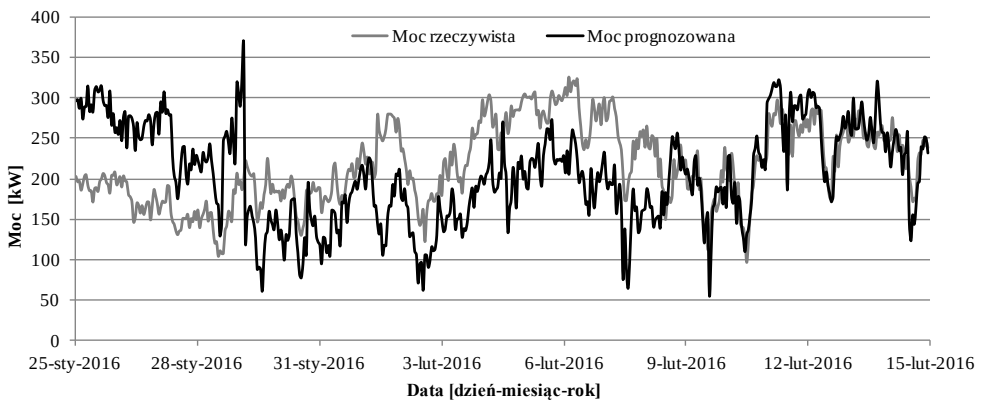
Tab. 4.27. Wartości błędu względnego prognozowania zapotrzebowania na moc ciepłą na potrzeby ogrzewania dla budynku użyteczności publicznej nr 1 (budynek sądu)

Błąd względny [%]	Profil A	Profil B	Profil C	Profil D	Profil E
Średni	27,5	23,4	11,6	<u>10,8</u>	18,8
Maksymalny	127,5	99,7	75,9	46,2	106,4
Odchylenie standardowe	19,07	15,86	13,64	13,11	17,40

Zależność mocy rzeczywistej oraz prognozowanej przedstawiono dla analizowanego budynku użyteczności publicznej nr 1 dla rekomendowanego profilu D na rysunku 4.41, a dla profilu A (profil najmniej dokładny w przypadku tego budynku) na rysunku 4.42.

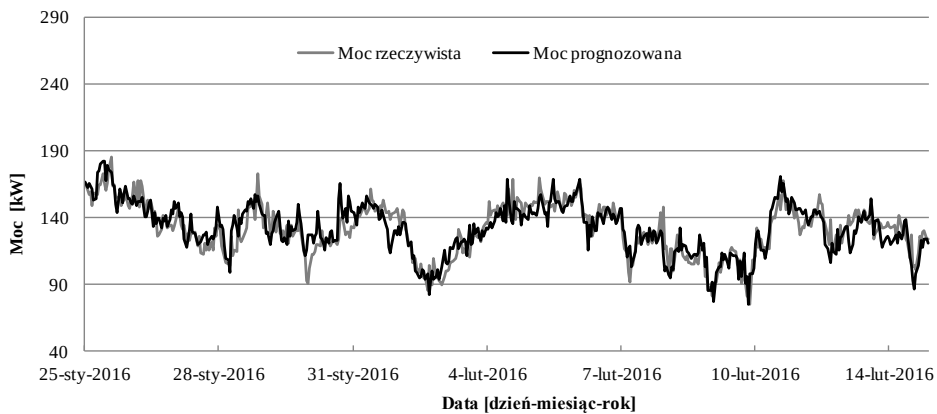


Rys. 4.41. Moc rzeczywista i prognozowana dla budynku użyteczności publicznej nr 1 przy wykorzystaniu profilu D



Rys. 4.42. Moc rzeczywista i prognozowana dla budynku użyteczności publicznej nr 1 przy wykorzystaniu profilu A

Profil D równoważnej temperatury wewnętrznej okazał się również najbardziej rekomendowanym profilem do zastosowania przy prognozowaniu zapotrzebowania na moc cieplną dla budynku użyteczności publicznej nr 5, ponieważ średni błąd względny prognozy był na poziomie 5,81%, co zostało przedstawione na rysunku 4.43 oraz w tabeli 4.28.

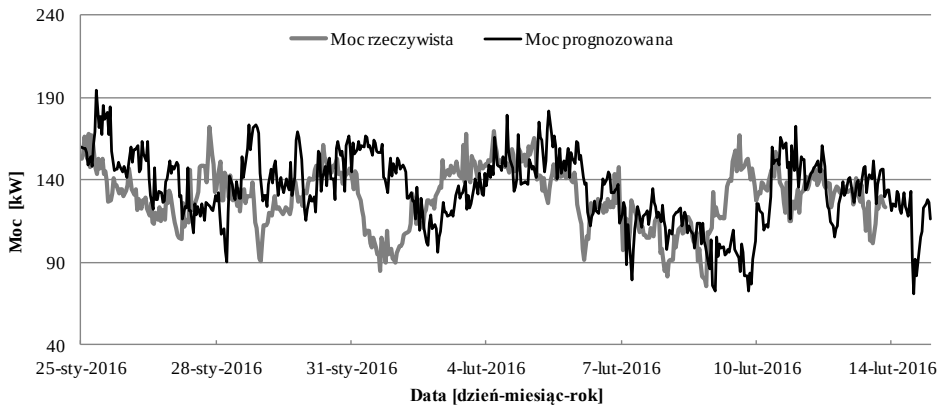


Rys. 4.43. Moc rzeczywista i prognozowana dla budynku użyteczności publicznej nr 5 przy wykorzystaniu profilu D

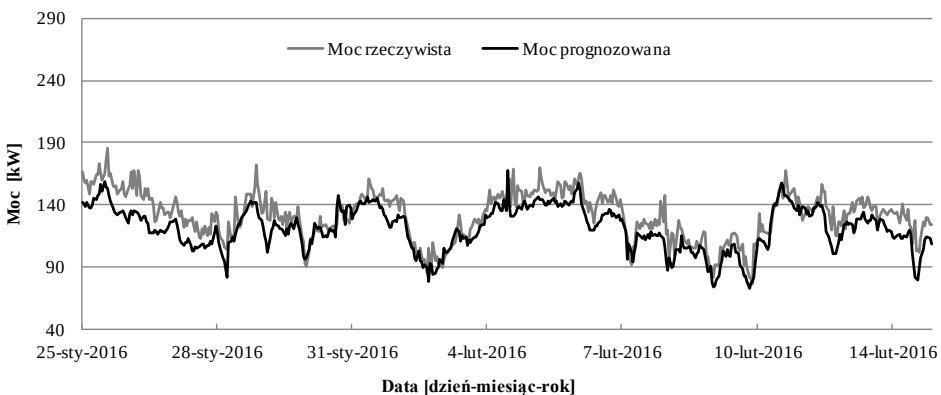
Z kolei zastosowanie przy prognozowaniu zużycia ciepła na potrzeby ogrzewania profilu A czy też profilu E generuje większe różnice pomiędzy rzeczywistą mocą cieplną a mocą prognozowaną, co zostało przedstawione na rysunkach 4.44 oraz 4.45.

Tab. 4.28. Wartości błędu względnego prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną na potrzeby ogrzewania dla budynku użyteczności publicznej nr 5 (szkoła)

Błąd względny [%]	Profil A	Profil B	Profil C	Profil D	Profil E
Średni	8,45	7,16	6,50	<u>5,81</u>	8,83
Maksymalny	44,45	34,30	51,88	39,05	36,17
Odchylenie standardowe	7,23	6,16	5,91	5,13	5,35



Rys. 4.44. Moc rzeczywista i prognozowana dla budynku użyteczności publicznej nr 5 przy wykorzystaniu profilu A



Rys. 4.45. Moc rzeczywista i prognozowana dla budynku użyteczności publicznej nr 5 przy wykorzystaniu profilu E

W przypadku budynku wielorodzinnego nr 11 oraz nr 12 poddano analizie (poza profilami równoważnej temperatury wewnętrznej – profile A, B, C, D, E) również zastosowanie różnych wariantów obliczeniowych równoważnej temperatury zewnętrznej (warianty 1–5). Stwierdzono, że w przypadku budynku wielorodzinnego nr 11 najniższym (8,1%) błędem względnym prognozy mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania charakteryzuje się wariant 1 równoważnej temperatury zewnętrznej połączony z profilem D równoważnej temperatury wewnętrznej, co przedstawiono na rysunku 4.46 oraz w tabeli 4.29.



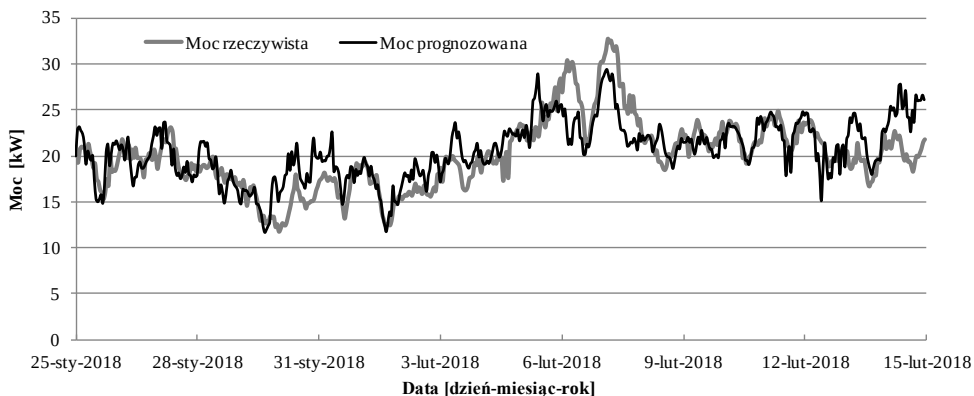
Rys. 4.46. Moc rzeczywista i prognozowana dla budynku wielorodzinnego nr 11 przy wykorzystaniu profilu D oraz wariantu 1

Wariant 1 oznacza, że przy prognozowaniu mocy cieplnej wykorzystuje się tylko korektę z uwagi na wpływ prędkości wiatru, a nie uwzględnia się korekty z uwagi na nasłonecznienie.

Tab. 4.29. Wartości średniego błędu względnego prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną na potrzeby ogrzewania [%] dla budynku wielorodzinnego nr 11

Rodzaj wariantu	Profil A	Profil B	Profil C	Profil D	Profil E
Wariant 1	11,72	10,37	8,42	8,10	11,45
Wariant 2	12,14	10,81	8,58	8,31	10,17
Wariant 3	11,84	10,44	8,49	8,21	10,49
Wariant 4	12,11	10,83	8,53	8,23	10,52
Wariant 5	18,71				

Z kolei najwyższy (12,14%) średni błąd względny prognozy przy wykorzystaniu autorskiej metody dla budynku wielorodzinnego nr 11 uzyskano dla wariantu 2 i profilu A (rysunek 4.47).



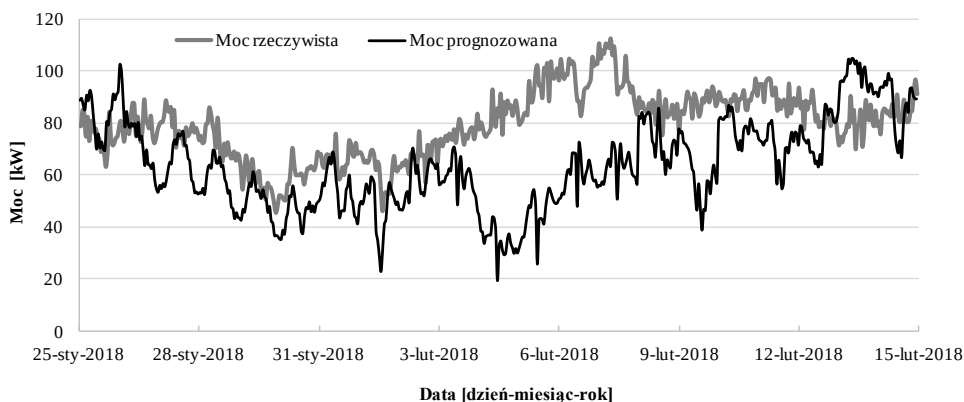
Rys. 4.47. Moc rzeczywista i prognozowana dla budynku wielorodzinnego nr 11 przy wykorzystaniu profilu A oraz wariantu 2

Należy jednak zauważyć, że wykorzystanie samej wartości temperatury zewnętrznej przy prognozowaniu zapotrzebowania na moc cieplną na potrzeby ogrzewania (wariant 5) nie pozwala na dokładne przeprowadzenie tej czynności, ponieważ średni błąd względny w tym przypadku dla budynku wielorodzinnego nr 11 wynosi 18,71%.

Podobne wyniki uzyskano podczas analizy budynku wielorodzinnego nr 12, ponieważ w tym przypadku zastosowanie wariantu 5 przy prognozowaniu zapotrzebowania mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania wygenerowało średni błąd względny prognozy na poziomie 24,22% (tabela 4.30). Rekomendowanym do wykorzystania profilem równoważnej temperatury wewnętrznej był profil B dla wariantu 3, co zostało przedstawione na rysunku 4.48.

Tab. 4.30. Wartości średniego błędu względnego prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną na potrzeby ogrzewania [%] dla budynku wielorodzinnego nr 12

Rodzaj wariantu	Profil A	Profil B	Profil C	Profil D	Profil E
Wariant 1	27,61	13,31	14,12	24,10	25,37
Wariant 2	27,29	13,45	14,22	23,94	25,22
Wariant 3	26,84	<u>13,15</u>	13,93	23,32	24,56
Wariant 4	28,52	14,01	14,70	25,40	26,82
Wariant 5	24,22				



Rys. 4.48. Moc rzeczywista i prognozowana dla budynku wielorodzinnego nr 12 przy wykorzystaniu profilu B oraz wariantu 3

Podsumowując przeprowadzoną weryfikację autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną na potrzeby ogrzewania w budynkach (wyniki dla 5 budynków przedstawiono w niniejszej rozprawie, a wyników dla 36 innych budynków nie przedstawiano w niniejszej rozprawie), stwierdza się, że opracowano zależności pozwalające na prognozowanie zapotrzebowania na moc cieplną na potrzeby ogrzewania z wysoką dokładnością, charakteryzowaną przez średni błąd względny prognozy poniżej 15%. W analizowanych budynkach można zauważyć, że wyboru najbardziej dokładnego (pozwalającego na uzyskanie najmniejszego średniego błędu względnego prognozy) profilu równoważnej temperatury zewnętrznej (wariant 1–4), jak i profilu równoważnej temperatury wewnętrznej (profil A, B, C, D, E) należy dokonywać indywidualnie dla danego budynku. Zauważono jednak, że w wielu przypadkach zastosowanie profilu D pozwala na uzyskanie najlepszej zgodności pomiędzy mocą rzeczywistą a prognozowaną.

Dodatkowo należy podkreślić, że mimo często nieznacznie mniejszych wartości średniego błędu względnego prognozy dla wariantu 1, warto uwzględnić przy sterowaniu prognozowym również wpływ nasłonecznienia (wariant 2–4), ponieważ dzięki temu można zmniejszyć moc cieplną dostarczaną do układu i uzyskać oszczędności zużycia ciepła.

Z kolei nie rekomenduje się zastosowania przy prognozowaniu zużycia ciepła i następnie sterowaniu prognozowym dostawy ciepła na potrzeby ogrzewania

wykorzystania tylko temperatury zewnętrznej (bez uwzględnienia wpływu czynników zewnętrznych: prędkość wiatru, nasłonecznienie, jak i wewnętrznych-użytkownicy systemu), ponieważ dokładność prognozy zapotrzebowania mocy cieplnej jest na niskim poziomie.

4.6.2. Weryfikacja autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną dla podstacji ciepłych

W celu weryfikacji proponowanej metody prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną na potrzeby ogrzewania w obiektach, jakim są podstacje ciepłe, przedstawiono poniżej wyniki dla dwóch przykładowych obiektów.

W analizowanych podstacjach ciepłych (inaczej nazywanych wymiennikownikami grupowymi) przygotowanie ciepłej wody użytkowej realizowane jest również w wymienniku ciepłej wody w sposób przepływowy. W każdej z analizowanych podstacji ciepłych zainstalowane są dwa ciepłomierze, z których jeden jest ciepłomierzem głównym (zainstalowany na wysokich parametrach czynnika sieciowego, na wejściu do podstacji), a drugi ciepłomierz zainstalowany jest na zasileniu systemu ogrzewania, gdzie czynnik ogrzewczy przesyłany jest siecią niskoparametrową do grupy budynków zasilanych z danej podstacji cieplnej. Jednak w niniejszej analizie uwzględniono tylko zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania budynków.

Z podstacji cieplnej nr 1 zasilanych jest 6 budynków wielorodzinnych. Natomiast podstacja cieplna nr 2 zasila 9 budynków wielorodzinnych oraz jeden budynek przedszkola.

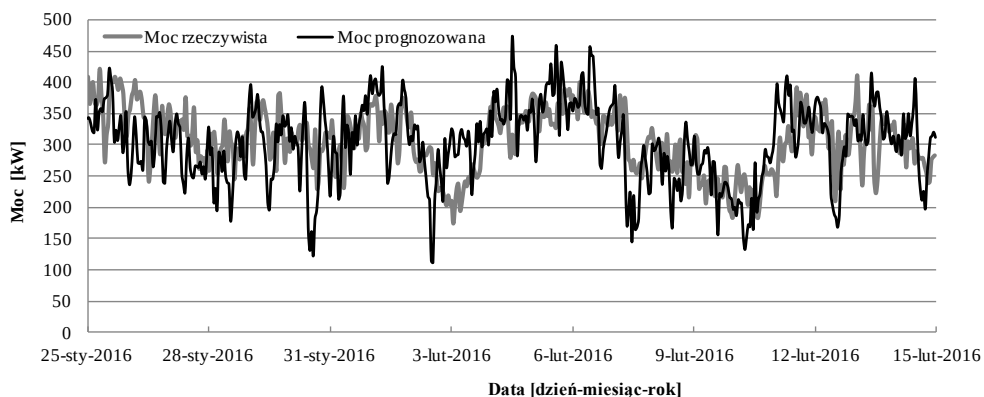
Dla podstacji cieplnej nr 1 opracowano indywidualny model cieplny w formie t_e^{row} na podstawie danych z pierwszej części sezonu ogrzewczego 2015/2016 i przeprowadzono weryfikację autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną w tym obiekcie w drugiej połowie sezonu ogrzewczego 2015/2016.

Natomiast dla podstacji cieplnej nr 2 opracowano indywidualny model cieplny w formie t_e^{row} na podstawie danych z całego sezonu ogrzewczego 2016/2017, a weryfikację autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną przeprowadzono w sezonie ogrzewczym 2017/2018.

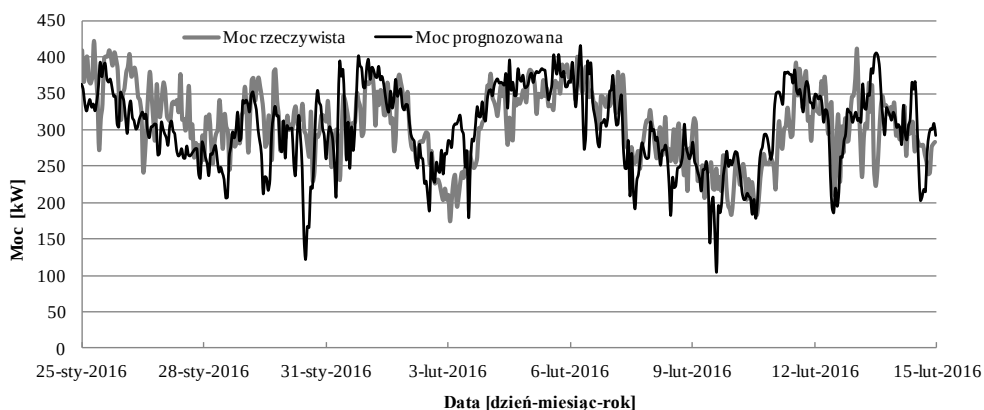
Podobnie jak w przypadku wcześniej analizowanych budynków (rozdział 4.6.1), dla podstacji ciepłych na rysunkach zamieszczano tylko wyniki z okresu

od 25 stycznia do 14 lutego w celu klarowanego przedstawienia otrzymanych zależności pomiędzy mocą rzeczywistą a mocą prognozowaną.

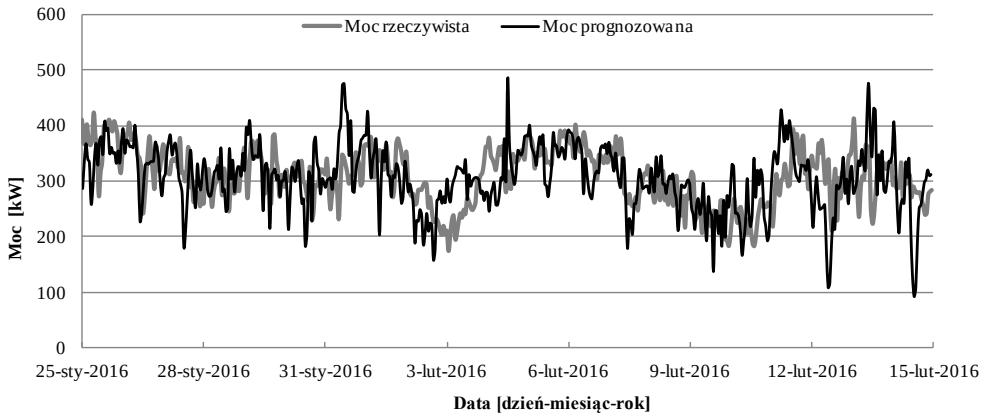
Na rysunkach 4.49–4.53 przedstawiono rzeczywisty oraz prognozowany przebieg mocy cieplnej dla analizowanej podstacji cieplnej nr 1.



Rys. 4.49. Moc rzeczywista i prognozowana dla podstacji cieplnej nr 1 przy wykorzystaniu profilu A



Rys. 4.50. Moc rzeczywista i prognozowana dla podstacji cieplnej nr 1 przy wykorzystaniu profilu B



Rys. 4.51. Moc rzeczywista i prognozowana dla podstacji ciepłej nr 1 przy wykorzystaniu profilu C



Rys. 4.52. Moc rzeczywista i prognozowana dla podstacji ciepłej nr 1 przy wykorzystaniu profilu D



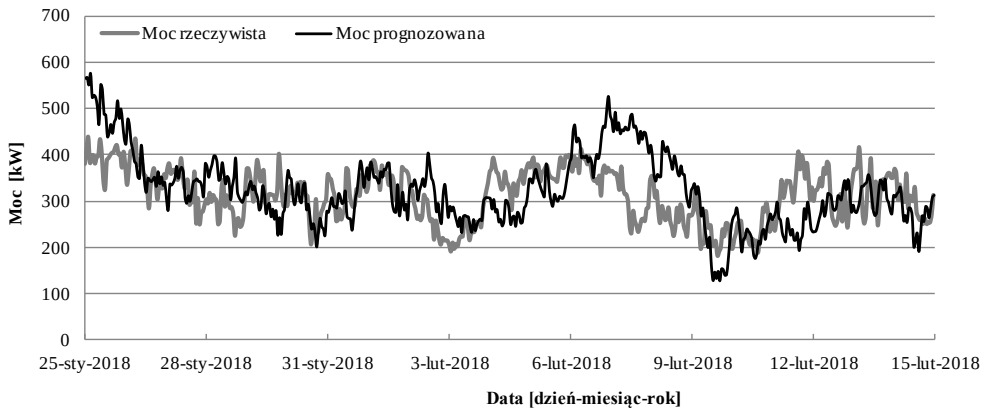
Rys. 4.53. Moc rzeczywista i prognozowana dla podstacji cieplnej nr 1 przy wykorzystaniu profilu E

Tab. 4.31. Wartości błędu względnego prognozowania zapotrzebowania na moc ciepłą na potrzeby ogrzewania dla podstacji cieplnej nr 1

Błąd względny [%]	Profil A	Profil B	Profil C	Profil D	Profil E
Średni	14,03	<u>11,56</u>	14,11	12,20	13,79
Maksymalny	82,2	81,9	86,0	71,6	65,3
Odchylenie standardowe	12,67	11,03	12,51	11,06	10,56

Na podstawie przedstawionych wyników dla podstacji cieplnej nr 1 (rysunki 4.49–4.53 oraz tabela 4.31) można stwierdzić, że profil B równoważnej temperatury wewnętrznej pozwolił na uzyskanie najniższego średniego błędu względnego prognozy mocy ciepłej na poziomie 11,56%. Z kolei najmniej dokładna (średni błąd względny równy 14,11%) prognoza zapotrzebowania na moc ciepłą była uzyskana przy wykorzystaniu profilu C.

W przypadku podstacji cieplnej nr 2 nie uzyskano wysokiej (średni błąd względny poniżej 15%) dokładności prognozowania mocy ciepłej na potrzeby ogrzewania, ponieważ najniższy średni błąd względny prognozy mocy ciepłej był dla profilu D oraz wariantu 4 i wynosił 19,24% (tabela 4.32 oraz rysunek 4.54).



Rys. 4.54. Moc rzeczywista i prognozowana dla podstacji ciepłej nr 2 przy wykorzystaniu profilu D oraz wariantu 4

Tab. 4.32. Wartości średniego błędu względnego prognozowania zapotrzebowania na moc ciepłą na potrzeby ogrzewania [%] dla podstacji ciepłej nr 2

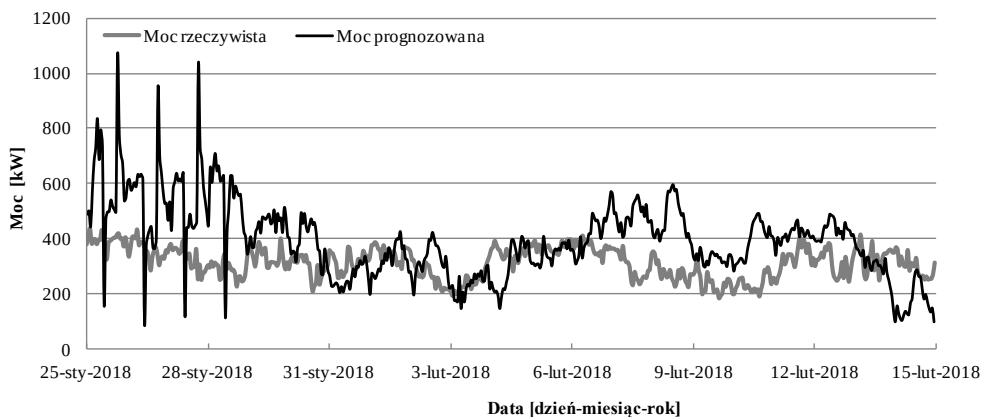
Rodzaj wariantu	Profil A	Profil B	Profil C	Profil D	Profil E
Wariant 1	38,22	30,94	19,61	19,95	27,91
Wariant 2	37,65	32,41	19,45	19,93	21,36
Wariant 3	36,85	33,76	19,41	19,41	20,80
Wariant 4	36,88	35,91	19,35	<u>19,24</u>	21,54
Wariant 5	54,31				

Natomiast najniższą (średni błąd względny równy 38,22%) dokładność prognozy mocy ciepłej za pomocą autorskiej metody prognozowania uzyskano przy wykorzystaniu profilu A i wariantu 1.

Jednak w przypadku próby prognozowania zapotrzebowania mocy ciepłej na potrzeby ogrzewania dla podstacji ciepłej nr 2 przy wykorzystaniu tylko zależności pomiędzy temperaturą zewnętrzną a dostarczaną mocą ciepłą, uzyskano średni błąd względny takiej prognozy na poziomie 54,31%.

Tak niskie (tabela 4.32) poziomy zgodności pomiędzy mocą rzeczywistą a prognozowaną niezależnie od analizowanego wariantu (profile A–E; warianty 1–5) uzyskano tylko w podstacji ciepłej nr 2 z sześciu dotychczas analizowanych

przez autora rozprawy podstacji ciepłych (wyników dla czterech pozostałych podstacji ciepłych nie zamieszczono w niniejszej rozprawie). Ponieważ w pozostałych przypadkach możliwe było dobranie wariantu $t_e^{rów}$ przy danym profilu $t_i^{rów}$, który charakteryzował się średnim błędem względnym prognozy mocy ciepłej na potrzeby ogrzewania poniżej 15%.



Rys. 4.55. Moc rzeczywista i prognozowana dla podstacji ciepłej nr 2 przy wykorzystaniu profilu A oraz wariantu 1

Niski poziom zgodności pomiędzy mocą rzeczywistą a prognozowaną w przypadku podstacji ciepłej nr 2 może świadczyć o złym dopasowaniu krzywej grzewczej obecnie stosowanej regulacji pogodowej dostawy ciepła do grupy zasilanych z podstacji budynków, złym zrównoważeniu hydraulicznym systemu ogrzewczego w budynkach, co może powodować nieracjonalne zachowania użytkowników, np. otwieranie okien w celu zmniejszenia temperatury powietrza wewnętrznego (niepoprawne działanie zaworów termostatycznych z uwagi na zbyt wysokie ciśnienie czynnika ogrzewczego w układzie).

Podsumowując przeprowadzoną weryfikację autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania mocy ciepłej na potrzeby ogrzewania w podstacjach ciepłych, stwierdzono, że metoda ta pozwala na uzyskanie wysokiego poziomu zgodności pomiędzy mocą ciepłą rzeczywistą a prognozowaną (średni błąd względny prognozy poniżej 15%) z wyjątkiem podstacji ciepłej nr 2, co zostało odpowiednio uargumentowane powyżej.

Podobnie, jak w przypadku budynków, nie rekomenduje się zastosowania tylko temperatury zewnętrznej (bez uwzględnienia wpływu prędkości wiatru, nasło-

necznienie, jak i użytkowników systemu) przy prognozowaniu zużycia ciepła i następnie sterowaniu prognozowym dostawy ciepła na potrzeby ogrzewania.

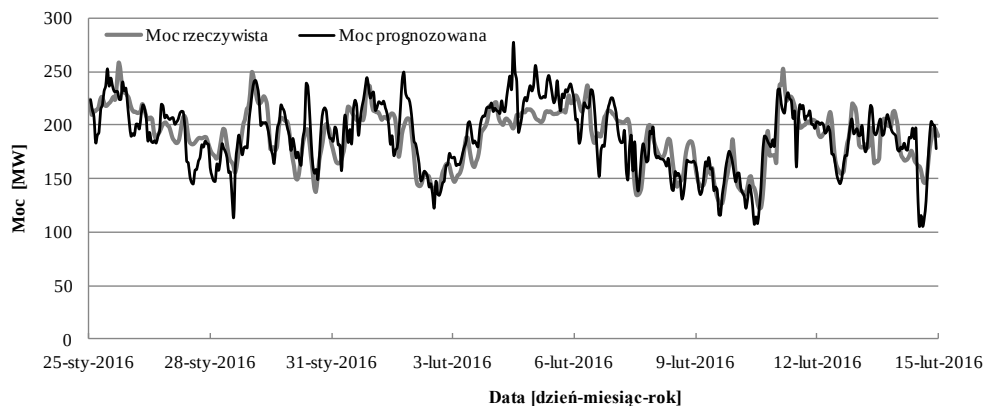
Dodatkowo należy podkreślić, że wybór profilu równoważnej temperatury wewnętrznej, jak i zewnętrznej na potrzeby wykonania prognozy mocy cieplnej należy przeprowadzać indywidualnie dla każdego obiektu, aby uzyskać możliwie wysoką zgodność pomiędzy mocą rzeczywistą a prognozowaną.

4.6.3. Weryfikacja autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną dla systemu ciepłowniczego

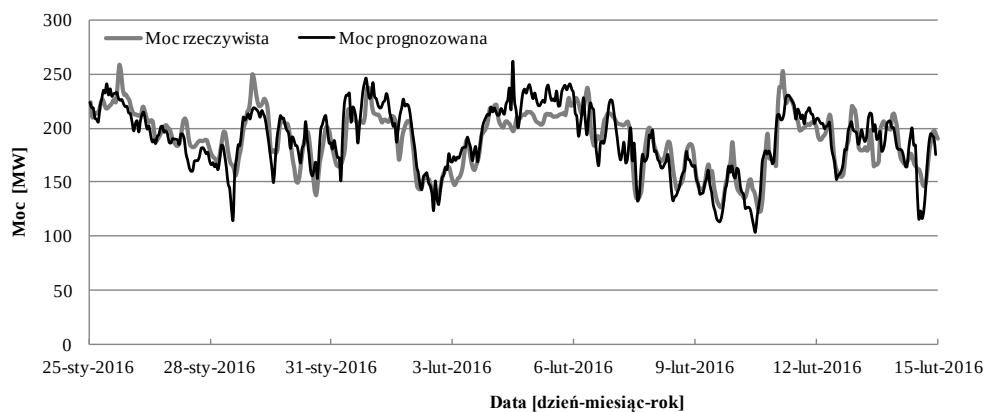
W przypadku obiektu, jakim jest miejski system ciepłowniczy dla miasta Lublin, który jest zasilany z dwóch, niezależnych źródeł ciepła, nie było możliwości rozdzielenie potrzeb cieplnych związanych z ogrzewaniem obiektów od potrzeb cieplnych związanych z przygotowaniem ciepłej wody użytkowej czy też ciepłem technologicznym dostarczonym do poszczególnych obiektów, ponieważ dysponowano tylko mocą cieplną dostarczaną przez poszczególne źródła do wspólnego systemu ciepłowniczego. Dlatego też niniejsza analiza w przypadku tego obiektu (cały miejski system ciepłowniczy) jest próbą weryfikacji autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania mocy cieplnej w systemach ogrzewczych, które nie są tylko związane z ogrzewaniem budynków, a dostarczają ciepło również na inne cele (np. na potrzeby przygotowania ciepłej wody użytkowej, na potrzeby ciepła technologicznego dla zakładów przemysłowych, jak i budynków użyteczności publicznej czy też zamieszkania zbiorowego).

Indywidualny model cieplny w formie $t_e^{rów}$ opracowano dla analizowanego systemu ciepłowniczego na podstawie danych z pierwszej części sezonu ogrzewczego 2015/2016 i przeprowadzono weryfikację autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną w drugiej połowie sezonu ogrzewczego 2015/2016.

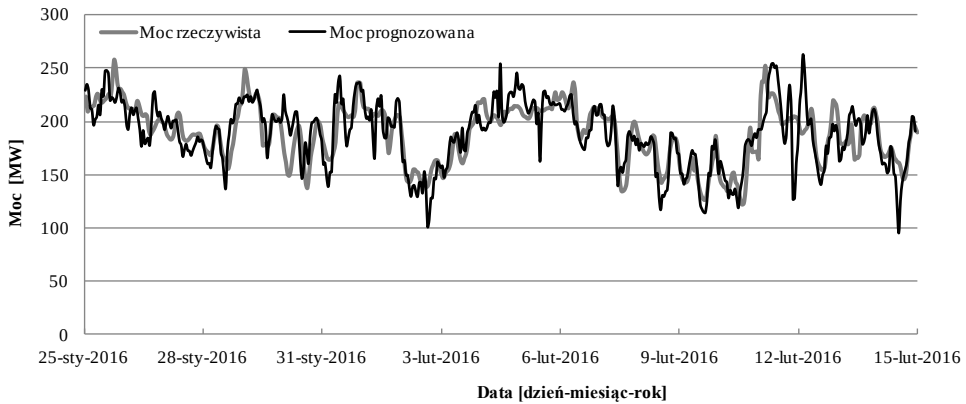
Na rysunkach 4.56–4.60 przedstawiono profile mocy rzeczywistej oraz prognozowanej dla wariantu 1 (korekta temperatury zewnętrznej tylko z uwagi na prędkość wiatru) oraz dla analizowanych profili A–E równoważnej temperatury wewnętrznej z okresu od 25 stycznia do 14 lutego 2016 roku.



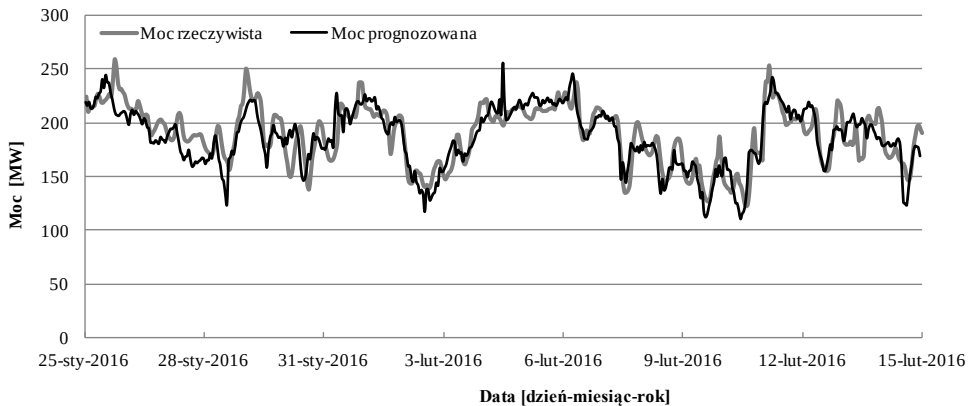
Rys. 4.56. Moc rzeczywista i prognozowana dla miejskiego systemu ciepłowniczego przy wykorzystaniu profilu A oraz wariantu 1



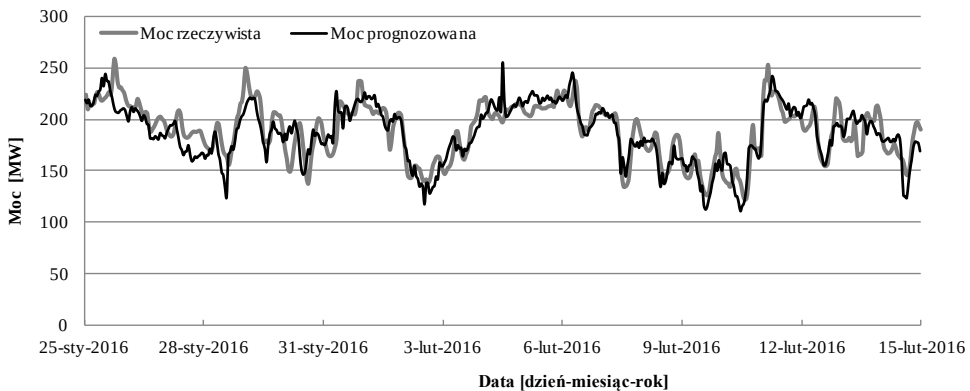
Rys. 4.57. Moc rzeczywista i prognozowana dla miejskiego systemu ciepłowniczego przy wykorzystaniu profilu B oraz wariantu 1



Rys. 4.58. Moc rzeczywista i prognozowana dla miejskiego systemu ciepłowniczego przy wykorzystaniu profilu C oraz wariantu 1



Rys. 4.59. Moc rzeczywista i prognozowana dla miejskiego systemu ciepłowniczego przy wykorzystaniu profilu D oraz wariantu 1



Rys. 4.60. Moc rzeczywista i prognozowana dla miejskiego systemu ciepłowniczego przy wykorzystaniu profilu E oraz wariantu 1

Tab. 4.33. Wartości średniego błędu względnego prognozowania zapotrzebowania na moc ciepłą w [%] dla systemu ciepłowniczego

Rodzaj wariantu	Profil A	Profil B	Profil C	Profil D	Profil E
Wariant 1	7,96	<u>6,78</u>	7,17	7,53	6,86
Wariant 2	8,61	8,50	7,54	7,94	7,56
Wariant 5	14,32				

Na podstawie profili mocy rzeczywistej oraz prognozowanej (rysunki 4.56–4.60) oraz wyników obliczeń średniego błędu względnego prognozy mocy cieplnej dla analizowanego miejskiego systemu ciepłowniczego można stwierdzić, że autorska metoda prognozowania zapotrzebowania na moc ciepłą pozwala uzyskać wysoką dokładność prognozy zapotrzebowania mocy cieplnej dla systemu ciepłowniczego. Najwyższą dokładność prognozy (średni błąd względny na poziomie 6,78%) uzyskano przy uwzględnieniu tylko korekty z uwagi na prędkość wiatru przy obliczeniach równoważnej temperatury zewnętrznej (wariant 1) i dla profilu B równoważnej temperatury wewnętrznej. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że dokładność prognozy mocy cieplnej przy wykorzystaniu proponowanej, autorskiej metody jest wyższa (niezależnie od przyjętego wariantu t_e^{row} czy też profilu t_i^{row}) niż prognoza mocy cieplnej przy wykorzystaniu tylko wartości temperatury zewnętrznej.

Zatem mimo, że głównym zastosowaniem autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania na moc ciepłą jest sterowanie prognozowe dostawą ciepła na potrzeby ogrzewania budynków, to jej zastosowanie może być również rozważone w miejskich systemach ciepłownicznych.

4.7. Podsumowanie i rekomendacje

Odpowiednie uwzględnienie wpływu każdego z czynników zewnętrznych (temperatura zewnętrzna, prędkość wiatru, nasłonecznienie czy też zachmurzenie) i wewnętrznych (preferencje i zachowania użytkowników systemu) na prognozowane zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania, nie jest zadaniem łatwym, szczególnie gdy trzeba uwzględnić wpływ każdego z czynników z osobna.

Dlatego też na podstawie szeregu własnych, wielowariantowych badań eksploatacyjnych (rozdziały 4.2 oraz 4.3) zostały opracowane odpowiednie algorytmy obliczeniowe na potrzeby uwzględnienia wpływu każdego z omawianych czynników zewnętrznych na prognozowane zapotrzebowanie mocy cieplnej do ogrzewania w formie korekty temperatury zewnętrznej (rozdział 4.4).

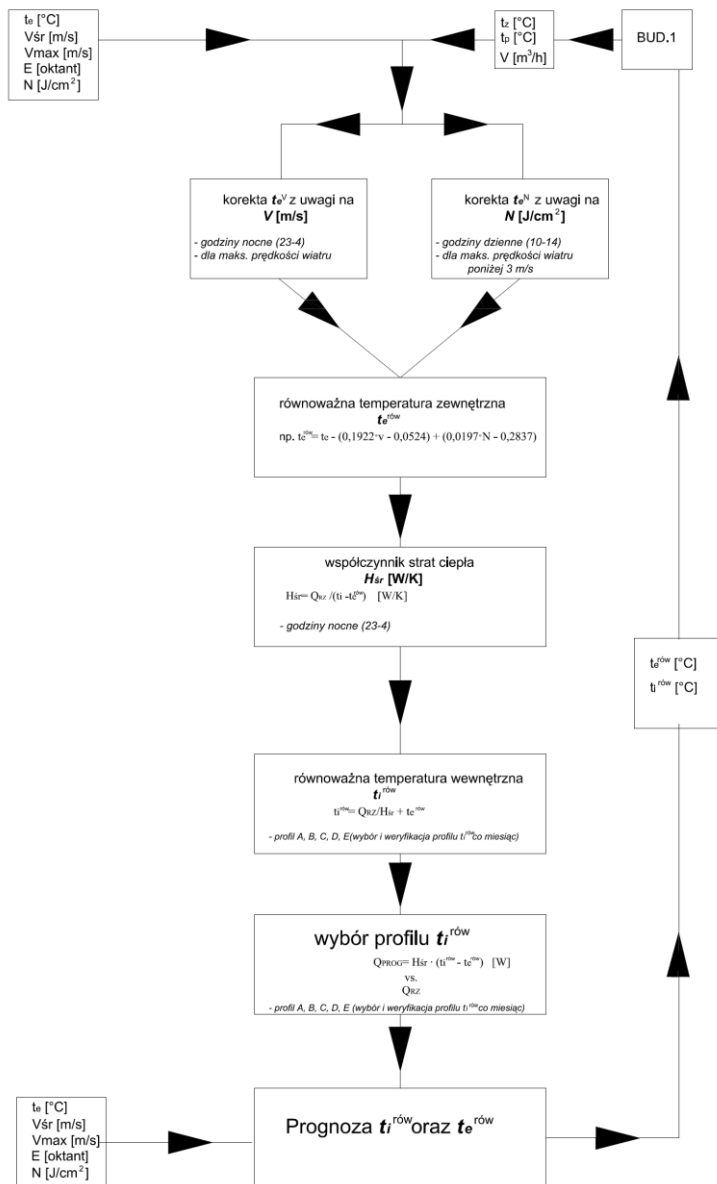
W przypadku wyznaczenia korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na prędkość wiatru (t_e^V), to rekomenduje się uwzględnienie tylko wyników z godzin 23–4 przy maksymalnej prędkości wiatru dla danego obiektu, ponieważ w taki sposób minimalizuje się wpływ pozostałych czynników zewnętrznych (nasłonecznienie) jak i wewnętrznych zysków ciepła związanych z egzystencją osób, jak też zmiany mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania, wynikające z nastawionej przez użytkowników wartości temperatury powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach ogrzewanych.

Z kolei w przypadku wyznaczenia korekty temperatury zewnętrznej z uwagi na nasłonecznienie (t_e^N), to rekomenduje się uwzględnienie tylko wyników z godzin 10–14 przy maksymalnej prędkości wiatru poniżej 3 m/s dla danego obiektu, ponieważ w taki sposób minimalizowany jest również wpływ pozostałych czynników zewnętrznych (prędkości wiatru) oraz wewnętrznych.

Jednym z ostatnich aspektów, którego poprawne uwzględnienie jest istotne dla możliwie dokładnego prognozowania zapotrzebowania na moc cieplną na potrzeby ogrzewania, są czynniki wewnętrzne związane z zachowaniami i preferencjami użytkowników/mieszkańców (rozdział 4.5). Wpływ czynników wewnętrznych rekomenduje się uwzględnić poprzez wybór odpowiedniego profilu równoważnej temperatury wewnętrznej ($t_i^{równ}$), który pozwala na minimalizację różnicy pomiędzy mocą cieplną prognozowaną a rzeczywistą.

Autorska metody prognozowania zapotrzebowania mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania została przedstawiona w postaci schematu blokowego na rysunku 4.61, a weryfikacja praktycznego zastosowania tej metody została przeprowa-

dzona z pozytywnym wynikiem, zarówno dla budynków wielorodzinnych, budynków użyteczności publicznej, podstacji ciepłych, jak i miejskiego systemu ciepłowniczego.



Rys. 4.61. Schemat blokowy autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania na moc ciepłą na potrzeby ogrzewania

5. Autorska metoda sterowania prognozowego zapotrzebowania na moc ciepłą na potrzeby ogrzewania obiektów

5.1. Założenia wstępne i opis autorskiej metody sterowania prognozowego

Dążenia do ograniczenia zużycia energii, wzrostu efektywności energetycznej oraz wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych stanowią istotne działania konieczne do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, które wynikają z *Dyrektywy 2012/27/UE*. Dlatego też prowadzonych jest wiele działań modernizacyjnych w zakresie obudowy budynku (termomodernizacja), systemów ogrzewania i przygotowania ciepłej wody (izolacja przewodów, regulacja hydrauliczna instalacji, stosowanie wysokosprawnych źródeł ciepła), które zostały opisane w ramach rozdziału 2 i pozwalają na zmniejszenie zużycia ciepła w budynkach istniejących i poprzez to na obniżenie negatywnego wpływu na środowisko naturalne.

Jednak bardzo istotną kwestią jest zastosowanie odpowiedniego sposobu sterowania dostawą energii do budynku, który powinien zapewnić komfort cieplny użytkownikom przy jednoczesnym, możliwie dużym obniżeniu zużycia ciepła wykorzystywanego w budynku. Dlatego też proponowana metoda sterowania dostawą ciepła na potrzeby ogrzewania do obiektów (budynki, podstacje ciepłne, kotłownie osiedlowe) istniejących i nowopowstających, pozwoli na zapewnienie komfortu cieplnego użytkowników, osiągnięcie oszczędności zużycia ciepła oraz będzie możliwa do powszechnego i szybkiego (dzięki swoim automatycznym funkcjom i zaawansowanym algorytmom obliczeniowym) zastosowania.

Biorąc to pod uwagę, podczas opracowania niniejszego systemu sterowania będą realizowane następujące założenia, które będą charakteryzowały również innowacyjny charakter tego rozwiązania i pozwolą na to, że:

- system będzie możliwy do powszechnego zastosowania szczególnie w istniejących budynkach z uwagi na fakt, że potencjał oszczędności zużycia ciepła tkwi w już istniejących obiektach (40% zużycia ciepła to sektor mieszkaniowy);
- system ma być możliwy do zainstalowania w szybki i prosty sposób dzięki wykorzystaniu już istniejących urządzeń pomiarowych zużycia ciepła

(ciepłomierze, przepływomierze) i/lub energii (liczniki elektryczne) bez szczegółowej analizy i wnikania w stan techniczny instalacji wewnętrznych oraz bez instalacji dodatkowych przyrządów pomiarowych;

- system będzie posiadał funkcję automatycznego uczenia się i automatycznego wyboru optymalnego modelu cieplnego do prognozowania dla danego obiektu;
- dla każdego obiektu indywidualnie, po zainstalowaniu modułu lub sterownika prognozowego z funkcją uczenia się, opracowywany będzie automatycznie (w innowacyjny sposób) dokładny model cieplno-funkcjonalny danego obiektu;
- w algorytmach prognozowania (przedstawionych w rozdziale 4) uwzględnia się w innowacyjny, automatyczny sposób wpływ temperatury zewnętrznej, prędkości wiatru oraz nasłonecznienia;
- w algorytmach prognozowania (przedstawionych w rozdziale 4) uwzględnia się w innowacyjny, automatyczny sposób wpływ użytkowników systemów ogrzewczych (w formie ich godzinowych profili) bez konieczności instalacji dodatkowych czujników obecności/ruchu czy też innych kosztownych rozwiązań w tym zakresie;
- system sterowania będzie mógł współpracować (wersja 1: moduł) lub może zastąpić (wersja 2: sterownik prognozowy) istniejący w systemie regulator pogodowy.

Dlatego też osiągnięcie zakładanego celu w tym zakresie będzie wymagało:

- opracowania algorytmów obliczeniowych na potrzeby automatycznego wykonania dokładnego modelu cieplnego indywidualnie dla każdego budynku lub innego obiektu, który uwzględnia wpływ głównych czynników zewnętrznych (temperatura zewnętrzna, prędkość wiatru, nasłonecznienie lub zachmurzenie);
- opracowania algorytmów prognozowania zużycia ciepła uwzględniających dokładną prognozę pogody (24h do przodu z aktualizacją co 2h) w zakresie głównych czynników zewnętrznych (temperatura zewnętrzna, prędkość wiatru, nasłonecznienie lub zachmurzenie);
- opracowanie i wykonanie modułu (wersja 1) oraz sterownika prognozowego (wersja 2) i ich urządzeń towarzyszących (moduły komunikacji z nadrzędnym systemem informatycznym, w ramach którego będzie przeprowa-

dzana archiwizacja danych oraz na którym będą wykonywane również obliczenia za pomocą zaawansowanych algorytmów obliczeniowych);

- przetestowanie prototypowego modułu, jak i sterownika prognozowego, urządzeń towarzyszących oraz zaawansowanego nadrzędnego systemu informatycznego pod kątem weryfikacji poprawności i zgodności z założeniami zaplanowanych procesów regulacji w skali demonstracyjnej w istniejących budynkach.

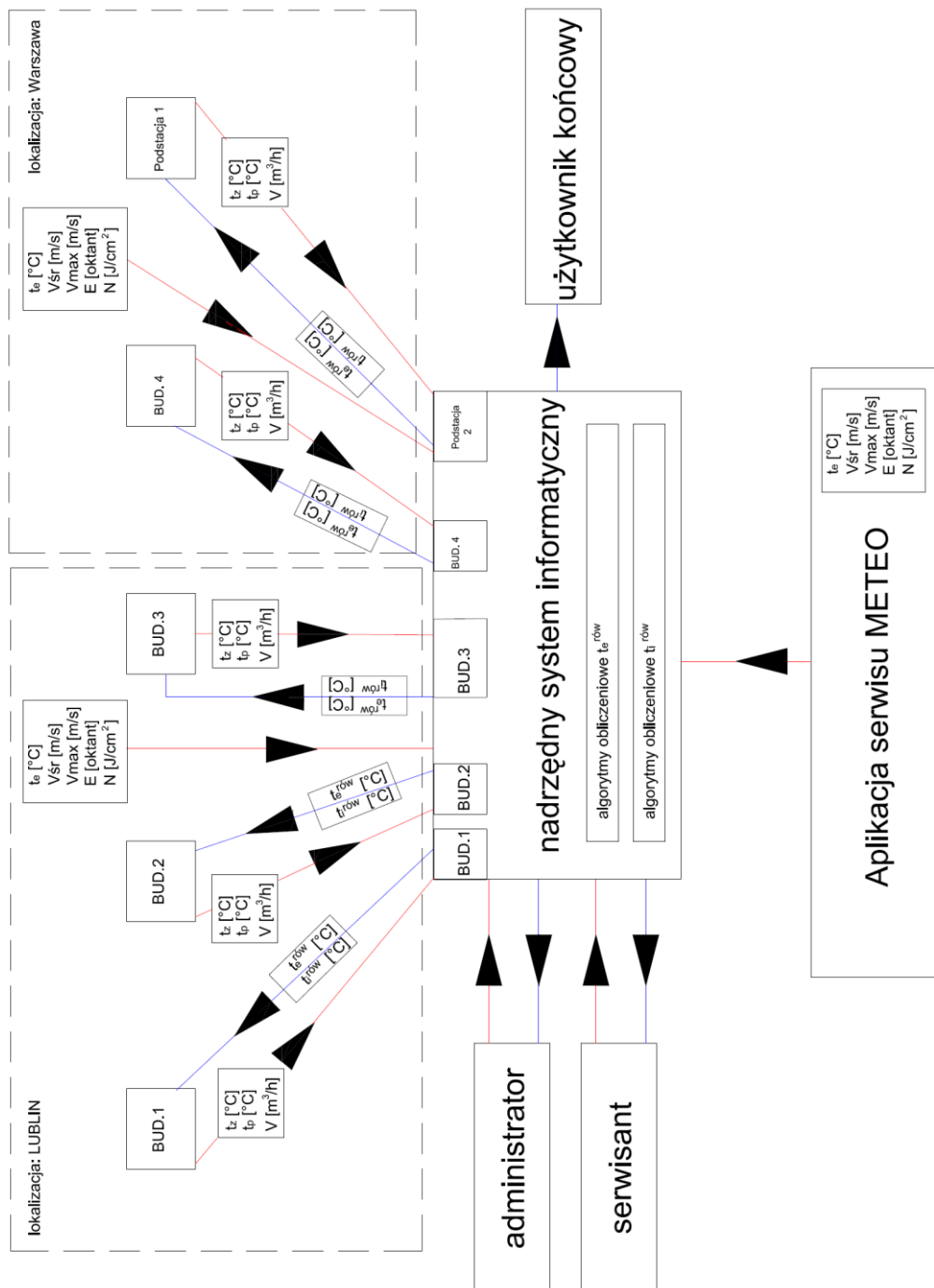
Schemat blokowy działania autorskiego systemu sterowania prognozowego przedstawiono na rysunku 5.1.

Zasada działania tego systemu sterowania prognozowego polega na ciągłej wymianie informacji pomiędzy jednostkami podrzędnymi, które są obiektami sterowania (budynek, podstacja ciepłna, system ciepłowniczy), a nadrzędnym systemem informatycznym, na którym przeprowadzane są obliczenia.

Do nadrzędnego systemu informatycznego przesyłane są informacje z poszczególnych jednostek podrzędnych, które pozwalają na określenie mocy cieplnej dostarczonej do danego obiektu oraz parametry pogodowe, w szczególności temperatura zewnętrzna. Z kolei z nadrzędnego systemu informatycznego przesyłane są do poszczególnych jednostek podrzędnych informacje dotyczące równoważnej temperatury wewnętrznej ($t_i^{równ}$) oraz zewnętrznej ($t_e^{równ}$), co pozwala odpowiednio sterować dostawą ciepła na potrzeby ogrzewania do analizowanych obiektów.

Zatem do nowych (innowacyjnych) funkcjonalności autorskiej metody sterowania prognozowego dostawą ciepła na potrzeby ogrzewania zalicza się:

1. **OBNIŻENIE ZUŻYCIA CIEPŁA** dostarczanego do budynków/obiektów (szczególnie istniejących) na potrzeby ogrzewania dzięki zastosowaniu proponowanego systemu sterowania, który pozwala na prognozowanie zużycia ciepła na cele ogrzewcze z wykorzystaniem modelu budynku (opracowanego na podstawie badań eksploatacyjnych) oraz odpowiedniego, rzeczywistego (wyznaczonego również na podstawie badań eksploatacyjnych) profilu użytkowników, a co za tym idzie przyczynia się do odpowiedniego dostosowania mocy cieplnej dostarczanej i wykorzystywanej w budynku. Zastosowanie tej metody w praktyce inżynierskiej będzie generowało oszczędności ciepła również w istniejących budynkach przy krótkim czasie zwrotu nakładów inwestycyjnych oraz przy bardzo krótkim czasie uruchomienia i prostocie tego procesu, co zdaniem autora rozprawy będzie miało wpływ na wybór tego rozwiązania w stosunku do potencjalnie innych, podobnych rozwiązań z zakresu dostawy ciepła.



Rys. 5.1. Schemat blokowy autorskiego systemu sterowania prognozowego dostawy ciepła na potrzeby ogrzewania

Korzyści/przewaga

Należy zauważyć, że na rynku brak jest podobnych, uniwersalnych (łatwych do powszechnego zastosowania) rozwiązań, które pozwalają na uzyskanie oszczędności zużycia ciepła dzięki zainstalowaniu (szczególnie w budynkach istniejących, które są wyposażone w centralną regulację systemu ogrzewczego) nowatorskiego, centralnego systemu sterowania dostawą ciepła na potrzeby ogrzewania. Dzięki wykorzystaniu innowacyjnych, autorskich algorytmów obliczeniowych możliwe będzie automatyczne określenie rzeczywistego modelu cieplnego budynku (w formie równoważnej temperatury zewnętrznej) oraz dokładnych profili równoważnej temperatury wewnętrznej, która charakteryzuje zachowania użytkowników w budynku. Te zadania będą wykonywane automatycznie bez konieczności instalacji rozbudowanej aparatury pomiarowej, jak ma to miejsce w przypadku technologii MPC (Model Predictive Control) czy też wykonywania teoretycznych modeli na podstawie dokumentacji projektowej (jak w przypadku systemu firmy eGain). Następnie wykorzystanie prognozy pogody, profili użytkowników oraz innowacyjnych algorytmów sterowania pozwoli na dostawę takiej ilości ciepła, jaka wynika z aktualnych potrzeb cieplnych użytkowników i całego systemu ogrzewczego. Rozwiązania charakteryzujące się krótkim czasem zwrotu poniesionych nakładów inwestycyjnych oraz możliwością powszechnego zastosowania szczególnie w budynkach istniejących, są wskazywane jako priorytetowe działania, które mają na celu zwiększenie efektywności energetycznej.

Parametr techniczny i metoda jego weryfikacji

Obniżenie zużycia ciepła dzięki zastosowaniu proponowanej metody sterowania prognozowego dostawą ciepła jest szacowane na poziomie około 10% w porównaniu do stanu wejściowego. Wartość ta została oszacowana na podstawie dostępnej literatury przedmiotu (między innymi przedstawionej w rozdziale 2 oraz 3) oraz dotychczasowych doświadczeń autora rozprawy w zakresie innowacyjnych technik sterowania dostawą ciepła do układów na cele ogrzewcze. Stanem wejściowym/początkowym (rozumianym jako obiekt przed zainstalowaniem proponowanego systemu sterowania dostawą ciepła) będzie budynek/obiekty, w których dostawa ciepła jest już realizowana za pomocą regulacji pogodowej oraz lokale mieszkalne lub usługowe są wyposażone w urządzenia pozwalające na miejscową regulację dostawy ciepła w poszczególnych pomieszczeniach (np. przy wykorzystaniu zaworów termostatycznych). Jako stan doce-

lowy (końcowy) przyjmuje się ten sam obiekt, jak w stanie początkowym tylko wyposażony w proponowany system sterowania dostawą ciepła. Zatem zakłada się, że w okresie prowadzonych badań na potrzeby weryfikacji wskaźnika zmniejszenia (10%) zużycia ciepła nie będą wprowadzane inne modernizacje w zakresie obudowy, jak i systemu ogrzewania danego obiektu, które mogłyby wpłynąć na zmianę czy też dodatkowe oszczędności zużycia ciepła. W celu kalkulacji i weryfikacji tego wskaźnika będzie porównane skorygowane (sprowadzone do standardowego sezonu ogrzewczego) zużycie ciepła z przynajmniej jednego sezonu ogrzewczego przed zainstalowaniem (stan początkowy) proponowanego systemu sterowania oraz z przynajmniej jednego sezonu ogrzewczego po jego zainstalowaniu w danym obiekcie (stan końcowy). Przy sprowadzaniu rzeczywistego zużycia ciepła ($Q_{c.o.}^r$) do zużycia ciepła w standardowym sezonie ogrzewczym ($Q_{c.o.}^s$) będzie wykorzystana znana w praktyce metodyka uwzględniająca współczynnik korekcyjny otrzymany jako iloraz liczby stopniodni w standardowym sezonie ogrzewczym dla danej lokalizacji i liczby stopniodni w aktualnym sezonie ogrzewczym dla danej lokalizacji (zależność 5.1).

$$Q_{c.o.}^s = Q_{c.o.}^r \cdot \varphi \quad [GJ] \quad (5.1)$$

gdzie:

$Q_{c.o.}^r$ – rzeczywiste zużycie ciepła na potrzeby ogrzewania w danym okresie (miesiąc, sezon ogrzewczy), [GJ],

φ – współczynnik korekcyjny dla danego okresu (najczęściej: miesiąc, sezon ogrzewczy), za pomocą którego przeliczano rzeczywiste zużycie ciepła na potrzeby ogrzewania do zużycia ciepła w standardowym sezonie ogrzewczym, był on wyznaczany z zależności 5.2–5.3, [-].

$$SD_{20} = z_0 \cdot (t_i - t_{me}) \quad [(K \cdot d)/a] \quad (5.2)$$

gdzie:

SD_{20} – liczba stopniodni okresu ogrzewania dla danej lokalizacji, [(K·d)/a],

z_0 – liczba dni sezonu ogrzewczego w roku, [d/a],

t_i – projektowa temperatura wewnętrzna, [°C],

t_{me} – średnia temperatura powietrza zewnętrznego w danym okresie, [°C].

$$\varphi = \frac{\sum SD_{20}^{stand}}{\sum SD_{20}^{rzecz}} \quad [-] \quad (5.3)$$

gdzie:

$\sum SD_{20}^{stand}$ – suma liczby stopniodni w standardowym sezonie ogrzewczym dla danej lokalizacji oraz dla analizowanego okresu odniesienia (miesiąc, sezon ogrzewczy),

$\sum SD_{20}^{rzecz}$ – suma liczby stopniodni w analizowanym sezonie ogrzewczym dla danej lokalizacji oraz dla analizowanego okresu odniesienia (miesiąc, sezon ogrzewczy).

2. RZECZYWISTY MODEL CIEPLNY BUDYNKU/OBIEKTU. Indywidualny rzeczywisty model cieplny budynku/objektu opracowywany jest automatycznie na podstawie wskazań ciepłomierza (istniejącego lub dodatkowo zainstalowanego) oraz aktualnych danych meteorologicznych z danej lokalizacji przy wykorzystaniu zaawansowanych, autorskich algorytmów obliczeniowych. Przy opracowaniu modelu cieplnego uwzględnia się tylko dane, w których jest zminimalizowany wpływ użytkowników systemu ogrzewczego, w celu eliminacji tego aspektu na tym etapie.

Korzyści/przewaga

W konkurencyjnych, powszechnie stosowanych technologiach centralnej regulacji (najczęściej pogodowej) instalacji ogrzewczej wykorzystywane są typoszeregi krzywych grzewczych, które są wybierane przez wykonawcę systemu automatyki lub osobę zajmującą się eksploatacją tego typu układów często w sposób przypadkowy bez specjalnych obliczeń. To w konsekwencji powoduje częste niedopasowanie obliczeniowych i rzeczywistych potrzeb cieplnych obiektu (budynek, podstacja ciepła czy też źródło ciepła dla grupy budynków). Dodatkowo nie uwzględnia się przy tym bezpośredniego wpływu prędkości wiatru, jak i nasłonecznienia lub zachmurzenia oraz równoległego wpływu zachowań użytkowników systemu ogrzewczego. Dlatego też proponowana metoda sterowania, która stanowi polską myśl techniczną będzie w sposób automatyczny, a przy tym dokładny pozwalająca na wykonanie modelu cieplnego indywidualnie dla analizowanego obiektu, ponieważ każdy obiekt reaguje w swój sposób na zmiany zewnętrznych parametrów klimatycznych. Model będzie wykonany w formie równoważnej temperatury zewnętrznej uwzględniającej wpływ prę-

kości wiatru oraz nasłonecznienia. Do wykonania tego modelu będą uwzględniane dane z odpowiednich godzin, w których wpływ użytkowników na proces wymiany ciepła w budynku jest zminimalizowany. Pozwoli to na możliwie dokładne, automatyczne (bez potrzeby obsługi, wglądu do dokumentacji obiektu, zaangażowania Inwestora i ingerencji dodatkowych osób) wykonanie modelu cieplnego, który będzie aktualizowany automatycznie co najmniej po każdym sezonie ogrzewczym lub też po wykonaniu modernizacji obudowy budynku (np. docieplenie przegród zewnętrznych) czy też systemu ogrzewczego (np. izolacja przewodów, zastosowanie armatury regulacyjnej).

Parametr techniczny i metoda jego weryfikacji

Opracowany model cieplny dla danego obiektu w formie równoważnej temperatury zewnętrznej (patrz rozdziały 4.1–4.4) będzie charakteryzował się wysokim współczynnikiem determinacji na poziomie powyżej 0,85. Wartość ta została oszacowana na podstawie przeprowadzonych przez autora rozprawy badań eksperymentalnych w tym zakresie. Niniejszy algorytm, umożliwiający wyznaczenie równoważnej temperatury zewnętrznej, będzie pozwalał na opracowanie modelu cieplnego indywidualnie dla konkretnego obiektu (na podstawie rzeczywistych, aktualnych wyników pomiarów lub rzeczywistych, archiwalnych danych pomiarowych), który dzięki uwzględnieniu w obliczeniach tylko odpowiedniej części dostępnych danych będzie charakteryzował się wysoką dokładnością charakteryzowaną przez współczynnik determinacji (R^2) na poziomie powyżej 0,85 (85%). Równanie określające równoważną temperaturę zewnętrzną $t_e^{rów}$ (model cieplny) dla konkretnego budynku będzie zawierało korektę z uwagi na prędkość wiatru (t_e^V) oraz korektę z uwagi na nasłonecznienie/zachmurzenie (t_e^N) zgodnie z zależnością 4.1.

Korekta z uwagi na prędkość wiatru oraz korekta z uwagi na nasłonecznienie/zachmurzenie będzie wyznaczona ze zbioru odpowiednio wybranych danych w formie równania regresji, które charakteryzuje się współczynnikiem determinacji (R^2) powyżej 0,85. Zatem określony powyżej współczynnik determinacji (R^2) pokazuje, jaka część zmienności zmiennej objaśnianej jest wyjaśniona przez opracowany model statystyczny.

3. PROGNOZOWANIE ZUŻYCIA CIEPŁA w istniejących i projektowanych obiektach (budynki –szczególnie mieszkalne i użyteczności publicznej, podstacje cieplne czy też źródło ciepła dla grupy budynków) dzięki wykorzystaniu

opracowanego automatycznie (samouczenie się modelu) autorskiego modelu cieplnego obiektu (w formie równoważnej temperatury zewnętrznej) oraz rzeczywistych profili godzinowych równoważnej temperatury wewnętrznej (obejmującej między innymi zachowania i preferencje użytkowników systemu ogrzewczego). Szczegółowy opis odnośnie profili równoważnej temperatury wewnętrznej zamieszczony jest w podrozdziale 4.5.

Korzyści/przewaga

W dostępnych na rynku technologiach centralnej regulacji instalacji ogrzewczej nie stosowane jest prognozowanie zużycia ciepła (np. z wyprzedzeniem o 12h) na cele ogrzewcze z wykorzystaniem rzeczywistego modelu budynku (uwzględniającego wpływ czynników zewnętrznych) oraz odpowiednio dobranego profilu równoważnej temperatury wewnętrznej, która uwzględnia zachowania/preferencje użytkowników systemu, a co za tym idzie przyczynia się do odpowiedniego dostosowania mocy cieplnej dostarczanej względem wykorzystywanej w budynku. Całość tego procesu realizowana jest automatycznie dzięki zastosowaniu odpowiednich, autorskich algorytmów obliczeniowych, które wypracowują zoptymalizowane modele cieplne, profile równoważnej temperatury wewnętrznej dla indywidualnych obiektów. Obliczenia te prowadzone są indywidualnie dla poszczególnych obiektów na nadrzędnym systemie informatycznym i następnie niezbędne informacje przekazywane są do modułów lub sterowników prognozowych w poszczególnych obiektach.

Parametr techniczny i metoda jego weryfikacji

Na podstawie przeprowadzonych badań własnych autora rozprawy, zakłada się, że dokładność prognozy zużycia ciepła będzie charakteryzowała się średnim błędem względnym poniżej 15%. Prognoza mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania dla każdego obiektu będzie wykonywana przy uwzględnieniu iloczynu rzeczywistego współczynnika strat ciepła dla danego budynku i różnicy pomiędzy równoważną temperaturą wewnętrzną i równoważną temperaturą zewnętrzną, co zostało przedstawione w formie równania 4.7 w rozdziale 4. Dokładność prognozowania zużycia ciepła na potrzeby ogrzewania w poszczególnych obiektach jest oceniana na podstawie testowania opracowanego algorytmu w analizowanych obiektach przy wykorzystaniu aktualnego zużycia ciepła na potrzeby ogrzewcze i aktualnej prognozy pogody oraz dzięki określeniu średniego błędu względnego zgodnie z równaniem 4.9 przedstawionym w rozdziale 4, który

pokazuje różnicę pomiędzy prognozowaną wartością zużycia ciepła na cele c.o. dla danej godziny a wartością rzeczywistą (faktyczną) mocy cieplnej dla danej godziny.

4. PROSTOTA ZASTOSOWANIA, EKSPLOATACJI ORAZ EKONOMIKA i UNIWERSALNOŚĆ proponowanej metody sterowania. Kompleksowe podejście do obiektu sterowania oraz bezobsługowość (dzięki automatycznemu procesowi uczenia się charakterystyki rzeczywistego obiektu oraz zaawansowanym algorytmom prognozowania), pozwala na szybkie zainstalowanie systemu w obiekcie (budynek, podstacja ciepłna czy też źródło ciepła dla grupy budynków), wykonanie procesów samouczenia się modelu oraz przejścia do fazy prognozowania zużycia ciepła bez konieczności instalowania dodatkowych urządzeń i bez potrzeby analizy stanu istniejącego obudowy budynku oraz instalacji ogrzewczych. Świadczy to o uniwersalności zastosowania proponowanej metody.

Korzyści/przewaga

Na rynku nie ma dostępnych technik sterowania dostawą ciepła do obiektów, które w kompleksowy oraz bezinwazyjny (brak konieczności instalowania dodatkowych urządzeń pomiarowych w poszczególnych pomieszczeniach budynku) sposób realizują ten proces z uwzględnieniem prognozy pogody (w zakresie temperatury powietrza zewnętrznego, prędkości wiatru, nasłonecznienia lub zachmurzenia), rzeczywistego, dokładnego modelu obiektu (wypracowanego na podstawie badań eksploatacyjnych) oraz odpowiednio wybranego profilu równoważnej temperatury wewnętrznej (uwzględniającej zachowania użytkowników systemu ogrzewczego). Dzięki prostocie instalacji, automatyzacji procesów obliczeniowych, możliwości zainstalowania w budynkach istniejących przy wykorzystaniu istniejącego regulatora/sterownika oraz obniżeniu zużycia ciepła szczególnie w istniejących budynkach mieszkalnych i użyteczności publicznej przy krótkim czasie zwrotu poniesionych nakładów inwestycyjnych (około 1 roku) można spodziewać się powszechnego wykorzystania tego układu (efekt skali). Dodatkowym aspektem pozwalającym na szerokie zastosowanie analizowanego systemu jest jego uniwersalność, może być on zainstalowany w instalacji ogrzewczej bez konieczności posiadania jej dokumentacji technicznej, jak i dokładnej inwentaryzacji stanu istniejącego, co może przyczynić się do jego szerokiego zastosowania w istniejących obiektach.

Parametr techniczny i metoda jego weryfikacji

Proponowany system sterowania prognozowego dostawą ciepła będzie charakteryzował się krótkim czasem realizacji prac modernizacyjnych (implementacja systemu w budynku przez przeszkoloną firmę), poniżej 1 dnia. W przypadku braku potrzeby montażu dodatkowych urządzeń pomiarowych czy też regulacyjnych, co ma miejsce w przypadku zastosowania modułu współpracującego z istniejącym sterownikiem, to implementacja systemu w budynku przez przeszkoloną firmę będzie trwała poniżej 3 godzin. Czas implementacji podany powyżej dla tych dwóch przypadków jest mierzony od momentu wejścia osób z firmy instalacyjnej do obiektu do momentu wyjścia firmy instalacyjnej, co jest równoznaczne z podpisaniem końcowego protokołu stwierdzającego poprawność zainstalowania proponowanego systemu w obiekcie przez Inwestora.

W przypadku montażu modułu współpracującego z istniejącym sterownikiem brak jest utrudnień dla mieszkańców lub innych użytkowników obiektu podczas realizacji prac modernizacyjnych (implementacji proponowanego systemu sterowania w obiekcie). W przypadku potrzeby montażu dodatkowych urządzeń pomiarowych czy też regulacyjnych, co może mieć miejsce w przypadku zastosowania sterownika prognozowego, to utrudnienia będą trwały poniżej 4 godzin, co jest związane z ewentualną potrzebą spuszczenia części czynnika ogrzewczego z instalacji i montażem urządzeń pomiarowych lub regulacyjnych. Powyżej opisany brak utrudnień lub ich krótkotrwały charakter wynika z faktu, że prace montażowe realizowane są w kotłowni lub wymiennikowi budynku i dlatego mogą być nawet nie zauważone przez użytkowników poszczególnych lokali.

5.2. Charakterystyka rynku docelowego

Podstawą do określenia rynku docelowego była wykonana analiza całego obszaru, gdzie możliwe jest zastosowanie proponowanego systemu sterowania dostawą ciepła na potrzeby ogrzewania. Jak już wcześniej wspomniano, zgodnie z *Polityką energetyczną Polski do 2030 roku* konieczne jest zwiększenie efektywności energetycznej szczególnie przez odbiorców końcowych.

Dlatego też głównym obszarem zastosowania tego energooszczędnego rozwiązania są budynki ogrzewane. W Polsce łączna liczba budynków wielorodzinnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej jest na poziomie

około 0,5 miliona – dane GUS (2017). Według Ahern i Norton (2015) w 2010 roku zużycie energii w budynkach stanowiło 41% całkowitej końcowej energii w krajach członkowskich Unii Europejskiej, z czego 27% przypadało na budynki mieszkalne, a 14% na budynki niemieszkalne. W 2012 roku sektor budynków w krajach członkowskich Unii Europejskiej zużywał już około 40% całkowitej energii końcowej: budynki niemieszkalne 1730 TWh (13,6%), a budynki mieszkalne 3360 TWh (26,4%) (Carvalho i in., 2015). Jak już podkreślono to w rozdziale 2, w sektorze mieszkaniowym największe zapotrzebowanie energii związane jest z ogrzewaniem pomieszczeń. Według danych GUS (2014) w gospodarstwach domowych na potrzeby ich ogrzewania wykorzystywane jest 68,8%, na potrzeby przygotowania ciepłej wody użytkowej 14,8% całkowitego zużycia energii, a pozostałe cele stanowią gotowanie, oświetlenie oraz urządzenia elektryczne. Jak widać, w sektorze budynków tkwi zatem olbrzymi potencjał oszczędności energii, szczególnie w zakresie ich ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej. Dlatego też niezbędne jest ograniczenie zapotrzebowania energii na ogrzewanie do poziomów optymalnych pod względem kosztów przy zachowaniu komfortu cieplnego. Dążenia do ograniczenia zużycia energii, wzrostu efektywności energetycznej oraz wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych stanowią istotne działania konieczne do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych (Dyrektywa 2010/31/UE), ponieważ sektor budynków odpowiedzialny jest za 35% emisji gazów cieplarnianych (Carutasiu i in., 2015).

Z drugiej strony, analizując raport wykonany przez Kantar Public (Raport Kantar Public, 2017), zauważono, że prawie 9 z 10 osób chciałoby mieszkać w efektywnym energetycznie budynku (tylko 6% nie wykazuje zainteresowania energooszczędnym budownictwem) oraz około 66% osób uważa, że inwestycja w rozwiązania poprawiające efektywność energetyczną jest uzasadniona.

Dlatego też biorąc powyższe pod uwagę proponowany, innowacyjny system sterowania dostawą ciepła jest dedykowany w szczególności do zainstalowania w już istniejących budynkach mieszkalnych i użyteczności publicznej wyposażonych w wodne, centralne instalacje ogrzewcze oraz posiadających (lub nie) system centralnej regulacji dostawy ciepła do instalacji ogrzewczej (regulacja pogodowa węzła ciepłowniczego, kotłowni, pompy ciepła lub jeszcze innych źródeł ciepła) w celu zwiększenia efektywności energetycznej. Z uwagi na uniwersalność i prostotę instalowania, jak i bezobsługowy charakter proponowanego systemu sterowania można będzie go aplikować w budynku bez względu na stan techniczny, rodzaj czy też materiał wewnętrznej instalacji ogrzewczej i nie

będzie on wymagał zainstalowania dodatkowych urządzeń w pomieszczeniach poszczególnych użytkowników/mieszkańców. Można będzie go zainstalować również w nowoprojektowanych obiektach czy też w źródłach ciepła dostarczających ciepło na potrzeby kilku obiektów (podstacje cieplne, ciepłownie i kotłownie osiedlowe), które mogą wykorzystywać dodatkowo odnawialne źródła energii do wspomagania pracy źródeł konwencjonalnych.

6. Podsumowanie

Badania przeprowadzone w budynkach wielorodzinnych, użyteczności publicznej, podstacjach ciepłych oraz dwóch wybranych miejskich systemach ciepłowniczych wykazały, że autorska metoda pozwala na prognozowanie zapotrzebowania na moc cieplną na potrzeby ogrzewania z wysoką dokładnością, charakteryzowaną przez średni błąd względny prognozy poniżej 15%.

Wpływ głównych czynników zewnętrznych (temperatura powietrza zewnętrznego, prędkość wiatru, nasłonecznienie lub zachmurzenie) na zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania został opracowany w formie równoważnej temperatury zewnętrznej (t_e^{row}), która uwzględnia korektę z uwagi na prędkość wiatru (korekta ze znakiem ujemnym) oraz korektę z uwagi na nasłonecznienie (korekta ze znakiem dodatnim). Korekty te powinny być uwzględniane indywidualnie dla każdego obiektu, ponieważ może on odmiennie reagować na dane warunki pogodowe. W przypadku analizy dotyczącej wpływu zachmurzenia na zapotrzebowanie mocy cieplnej na cele ogrzewania nie osiągnięto logicznych wyników w przypadku analizowanych obiektów, ponieważ wraz ze wzrostem stopnia zachmurzenia powinno wzrastać zapotrzebowanie na moc cieplną przy danej temperaturze powietrza zewnętrznego i przy możliwie zbliżonej prędkości wiatru. Jednak w przypadku analizowanych obiektów było odwrotnie i dlatego pominięto ten parametr w dalszych analizach.

Wpływ prędkości wiatru na zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania zaleca się uwzględnić w formie korekty temperatury zewnętrznej (t_e^V). Wyznaczenie tej korekty dla danego obiektu rekomenduje się na podstawie danych z godzin nocnych (23–4), ponieważ właśnie w tych godzinach zminimalizowane są pozostałe czynniki zewnętrzne, jak i wewnętrzne, które mogą zakłócać poprawne zdefiniowanie wpływu prędkości wiatru na zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania obiektów. Dodatkowo rekomenduje się uwzględnienie w tych obliczeniach maksymalnej prędkości wiatru zamiast średniej prędkości wiatru, ponieważ dzięki temu można uzyskać wyższe wartości współczynników determinacji.

Również wpływ nasłonecznienia na zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania rekomenduje się uwzględnić w formie korekty temperatury zewnętrznej (t_e^N). Przy wyznaczeniu tej korekty zaleca się wykorzystywać tylko dane dla maksymalnej prędkości wiatru poniżej 3 m/s z godzin 10–14 (szczegół-

nie w budynkach wielorodzinnych) w celu poprawnego uwzględniania wpływu nasłonecznienia na zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania obiektów. Takie podejście pozwala zminimalizować wpływ użytkowników systemu oraz wpływ prędkości wiatru, które w większości przypadków występują równolegle wraz z nasłonecznieniem i zakłócają czy też uniemożliwiają właściwe uwzględnienie wpływu promieniowania słonecznego na zapotrzebowanie mocy cieplnej na potrzeby ogrzewania obiektów. Dodatkowo przy wyborze wykonywania korelacji aktualnej czy też przesuniętej (o 1h czy też 2h do przodu) mocy cieplnej względem nasłonecznienia zaleca się brać pod uwagę specyfikę każdego obiektu indywidualnie, ponieważ każdy obiekt może reagować inaczej na zyski ciepła od promieniowania słonecznego, co należy uwzględnić (najlepiej eksperymentalnie) podczas wykonywania tych obliczeń. Dlatego wyboru najbardziej dokładnego (pozwalającego na uzyskanie najmniejszego średniego błędu względnego prognozy) profilu równoważnej temperatury zewnętrznej (wariant 1–4) należy dokonywać indywidualnie dla danego budynku.

Z kolei wpływ czynników wewnętrznych (zachowania/preferencje mieszkańców) na potrzeby prognozowania zapotrzebowania mocy cieplnej rekomenduje się uwzględnić w formie profilu godzinowego (profil A, B, C, D lub E) równoważnej temperatury wewnętrznej ($t_i^{równ}$). Wyboru najbardziej dokładnego (pozwalającego na uzyskanie najmniejszego średniego błędu względnego prognozy) profilu równoważnej temperatury wewnętrznej (profil A, B, C, D, E) należy dokonywać indywidualnie dla danego obiektu.

W przypadku wdrożenia autorskiej metody prognozowania zapotrzebowania na ciepło na potrzeby ogrzewania do praktyki inżynierskiej w formie autorskiej metody sterowania prognozowego dostawą ciepła na potrzeby ogrzewania, rezultatem będzie nowy produkt (system sterowania), który w szybki, prosty, ekonomicznie uzasadniony, a mimo to dokładny sposób uwzględni wpływ głównych czynników zewnętrznych (temperatura powietrza zewnętrznego, prędkość wiatru, nasłonecznienie) i wewnętrznych (zachowania i preferencje użytkowników systemu) na potrzeby odpowiedniego sterowania dostawą ciepła szczególnie w budynkach już istniejących, ponieważ w nich zużywana jest obecnie największa ilość ciepła.

Zastosowanie tak opracowanego systemu sterowania układów ogrzewczych przy uwzględnieniu prognozy pogody, odpowiedniej równoważnej temperatury zewnętrznej (charakterystycznej dla danego obiektu) oraz odpowiedniego, aktualnego dobowego profilu równoważnej temperatury wewnętrznej (charaktery-

stycznego dla danego obiektu) może pozwolić na uzyskanie zmniejszenia zużycia ciepła na poziomie co najmniej 10% w porównaniu do wariantu wejściowego (w którym zainstalowana jest już tradycyjna regulacja pogodowa).

Zatem proponowany system sterowania instalacjami ogrzewczymi, cechuje się dużym potencjałem rynkowym, ze względu na możliwość uzyskania zmniejszenia zużycia ciepła (co najmniej o 10%) w obiektach (szczególnie w budynkach) już istniejących w porównaniu do dostępnych dotychczas technologii oraz możliwością szerokiego zastosowania (efekt skali) dzięki automatyzacji zaawansowanych procesów obliczeniowych oraz minimalizacji czasu instalacji całego układu regulacji.

Literatura

- [1] Adamski M., Ruszczyk J., 2012. Nowy system pogodowej regulacji centralnego ogrzewania. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, 278–283.
- [2] Aditya L., Mahlia T.M.I., Rismanchi B., Ng H.M., Hasan M.H., Metselaar H.S.C., Muraza O., Aditiya H.B., 2017. A review on insulation materials for energy conservation in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 73, 1352–1365.
- [3] Afram A., Janabi-Sharifi F., 2014. Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC). *Building and Environment* 72, 343–355.
- [4] Aguilar, F.J., Aledo, S., Quiles P.V., 2016. Experimental study of the solar photovoltaic contribution for the domestic hot water production with heat pumps in dwellings. *Applied Thermal Engineering* 101, 379–389.
- [5] Ahern C., Norton B., 2015. Energy savings across EU domestic building stock by optimizing hydraulic distribution in domestic space heating systems. *Energy and Buildings* 91, 199–209.
- [6] Ahn J., Cho S., 2017. Development of an intelligent building controller to mitigate indoor thermal dissatisfaction and peak energy demands in a district heating system. *Building and Environment* 124, 57–68.
- [7] Al-Homoud M.S. 2001. Computer-aided building energy analysis techniques. *Building and Environment* 36, 421–433.
- [8] Amasyali K., El-Gohary N., 2018. A review of data-driven building energy consumption prediction studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81, 1192–1205.
- [9] Andrić I., Pina A., Ferrão P., Fournier J., Le Corre O., 2017. Assessing the feasibility of using the heat demand-outdoor temperature function for a long-term district heat demand forecast. *Energy Procedia* 116, 460–469.
- [10] Argiriou A.A., Bellas-Velidis I., Balaras C.A., 2000. Development of a neural network heating controller for solar buildings. *Neural Networks*, 811–820.
- [11] Ascione F., Cheche N., De Masi R.F., Minichiello F., Vanoli G.P., 2015. Design the refurbishment of historic buildings with the cost-optimal methodology: The case study of a XV century Italian building. *Energy and Buildings* 99, 162–176.

- [12] Axaopoulos I., Axaopoulos P., Panayiotou G., Kalogirou S., Gelegenis J., 2015. Optimal economic thickness of various insulation materials for different orientations of external walls considering the wind characteristics. *Energy* 90, 939–952.
- [13] Balan R., Cooper J., Chao K-M., Stan S., Donca R., 2011. Parameter identification and model based predictive control of temperature inside a house. *Energy and Buildings* 43, 748–758.
- [14] Belic F., 2015. HVAC Control Methods - A review, 19th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Romania, 2015.
- [15] Bianco L., Serra V., Fantucci S., Dutto M., Massolino M., 2015. Thermal insulating plaster as a solution for refurbishing historic building envelopes: First experimental results. *Energy and Buildings* 95, 86–91.
- [16] Binks, A.N., Kenway, S.J., Lant, P.A., Head, B.W., 2016. Understanding Australian household water-related energy use and identifying physical and human characteristics of major end uses. *Journal of Cleaner Production* 135, 892–906.
- [17] Binks, A.N., Kenway, S.J., Lant, P.A., 2017. The effect of water demand management in showers on household energy use. *Journal of Cleaner Production* 157, 177–189.
- [18] Biswas R., Robinson M. D., Fumo N., 2016. Prediction of residential building energy consumption: A neural network approach. *Energy* 117, 84–92.
- [19] Bochenek M., 2012. Próźniowe Panele Izolacyjne (VIPs) w budownictwie. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, vol. 50, No 2/II/I, 79–86.
- [20] Bøhm B., Danig P.O., 2004. Monitoring the energy consumption in a district heated apartment building in Copenhagen, with specific interest in the thermodynamic performance. *Energy and Buildings* 36, 229–236.
- [21] Caruana R., Lawrence S., Giles C., 2001. Overfitting in Neural Nets: Backpropagation, Conjugate Gradient, and Early Stopping. *Advances in Neural Information Processing Systems* 13, 402–408.
- [22] Carutasiu MB., Tanasieva V., Ionescua C., Danu A., Necula H., Badea A., 2015. Reducing energy consumption in low energy buildings through implementation of a policy system used in automated heating systems. *Energy and Buildings* 94, 227–239.
- [23] Carvalho AD., Mendrinos D., De Almeida AT., 2015. Ground source heat pump carbon emissions and primary energy reduction potential for heating in

buildings in Europe – results of a case study in Portugal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45, 755–768.

[24] Catalina T., Iordache V., Caracaleanu B., 2013. Multiple regression model for fast prediction of the heating energy demand. *Energy and Buildings* 57, 302–312.

[25] Celenza L., Dell’Isola M., Ficco G., Palella B.I., Riccio G., 2015. Heat accounting in historical buildings, *Energy and Buildings* 95, 47–56.

[26] Chen D., Wang X., Ren Z., 2012. Selection of climatic variables and time scales for future weather preparation in building heating and cooling energy predictions. *Energy and Buildings* 51, 223–233.

[27] Cholewa T., Siuta-Olcha A., 2015. Long term experimental evaluation of the influence of heat cost allocators on energy consumption in a multifamily building. *Energy and Buildings* 104, 122–130.

[28] Cholewa T., Siuta-Olcha A., 2016. Racjonalizacja zużycia energii w budownictwie mieszkaniowym. Ośrodek Informacji "Technika instalacyjna w budownictwie". INSTAL. Warszawa 2016. ISBN 978-83-88695-33-9.

[29] Cholewa T., Siuta-Olcha A., Balaras C.A., 2017. Actual energy savings from the use of thermostatic radiator valves in residential buildings – Long term field evaluation. *Energy and Buildings* 151, 487–493.

[30] Cholewa T., Balen I., Siuta-Olcha A., 2018. On the influence of local and zonal hydraulic balancing of heating system on energy savings in existing buildings–Long term experimental research. *Energy and Buildings* 179, 156–164.

[31] Cholewa T., Siuta-Olcha A., Anasiewicz R., 2019. On the possibilities to increase energy efficiency of domestic hot water preparation systems in existing buildings - Long term field research. *Journal of Cleaner Production* 217, 194–203.

[32] Chmielnicki W.J., 2008. Układy regulacji procesów cieplnych w budynkach oraz ich właściwości. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, No 2, 7–11.

[33] Chmielnicki W.J., 2009a. Analiza właściwości układów regulacji instalacji centralnego ogrzewania. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja*, No 6, 20–25.

[34] Chmielnicki W.J., 2009b. Węzły ciepłownicze. *Ciepłownictwo, ogrzewnictwo, wentylacja*, No 7-8, 6–12.

[35] Chmielnicki W. J., 2010. Algorytmy wykorzystujące sieci neuronowe do regulacji węzłów ciepłowniczych. *Rynek Energii*, 62–70.

-
- [36] Ciulla G., Lo Brano V., D'Amico A., 2016. Numerical assessment of heating energy demand for office buildings in Italy. *Energy Procedia* 101, 224–231.
- [37] Cockroft J., Cowie A., Samuel A., Strachan P., 2017. Potential energy savings achievable by zoned control of individual rooms in UK housing compared to standard central heating controls. *Energy and Buildings* 136, 1–11.
- [38] Correa F., Cuevas C., 2018. Air-water heat pump modelling for residential heating and domestic hot water in Chile. *Applied Thermal Engineering* 143, 594–606.
- [39] Cox R.A., Drews M., Rode C., Nilsen S.B., 2015. Simple future weather files for estimating heating and cooling demand. *Energy and Buildings* 83, 104–114.
- [40] da Cunha, J.P., Eames, P., 2018. Compact latent heat storage decarbonisation potential for domestic hot water and space heating applications in the UK. *Applied Thermal Engineering* 134, 396–406.
- [41] Dahl M., Brun A., B. Andresen G., 2017. Using ensemble weather predictions in district heating operation and load forecasting. *Applied Energy* 193, 455–465.
- [42] Dascalaki E.G., Balaras C.A., Kontoyiannidis S., Droutsas K.G., 2016. Modeling energy refurbishment scenarios for the Hellenic residential building stock towards the 2020 & 2030 targets. *Energy and Buildings* 132, 74–90.
- [43] De Rosa M., Bianco V., Scarpa F., Tagliofico L., 2014. Heating and cooling building energy demand evaluation; a simplified model and modified degree days approach. *Applied Energy* 128, 217–229.
- [44] Deb C., Zhang F., Yang J., Lee S.W., Shah K.W., 2017. A review on time series forecasting techniques for building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74, 902–924.
- [45] Deng J., Furbo S., Kong W., Fan J., 2018. Thermal performance assessment and improvement of a solar domestic hot water tank with PCM in the mantle. *Energy and Buildings* 172, 10–21.
- [46] Dianshu F., Sovacool B.K., Vu K.M., 2010. The barriers to energy efficiency in China: Assessing household electricity savings and consumer behavior in Liaoning Province. *Energy Policy* 38, 1202–1209.
- [47] Dopke J., 2010. The calculation of heating degree days based on Eurostat Method. *RynekGazu.pl*.
- [48] Dotzauer E., 2002. Simple model for prediction of loads in district-heating systems. *Applied Energy* 73, 277–284.

- [49] Dudek W., 2005. Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do prognozowania zapotrzebowania na ciepło w miejskim systemie ciepłowniczym, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Mechanika* 211, 83–92.
- [50] Dyrektywa 2010/31/UE: Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 19 maja 2010 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków.
- [51] Ekici B.B., Aksoy U. T., 2009. Prediction of building energy consumption by using artificial neural networks. *Advances in Engineering Software* 40, 356–362.
- [52] Emery A.F., Kippenhan C.J., 2006. A long term study of residential home heating consumption and the effect of occupant behavior on homes in the Pacific Northwest constructed according to improved thermal standards. *Energy* 31, 677–693.
- [53] Fang T., Lahdelma R., 2016. Evaluation of a multiple linear regression model and SARIMA model in forecasting heat demand for district heating system. *Applied Energy* 179, 544–552.
- [54] Faruqi A., Sergici S., Sharif A., 2010. The impact of informational feedback on energy consumption—A survey of the experimental evidence. *Energy* 35, 1598–1608.
- [55] Fedorowicz, R., Huk, R., Kołodziński, E., Kowalski, A., 2002. Komputerowe wspomaganie zarządzania siecią ciepłowniczą. Zakres i możliwości komputerowego wspomaganie zarządzania siecią ciepłowniczą. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* 33, 3–9.
- [56] Feliński, P., Sekret, R., 2017. Effect of PCM application inside an evacuated tube collector on the thermal performance of a domestic hot water system. *Energy and Buildings* 152, 558–567.
- [57] Ferkl L, Siroky J., 2010. Ceiling radiant cooling: comparison of ARMAX and subspace identification modelling methods. *Building and Environment* 45, 205–212.
- [58] Fischer M., 2008. Modeling and Forecasting energy demand: Principles and difficulties. In *Management of Weather and Climate Risk in the Energy Industry*, vol. 1, No 1, 207–226.
- [59] Fokaides P.A., Papadopoulos A.M., 2014. Cost-optimal insulation thickness in dry and mesothermal climates: Existing models and their improvement. *Energy and Buildings* 68, 203–212.

- [60] Frayssinet L., Merlier L., Kuznik F., Hubert J., Milliez M., Roux J., 2018. Modeling the heating and cooling energy demand of urban buildings at city scale. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81, 2318–2327.
- [61] Freire R., Oliveira G., Mendes N., 2008. Predictive controllers for thermal comfort optimization and energy savings. *Energy and Buildings* 40, 1353–1365.
- [62] Frost, Sullivan, 2010. Polska na początku drogi w rozwoju rynku inteligentnych liczników, *Serwis Energetyka*.
- [63] Gadenne D., Sharma B., Kerr D., Smith T., 2011. The influence of consumers' environmental beliefs and attitudes on energy saving behaviours, *Energy Policy* 39, 7684–7694.
- [64] Galvin R., 2013. Targeting 'behavers' rather than behaviours: A 'subject-oriented' approach for reducing space heating rebound effects in low energy dwellings. *Energy and Buildings* 67, 596–607.
- [65] Geryło R., Pietruszka B., 2010. Izolacje cieplne na bazie aerożeli krzemionkowych. *Materiały Budowlane* 1, 56–57.
- [66] Guan L., 2009. Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings. *Building and Environment* 44, 793–800.
- [67] Guo X., Goumba A.P., 2018. Air source heat pump for domestic hot water supply: Performance comparison between individual and building scale installations. *Energy* 164, 794–802.
- [68] GUS, 2014 GUS: Główny Urząd Statystyczny, Zużycie energii w gospodarstwach domowych w 2012 r. Informacje i opracowania statystyczne, Warszawa 2014.
- [69] GUS, 2017, <https://stat.gov.pl>.
- [70] Han H.J., Jeon Y.I., Lim S.H., Kim W.W., Chen K., 2010. New developments in illumination, heating and cooling technologies for energy-efficient buildings. *Energy* 35, 2647–2653.
- [71] Hepbasli A., 2012. Low exergy (LowEx) heating and cooling systems for sustainable buildings and societies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 73–104.
- [72] Henze G.P., Dodier R.H., Krarti M., 1997. Development of a predictive optimal controller for thermal energy storage systems. *HVAC R Res* 3, 233–64.
- [73] Henze G.P., Kalz D.E., Liu S., Felsmann C., 2005. Experimental analysis of model-based predictive optimal control for active and passive building thermal storage inventory. *HVAC R Res* 11, 189–213.

- [74] Hopkowicz M., 2005. Metody analizy stanów sieci ciepłowniczej w przewidywaniu zmian obciążenia systemu. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 11, 62–63.
- [75] Hopkowicz M., 2007. Analiza zmienności zapotrzebowania na moc ciepłą budynków przyłączonych do miejskiego systemu ciepłowniczego. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* 11, 31–33.
- [76] Hopkowicz M., Pytel K., 2009. Analiza opóźnień czasowych w ocenie zapotrzebowania na moc ciepłą miejskiej sieci ciepłowniczej. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* 5, 8–12.
- [77] Hopkowicz M., Pytel K., 2010. Wpływ zachmurzenia na zapotrzebowanie na moc w systemach ciepłownicznych. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* 41, 3–8.
- [78] Hopkowicz M., Pytel K., 2015. Prognozowanie zapotrzebowania na moc w miejskim systemie ciepłowniczym z wykorzystaniem prognozy meteorologicznej. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* 46, 207–211.
- [79] Idowu S. i inni, 2016. Applied machine learning: Forecasting heat load in district heating system. *Energy and Building* 133, 478–488.
- [80] Jachura A., Sekret R., 2015. Poprawa wykorzystania mocy cieplnej miejskiego systemu ciepłowniczego poprzez uwzględnienie krótkookresowego zapotrzebowania na ciepło. *Rynek Energii*, No 10/2014.
- [81] Jaffal I., Inard C., Ghiaus C., 2009. Fast method to predict building heating demand based on the design of experiments. *Energy and Buildings* 41, 669–677.
- [82] Janowicz L., 2011. Inteligentne sieci energetyczne. *Nowa Energia* 22, 36.
- [83] Johansson P., Adl-Zarrabi B., Kalagasidis A.S., 2016. Evaluation of 5 years' performance of VIPs in a retrofitted building façade. *Energy and Buildings* 130, 488–494.
- [84] Johansson Ch., Bergkvist M., Geysen D., De Somer O., Vanhoudt D., 2017. Operational Demand Forecasting In District Heating Systems Using Ensembles Of Online Machine Learning Algorithms. *Energy Procedia* 116, 208–216.
- [85] Ju, F., Fan, X., Chen, Y., Wang, T., Tang, X., Kuang, A., Ma, S., 2018. Experimental investigation on a heat pump water heater using R744/R290 mixture for domestic hot water. *International Journal of Thermal Sciences* 132, 1–13.
- [86] Kargiriou A., Bellas-Velidis I., Balaras C., 2000. Development of a neural network heating controller for solar buildings. *Neural Networks* 13, 811–820.

- [87] Kargiriou A, 2000. Applications of artificial neural-networks for energy systems. *Applied Energy* 67, 17–35.
- [88] Kalogirou S.A., 2006. Artificial neural networks in energy applications in buildings. *International Journal of Low Carbon Technologies* 1, 201–216.
- [89] Kapsalis V., Safouri G., Hadellis L., 2018. Cost/comfort-oriented optimization algorithm for operation scheduling of electric water heaters under dynamic pricing. *Journal of Cleaner Production* 198, 1053–1065.
- [90] Karlsson H., Hagentoft C-E., 2011. Application of model based predictive control for water-based floor heating in low energy residential buildings. *Building and Environment* 46, 556–69.
- [91] Kordana S., Słyś D., Dziopak J., 2014. Rationalization of water and energy consumption in shower systems of single-family dwelling houses. *Journal of Cleaner Production* 82, 58–69.
- [92] Kubicka S., Szlęk A., 2014. Wpływ zmienności dostarczonej mocy cieplnej na temperaturę pomieszczeń ogrzewanych. *Rynek Energii* 115.
- [93] Kozak S., 2012. Advanced Control Engineering Methods in Modern Technological Applications. *Carpathian Control Conference (ICCC)* 392–397.
- [94] Las-Heras-Casas J., Lopez-Ochoa L.M., Paredes-Sanchez J.P., Lopez-Gonzalez L.M., 2018. Implementation of biomass boilers for heating and domestic hot water in multi-family buildings in Spain: Energy, environmental, and economic assessment. *Journal of Cleaner Production* 176, 590–603.
- [95] Li Q., Augenbroe G., Brown J., 2016. Assessment of linear emulators in lightweight Bayesian calibration of dynamic building energy models for parameter estimation and performance prediction. *Energy and Buildings* 124, 194–202.
- [96] Ling X., 2017. The heat load prediction model based on BP neural network–Markov model. *Procedia Computer Science* 107, 296–300.
- [97] Liu F.G., Tian Z.Y., Dong F.J., Yan C., Zhang R., Yan A.B., 2017. Experimental study on the performance of a gas engine heat pump for heating and domestic hot water. *Energy and Buildings* 152, 273–278.
- [98] Liu L., Fu L., Jiang Y., Guo S., 2011. Major issues and solutions in the heat-metering reform in China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 673–680.
- [99] Liu L., Fu L., Jiang Y., 2012. A new “wireless on-off control” technique for adjusting and metering household heat in district heating system. *Applied Thermal Engineering* 36, 202–209.

- [100] Lucchi E., Becherini F., Di Tuccio M.C., Troi A., Frick J., Roberti F., Hermann C., Fairnington I., Mezzasalma G., Pockele L., Bernardi A., 2017. Thermal performance evaluation and comfort assessment of advanced aerogel as blown-in insulation for historic buildings. *Building and Environment* 122, 258–268.
- [101] Ma J., Qin J., Salsbury T., Xu P., 2011. Demand reduction in building energy systems based on economic model predictive control. *Chem Eng Sci* 67, 92–100.
- [102] Macarulla M., Casals M., Forcada N., Gangolells M., 2017. Implementation of predictive control in a commercial building energy management system using neural networks. *Energy and Buildings* 151, 511–519.
- [103] Maljković D., Balen I., 2017. Modelling the impact of installation of heat cost allocators in DH in Croatia. In *proceedings of Healthy Buildings 2017 Europe* July 2–5, 2017, Lublin, Poland.
- [104] Manjarres D., Mera A., Perea E., Lejarazu A., Gil-Lopez S., 2017. An energy-efficient predictive control for HVAC systems applied to tertiary buildings based on regression techniques. *Energy and Buildings* 152, 409–417.
- [105] Marino C., Minichiello F., Bahnfleth W., 2015. The influence of surface finishes on the energy demand of HVAC systems for existing buildings. *Energy and Buildings* 95, 70–79.
- [106] Marvuglia A., Messineo A., 2012. Using Recurrent Artificial Neural Networks to Forecast Household Electricity Consumption. *Energy Procedia* 14, 45–55.
- [107] Matic D., Calzada J.R., Eric M., Babin M., 2015. Economically feasible energy refurbishment of prefabricated building in Belgrade, Serbia. *Energy and Buildings* 98, 74–81.
- [108] Mauria L., Carnielo E., Basilicata C., 2016. Assessment of the impact of a centralized heating system equipped with programmable thermostatic valves on building energy demand. *Energy Procedia* 101, 1042–1049.
- [109] Miniewicz M., Bugaj A., 2007. Priorytet ciepłej wody użytkowej w dwufunkcyjnym szeregowo-równoległym węźle ciepłowniczym. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* 9, 12–18.
- [110] Misiorek A., Weron R., 2004. Modelowanie sezonowości a prognozowanie zapotrzebowania na energię elektryczną. *Energetyka*, 780–785.
- [111] Mizielińska K., Olszak J., 2005. *Gazowe i olejowe źródła ciepła małej mocy*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.

- [112] Monetti V., Fabrizio E., Filippi M., 2015. Impact of low investment strategies for space heating control: Application of thermostatic radiators valves to an old residential building. *Energy and Buildings* 95, 202–210.
- [113] Morosan P.-D., Bourdais R., Dumur D., Buisson J., 2010. Building temperature regulation using a distributed model predictive control. *Energy and Buildings* 42, 1445–1452.
- [114] Muniak D.P., 2014. A new methodology to determine the pre-setting of the control Valve in a heating installation. A general model. *Applied Energy* 135, 35–42.
- [115] Muniak D.P., A proposal for a new methodology to determine inner authority of the control valve in the heating system. *Applied Energy* 155, 421–433.
- [116] Niemelä T., Manner M., Laitinen A., Sivula T.M., Jokisalo J., Kosonen R., 2018. Computational and experimental performance analysis of a novel method for heating of domestic hot water with a ground source heat pump system. *Energy and Buildings* 161, 22–40.
- [117] Nik V.M., Mata E., Kalagasidis A.S., Scartezzini J.L., 2016 Effective and robust energy retrofitting measures for future climatic conditions — Reduced heating demand of Swedish households. *Energy and Buildings* 121, 176–187.
- [118] Olofsson T., Andersson S., 2001. Long-term energy demand predictions based on short-term measured data. *Energy and Buildings* 33, 85–91.
- [119] Ottesen S., Tomasgard A., 2015. A stochastic model for scheduling energy flexibility in buildings. *Energy* 88, 364–376.
- [120] Ouyang J., Gao J., Luo X., Ge J., Hokao K., 2007. A study on the relationship between household lifestyles and energy consumption of residential buildings in China. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)* 35, 171–174.
- [121] Ouyang J., Hokao K., 2009. Energy-saving potential by improving occupants' behavior in urban residential sector in Hangzhou City, China. *Energy and Buildings* 41, 711–720.
- [122] Pakanen J., Karjalainen S., 2006. Estimating static heat flows in buildings for energy allocation systems. *Energy and Buildings* 38, 1044–1052.
- [123] Park T.C., Kim U.S., Kim L., Jo B. W., Yeo Y.K., 2010. Heat consumption forecasting using partial least squares, artificial neural network and support vector regression techniques in district heating systems. *Korean J. Chem. Eng.* 27, 1063–1071.

- [124] Paudel S., Elmtiri M., Kling W.L., Le Corre O., Lacarrière B., 2014. Pseudo dynamic transitional modeling of building heating energy demand using artificial neural network, *Energy and Buildings*, vol. 70, 81–93.
- [125] Peeters L., Van der Veken J., Hens H., Helsen L., D’haeseleer W., 2008. Control of heating systems in residential buildings: current practice. *Energy and Buildings* 40, 1446–1455.
- [126] Peng F., Fu L., 2014. Operational regulation of the Secondary network of district heating systems based on actual parameters. *Heating, Ventilation & Air Conditioning* 44, 107–111.
- [127] Perez-Lombard, L., Ortiz, J., Pout, C., 2008. A review of buildings energy consumption information. *Energy and Buildings* 40, 394–398.
- [128] Polityka energetyczna Polski do 2030 roku.
- [129] Popescu D., Ungureanu F., Serban E., 2008. Simulation of consumption in district heating systems. *Environmental Problems and Development* 1, 50–55.
- [130] Popiołek Z., Bartosz D., 2010. Prognozowanie zużycia ciepła na cele grzewcze i wentylacyjne w budynku mieszkalnym. *Rynek Energii* nr 5 (90).
- [131] Privara S., Siroky J., Ferkl L., Cigler J., 2011. Model predictive control of a building heating system: The first experience. *Energy and Buildings* 43, 564–572.
- [132] Raport Kantar Public, 2017: http://www.nietracenergii.pl/wp-content/uploads/2017/09/Raport_Nie_tra%C4%87_energii_Budownictwo-energooszcz%C4%99dne-oczami-Polak%C3%B3w.pdf.
- [133] Rehl J, Horn M., 2011. Temperature control for HVAC systems based on exact linearization and model predictive control. In: *Int Conf Control Appl (CCA)*. Denver, Colorado, USA: IEEE; 1119–1124.
- [134] Rijksen D.O., Wisse C.J., Schijndel A.W.M., 2010. Reducing peak requirements for cooling by using thermally activated building systems. *Energy and Buildings* 42, 298–304.
- [135] Rinquet L., Schwab S., 2017. eREN Energetic refurbishment – a global approach for the building envelope. *Energy Procedia* 122, 109–114.
- [136] Rodrigues F. i inni, 2014. The daily and hourly energy consumption and load forecasting using artificial neural network method: a case study using a set of 93 households in Portugal. *Energy Procedia* 62, 220–229.
- [137] Saidur R., Masjuki H.H., Jamaluddin M.Y., 2007. An application of energy and exergy analysis in residential sector of Malaysia. *Energy Policy* 35, 1050–1063.

- [138] Sajjadi S., Shamshirband S., Alizamir M., Lip Yee P., Mansor Z., Manaf A. A., Altameem T. A., Mostafaeipour, 2016. Extreme learning machine for prediction of heat load in district heating systems. *Energy and Buildings* 122, 222–227.
- [139] Salata, F., Golasi, I., Domestico, U., Banditelli, M., Lo Basso, G., Nastasi, B., de Lieto Vollaro, A., 2017. Heading towards the nZEB through CHP+HP systems. A comparison between retrofit solutions able to increase the energy performance for the heating and domestic hot water production in residential buildings. *Energy Conversion and Management* 138, 61–76.
- [140] Santin O.G., Itard L., Visscher H., 2009. The effect of occupancy and building characteristics on energy use for space and water heating in Dutch residential stock. *Energy and Buildings* 41, 1223–1232.
- [141] Savickas R., Savickiene L., Bielskus J., 2015. Technical measures to decrease heat energy consumption of final customer in multi-apartment buildings according to energy efficiency directive. *Environmental Protection Engineering* 7, 461–467.
- [142] Schellong W., 2011. Energy Demand Analysis and Forecast. *Energy Management Systems* 5, 1–19.
- [143] Schmelas M., Feldmann T., Bollin E., 2017. Savings through the use of adaptive predictive control of thermo-active building systems (TABS): A case study. *Applied Energy* 199, 294–309.
- [144] Semprini G., Barbieri D., Gober A., Zandi F., 2015. Effect of occupant behavior and control systems on the reduction of energy needs of residential buildings. *Energy Procedia* 78, 633–638.
- [145] Sharif, M.K.A., Al-Abidi, A.A., Mat, S., Sopian, K., Ruslan, M.H., Sulaiman, M.Y., Rosli, M.A.M., 2015. Review of the application of phase change material for heating and domestic hot water systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42, 557–568.
- [146] Siggelsten S., Olander S., 2013. Individual metering and charging of heat and hot water in Swedish housing cooperatives, *Energy Policy* 61, 874–880.
- [147] Siggelsten S., 2014. Reallocation of heating costs due to heat transfer between adjacent apartments, *Energy and Buildings* 75, 256–263.
- [148] Simon H., 2011. *Neural network and learning machines*, China Machine Press.

- [149] Široky J., Oldewurtel F., Cigler J., Prívar S., 2011. Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system. *Applied Energy* 88, 3079–3087.
- [150] Skoczypiec S., 2012. *Metody prognozowania: Jakość prognoz*, Kraków, 2012, 1–13.
- [151] Śnieżyk R., 2006. Realizacja priorytetu ciepłej wody użytkowej. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* 12, 3–5.
- [152] Sonderegger R.C., 1985. Baseline equation for utility bill analysis using both weather and non-weather variables. *ASHRAE Transactions* 104, 859–870.
- [153] Spoladore A., Borelli D., Devia F., Mora F., Schenone C., 2016. Model for forecasting residential heat demand based on natural gas consumption and energy performance indicators. *Applied Energy* 182, 488–499.
- [154] Steidl T., 2011. Nowe rozwiązania izolacji termicznych, *Materiały Budowlane*, 1, 59–61.
- [155] Swan L., Ugursal I., 2009. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 1819–1835.
- [156] Teamah, H.M., Lightstone, M.F., Cotton, J.S., 2018. Potential of cascaded phase change materials in enhancing the performance of solar domestic hot water systems. *Solar Energy* 159, 519–530.
- [157] Tłuczak, A., 2009. Efektywność modeli adaptacyjnych w prognozowaniu cen rolnych. *Prace Naukowe / Akademia Ekonomiczna w Katowicach*, 123–133.
- [158] Ueno T., Inada R., Saeki O., Tsuji K., 2006. Effectiveness of an energy-consumption information system for residential buildings. *Applied Energy* 83, 868–883.
- [159] Ustawa z dnia 15 kwietnia 2011 roku o efektywności energetycznej i późniejsze jej nowelizacje.
- [160] Vasičkaninová A., Bakošová M., Mészáros A., Klemeš J.J., 2011. Neural Network predictive control of a heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 2094–2100.
- [161] Vassileva I., Odlare M., Wallin F., Dahlquist E., 2012. The impact of consumers' feedback preferences on domestic electricity consumption. *Applied Energy* 93, 575–582.
- [162] Vassileva I., Dahlquist E., Wallin F., Campillo J., 2013. Energy consumption feedback devices' impact evaluation on domestic energy use, *Applied Energy* 106, 314–320.

- [163] Verdejo H., Awerkin A., Becker C., Olguin G., 2017. Statistic linear parametric techniques for residential electric energy demand forecasting. A review and an implementation to Chile. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74, 512–521.
- [164] Vogler–Finck P., Bacher P., Madsen H., 2017. Online short-term forecast of greenhouse heat load using a weather forecast service. *Applied Energy* 205, 1298–1310.
- [165] Wang Z., Srinivasan R. S., 2017. A review of artificial intelligence based building energy use prediction: Contrasting the capabilities of single and ensemble prediction models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75, 796–808.
- [166] Wang, Z., Guo, P., Zhang, H., Yang, W., Mei, S., 2017. Comprehensive review on the development of SAHP for domestic hot water. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72, 871–881.
- [167] Wang H. i inni, 2015. Short-term Prediction of Power Consumption for Large-scale Public Buildings based on Regression Algorithm. *Procedia Engineering* 121, 1318 – 1325.
- [168] Wojdyga K., 2008. Prognozowanie zapotrzebowania na ciepło w miejskich systemach ciepłowniczych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2007.
- [169] Wojdyga K., 2008. An influence of weather conditions on heat demand in district heating systems. *Energy and Buildings* 40, 2009–2014.
- [170] Wojdyga K., Mirosz L., 2015. Nowoczesne materiały termoizolacyjne – problemy pomiarowe. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* 46, 294–298.
- [171] Wojdyga K., 2016. Metody pomiaru gęstości strumienia ciepła i strat ciepła. *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk*, vol. 130. Warszawa 2016.
- [172] www.danfoss.pl
- [173] www.egain.io/pl
- [174] www.new.siemens.com/pl
- [175] www.samson.com.pl
- [176] Xie J. i inni, 2017. Analysis of Key Factors in Heat Demand Prediction with Neural Networks. *Energy Procedia* 105, 2965–2970.
- [177] Xu B., Fu L., Di H., 2008. Dynamic simulation of space heating systems with radiators controlled by TRVs in buildings. *Energy and Buildings* 40, 1755–1764.

- [178] Xu B., Huang A., Fu L., Di H., 2011. Simulation and analysis on control effectiveness of TRVs in district heating systems. *Energy and Buildings* 43, 1169–1174.
- [179] Yan D., Zhe T., Yong W., Neng Z., 2011. Achievements and suggestions of heat metering and energy efficiency retrofit for existing residential buildings in northern heating regions of China. *Energy Policy* 39, 4675–4682.
- [180] Yang, X., Li, H., Svendsen, S., 2016a. Energy, economy and exergy evaluations of the solutions for supplying domestic hot water from low-temperature district heating in Denmark. *Energy Conversion and Management* 122, 142–152.
- [181] Yang, X., Li, H., Svendsen, S., 2016b. Evaluations of different domestic hot water preparing methods with ultra-low-temperature district heating. *Energy* 109, 248–259.
- [182] Yao Y., Liu S., Lian Z., 2008. Key technologies on heating/cooling cost allocation in multifamily housing. *Energy and Buildings* 40, 689–696.
- [183] Yu Z., Fung B.C.M., Haghighat F., Yoshino H., Morofsky E., 2011. A systematic procedure to study the influence of occupant behavior on building energy consumption. *Energy and Buildings* 43, 1409–1417.
- [184] Yun G. Y., Steemers K., 2011. Behavioural, physical and socio-economic factors in household cooling energy consumption. *Applied Energy* 88, 2191–2200.
- [185] Zhao H., Magoulès F., 2012. A review on the prediction of building energy consumption, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 3586–3692.
- [186] Żarski K., 1997. Węzły cieplne w miejskich systemach ciepłowniczych. Ośrodek Informacji „Technika instalacyjna w budownictwie”, AQUARIUS, Warszawa 1997.
- [187] Żarski K., 2014. Węzły cieplne – poradnik projektowania, Wyd. Redakcja techniczna: Kazimierz Żarski, 2014.
- [188] Żukowski M., 2012. Modelowanie zużycia ciepła w budynkach. Polska Akademia Nauk. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej. Warszawa–Białystok 2012.
- [189] Żurawski J., 2013. Efektywność energetyczna w budownictwie. Dolnośląska Agencja Energii i Środowiska, 2013.

**MONOGRAFIE KOMITETU INŻYNIERII ŚRODOWISKA
POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

- Nr 1 MIKROORGANIZMY W KSZTAŁTOWANIU JAKOŚCI I UZDATNIANIU WÓD PODZIEMNYCH
K. Olańczuk-Neyman
GDAŃSK 2001
- Nr 2 METODY OCENY I PODNOSZENIA NIEZAWODNOŚCI DZIAŁANIA KOMUNALNYCH SYSTEMÓW ZAOPATRZENIA W WODĘ
A. Wieczysty
KRAKÓW 2001
- Nr 3 UTYLIZACJA ZUŻYTYCH JONITÓW DO REKULTYWACJI ZDEGRADOWANYCH UTWORÓW PIASZCZYSTYCH – BADANIA MODELOWE
M. Chomczyńska
LUBLIN 2001
- Nr 4 POJEZIERZE ŁĘCZYŃSKO-WŁODAWSKIE PRZEKSZTAŁCENIE STRUKTURY EKOLOGICZNEJ KRAJOBRAZU I UWARUNKOWANIA ZAGOSPODAROWANIA PRZESTRZENNEGO
T. J. Chmielewski
LUBLIN 2001
- Nr 5 DEGRADACJA ZWIĄZKÓW ORGANICZNYCH ZAWARTYCH W ODCIEKACH Z WYSYPISK
J. Surmacz-Górska
LUBLIN 2001
- Nr 6 POLICHLOROWANE DIBENZO(P)DIOKSYNY I DIBENZOFURANY – WŁAŚCIWOŚCI I ODDZIAŁYWANIE NA ŚRODOWISKO
Z. Kozak, M. R. Dudzińska
LUBLIN 2001
- Nr 7 PESTYCYDY W ŚRODOWISKU I ICH OZNACZENIE METODĄ CHROMATOGRAFII GAZOWEJ
K. Pomorska
LUBLIN 2001
- Nr 8 ENERGETYCZNE ASPEKTY WYTWARZANIA OZONU DLA POTRZEB INŻYNIERII ŚRODOWISKA
J. Ozonek
LUBLIN 2002
- Nr 9 INŻYNIERIA ŚRODOWISKA STAN OBECNY I PERSPEKTYWY ROZWOJU (MATERIAŁY NA KONGRES)
LUBLIN 2002
- Nr 10 I KONGRES INŻYNIERII ŚRODOWISKA
MATERIAŁY
LUBLIN 2002

-
- Nr 11 I KONGRES INŻYNIERII ŚRODOWISKA
MATERIAŁY
LUBLIN 2002
- Nr 12 I KONGRES INŻYNIERII ŚRODOWISKA
RERERATY PROBLEMOWE
LUBLIN 2002
- Nr 13 ANALIZA PROCESÓW WYTWARZANIA OZONU DLA POTRZEB
OCHRONY ŚRODOWISKA
J. Ozonek
LUBLIN 2003
- Nr 14 WYSTĘPOWANIE I PRZEMIANY POLICHLOROWANYCH
DIBENZO-P-DIOKSYN I DIBENZOFURANÓW W UKŁADACH:
OSADY ŚCIEKOWE - GLEBA
M. R. Dudzińska
LUBLIN 2003
- Nr 15 I KONGRES INŻYNIERII ŚRODOWISKA
MATERIAŁY – SUPLEMENT
LUBLIN 2003
- NR 16 FILOZOFICZNE I SPOŁECZNE UWARUNKOWANIA ZRÓWNOWA-
ŻONEGO ROZWOJU
A. Pawłowski
LUBLIN 2003
- NR 17 INŻYNIERSKIE, PRZYRODNICZE I EKONOMICZNE UWARUNKO-
WANIE ZRÓWNOWAŻONEGO ROZWOJU
Z. Ciećko
LUBLIN 2003
- NR 18 POLSKA INŻYNIERIA ŚRODOWISKA - INFORMATOR
A. M. Anielak
LUBLIN 2003
- NR 19 UTLENIANIE METANU W WARUNKACH BIOLOGICZNEJ REKUL-
TYWACJI SKŁADOWISK KOMUNALNYCH PRZYWĘGŁOWEJ
SKAŁY PŁONNEJ
W. Stępniewski
LUBLIN 2003
- NR 20 SPECJACJA W OCHRONIE I INŻYNIERII ŚRODOWISKA
E. Bezak-Mazur
LUBLIN 2004
- NR 21 NEW MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR ENVIRONMENTAL
ENGINEERING
PART I. SYNTHESSES AND STRUCTURE OF ION EXCHANGE FIBERS
V. Soldatov, L. Pawłowski, A. Shunkevich, H. Wasąg
LUBLIN 2004
- NR 22 V KONFERENCJA NAUKOWA
MEMBRANY I PROCESY MEMBRANOWE W OCHRONIE
ŚRODOWISKA
GLIWICE 2004

- NR 23 HODOWLA SYNCHRONICZNA *CHLORELLA VULGARIS*
W KONTROLI JAKOŚCI WÓD
A. Czaplicka-Kotas
KRAKÓW 2004
- NR 24 PROFESOR TOMASZ WINNICKI W NAUCE I ŻYCIU SPOŁECZNYM
LUBLIN 2004
- NR 25 OCHRONA I INŻYNIERIA ŚRODOWISKA ZRÓWNOWAŻONY
ROZWÓJ
Szkola Ochrony I Inżynierii Środowiska im. Walerego Goetla
KRAKÓW 2004
- NR 26 FILOZOFICZNE, SPOŁECZNE I EKONOMICZNE UWARUNKOWA-
NIA ZRÓWNOWAŻONEGO ROZWOJU
A. Pawłowski
LUBLIN 2004
- NR 26 SUPLEMENT – PRZYRODNICZE UWARUNKOWANIA ZRÓWNOWA-
ŻONEGO ROZWOJU
Z. Ciećko
LUBLIN 2004
- NR 27 PATHWAYS OF POLLUTANTS AND MITIGATION STRATEGIES
OF THEIR IMPACT ON THE ECOSYSTEMS
M. R. Dudzińska, M. Pawłowska
LUBLIN 2004
- NR 28 PODSTAWY BEZPIECZEŃSTWA SYSTEMÓW ZAOPATRZENIA
W WODĘ
J. Rak
LUBLIN 2005
- NR 29 TECHNOLOGICZNE PODSTAWY MODERNIZACJI MAŁYCH
OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW
L. Dzienis
BIAŁYSTOK 2005
- NR 30 XII OGÓLNOPOLSKA KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA
Z CYKLU
PROBLEMY GOSPODARKI WODNO-ŚCIEKOWEJ W REGIONACH
ROLNICZO-PRZEMYSŁOWYCH
MATERIAŁY
L. Dzienis
BIAŁYSTOK 2005
- NR 31 PROFESOR ANDRZEJ KRÓLIKOWSKI. JUBILEUSZ 50-LECIA PRACY
ZAWODOWEJ, BADAWCZEJ I NAUKOWO-DYDAKTYCZNEJ.
MATERIAŁY
I. Bartkowska, L. Dzienis
BIAŁYSTOK 2005
- NR 32 II KONGRES INŻYNIERII ŚRODOWISKA
MATERIAŁY, TOM I
LUBLIN 2005

-
- NR 33 II KONGRES INŻYNIERII ŚRODOWISKA
MATERIAŁY, TOM II
LUBLIN 2005
- NR 34 DEVELOPMENT OF INSULATION WITH SPECIALLY DESIGNER
PROPERTIES FOR BUILDING RENOVATION
J. Grunewald, H. Sobczuk
LUBLIN 2005
- NR 35 OSADY POWSTAJĄCE W OBIEKTACH SYSTEMU KANALIZACJI
DESZCZOWEJ
A. Królikowski, K. Garbarczyk, J. Gwoździej-Mazur, A. Butarewicz
Białystok 2005
- NR 36 MEMBRANY I PROCESY MEMBRANOWE W OCHRONIE ŚRODOWISKA
GLIWICE 2006
- NR 37 PODSTAWY MODELOWANIA SYSTEMÓW EKSPLOATACJI WODO-
CIĄGÓW I KANALIZACJI
S. Danczew
LUBLIN 2006
- NR 38 POLSKA INŻYNIERIA ŚRODOWISKA INFORMATOR
A. M. Anielak
LUBLIN 2007
- NR 39 TIME DOMAIN REFLECTOMETRY METHOD IN ENVIRONMENTAL
MEASUREMENTS
H. Sobczuk, R. Plagge
LUBLIN 2007
- NR 41 ZINTEGROWANE SYSTEMY ZARZĄDZANIA ENERGIĄ W BUDYN-
KACH BIUROWYCH
J. Syposz, P. Jadwiszczak
LUBLIN 2007
- NR 42 BADANIA DOŚWIADCZALNE W ROZWOJU TECHNOLOGII UZDAT-
NIANIA WODY
M. M. Sozański, P. M. Huck
LUBLIN 2007
- NR 43 OCENA WPŁYWU ZABEZPIECZEŃ PRZECIWEROZYJNYCH NA WA-
RUNKI WILGOTNOŚCIOWE W PROFILU GLEBOWYM
M. K. Widomski
LUBLIN 2007
- NR 44 PROGNOSTYCZNY MODEL URUCHAMIANIA BIOGENNYCH
ZWIĄZKÓW AZOTU I FOSFORU W ERODOWANYCH GŁABACH
MAŁEJ ZLEWNI LESSOWEJ
P. Gliński
LUBLIN 2007
- NR 45 BADANIA POŁA CIEPLNEGO W HALACH OGRZEWANYCH PRO-
MIENNIKAMI CERAMICZNYMI
E. Dudkiewicz, J. Jeżowiecki
LUBLIN 2007

- NR 46 VI ZJAZD KANALIZATORÓW POLSKICH POLKAN'07 MATERIAŁY
M. Zawilski, G. Sakson, G. Mozolewska
LUBLIN 2007
- NR 47 ENERGETYCZNE I PROCESOWE ASPEKTY PRODUKCJI I ZASTO-
SOWAŃ OZONU W TECHNICIE
J. Ozonek, S. Fijałkowski
LUBLIN 2007
- NR 48 OPTOELECTRONIC DIAGNOSTICS OF COMBUSTION PROCESSES.
INSTRUMENTS METHODS OF APPLICATIONS.
W. Wójcik
LUBLIN 2008
- NR 49 MEMBRANY I PROCESY MEMBRANOWE W OCHRONIE ŚRODOWI-
SKA
K. Konieczny, M. Bodzek
GLIWICE 2008
- NR 50 WYBRANE ZAGADNIENIA Z MODELOWANIA MATEMATYCZNEGO
PROCESU OSADU CZYNNEGO.
Z. Dymaczewski
POZNAŃ 2008
- NR 51 ROZWÓJ ZRÓWNOWAŻONY – IDEA, FILOZOFIA, PRAKTYKA
A. Pawłowski
LUBLIN 2008
- NR 52 ULTRASŁABA LUMINESCENCJA GLONÓW CHARACEAE JAKO ME-
TODA OCENY ŚRODOWISKA WODNEGO
A. Jaśkowska
LUBLIN 2008
- NR 53 PODSTAWY REOLOGII I TRANSPORTU RUROWEGO ZAWIESIN
I OSADÓW Z OCZYSZCZANIA WODY I ŚCIEKÓW
Z. Dymaczewski, J. Jeż-Walkowiak, A. Marlewski, M. Sozański
POZNAŃ 2008
- NR 54 PRZYDATNOŚĆ WYBRANYCH BIOINDYKATORÓW DO OCENY
EFEKTYWNOŚCI BIOREMEDIACJI GRUNTÓW ZANIECZYSZCZO-
NYCH WĘGLOWODORAMI
A. Małachowska-Jutcz, K. Miksch
GLIWICE 2008
- NR 55 MECHANIZMY TWORZENIA SIĘ I ROZPRZESTRZENIANIA ZWIĄZ-
KÓW DIOKSYNOPOCHODNYCH W ŚRODOWISKU
J. Czerwiński
LUBLIN 2008
- NR 56 OGÓLNOPOLSKA KONFERENCJA NAUKOWA. INŻYNIERIA EKO-
LOGICZNA
H. Obarska-Pempkowiak
LUBLIN 2009
- NR 57 RETENCJA ZBIRONIKOWA I STEROWANIE DOPŁYWEM ŚCIEKÓW
DO OCZYSZCZALNI
D. Słyś
LUBLIN 2009

-
- NR 58 POLSKA INŻYNIERIA ŚRODOWISKA PIĘĆ LAT PO WSTĄPIENIU DO
UNII EUROPEJSKIEJ TOM 1
J. Ozonek, M. Pawłowska
LUBLIN 2009
- NR 59 POLSKA INŻYNIERIA ŚRODOWISKA PIĘĆ LAT PO WSTĄPIENIU DO
UNII EUROPEJSKIEJ TOM 2
J. Ozonek, A. Pawłowski
LUBLIN 2009
- NR 60 POLSKA INŻYNIERIA ŚRODOWISKA PIĘĆ LAT PO WSTĄPIENIU DO
UNII EUROPEJSKIEJ TOM 3
M. Dudzińska, L. Pawłowski
LUBLIN 2009
- NR 61 NOWE METODY REDUKCJI EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ I WYKO-
RZYSTANIA PRODUKTÓW UBOCZNYCH OCZYSZCZALNI ŚCIEKÓW
H. Obarska-Pempkowiak, L. Pawłowski
LUBLIN 2009
- NR 62 MEMBRANY I PROCESY MEMBRANOWE W PRACY NAUKOWEJ
PROF. DR HAB. INŻ. MICHAŁA BODZKA
K. Konieczny
GLIWICE 2009
- NR 63 MIKROBIOLOGICZNE METODY OGRANICZANIA EMISJI METANU
ZE SKŁADOWISK ODPADÓW
M. Pawłowska
LUBLIN 2010
- NR 64 MICROORGANISMS IN THE ENVIRONMENT AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING FROM ECOLOGY AND TECHNOLOGY
K. Olańczuk-Neyman, H. Mazur-Marzec
GDAŃSK-GDYNIA 2010
- NR 65 MEMBRANY I PROCESY MEMBRANOWE W OCHRONIE ŚRODOWI-
SKA TOM 1
K. Konieczny
GLIWICE 2010
- NR 66 MEMBRANY I PROCESY MEMBRANOWE W OCHRONIE ŚRODOWI-
SKA TOM 2
K. Konieczny
GLIWICE 2010
- NR 67 ENERGETYKA-DZIŚ I JUTRO
T. Cholewa, A. Siuta-Olcha
LUBLIN 2010
- NR 68 HYDROLOGIA W INŻYNIERII I GOSPODARCE WODNEJ TOM 1
B. Więzik
WARSZAWA 2010
- NR 69 HYDROLOGIA W INŻYNIERII I GOSPODARCE WODNEJ TOM 2
A. Magnuszewski
WARSZAWA 2010

- NR 70 PROFESOR LUCJAN PAWŁOWSKI W DRODZE PRZEZ ŻYCIE
H. Wasąg
LUBLIN 2010
- NR 71 KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE PROJEKTOWANIA
Z. Suchorab, A. Jedut, G. Łagód, A. Raczkowski
LUBLIN 2010
- NR 72 MODELOWANIE PRZEPŁYWÓW ORAZ TRANSPORTU I BIODEGRADACJI ZANIECZYSZCZEŃ
G. Łagód, Z. Suchorab, M. Widomski, K. Wróbel
LUBLIN 2010
- NR 73 MODELOWANIE RUCHU WODY I TRANSPORT ZANIECZYSZCZEŃ W OŚRODKU POROWATYM
M. Widomski, D. Kowalski, G. Łagód
LUBLIN 2010
- NR 74 MODELOWANIE SYSTEMU OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW
A. Montusiewicz, G. Łagód, A. Piotrowicz
LUBLIN 2010
- NR 75 JĘZYKI PROGRAMOWANIA KOMPUTERÓW
G. Łagód, H. Sobczuk, Z. Suchorab
LUBLIN 2010
- NR 76 SYSTEMY GRZEWCZE
A. Siuta-Olcha, T. Cholewa
LUBLIN 2010
- NR 77 UKŁADY WENTYLACJI, KLIMATYZACJI I CHŁODNICTWA
A. Raczkowski, S. Dumała, M. Skwarczyński
LUBLIN 2010
- NR 78 NITRYFIKACJA W PROCESACH OCZYSZCZANIA WYBRANYCH WÓD ODPADOWYCH I ŚCIEKÓW
J. Surmacz-Górska
GLIWICE 2010
- NR 79 TECHNOLOGIE ENERGII ODNAWIALNEJ
K. Nalewaj, J. Diatczyk, R. Jaroszyńska
LUBLIN 2010
- NR 80 NOWOCZESNE TECHNOLOGIE PALIW I SPALANIA
P. Komoda
LUBLIN 2010
- NR 81 UKŁADY ELEKTRONICZNE W NOWOCZESNYCH TECHNOLOGIACH ENERGETYCZNYCH
W. Surtel, P. Komoda
LUBLIN 2010
- NR 82 INŻYNIERIA ELEKTRYCZNA I TECHNOLOGIE INFORMATYCZNE W UKŁADACH ENERGOELEKTRONICZNYCH W NOWOCZESNYCH TECHNOLOGIACH ENERGETYCZNYCH
P. Kacejko, S. Adamek
LUBLIN 2010

-
- NR 83 ENERGOOSZCZEDNY BUDYNEK
M. Horyński
LUBLIN 2010
- NR 84 SIECI KOMPUTEROWE
K. Gromaszek, T. Ławicki
LUBLIN 2010
- NR 85 ARCHITEKTURA KOMPUTERÓW I SYSTEMY GIER
W. Surtel, P. Kisała
LUBLIN 2010
- NR 86 ARCHITEKTURA KOMPUTERÓW I SYSTEMY OPERACYJNE
W. Surtel, P. Kisała
LUBLIN 2010
- NR 87 ZASTOSOWANIE ZJAWISKA KAWITACJI HYDRODYNAMICZNEJ
W INŻYNIERII ŚRODOWISKA
J. Ozonek
LUBLIN 2010
- NR 88 NOWE METODY OPISU STRUKTURY SIECI WODOCIĄGOWYCH DO
ROZWIĄZANIA PROBLEMÓW ZWIĄZANYCH Z ICH PROJEKTOWA-
NIEM I EKSPLOATACJĄ
D. Kowalski
LUBLIN 2010
- NR 89 JAKUB KAZIMIERZ SIEMEK- PROFESOR HONOROWY POLITECH-
NIKI LUBELSKIEJ
LUBLIN 2010
- NR 90 TOMASZ WINNICKI- PROFESOR HONOROWY POLITECHNIKI LU-
BELSKIEJ
LUBLIN 2010
- NR 91 WYKORZYSTANIE WŁAŚCIWOŚCI ADSORPCYJNYCH MATERIA-
ŁÓW ODPADOWYCH DO USUWANIA BARWNIKÓW Z ROZTWO-
RÓW WODNYCH
U. Filipkowska
LUBLIN 2011
- NR 92 ZAAWANSOWANE METODY USUWANIA NATURALNYCH SUBSTAN-
CJI
M. Kabsch-Korbutowicz
LUBLIN 2012
- NR 93 INŻYNIERIA ŚRODOWISKA – STAN OBECNY I PERSPEKTYWY
ROZWOJU
Cz. Rosik-Dulewska, M. Kostecki
LUBLIN 2011
- NR 94 BADANIA NAD ZWIĘKSZENIEM WYDAJNOŚCI BARWNIKOWYCH
OGNIW SŁONECZNYCH
A. Zdyb
LUBLIN 2012

- Nr 95 MEMBRANY I PROCESY MEMBRANOWE W OCHRONIE ŚRODOWISKA TOM 1
K. Konieczny, I. Korus
GLIWICE 2012
- Nr 96 MEMBRANY I PROCESY MEMBRANOWE W OCHRONIE ŚRODOWISKA TOM 2
M. Bodzek, J. Pelczara
GLIWICE 2012
- Nr 97 PROFESOR JANUARY BIEŃ CZTERDZIEŚCI LAT W DYDAKTYCE I NAUCE
L. Pawłowski
LUBLIN 2012
- Nr 98 WSPÓŁFERMENTACJA OSADÓW ŚCIEKOWYCH I WYBRANYCH KOSUBSTRATÓW JAKO METODA EFEKTYWNEJ BIOMETANIZACJI
A. Montusiewicz
LUBLIN 2012
- Nr 99 POLSKA INŻYNIERIA ŚRODOWISKA. PRACE. TOM I
M.R. Dudzińska, A. Pawłowski
LUBLIN 2012
- Nr 100 POLSKA INŻYNIERIA ŚRODOWISKA. PRACE. TOM II
M.R. Dudzińska, A. Pawłowski
LUBLIN 2012
- Nr 101 KOMPOSTOWANIE KOMUNALNYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH JAKO FORMA RECYKLINGU ORGANICZNEGO
D. Kulikowska
LUBLIN 2012
- Nr 102 ZASTOSOWANIE ZEOLITÓW WYTWORZONYCH Z POPIOŁÓW LOTNYCH DO USUWANIA ZANIECZYSZCZEŃ Z WODY I ŚCIEKÓW
W. Franus
LUBLIN 2012
- Nr 103 BADANIA EKSPERYMENTALNE I TEORETYCZNE ZASOBNIKA CIEPŁEJ WODY ZE STRATYFIKACJĄ TERMICZNĄ WSPÓŁPRACUJĄCEGO Z INSTALACJĄ NISKOTEMPERATUROWĄ
A. Siuta-Oлча
LUBLIN 2012
- Nr 104 WYBRANE MIKROZANIECZYSZCZENIA ORGANICZNE W WODACH I GLEBACH
M. Włodarczyk-Makuła
LUBLIN 2012
- Nr 105 TOKSYCZNOŚĆ W PROCESIE BEZTLENOWEJ STABILIZACJI KOMUNALNYCH OSADÓW ŚCIEKOWYCH
Z. Sadecka
LUBLIN 2013

-
- Nr 106 PROCESY I EFEKTYWNOŚĆ USUWANIA I ZANIECZYSZCZEŃ Z OD-
CIEKÓW ZE SKŁADOWISKA ODPADÓW KOMUNALNYCH
W OCZYSZCZALNIACH HYDROFITOWYCH
E. Wojciechowska
GDAŃSK 2013
- NR 107 ZASTOSOWANIE JONITÓW WŁÓKNISTYCH W PROCESACH DEZ-
ODORYZACJI I KONTROLI JAKOŚCI POWIETRZA
H. Wasąg
LUBLIN 2013
- NR 108 ROZKŁAD BIOMIMETYKÓW HORMONALNYCH ZA POMOCĄ ZA-
AWANSOWANYCH PROCESÓW UTLENIANIA
E. Flis
GLIWICE 2013
- NR 109 DEGRADACJA PESTYCYDÓW WYBRANYMI METODAMI
I. Skoczko
BIAŁYSTOK 2013
- NR 110 WYKORZYSTANIE SYNTETYCZNYCH ŻYWIC JONOWYMIENNYCH
W REKULTYWACJI TERENÓW ZDEGRADOWANYCH
M. Chomczyńska
LUBLIN 2013
- NR 111 COMPUTER AIDED DESIGNING – 3D MODELING
G. Łagód, Z. Suchorab
LUBLIN 2013
- NR 112 AEROZOLE W POWIETRZU WEWNĘTRZNYM: ŹRÓDŁA - POZIOMY -
PROBLEMY
M. Dudzińska
LUBLIN 2013
- NR 113 SEPARACJA UCIAŹLIWYCH ZANIECZYSZCZEŃ ORGANICZNYCH
Z WYKORZYSTANIEM TECHNIK MEMBRANOWYCH
K. Majewska-Nowak
WROCŁAW 2013
- NR 114 ŹRÓDŁA WĘGLA W PROCESACH BIOLOGICZNEGO USUWANIA
AZOTU I FOSFORU
W. Janczukowicz, J. Rodziewicz
LUBLIN 2013
- NR 115 WSKAŹNIKI JAKOŚCIOWE SUBSTANCJI ORGANICZNEJ GLEB
ZRÓŻNICOWANYM NAWOŻENIEM I ZMIANOWANIEM
G. Żukowska
LUBLIN 2013
- NR 116 ZANIECZYSZCZENIA A JAKOŚĆ POWIETRZA WEWNĘTRZNEGO
W WYBRANYCH POMIESZCZENIACH
B. Południk
LUBLIN 2013
- NR 117 BIOSURFACTANTS: GREEN SURFACTANTS
G. Płaza
LUBLIN 2014

- NR 118 MEMBRANES AND MEMBRANE PROCESSES IN ENVIRONMENTAL PROTECTION VOL. 1
K. Konieczny, I. Korus
LUBLIN 2014
- NR 119 MEMBRANES AND MEMBRANE PROCESSES IN ENVIRONMENTAL PROTECTION VOL. II
M. Bodzek, J. Pelczar
LUBLIN 2014
- NR 120 ZASTOSOWANIE ZEOLITÓW DO SEPARACJI CO₂ I Hg Z GAZÓW ODLOTOWYCH W PROCESACH WYCHWYTYWANIA I SKŁADOWANIA DITLENKU WĘGLA
M. Wdowin
LUBLIN 2015
- NR 121 WYKORZYSTANIE TUFÓW ZEOLITOWYCH W INŻYNIERII ŚRODOWISKA
W. Franus, A. Pawłowski
LUBLIN 2015
- NR 122 OBIEG WYBRANYCH MAKROPIERWIASTKÓW I ZWIĄZKÓW BIOGENNYCH W SYSTEMIE RZECZNO-JEZIORNYM NA PRZYKŁADZIE GÓRNEJ PASŁĘKI
J. Grochowska
LUBLIN 2015
- NR 123 INCINERATION OF WASTE IN A ROTARY KILN
J. W. Bujak
LUBLIN 2015
- NR 124 PIENIĄDZE I ZRÓWNOWAŻONY ROZWÓJ: BRAKUJĄCE OGNIWO
LUBLIN 2016
- NR 125 OCENA ZRÓWNOWAŻONOŚCI SYSTEMÓW SOLARNYCH OPARTA NA ANALIZIE CYKLU ŻYCIA
A. Żelazna
LUBLIN 2016
- NR 126 NEW MATERIAL SOLUTIONS FOR PLASMA REACTOR
S. Gnapowski
LUBLIN 2017
- NR 127 SUSTAINABILITY OF COMPACTED CLAY LINERS AND SELECTED PROPERTIES OF CLAY
M. Widomski
LUBLIN 2016
- NR 128 DROGA PRZEZ ŻYCIE PROFESORA TADEUSZA PIECUCHA: 70 ROCZNICA URODZIN 4.06.2016R.
LUBLIN 2016
- NR 129 INFORMATOR INŻYNIERII ŚRODOWISKA
A. Anielak, M. Cimochoicz-Rybicka
LUBLIN 2016

-
- NR 130 METODY POMIARU GĘSTOŚCI STRUMIENIA CIEPŁA I STRAT CIEPŁA W BUDOWNICTWIE I CIEPŁOWNICTWIE
K. Wojdyga
WARSZAWA 2016
- NR 131 OKREŚLENIE POZIOMU AKTYWNOŚCI SZTUCZNEGO ^{137}Cs I NATURLANEGO ^{40}K ORAZ WYBRANYCH METALI CIĘŻKICH W GLEBACH, NIEKTÓRYCH ROŚLINACH I W OSADACH DENNYCH AKWENÓW WODNYCH NA OBSZARACH POLSKI POŁUDNIOWEJ
A. Kubica
LUBLIN 2016
- NR 132 UTYLIZACJA WYBRANYCH ODPADÓW W PRODUKCJI SPIEKANYCH KRUSZYW LEKKICH
M. Franus
LUBLIN 2016
- NR 133 ZASTOSOWANIE TECHNIKI REFLAKTOMETRII W DOMENIE CZASU DO OCENY STANU ZAWILGOCENIA PRZEGRÓD BUDOWLANYCH
Z. Suchorab
LUBLIN 2016
- NR 134 DEPOZYCJA PM₁₀ PODCZAS OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH
T. Olszowski
LUBLIN 2017
- NR 135 ZASTOSOWANIE ZEOLITÓW SYNTETYCZNYCH Z POPIOŁÓW LOTNYCH W INŻYNIERII ŚRODOWISKA
W. Franus
LUBLIN 2017
- NR 136 BIOINDYKACJA W KONTROLI PROCESU OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW
G. Łagód
LUBLIN 2017
- NR 137 ANALIZA OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH DLA POTRZEB PROJEKTOWANIA SYSTEMÓW ODWODNIENIA
P. Licznar
LUBLIN 2018
- NR 138 METALE CIĘŻKIE W ODCIEKACH I ŚCIEKACH TECHNOLOGICZNYCH ZE SKŁADOWISK ODPADÓW KOMUNALNYCH W ASPEKCIE ZMIAN SPOSOBÓW ICH ZAGOSPODAROWANIA
E. Kulbat
GDAŃSK 2018
- NR 139 EFEKTYWNOŚĆ EKONOMICZNA I ENERGETYCZNA W BUDOWNICTWIE JEDNORODZINNYM
J. Danielewicz
LUBLIN 2018

- NR 140 FOSFOR W INTERFAZIE WODA-OSADY DENNE JEZIOR ZMIENIONYCH ANTROPOGENICZNIE NA TLE WYBRANYCH FIZYKO-CHEMICZNYCH I MIKROBIOLOGICZNYCH CZYNNIKÓW ŚRODOWISKOWYCH KSZTAŁTUJĄCYCH PROCESY JEGO WYMIANY POMIĘDZY OSADAMI A WODĄ
R. Augustyniak
LUBLIN 2018
- NR 141 BAKTERIOCENOZA PŁYTKIEGO LITORALU ZATOKI PUCKIEJ W REJONIE WYSTĘPOWANIA PODMORSKIEGO DRENAŻU WÓD PODZIEMNYCH
K. Jankowska
GDAŃSK 2018
- NR 142 ZDOŁNOŚCI SORPCYJNE WYBRANYCH SUBSTANCJI BOGATYCH W MATERIE ORGANICZNĄ W STOSUNKU DO BARWNIKÓW
A. Dzieniszewska, J. Kyzioł-Komosńska
LUBLIN 2018
- NR 143 ZANIECZYSZCZENIE OSADÓW DENNYCH METALAMI CIĘŻKIMI - METODY OCENY
E. Kulbat, A. Sokołowska
LUBLIN 2018
- NR 144 ZANIECZYSZCZENIA POWIETRZA W POLSCE: STAN, PRZYCZYNY, SKUTKI
L. Pawłowski
LUBLIN 2018
- NR 145 ZASTOSOWANIE ZIELONEJ INFRASTRUKTURY DO OGRANICZANIA ZANIECZYSZCZEŃ WÓD POWIERZCHNIOWYCH W ZLEWNI MIEJSKIEJ
E. Wojciechowska
GDAŃSK 2018
- NR 146 METODA WYZNACZANIA ZASIĘGU STREF ZAGROŻENIA POWODOWANEGO PRZEZ ROZSZCZELNIENIE PODZIEMNYCH PRZEWODÓW WODOCIĄGOWYCH
M. Iwanek
LUBLIN 2018
- NR 147 ZASTOSOWANIE SPEKTROSKOPII IR W INŻYNIERII ŚRODOWISKA
S. Pasieczna-Padkowska
LUBLIN 2019
- NR 148 REKULTYWACJA JEZIOR – TEORIA I PRAKTYKA
J. A. Dunalska
OLSZTYN 2019
- NR 149 USUWANIE ZANIECZYSZCZEŃ I STABILIZACJA OSADÓW ŚCIEKOWYCH W SYSTEMACH TRZCINOWYCH
K. KołECKA
GDAŃSK 2019

-
- NR 150 ZŁOŻA HYDROFITOWE Z PIONOWYM PRZEPŁYWEM ŚCIEKÓW.
CHARAKTERYSTYKA PROCESÓW I ZASTOSOWAŃ
M. Gajewska
GDAŃSK 2019
- NR 151 FILTRACJA WODY W TEORII I PRAKTYCE
I. Skoczko
WARSZAWA 2019
- NR 152 OPERATION FLEXIBILITY OF HEAT PUMPS IN SMART DISTRICT
HEATING
Marderos Ara Sayegh
LUBLIN 2019
- NR 153 ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA POFERMENTU JAKO
ŹRÓDŁA BIODOSTĘPNEGO FOSFORU
A. Tuszyńska
WARSZAWA 2019
- NR 154 ANALIZA TERMICZNEJ PRZERÓBKI BIOMASY
P. Komada
WARSZAWA 2019
- NR 155 ANALIZA I ZASTOSOWANIE MODELU ADM1 DO SYMULACJI FER-
MENTACJI I WSPÓLFERMENTACJI KISZONEK ROŚLINNYCH I WY-
BRANYCH KOSUBSTRATÓW
K. Bułkowska
WARSZAWA 2019
- NR 156 DIFFERENT MATERIAL SOLUTIONS FOR THE REACTOR ELEC-
TRODES
S. Gnapowski
WARSZAWA 2019
- NR 157 NASTĘPCZY WPŁYW KOMPOSTÓW Z OSADU I OSADOWO-
POPIOŁOWYCH NA KSZTAŁTOWANIE WŁAŚCIWOŚCI REKULTY-
WOWANEJ GLEBY INDUSTRIOZIEMNEJ
M. Bik-Małodzińska
WARSZAWA 2019
- NR 158 MATERIAL-RELATED IMPACT OF PE AND PVC-U PIPES ON DISTRI-
BUTION SYSTEM WATER QUALITY
B. Kowalska
WARSZAWA 2019