



Małgorzata Szulgowska-Zgrzywa

**Miesięczna
efektywność energetyczna
systemów z pompami ciepła
powietrze/woda**



Prace Naukowe
Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej

Monografie

2

Małgorzata Szulgowska-Zgrzywa

**Miesięczna
efektywność energetyczna
systemów z pompami ciepła
powietrze/woda**



Prace Naukowe Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej.
Monografie są kontynuacją
Prac Naukowych Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej.
Seria: Monografie

Recenzenci

Jan DANIELEWICZ

Robert SEKRET

Korekta językowa

PRIMUM VERBUM Anna ORĘBSKA

Przygotowanie do druku

Krzysztof PIECHURSKI

Wszelkie prawa zastrzeżone. Niniejsza książka, zarówno w całości,
jak i we fragmentach, nie może być reprodukowana w sposób elektroniczny,
fotograficzny i inny bez zgody wydawcy i właściciela praw autorskich.

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2019

OFICyna WYDAWNICZA POLITECHNIKI WROCLAWSKIEJ

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

<http://www.oficyna.pwr.edu.pl>

e-mail: oficwyd@pwr.edu.pl

zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl

ISBN 978-83-7493-062-8

Druk i oprawa: beta-druk, www.betadruk.pl

*pompa ciepła powietrze/woda,
model miesięcznej efektywności energetycznej,
dobór i analiza pracy pomp ciepła*

Małgorzata SZULGOWSKA-ZGRZYWA*

MIESIĘCZNA EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA SYSTEMÓW Z POMPAMI CIEPŁA POWIETRZE/WODA

Tematem przewodnim tej książki są metody stosowane do analizy efektywności energetycznej pomp ciepła powietrze/woda. W rozdziale I przedstawiono systematykę tych metod w kontekście zgodności z modelami efektywności energetycznej budynków. W wyniku tego przeglądu za szczególnie istotne uznano badania nad modelami pozwalającymi na symulacje pracy pomp ciepła powietrze/woda w kroku miesięcznym. Modele takie, choć sprawdzają się w innych obszarach inżynierii środowiska, nie są stosowane w odniesieniu do pomp ciepła powietrze/woda, tj. nie stwierdzono w tej grupie modeli odpowiednich rozwiązań teoretycznych. W rozdziałach II i IV przedyskutowano wpływ sposobu modelowania obciążenia częściowego pompy ciepła powietrze/woda oraz dokładności odwzorowania profilu obciążenia cieplnego na wyniki symulacji efektywności energetycznej tych urządzeń. W tym celu przygotowano odpowiednie algorytmy obliczeniowe i przeprowadzono rozważania, poparte wynikami badań i analizami, nad powyższymi problemami. W ich wyniku podjęto decyzję o rodzaju i szczegółowości danych wejściowych do modelu efektywności pompy ciepła powietrze/woda obliczanego w kroku miesięcznym. W rozdziałach III i IV opisano autorskie modele do obliczania efektywności energetycznej pomp ciepła powietrze/woda współpracujących z systemami do ogrzewania budynków lub do przygotowania ciepłej wody użytkowej w kroku miesięcznym. W celu skonstruowania modeli założono, iż podział każdego miesiąca na obszary różniące się sposobem eksploatacji pompy ciepła powietrze/woda pozwoli na obliczenie efektywności reprezentatywnej dla tego obszaru, a dzięki wiedzy o udziale poszczególnych obszarów w zapotrzebowaniu na energię możliwe będzie precyzyjne określenie efektywności urządzenia w danym miesiącu. W celu obliczenia wpływu poszczególnych obszarów na efektywność urządzenia opracowano *funkcję częstości temperatury*, która na podstawie temperatur: minimalnej, maksymalnej i średniej, powietrza ze-

* Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370, Wrocław, e-mail: malgorzata.szulgowska@pwr.edu.pl

powietrze/woda obliczanego w kroku miesięcznym. W rozdziałach III i IV opisano autorskie modele do obliczania efektywności energetycznej pomp ciepła powietrze/woda współpracujących z systemami do ogrzewania budynków lub do przygotowania ciepłej wody użytkowej w kroku miesięcznym. W celu skonstruowania modeli założono, iż podział każdego miesiąca na obszary różniące się sposobem eksploatacji pompy ciepła powietrze/woda pozwoli na obliczenie efektywności reprezentatywnej dla tego obszaru, a dzięki wiedzy o udziale poszczególnych obszarów w zapotrzebowaniu na energię możliwe będzie precyzyjne określenie efektywności urządzenia w danym miesiącu. W celu obliczenia wpływu poszczególnych obszarów na efektywność urządzenia opracowano *funkcję częstości temperatury*, która na podstawie temperatur: minimalnej, maksymalnej i średniej, powietrza zewnętrznego w danym miesiącu pozwala przybliżyć czas pracy urządzenia w każdym z obszarów. Dodatkowo dla modelu dotyczącego ogrzewania opracowano metodę tworzenia indywidualnych profili obciążenia cieplnego dla każdego miesiąca w roku, a dla układu przygotowania c.w.u. – metodę do obliczania reprezentatywnej mocy grzewczej. Dokonano sprawdzenia wyników uzyskiwanych z zastosowaniem zaproponowanych w pracy modeli do analizy miesięcznej efektywności energetycznej pomp ciepła powietrze/woda względem wyników uzyskanych z zastosowaniem modeli z obliczeniami w kroku godzinowym. Stwierdzono, iż zaproponowane modele miesięczne zapewniają dobrą dokładność obliczeń i mogą stanowić alternatywę do zaawansowanych symulacji energetycznych tych urządzeń. W rozdziale VI opisano algorytm dla modelu zintegrowanego, który umożliwia dobór i analizę pracy pompy ciepła powietrze/woda na potrzeby ogrzewania i jednocześnie przygotowania ciepłej wody użytkowej.

WYKAZ OZNACZEŃ I AKRONIMÓW

a	współczynnik redukcji do obliczania wpływu obciążenia częściowego na efektywność pompy ciepła powietrze/woda dla modelu 1	-
A, B, C, D	parametry dla funkcji mocy grzewczej pompy ciepła powietrze/woda	-
A_1, B_1, C_1, D_1	parametry dla funkcji COP_d pompy ciepła powietrze/woda	-
Cc	współczynnik redukcji do obliczania wpływu obciążenia częściowego na efektywność pompy ciepła powietrze/woda dla modelu 2	-
COP	chwilowy współczynnik efektywności pompy ciepła powietrze/woda pracującej w warunkach rzeczywistych	-
COP_d	deklarowany współczynnik efektywności pompy ciepła powietrze/woda wynikający z testów według normy EN 14511	-
cw	ciepło właściwe wody	kJ/(kg·K)
$defG$	deficyt energii w zbiorniku, przy którym następuje załączenie grzałki elektrycznej	kWh
$defPC$	deficyt energii w zbiorniku, przy którym następuje załączenie pompy ciepła powietrze/woda	kWh
DT	parametr <i>funkcji częstości temperatury</i>	-
k	parametr korygujący wartość COP pompy ciepła w obszarze	-
Ld	liczba dni	-
Lh	liczba godzin	-
Lx	znacznik liczby godzin skumulowanych <i>funkcji częstości temperatury</i> dla znacznika x	-
n	liczba cykli ładowania w dobie	-
n_{max}	maksymalna liczba cykli ładowania w dobie	-
$Q_{A\dot{Z}}$	moc alternatywnego źródła energii, innego niż pompa ciepła i grzałka elektryczna	kW
Q_B	wymagana moc grzewcza dla budynku, z uwzględnieniem sprawności systemu grzewczego	kW
Q_{CO}	obciążenie cieplne budynku	kW
$Q_{CWU,max}$	moc maksymalna układu przygotowania c.w.u.	kW
$Q_{CWU,\dot{s}r}$	moc średnia godzinowa układu przygotowania c.w.u.	kW
$Q_{D\dot{Z}}$	moc dolnego źródła energii dla pompy ciepła powietrze/woda	kW
Q_{EL}	moc elektryczna do zasilenia pompy ciepła (bez mocy grzałki elektrycznej)	kW
$Q_{el,G}$	moc grzałki elektrycznej	kW
$Q_{el,P}$	moc elektryczna pompy obiegowej	kW
$Q_{el,Q}$	moc grzałki, wynikająca z niedoboru mocy pompy ciepła powietrze/woda	kW
$Q_{el,S}$	moc elektryczna sprężarki	kW
$Q_{EL,S}$	moc elektryczna systemu pompy ciepła powietrze/woda	kW

$Q_{el,S-by}$	moc elektryczna systemów pomocniczych i sterowania pompy ciepła	kW
$Q_{el,T}$	moc grzałki elektrycznej, wynikająca ze zbyt niskiej temperatury zasilania wytwarzanej przez pompę ciepła powietrze/woda	kW
$Q_{el,W}$	moc elektryczna wentylatorów	kW
Q_{PC}	moc grzewcza generowana przez pompę ciepła powietrze/woda	kW
$Q_{PC,min}$	moc grzewcza pompy ciepła powietrze/woda przy minimalnej częstotliwości inwertera	kW
Q_{SZ}	moc w trakcie cyklu odszraniania	kW
$Q_{W,R}$	reprezentatywna moc układu przygotowania c.w.u. w danym miesiącu	kW
$Q'_{W,R}$	reprezentatywna moc układu przygotowania c.w.u. w danym miesiącu skorygowana o udział grzałki elektrycznej	kW
$SCOP$	okresowy współczynnik efektywności energetycznej pompy ciepła	-
S_d	udział zużycia c.w.u. w danej dobie względem średniej wartości tego zużycia dla okresu roku	-
S_m	udział zużycia c.w.u. w danym miesiącu względem średniej wartości tego zużycia dla okresu roku	-
S_{th}	stopniogodziny	(h·K)/rok
S_{thx}	stopniogodziny <i>jednostkowe</i>	-
T_1	dolna granica obszaru I	-
T_2	dolna granica obszaru II / górna granica obszaru I	-
T_3	dolna granica obszaru III / górna granica obszaru II	-
T_4	dolna granica obszaru IV / górna granica obszaru III	-
T_5	górna granica obszaru IV	-
T_{biw}	temperatura powietrza zewnętrznego w punkcie biwalentnym	°C
T_{CWU}	temperatura ciepłej wody użytkowej	°C
T_{ksg}	temperatura powietrza zewnętrznego określająca koniec sezonu grzewczego dla budynku	°C
T_{max}	temperatura maksymalna powietrza zewnętrznego w analizowanym okresie	°C
$T_{max,PC}$	maksymalna temperatura czynnika wytwarzanego przez pompę ciepła bez udziału grzałki elektrycznej	°C
T_{min}	temperatura minimalna powietrza zewnętrznego w analizowanym okresie	°C
$T_{min,PC}$	minimalna temperatura powietrza zewnętrznego wymagana do pracy pompy ciepła powietrze/woda	°C
T_P	temperatura czynnika grzewczego w przewodzie powrotnym z instalacji grzewczej	°C
$T_{PC,inw}$	temperatura powietrza zewnętrznego, przy której pompa ciepła powietrze/woda osiąga granicę minimalnej mocy grzewczej	°C
T_R	temperatura reprezentatywna w obszarze pracy pompy ciepła powietrze/woda	°C
T_{sr}	temperatura średnia powietrza zewnętrznego w analizowanym okresie	°C
T_{wew}	temperatura powietrza wewnętrznego w budynku	°C
T_{WZ}	temperatura wody zimnej	°C
T_Z	temperatura zasilania instalacji grzewczej (górnego źródła)	°C
T_{zew}	temperatura powietrza zewnętrznego	°C

T_{zew}^{obl}	obliczeniowa temperatura powietrza zewnętrznego	°C
T_Z^{ksg}	temperatura zasilania instalacji grzewczej przy temperaturze zewnętrznej końca sezonu grzewczego	°C
T_Z^{obl}	obliczeniowa temperatura zasilania instalacji grzewczej	°C
U_T	udział grzałki elektrycznej lub alternatywnego źródła energii cieplnej w celu podniesienia temperatury czynnika grzewczego	-
V_{CWU}	zużycie c.w.u.	dm ³
V_Z	objętość zasobnika	dm ³
x	znacznik temperaturowy dla <i>funkcji częstości temperatury</i>	-
X_I	udział obszaru I w całkowitym zapotrzebowaniu na energię do ogrzewania	-
X_{II}	udział obszaru II w całkowitym zapotrzebowaniu na energię do ogrzewania	-
X_{III}	udział obszaru III w całkowitym zapotrzebowaniu na energię do ogrzewania	-
X_{IV}	udział obszaru IV w całkowitym zapotrzebowaniu na energię do ogrzewania	-
δ	błąd lub niedokładność	-
ΔQ_B	współczynnik kierunkowy funkcji obciążenia cieplnego budynku	-
ΔT	parametr charakterystyczny do obliczenia krzywej grzewczej	-
η_m	sprawność magazynowania	-
η_p	sprawność przesyłu	-
η_r	sprawność regulacji	-
$\Sigma Q_{A\dot{Z}}$	energia cieplna z alternatywnego źródła energii	kWh
ΣQ_B	energia cieplna (końcowa) dostarczona do budynku przez pompę ciepła	kWh
ΣQ_{CO}	energia cieplna (użytkowa) do ogrzewania budynku	kWh
ΣQ_{CWU}	energia cieplna (użytkowa) do przygotowania ciepłej wody użytkowej	kWh
ΣQ_{CYKL}	energia cieplna w cyklu pracy	kWh
$\Sigma Q_{D\dot{Z}}$	energia cieplna pobrana z dolnego źródła	kWh
ΣQ_{EL}	energia elektryczna dostarczona do pompy ciepła (bez udziału grzałki elektrycznej)	kWh
$\Sigma Q_{el,G}$	energia z/do grzałki elektrycznej	kWh
$\Sigma Q_{el,P}$	energia elektryczna do zasilania pompy obiegowej	kWh
$\Sigma Q_{el,Q}$	energia z/do grzałki, wynikająca z niedoboru mocy pompy ciepła powietrze/woda	kWh
$\Sigma Q_{el,S}$	energia elektryczna dostarczona na potrzeby pracy sprężarki	kWh
$\Sigma Q_{EL,S}$	energia elektryczna do zasilania systemu pompy ciepła powietrze/woda	kWh
$\Sigma Q_{el,S-by}$	energia elektryczna do zasilania systemów pomocniczych i sterowania w pompie ciepła powietrze/woda	kWh
$\Sigma Q_{el,T}$	energia z/do grzałki elektrycznej, wynikająca z niedoboru temperatury czynnika grzewczego	kWh
$\Sigma Q_{el,W}$	energia elektryczna dostarczona na potrzeby pracy wentylatorów	kWh
ΣQ_{PC}	energia cieplna wytworzona przez pompę ciepła	kWh
ΣQ_{SZ}	energia cieplna w trakcie cyklu odszraniania	kWh
ΣQ_W	energia cieplna (końcowa) dostarczona do systemu przygotowania ciepłej wody użytkowej	kWh

ΣQ_z	energia cieplna zmagazynowana w zasobniku	kWh
τ_{max}	maksymalny czas ładowania zasobnika	h
τ_{PC}	współczynnik obciążenia częściowego, jest to udział czasu pracy aktywnej w godzinie	–
τ_{s-by}	czas pracy pompy ciepła w trybie stand-by	h
ϕ	współczynnik względnego obciążenia cieplnego budynku	–
ϕ_{Sth}	współczynnik udziału danej temperatury powietrza zewnętrznego w całkowitym zapotrzebowaniu na energię	–

indeksy dolne

<i>I, II, III, IV</i>	oznaczenia obszarów pracy pompy ciepła powietrze/woda
<i>CO</i>	system grzewczy
<i>COP</i>	chwilowy współczynnik efektywności pompy ciepła powietrze/woda pracującej w warunkach rzeczywistych
<i>i</i>	numer
<i>max</i>	maksymalny
<i>min</i>	minimalny
<i>p</i>	pomiar
<i>s</i>	symulacja
<i>SCOP</i>	sezonowy współczynnik efektywności pompy ciepła powietrze/woda
<i>T</i>	temperatura
<i>W</i>	system przygotowania c.w.u.
<i>x</i>	chwilowy

indeksy górne

<i>d</i>	dzień
<i>h</i>	godzina
<i>ksg</i>	koniec sezonu grzewczego
<i>m</i>	miesiąc
<i>obl</i>	obliczeniowy
<i>r</i>	rok

METODY ANALIZY EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ POMP CIEPŁA POWIETRZE/WODA W KONTEKŚCIE ANALIZY EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ BUDYNKÓW

1. Wprowadzenie

Analiza energetyczna budynku jest obecnie ważnym elementem procesu jego projektowania. Typowy krok czasowy symulacji energetycznych budynków to krok miesięczny lub godzinowy [1, 2]. Dokładność modeli godzinowych jest wysoka. Uwzględniają one (lub mogą uwzględniać) większość parametrów wpływających na zapotrzebowanie na energię do ogrzewania dla analizowanego budynku. Dokładność modeli miesięcznych do obliczania zapotrzebowania na energię w budynkach jest nieco niższa, ale są one w powszechnym zastosowaniu. Obliczenia te są obowiązkowe jako element procesu certyfikacji budynków w Polsce [3]. Uzupełnieniem analizy efektywności energetycznej budynku powinna być analiza efektywności systemów do dystrybucji energii w obiekcie. Obecnie dostępne są już bardzo zaawansowane techniki symulacyjne dla systemów grzewczych i wentylacyjnych, np. oprogramowanie *TRNSYS*, jednak ich zastosowanie w praktyce często jest pomijane ze względu na czasochłonność procesu wykonania analiz. Wykorzystanie takich narzędzi wymaga wiedzy i czasu, które nie zawsze są dostępne w zespole projektowym. Jednak w związku z koniecznością oszczędzania energii oraz zmniejszania emisji zanieczyszczeń do atmosfery ważne jest wdrożenie skutecznych, relatywnie prostych metod i narzędzi symulacyjnych, które efektywnie wspomogą pracę projektanta. W niniejszej pracy rozważono ten problem na przykładzie modelowania efektywności pomp ciepła powietrze/woda. Wybór tych urządzeń wynika ze znaczącego poziomu skomplikowania ich doboru i analizy pracy, a także poważnych konsekwencji niewłaściwych decyzji podjętych na etapie projektowania tego typu systemów grzewczych. Potwierdzeniem istotności zagadnień związanych z doбором i analizą pracy pomp ciepła powietrze/woda są publikacje międzynarodowych zespołów powołanych do usystematyzowania wiedzy o tych urządzeniach [4, 5, 6]. Równie ważnym powodem wyboru pomp ciepła powietrze/woda jako tematu pracy badawczej jest fakt, iż wykorzystują one energię odnawialną, a ciągły rozwój tej technologii grzewczej poprzez kontynuowanie prac nad zwiększaniem ich efektywności energetycznej [7] sprawia, że są one ważnym czynnikiem pozwalającym na ograniczenie negatywnego wpływu człowieka na środowisko naturalne.

2. Klasyfikacja metod obliczeniowych

Symulacja pracy pomp ciepła powietrze/woda jest zagadnieniem skomplikowanym [4, 5, 6]. Niekoherentność mocy grzewczej urządzenia względem obciążenia cieplnego budynku znacząco utrudnia jego dobór, a ilość czynników wpływających na efektywność energetyczną utrudnia proces analizy. Jednocześnie, co warto podkreślić, analiza efektywności energetycznej, i jej ocena, powinna być uzasadnieniem i potwierdzeniem poprawności doboru mocy grzewczej pompy ciepła powietrze/woda wobec potrzeb energetycznych budynku [8, 9, 10]. Dla zrozumienia procesu symulacji efektywności energetycznej pomp ciepła powietrze/woda należy odróżnić model opisujący efektywność samej pompy ciepła, czyli wartość deklarowanego współczynnika efektywności (COP_d) w konkretnym punkcie pracy, od modelu opisującego sezonową efektywność systemu grzewczego zasilanego przez to urządzenie w zadanym okresie ($SCOP$).

Model pompy ciepła powietrze/woda to zależność deklarowanego współczynnika efektywności energetycznej (COP_d) i mocy grzewczej (Q_{pc}) od parametrów wpływających na te wartości. Obecnie do opisu tych zmiennych zależnych najczęściej wykorzystuje się dwie zmienne niezależne: temperaturę dolnego i górnego źródła. Dane dotyczące wartości COP_d i mocy grzewczej urządzenia dostarcza producent, a powszechnie uznawaną procedurą do ich pozyskiwania są testy opisane w normie EN 14511 [11].

Model $SCOP$ systemu z pompą ciepła powietrze/woda obejmuje całość zagadnień pozwalających na ocenę efektywności energetycznej pompy ciepła w konkretnej instalacji. Jako podstawowe dane wejściowe do tych analiz wykorzystuje się wartości COP_d , ale proces obliczeń $SCOP$ powinien być rozszerzony o wpływ innych czynników, z których najważniejszym, w przypadku pomp ciepła powietrze/woda, jest chwilowe obciążenie cieplne budynku lub innego systemu, do którego urządzenie dostarcza energię cieplną.

Testy proponowane w normie [11] dostarczają danych na temat mocy grzewczej pompy ciepła i wartości jej COP_d w zależności od wartości temperatury powietrza zewnętrznego i temperatury czynnika grzewczego. Poprawnym krokiem czasowym do zastosowania tych danych jest krok godzinowy. Bezpośrednie zastosowanie innego kroku czasowego, np. miesięca, skutkowałoby znacznymi niedokładnościami. O ile średnia miesięczna wartość temperatury powietrza zewnętrznego jest wystarczająca do dość dokładnego obliczenia zapotrzebowania na energię do ogrzewania budynku, to w odniesieniu do efektywności pomp ciepła powietrze/woda już taką nie będzie. Związane jest to ze znaczącym zakresem zmian wartości mocy i COP_d urządzenia w ciągu roku, z czego wynika konieczność analizy tej wartości dla całego zakresu występujących temperatur powietrza zewnętrznego. Aktualnie stosowane modele obliczeniowe $SCOP$ pomp ciepła opierają się o dwa, znacząco różniące się od siebie podejścia anali-

tyczne. Pierwszy sposób to obliczenia prowadzone w kroku godzinowym (lub ewentualnie częstszym) [4, 5, 12, 13, 14, 15]. Drugie podejście, zalecane przez normy europejskie EN 14825 [16] i EN 15316-4-2 [17] oraz opisane w publikacjach naukowych [18, 19, 20, 21, 22, 23], to krok temperaturowy.

Modele obliczeniowe *SCOP* w kroku godzinowym stosowane są do dokładnego opisu współpracy urządzenia z instalacją grzewczą, wentylacyjną czy instalacją ciepłej wody użytkowej w budynku [24, 25, 26]. W procesie obliczeniowym możliwe jest uwzględnienie zmian temperatury dolnego i górnego źródła oraz zapotrzebowania na ciepło w budynku. Należy podkreślić, że wykonanie takich symulacji wymaga wcześniejszego zamodelowania pracy budynku w celu określenia zapotrzebowania na energię w kroku godzinowym. Modele godzinowe nie są pozbawione wad, związanych głównie z problemami trudnymi do oddania w nadal, jak się okazuje, rzadkim kroku czasowym, tzn. dynamiczną pracą systemu automatycznej regulacji i samego urządzenia – dość często w ciągu jednej godziny zachodzi kilka cykli włączenia i wyłączenia pompy ciepła. Istotnym problemem jest również precyzyjne odzwierciedlenie procesów ładowania i rozładowywania elementów pojemnościowych w systemie. Aby dokładnie opisać pracę tych układów, konieczne jest zastosowanie analiz w kroku minutowym. Ich praktyczne zastosowanie ograniczone jest jednak zarówno możliwościami finansowymi, czasowymi, jak i dostępnością danych klimatycznych o określonym, najczęściej godzinowym kroku czasowym. W związku z tym stosuje się je w badaniach naukowych [27, 28, 29] i obliczeniach wizualizujących pracę poszczególnych komponentów urządzenia, potrzebnych raczej w procesie projektowania urządzeń, a nie przy całorocznych obliczeniach efektywności energetycznej pompy ciepła.

Mniej czasochłonne w procesie obliczeń są modele obliczające *SCOP* na podstawie krzywej klimatycznej [16, 17]. Modele w kroku temperaturowym ułatwiają proces obliczeniowy, redukując ilość przeliczeń z 8760 wierszy (odpowiadających liczbie godzin w roku) do około 40 wierszy (wynikających z kroku temperaturowego, co 1 K, od temperatury zewnętrznej -20°C do $+20^{\circ}\text{C}$). Takie podejście obliczeniowe ma wiele zalet: upraszcza i skraca proces obliczeń, porządkuje informacje w jasnej i czytelnej formie oraz pozwala na precyzyjne określenie parametrów pracy systemu dla różnych temperatur powietrza zewnętrznego. Należy podkreślić, że wartość temperatury powietrza zewnętrznego jest kluczowym parametrem w analizie energetycznej zarówno budynków, jak i pomp ciepła. Współczynnik efektywności pompy ciepła jest bowiem najmocniej skorelowany z wartością tej temperatury oraz z wartością temperatury czynnika grzewczego, które w takim podejściu obliczeniowym są dobrze odzwierciedlone. Analiza *SCOP* w kroku nie czasowym, a temperaturowym ma jednak również wady. W odniesieniu do analizy dotyczącej systemu ogrzewania główny problem dotyczy obciążenia cieplnego. Trudno jest precyzyjnie przypisać do danej temperatury zewnętrznej zapo-

trzebowanie na energię do ogrzewania, gdyż na zapotrzebowanie to, oprócz samej wartości tej temperatury, która oczywiście definiuje moc (energię) do kompensacji strat statycznych budynku oraz moc (energię) potrzebną do podgrzania powietrza wentylacyjnego, wpływają również w znacznym stopniu zyski ciepła od słońca i zyski wewnętrzne. Szczególnie wartość tych pierwszych trudno jest przyporządkować do wartości temperatury zewnętrznej. Stosowane modele obliczeniowe *SCOP* opierające się o krzywą klimatyczną albo pomijają zyski ciepła i jako dane wejściowe przyjmują wartość projektowego obciążenia cieplnego, albo przyjmują jako wartość wejściową roczne zapotrzebowanie na energię do ogrzewania, które rozdzielane jest równomiernie na poszczególne kroki temperaturowe. Powoduje to znaczące zaniżenie wymaganej mocy grzewczej pompy ciepła powietrze/woda, szczególnie przy niskich temperaturach powietrza zewnętrznego. Skutkiem tego jest brak precyzji w określeniu COP_d pompy ciepła oraz w określeniu wartości energii potrzebnej do zasilenia sprężarki oraz grzałki elektrycznej. W odniesieniu do analizy dotyczącej systemu przygotowania ciepłej wody użytkowej główny problem dotyczy niemożności oddania profilu zapotrzebowania na energię oraz procesów ładowania i rozładowywania elementów pojemnościowych układu w kroku temperaturowym, gdyż nie są one funkcją temperatury powietrza zewnętrznego.

Tabela 1. Klasyfikacja modeli pomp ciepła powietrze/woda ze względu na krok obliczeniowy modelu i w kontekście stosowanych modeli do analizy efektywności energetycznej budynków

Krok obliczeniowy	Model pompy ciepła powietrze/woda	Model efektywności energetycznej budynku	Dane klimatyczne
Minuta	Stosowany	Brak	Brak
Godzina	Stosowany	Stosowany	Dostępne
Doba	Brak	Brak	Dostępne
Miesiąc	Brak	Stosowany	Dostępne
Rok	Stosowany	Brak	Dostępne
Temperaturowy	Stosowany	Stosowany	Dostępne*

* wymagają dodatkowych przeliczeń

W tabeli 1 zestawiono, klasyfikując według kroku obliczeniowego, modele efektywności pomp ciepła powietrze/woda, modele efektywności energetycznej budynków i dostępność danych klimatycznych. Klasyfikacja ta powstała w wyniku przeglądu artykułów dotyczących symulacji efektywności energetycznej budynków i systemów dystrybucji energii [30, 34, 35, 36], norm [1, 2, 16, 17, 35] oraz publikacji zespołów badawczych [4, 5, 6]. Przegląd ten wykazał istnienie kompatybilnego rozwiązania analitycznego na poziomie kroku godzinowego. Zdecydowanie wyróżnia się brak modelu do analizy pracy pomp ciepła powietrze/woda w kroku miesięcznym. Powszechność tego kroku obliczeniowego w praktycznych analizach energetycznych budynków jest niezaprzeczalna. Obecnie do wyników obliczeń energetycznych obiektu wykonanych w kroku miesięcznym przypisywana jest wartość *SCOP* pompy ciepła wynikająca z szacunków

w kroku rocznym lub temperaturowym. Nie jest to właściwe postępowanie, gdyż kroki czasowe poszczególnych modeli powinny być do siebie dostosowane. Brak informacji o zmianach efektywności pompy ciepła powietrze/woda w ciągu roku uniemożliwi diagnozowanie zmian profilu zapotrzebowania na energię końcową w budynku. Jednym z wielu przykładów, kiedy informacja ta będzie niezbędna, jest planowanie współpracy tych urządzeń z układami ogniw fotowoltaicznych. Jej brak utrudni planowanie wymiany energii elektrycznej z siecią elektroenergetyczną oraz pogorszy jakość procesu projektowania układu do akumulacji tej energii.

3. Zdefiniowanie problemu badawczego

Teza pracy brzmi następująco: modelowanie efektywności energetycznej systemu pompy ciepła powietrze/woda w kroku miesięcznym może spełnić kryterium odpowiedniej dokładności analiz, dostarczając precyzyjnej informacji o zmianach efektywności urządzenia w ciągu roku, zapewniając jednocześnie krótki czas wykonywania obliczeń i pozwalając na dostosowanie się do powszechnie stosowanego kroku obliczeniowego przy wyznaczaniu zapotrzebowania na energię do ogrzewania budynków.

Głównym celem tej pracy jest stworzenie metody do analizy miesięcznej efektywności pomp ciepła powietrze/woda, będącej alternatywą dla obliczeń w kroku temperaturowym i godzinowym. Istotnym problemem przy próbie opracowania dokładnego modelu pompy ciepła powietrze/woda w kroku miesięcznym jest konieczność zastąpienia niektórych danych wejściowych oraz modeli obliczeniowych właściwych dla procesów pracy tego urządzenia i układów automatycznej regulacji, stosowanych w symulacjach w kroku godzinowym, funkcjami pozwalającymi na oddanie dynamiki zmian tych parametrów w kroku miesięcznym. Zasadniczo najprostszym rozwiązaniem jest zastosowanie wartości średniej, np. temperatury powietrza zewnętrznego z okresu miesiąca. Należy jednak zauważyć, iż w procesie uśredniania znacząco pogorszeniu ulegnie dokładność opisu rzeczywistej efektywności pompy ciepła. Z punktu widzenia rzetelnej oceny efektywności tych urządzeń istotne są bowiem również informacje o wartościach skrajnych temperatury powietrza zewnętrznego oraz profilach zmian tej temperatury i zapotrzebowania na energię. Wszystkie te dane należy poddać analizie w celu opracowania zależności pozwalających na zachowanie dokładności prowadzonych obliczeń. Prace badawcze opisane w niniejszej książce zostały ukierunkowane na weryfikację rodzaju danych wejściowych i funkcji właściwych do zastosowania w analizach miesięcznych w celu otrzymania zbliżonej dokładności uzyskiwanych wyników w stosunku do modelowania w kroku godzinowym.

MODELOWANIE EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ POMP CIEPŁA POWIETRZE/WODA WSPÓŁPRACUJĄCYCH Z SYSTEMAMI OGRZEWANIA BUDYNKÓW

1. Efektywność energetyczna pompy ciepła powietrze/woda

1.1 Współpraca pompy ciepła z systemem grzewczym

Sezonową efektywność energetyczną ($SCOP$) systemu pompy ciepła powietrze/woda stosowanej jako źródło ciepła do ogrzewania budynku oblicza się, zestawiając energię cieplną dostarczoną do budynku w analizowanym okresie (ΣQ_B) z energią elektryczną dostarczoną do systemu pompy ciepła w tym samym okresie (ΣQ_{EL}), co opisuje poniższe równanie:

$$SCOP = \frac{\Sigma Q_B}{\Sigma Q_{EL}}$$

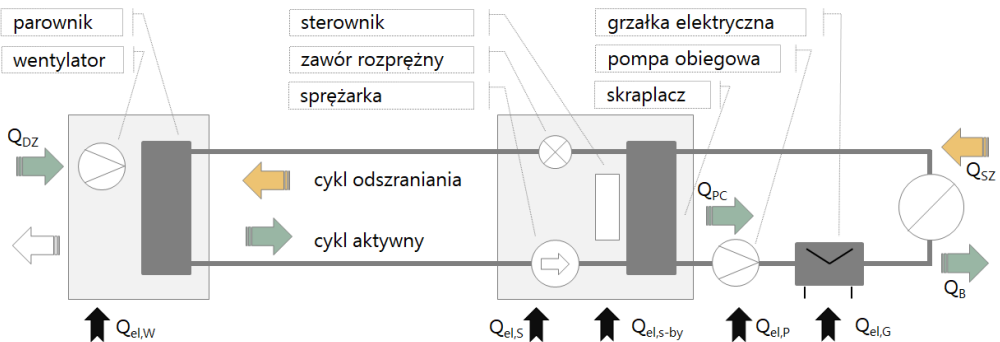
Energia cieplna (ΣQ_B), jaką ma dostarczyć pompa ciepła powietrze/woda w zadanej jednostce czasu, wynika z zapotrzebowania budynku na energię użytkową (ΣQ_{CO}), sprawności magazynowania (η_m), przesyłu (η_p) oraz regulacji (η_r) i jest opisana poniższym wzorem:

$$\Sigma Q_B = \frac{\Sigma Q_{CO}}{\eta_m \cdot \eta_p \cdot \eta_r}$$

Dobór pompy ciepła powietrze/woda dokonywany jest najczęściej nie na podstawie projektowego obciążenia cieplnego budynku, lecz w odniesieniu do mocy grzewczej w punkcie biwalentnym¹. Przy takim założeniu w systemie zawsze niezbędne jest dodatkowe źródło energii, którym może być grzałka elektryczna (system monoenergetyczny) lub źródło ciepła korzystające z innego nośnika energii (system biwalentny). Jeśli stosowany jest system monoenergetyczny, zużycie energii elektrycznej do obliczenia $SCOP$ układu pompy ciepła powietrze/woda ($\Sigma Q_{EL,S}$) jest wynikiem sumowania energii dostarczonej do pompy ciepła (ΣQ_{EL}) i energii dostarczonej do grzałki elektrycznej ($\Sigma Q_{el,G}$). Jeśli system jest biwalentny, energia cieplna dostarczona za pośrednictwem innego nośnika nie jest uwzględniana w wartości $SCOP$.

¹ Punkt biwalentny określany jest poprzez wartość temperatury powietrza zewnętrznego, dla której moc grzewcza pompy ciepła powietrze/woda równa jest chwilowemu obciążeniu cieplnemu budynku.

Schemat systemu z pompą ciepła powietrze/woda wraz ze stosownymi oznaczeniami przedstawiono na rysunku 1. Przed przystąpieniem do obliczeń wartości *SCOP* systemu pompy ciepła powietrze/woda konieczne jest zrozumienie sposobu pracy tych urządzeń oraz ich współpracy z systemem grzewczym budynku. Przeważająca część energii elektrycznej dostarczanej do systemu pompy ciepła kierowana jest do napędu sprężarki pompy ciepła ($\Sigma Q_{el,S}$). W szczegółowej analizie nie można jednak pomijać innych celów dostawy tej energii, takich jak zasilanie wentylatora ($\Sigma Q_{el,W}$), zasilanie systemu podtrzymania pracy pompy ciepła ($\Sigma Q_{el,s-by}$), zasilanie pompy obiegowej ($\Sigma Q_{el,P}$) oraz grzałki elektrycznej ($\Sigma Q_{el,G}$). Należy też zauważyć, że pracę pompy ciepła powietrze/woda charakteryzuje cykliczność. Związana jest ona ze sposobem regulacji mocy urządzenia, minimalnym czasem pracy sprężarki i koniecznością okresowego odszraniania wymiennika po stronie dolnego źródła energii (parownika). Zasadniczo cykle te można sklasyfikować jako cykle pracy aktywnej i pracy w trybie podtrzymania (stand-by). Dodatkowo cykle pracy aktywnej należy podzielić na takie, w których zachodzi proces odszraniania wymiennika dolnego źródła, i takie, w których proces ten nie występuje.



Rysunek 1. Schemat systemu pompy ciepła powietrze/woda stosowanej do ogrzewania budynku

Cykl aktywny odpowiada za dostawę energii cieplnej do budynku. Cykl stand-by jest okresem postoju urządzenia w oczekiwaniu na pojawienie się zapotrzebowania na moc grzewczą. Cykl odszraniania z kolei ma na celu zabezpieczenie parownika pompy ciepła powietrze/woda przed zamrożeniem. W urządzeniach różnych producentów i typów sterowanie tymi cyklami ma różny przebieg, gdyż zależy od rozwiązań technicznych oraz algorytmów sterowania zaimplementowanych w pompie ciepła. Efektywność tych rozwiązań i systemów sterowania jest bardzo różna i w sposób znaczący wpływa na efektywność układu, w którym pracuje pompa ciepła [36]. Bez względu jednak na to, jak przebiega proces sterowania pracą urządzenia w poszczególnych cyklach, zużycie energii elektrycznej przez układ pompy ciepła w każdym z nich jest wynikiem sumy poborów energii przez pracujące w danym cyklu zestawy komponentów systemu, co szczegółowo zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Zużycie energii elektrycznej przez pompę ciepła powietrze/woda działającej w trybie ogrzewania budynku w różnych cyklach pracy

	Cykl aktywny	Cykl stand-by	Cykl odszraniania
Sprężarka	+		+
Wentylatory	+		
Pompa obiegowa	+	+*	+
Układ automatycznej regulacji	+	+	+
Grzałka elektryczna*	+		

* opcjonalnie, w zależności od algorytmu sterowania pracą urządzenia

Cykliczność pracy pompy ciepła powietrze/woda musi zostać odpowiednio uwzględniona w obliczeniach sezonowego współczynnika efektywności ($SCOP$) systemu pompy ciepła. Wymagane jest określenie chwilowych wartości COP w przyjętym kroku obliczeniowym², które będą różne w zależności od stanu pracy urządzenia. Do określania chwilowych wartości COP stosowane są różne modele, szczegółowo omówione w kolejnym punkcie.

1.2 Chwilowa wartość COP oraz mocy grzewczej pompy ciepła

Podstawą do obliczeń chwilowej wartości COP oraz mocy pompy ciepła (Q_{PC}) są dane dostarczane przez producenta pompy ciepła. W niniejszej pracy wykorzystywane są dane pozyskiwane zgodnie z zaleceniami normy EN 14511 [11]. W chwili obecnej są one najbardziej precyzyjną informacją umożliwiającą analizę pracy pomp ciepła powietrze/woda. Testy proponowane w normie [11] uwzględniają zmiany temperatury wody grzewczej (górnego źródła), zmiany temperatury powietrza zewnętrznego (dolnego źródła) oraz proces odszraniania parownika pompy ciepła. Wartości deklarowanego współczynnika efektywności COP_d wynikające z testów zgodnych z zapisami normy [11] uwzględniają energię dostarczoną do sprężarki, wentylatorów, pompy obiegowej (jeśli jest zamontowana w pompie ciepła) oraz na potrzeby automatyki w trakcie aktywnego cyklu pracy urządzenia. Testy dostarczają informacji o parametrach urządzenia w kilku punktach pomiarowych. Najczęściej zestaw danych obejmuje trzy temperatury górnego źródła: 35°C, 45°C, 55°C, i sześć temperatur dolnego źródła: -15°C, -10°C, -7°C, 2°C, 7°C, 20°C. Z punktów tych należy stworzyć model obliczeniowy COP_d i mocy grzewczej urządzenia (Q_{PC}). W praktyce stosowane są do tego dwie podstawowe metody: model Afjeiego [37] oraz interpolacja liniowa [16, 17]. Charakterystyczne cechy tych metod zestawiono w tabeli 3. Model interpolacji liniowej jest dokładniejszy w obszarze pomiędzy znanymi punktami opisującymi COP_d i moc pompy ciepła (Q_{PC}). Niestety wymaga on tworzenia charakterystyki liniowej pomiędzy każdym sąsiadują-

² Dostępne możliwości w zakresie doboru kroku obliczeniowego do analizy $SCOP$ systemu pompy ciepła powietrze/woda omówiono w rozdziale I.

cym ze sobą zestawem punktów. Niemożliwe jest stworzenie jednej funkcji, która opisyje cały obszar pracy urządzenia. Znaczącym problemem jest również kwestia ekstrapolacji poza zakres punktów pomiarowych, gdzie założenie o liniowym przebiegu tej charakterystyki może znacząco odbiegać od rzeczywistości, co sygnalizowano w pracach [38, 39]. Model płaszczyzny Afjeiego [37] z kolei może powodować pewne rozbieżności pomiędzy wartością w punkcie testowym a informacją podawaną przez model. Należy podkreślić, że istotną zaletą tego rozwiązania jest przekształcenie charakterystyki opisanej punktami pracy w charakterystykę wyrażoną jedną funkcją, w oryginalnej metodzie będącej wielomianem drugiego stopnia o dwóch zmiennych.

Tabela 3. Modele COP_d i mocy pompy ciepła powietrze/woda

Model	Dane początkowe	Zmienne niezależne modelu	Sposób obliczeń	Stosowanie
Model Thomasa Afjeiego	COP_d i Q_{PC} dla kilku punktów pracy urządzenia	<ul style="list-style-type: none"> temperatura zasilania temperatura powietrza zewnętrznego 	Charakterystykę przybliża wielomian drugiego stopnia opisujący płaszczyznę pracy urządzenia	Powszechnie w symulacjach energetycznych
Interpolacja liniowa	COP_d i Q_{PC} dla kilku punktów pracy urządzenia	<ul style="list-style-type: none"> temperatura zasilania temperatura powietrza zewnętrznego 	Stosuje się przybliżenie z zastosowaniem funkcji liniowej pomiędzy znanymi wartościami	Normy europejskie EN 14825 [16] i EN 15316 [17]

Bez względu na stosowany model charakterystyki COP i mocy pompy ciepła najważniejszą kwestią jest jakość danych wejściowych. Zasadniczo proces testów proponowanych przez EN 14511 [11] nie jest całkowicie satysfakcjonujący. Główne problemy dotyczą zbyt małej liczby punktów pomiarowych dla wyznaczenia dokładnej charakterystyki urządzenia (zasadniczo należy stwierdzić brak danych dla temperatur zasilania poniżej 35°C), stałej podczas testów różnicy temperatur na skraplaczu (wynoszącej 5 K), braku oceny wpływu zmiennej częstotliwości pracy inwertera na wartość COP_d i moc urządzenia oraz braku oceny wpływu obciążenia częściowego i sposobu dopasowania mocy urządzenia na jego efektywność. Wyznaczona na podstawie testów [11] wartość COP_d dotyczy bowiem jedynie sytuacji, gdy pompa ciepła pracuje przy pełnym obciążeniu w cyklu aktywnym.

Kwestia dopasowania mocy grzewczej pompy ciepła powietrze/woda do obciążenia cieplnego budynku jest kluczowa w przypadku szacowania $SCOP$ systemów z tymi urządzeniami. Regulacja mocy pompy ciepła może przebiegać dwojako, w zależności od typu zainstalowanej sprężarki. W tzw. sprężarkach inwerterowych istnieje możliwość regulacji prędkości obrotowej, co bezpośrednio wpływa na moc grzewczą urządzenia. Zakres tej regulacji jest różny, najczęściej do około 30% mocy nominalnej. Jednocześnie należy podkreślić, iż częstotliwość pracy sprężarki wpływa również na wartość COP

pompy ciepła [40, 41]. Informację o stopniu tego wpływu pozyskać jest bardzo trudno, gdyż charakterystyki takie najczęściej wykonywane są jedynie na etapie projektowania sprężarki i nie są udostępniane w katalogach pomp ciepła. W większości analiz zakłada się, iż sama zmiana częstotliwości pracy sprężarki nie zmienia charakterystyki urządzenia. W sprężarkach bez możliwości regulacji prędkości obrotów oraz w pompach ciepła ze sprężarką inwerterową, w sytuacji, gdy wymagana moc urządzenia jest niższa niż minimalna możliwa do osiągnięcia w wyniku redukcji częstotliwości, regulacja odbywa się na zasadzie włączania i wyłączania sprężarki (on/off). Nie jest to wydajny sposób regulacji. Związane z nim straty rozruchowe sprężarki oraz straty energii wynikające z cyklu standy-by (szczególnie istotne, gdy regulacja pracy pompy obiegowej nie jest odpowiednio zintegrowana z pracą sprężarki lub energochłonność pompy obiegowej jest wysoka) znacząco wpływają na efektywność systemu, zmniejszając chwilowe wartości COP . Sposobów uwzględniania wpływu obciążenia częściowego na efektywność pompy ciepła jest kilka [42, 43, 14, 29], poniżej przytoczono dwa stosowane w normach europejskich EN 14825 [16] i EN 15316-4-2 [17] oraz trzeci zaproponowany w pracy [46].

Przy omawianiu wpływu obciążenia częściowego na efektywność pompy ciepła powietrze/woda należy przede wszystkim zdefiniować parametr stanowiący podstawę jego obliczania. W niniejszej pracy współczynnik obciążenia, definiowany jako stosunek chwilowej mocy pompy ciepła do obciążenia cieplnego budynku, oznaczono jako τ_{PC} . Może być on interpretowany jako udział czasu pracy pompy ciepła w trybie aktywnym w analizowanym kroku obliczeniowym i obliczany jest z poniższej zależności:

$$\tau_{PC} = \frac{Q_{PC}}{Q_B}$$

Tak zdefiniowany współczynnik można zastosować w jednym z trzech modeli oceny wpływu obciążenia częściowego na efektywność energetyczną pompy ciepła powietrze/woda.

Model 1 do obliczania wpływu obciążenia częściowego [16]:

$$COP = COP_d \cdot \frac{\tau_{PC}}{C_c \cdot \tau_{PC} + (1 - C_c)}$$

Model 2³ do obliczania wpływu obciążenia częściowego [17]:

³ W modelu 2 wartość τ_{PC} stosowana jest do obliczenia czasu pracy w trybie stand-by i dalej do obliczenia zużycia energii elektrycznej w tym trybie (Q_{els-by}).

$$COP = \frac{Q_B}{\frac{Q_B}{COP_d} + Q_{el,s-by}}$$

Model 3 do obliczania wpływu obciążenia częściowego [46]:

$$COP = COP_d \cdot (1 + a \cdot \ln(\tau_{PC} + e^{(-1/a)})).$$

Podsumowując, obliczenie wartości COP_d oraz mocy pompy ciepła (Q_{PC}) w pojedynczym punkcie pracy przy pełnym obciążeniu wymaga znajomości temperatury powietrza zewnętrznego (T_{zew}) i temperatury zasilania systemu grzewczego (T_Z). Jednak aby przeliczyć wartość COP_d na wartość COP pompy pracującej pod rzeczywistym obciążeniem grzewczym, konieczna jest znajomość chwilowego obciążenia cieplnego budynku (Q_B). Wymaga tego każdy z opisanych powyżej modeli. Konieczna jest również prawidłowa informacja o wartości parametru opisującego wpływ obciążenia częściowego na efektywność energetyczną pompy ciepła, wyrażona w poszczególnych modelach wartościami: C_c , $Q_{el,s-by}$ lub a .

1.3 Zapotrzebowanie na moc i energię do ogrzewania budynku

Dane dotyczące chwilowego obciążenia cieplnego budynku (Q_B) pozyskać można na kilka sposobów. Mogą być to dane pomiarowe, wyniki symulacji energetycznych lub przybliżenia, wynikające z rocznego zapotrzebowania na energię lub projektowego obciążenia cieplnego. Jak opisano w rozdziale I, typowy krok czasowy dla symulacji energetycznych budynków to krok miesięczny lub godzinowy. Dokładność modeli godzinowych jest wysoka. Uwzględniają one (lub mogą uwzględniać) większość parametrów wpływających na zapotrzebowanie na energię do ogrzewania analizowanego budynku. Dokładność modeli miesięcznych do obliczania zapotrzebowania na energię w budynkach jest nieco niższa, ale są one powszechnie stosowane – obliczenia takie są obowiązkowe w procesie certyfikacji energetycznej budynków. Pomimo tego w odniesieniu do analizy efektywności pomp ciepła powszechnie stosowany jest krok roczny lub krok temperaturowy. Wydaje się, iż model efektywności energetycznej urządzenia powinien być dostosowany do kroku czasowego modelowania zapotrzebowania na energię, jednak tak nie jest. W wyniku tego, iż popularne modele efektywności pomp ciepła (i wielu innych systemów) opracowane są dla kroku temperaturowego, a nie czasowego, w dość powszechnym zastosowaniu są metody pozwalające na przybliżenie wartości zapotrzebowania na energię oraz chwilowego obciążenia cieplnego budynku w poszczególnych krokach temperaturowych na podstawie projektowego obciążenia cieplnego lub na podstawie rocznego zapotrzebowania na energię do ogrzewania. Wyróżnić można dwa podejścia do tworzenia profilu obciążenia cieplnego w kroku temperaturowym.

Pierwsza metoda (profil A) to obliczenie chwilowej mocy grzewczej obiektu za pomocą współczynnika względnego obciążenia cieplnego (φ) i obliczeniowego zapotrzebowania budynku na moc (Q_B^{obl}). Względne obciążenie cieplne zdefiniowane jest poniższym wzorem:

$$\varphi_x = \frac{T_{wew} - T_{zew,x}}{T_{wew} - T_{zew}^{obl}}$$

Chwilowe obciążenie cieplne budynku ($Q_{B,x}$) obliczyć można, korzystając z przekształconej zależności na współczynnik względnego obciążenia cieplnego:

$$\varphi_x = \frac{Q_{B,x}}{Q_B^{obl}} \Leftrightarrow Q_{B,x} = Q_B^{obl} \cdot \varphi_x$$

Wzór ten pozwala na oszacowanie chwilowego zapotrzebowania na moc grzewczą w budynku przy założeniu, że jest ona liniowo zależna od temperatury powietrza zewnętrznego. Pomijany jest wpływ wewnętrznych zysków ciepła i zysków ciepła od nasłonecznienia. W Polsce najczęściej wykonuje się powyższe obliczenia dla temperatury powietrza wewnętrznego (T_{wew}) wynoszącej 20°C. Norma EN 14825 [16], dotycząca testowania i analizy pracy pomp ciepła, zaleca przyjęcie tej temperatury (T_{wew}) jako 16°C. Pozwala to na zmianę punktu przecięcia prostej obrazującej obciążenie cieplne budynku z osią x . Uzasadnieniem tego działania wydaje się być dopasowanie przebiegu tej prostej do rzeczywistego zakończenia sezonu grzewczego, przyjmowanego zazwyczaj dla temperatury powietrza zewnętrznego (T_{zew}^{ksg}) wynoszącej 16°C.

Aby wyznaczyć nie tylko moc, ale i zużycie energii cieplnej w budynku w danym kroku temperaturowym, wymagana jest znajomość krzywej klimatycznej. Krzywa klimatyczna to zestawienie, w którym danej temperaturze powietrza zewnętrznego ($T_{zew,x}$) przyporządkowana zostaje liczba godzin występowania tej temperatury. Typowe krzywe klimatyczne sporządzane są dla okresu grzewczego lub dla całego roku. Czas trwania sezonu grzewczego jest odmienny w różnych lokalizacjach, co należy wziąć pod uwagę przy porównywaniu takich krzywych. Liczba godzin występowania danej temperatury powietrza zewnętrznego (Lh_x) pozwala wyznaczyć zużycie energii cieplnej ($\Sigma Q_{B,x}$) przypadające na daną wartość temperatury powietrza zewnętrznego. Ilość tej energii będzie zasadniczo przeszacowana ze względu na brak uwzględnienia zysków ciepła w danych wejściowych do obliczeń.

$$\Sigma Q_{B,x} = Q_{B,x} \cdot Lh_x$$

Druga metoda (profil B), choć również wykorzystuje krzywą klimatyczną, charakteryzuje się odwrotnym podejściem, tj. wartością wejściową jest roczne zapotrzebowanie na energię (ΣQ_B^r), a nie moc grzewcza (Q_B^{obl}). Metoda ta opisana jest w normie

EN 15316-4-2 [17] i pozwala na oszacowanie chwilowej mocy grzewczej wymaganej przez budynek z uwzględnieniem zysków ciepła od słońca i wewnętrznych, z zastosowaniem wzorów opisanych poniżej. Stopniogodziny danej temperatury zewnętrznej (Sth_x) oblicza się na podstawie poniższego równania:

$$Sth_x = (T_{zew} - T_{zew,x}) \cdot Lh_x.$$

Dzięki tej wartości oblicza się wskaźnik:

$$\varphi_{Sth,x} = \frac{Sth_x}{\sum_{x=1}^{x=ksg} Sth_x},$$

pozwalający wyznaczyć zapotrzebowanie na energię do ogrzewania w danym kroku temperaturowym:

$$\Sigma Q_{B,x} = \Sigma Q_B^r \cdot \varphi_{Sth,x}.$$

Przeliczenia z wartości zapotrzebowania na energię na wartość obciążenia cieplnego dokonuje się poprzez równomierne jej rozłożenie na każdą z godzin kroku temperaturowego, co opisuje poniższe równanie:

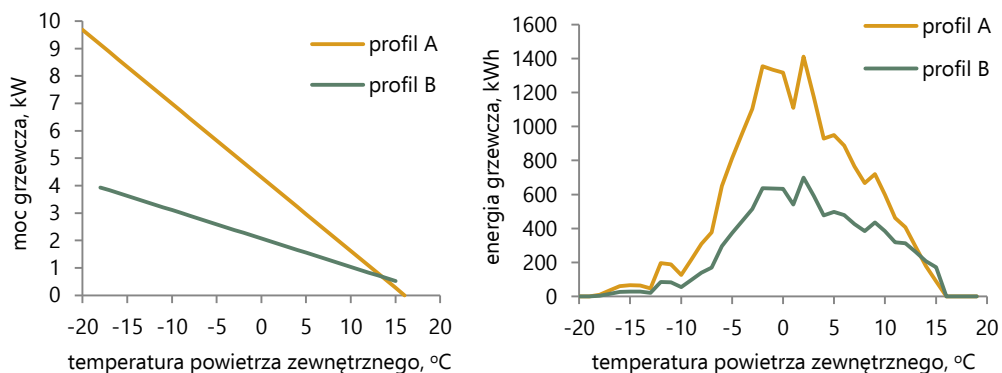
$$Q_{B,x} = \frac{\Sigma Q_{B,x}}{Lh_x}.$$

W tabeli 4, dla podkreślenia elementów wspólnych oraz różnic, zestawiono zasady obliczeń dla obu metod obliczeniowych, nazwanych profilem A i profilem B.

Tabela 4. Zasada obliczania krzywej klimatycznej oraz zapotrzebowania na moc i energię dla profili A oraz B

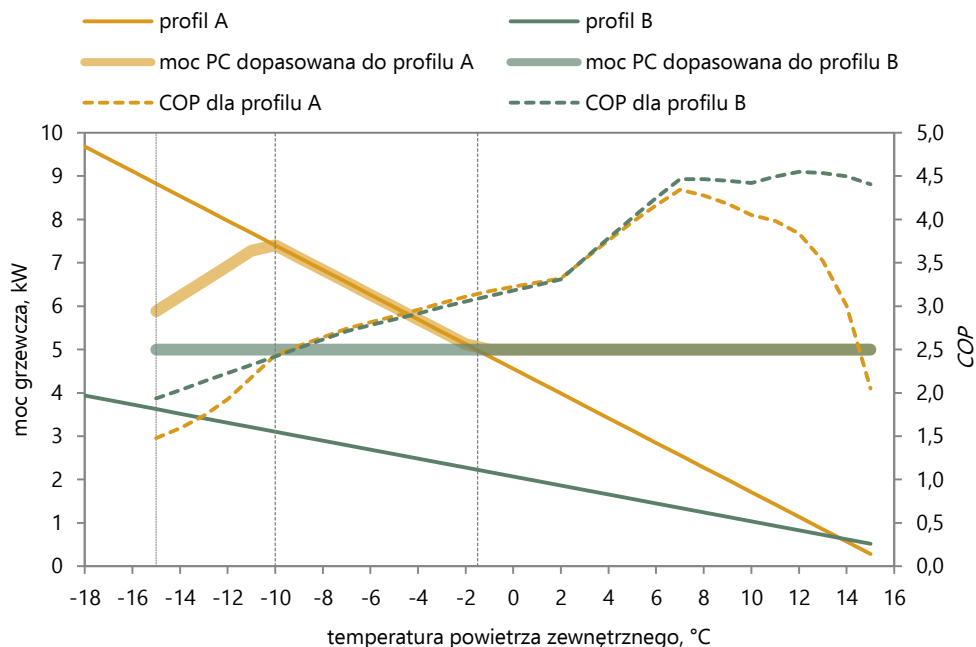
Krok temp.	$T_{zew,x}$	Lh_x	Sth_x	ϕ_x	$\phi_{Sth,x}$	Profil A moc	Profil B moc	Profil A energia	Profil B energia
1	$T_{zew,1}$	Lh_1	Sth_1	ϕ_1	$\phi_{Sth,1}$	$\phi_1 \cdot Q_B^{obl}$	$\frac{\Sigma Q_B^r \cdot \phi_{Sth,1}}{Lh_1}$	$\phi_1 \cdot Q_B^{obl} \cdot Lh_1$	$\Sigma Q_B^r \cdot \phi_{Sth,1}$
2	$T_{zew,2}$	Lh_2	Sth_2	ϕ_2	$\phi_{Sth,2}$	$\phi_2 \cdot Q_B^{obl}$	$\frac{\Sigma Q_B^r \cdot \phi_{Sth,2}}{Lh_2}$	$\phi_2 \cdot Q_B^{obl} \cdot Lh_2$	$\Sigma Q_B^r \cdot \phi_{Sth,2}$
.
.
.
<i>ksg</i>	T_{zew}^{ksg}	Lh_n	Sth_n	ϕ_n	$\phi_{Sth,n}$	$\phi_n \cdot Q_B^{obl}$	$\frac{\Sigma Q_B^r \cdot \phi_{Sth,n}}{Lh_n}$	$\phi_n \cdot Q_B^{obl} \cdot Lh_n$	$\Sigma Q_B^r \cdot \phi_{Sth,n}$
suma	-	$\Sigma_{1-n} Lh$	$\Sigma_{1-n} Sth$	-	-	-	-	ΣQ_B^r	ΣQ_B^r

Porównanie przebiegu zmian zapotrzebowania na moc w zależności od wartości temperatury powietrza zewnętrznego dla przykładowego obiektu przy zastosowaniu profilu A i profilu B przedstawiono na rysunku 2. Rozbieżności pomiędzy wynikami obliczeń na podstawie poszczególnych metod są znaczące. Należy zauważyć, że będą one tym większe, im większy jest udział zysków ciepła w całkowitym zapotrzebowaniu na energię w obiekcie.



Rysunek 2. Przykładowe profile obciążenia cieplnego budynku: profil A [16] i profil B [17]

Opisane podejścia obliczeniowe stanowią dwa alternatywne sposoby pozyskania danych wejściowych do modelowania pracy pompy ciepła powietrze/woda w kroku temperaturowym. Wyniki doboru i analizy pracy pompy ciepła wykonane w oparciu o zastosowanie każdego z tych modeli dadzą znacząco rozbieżne wyniki. Jest to skutek zarówno wyznaczenia zupełnie różnych punktów biwalentnych, różnego obszaru niedopasowania mocy pompy ciepła do mocy budynku, jak i różnego współczynnika obciążenia częściowego w obszarze regulacji on/off. Problem ten zobrazowano na rysunku 3, który przedstawia sytuację, gdy dobór pompy ciepła przeprowadzony został dla wartości mocy wynikającej z profilu A. Wartość temperatury (T_{zew}^{biw}) w punkcie biwalentnym wynosi -10°C . Dobór należy więc uznać za relatywnie poprawny dla warunków klimatycznych w Polsce [9]. W odniesieniu do mocy wynikającej z modelu B dobrana pompa ciepła jest znacząco przewymiarowana, punkt biwalentny nie występuje. W przypadku symulacji dla profilu A występuje niewielki obszar, w którym praca pompy ciepła wspomagana musi być dodatkowym źródłem ciepła. W przypadku analizy dla profilu B obszar taki nie występuje. W przypadku analizy dla profilu A obszar pracy pompy ciepła z obciążeniem częściowym pojawia się powyżej temperatury powietrza zewnętrznego wynoszącej -2°C . W przypadku analizy dla profilu B obszar niedopasowania mocy obejmuje wszystkie punkty temperatury powietrza zewnętrznego. Powstaje więc pytanie, czy dobór pompy ciepła powietrze/woda prowadzony w oparciu o charakterystykę wynikającą z mocy obliczeniowej jest dobrym rozwiązaniem. Jeżeli nie, należy ustalić zasady doboru tak, aby urządzenie pracowało jak najlepiej, oczywiście uwzględniając jednocześnie inne potrzeby grzewcze, szczególnie przygotowanie c.w.u., jeśli takie występują. Należy podkreślić, że informacje o efektywności urządzenia w poszczególnych punktach temperaturowych wynikające z tych dwóch analiz będą prawdopodobnie niemiernodajne, a na pewno znacząco różniące się od siebie.

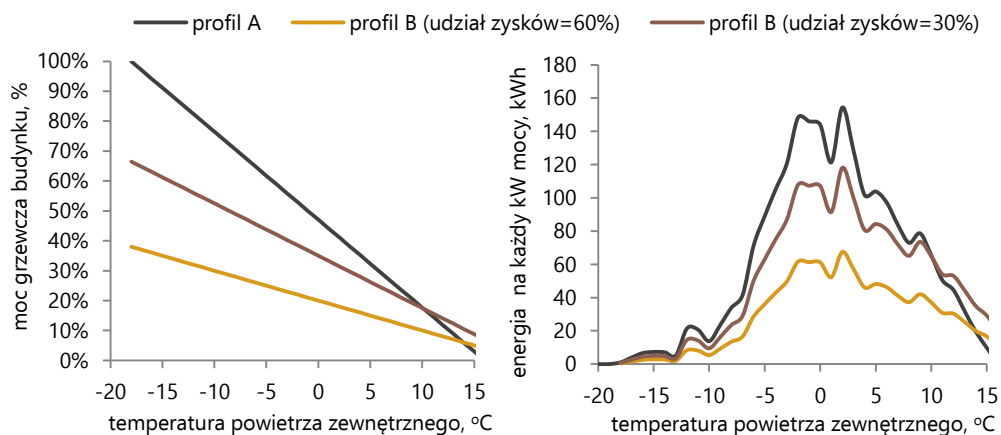


Rysunek 3. Parametry pracy pompy ciepła powietrze/woda w zależności od profilu obciążenia cieplnego budynku

Wyniki obliczeń przeprowadzonych obiema metodami dla przykładowego obiektu zestawiono w tabeli 5. Wyniki rocznej wartości *SCOP* dla przeprowadzonych symulacji różnią się o ok. 5%, co może być uznane za poziom akceptowalny. Szczegółową dyskusję tego problemu przeprowadzono w pracy [47], gdzie wykazano, iż żadna z tych metod nie jest w pełni wiarygodna. Wyznaczone wartości zapotrzebowania na energię cieplną i elektryczną obiema metodami różnią się od siebie o około 50%. Podsumowując, trudno do zaakceptowania jest fakt obowiązywania wytycznych opisujących właściwie tę samą metodę obliczeń, ale dopuszczających prowadzenie ich na podstawie danych tak bardzo od siebie rozbieżnych, co skutkuje równie rozbieżnymi wynikami.

Tabela 5. Wyniki obliczeń efektywności pompy ciepła powietrze/woda według norm [16] i [17]

Parametr	Profil A [16]	Profil B [17]	Różnica: (B – A) / A
Zapotrzebowanie na energię do ogrzewania	21 041 kWh/rok	10 479 kWh/rok	-50%
Energia elektryczna całkowita	6 479 kWh/rok	3 067 kWh/rok	-52%
<i>SCOP</i>	3,25	3,42	+5%



Rysunek 4. Profile obciążenia cieplnego budynku w zależności od udziału zysków ciepła od nasłonecznienia w bilansie energetycznym obiektu

Jak przytoczono wcześniej, różnice w chwilowych wartościach obciążenia cieplnego i zapotrzebowaniu na energię w danym kroku temperaturowym dla profili A i B powiązane są z udziałem zysków ciepła od nasłonecznienia w bilansie energetycznym budynku, co pokazano na rysunku 4. Rozbieżność pomiędzy profilami będzie tym większa, im budynek jest lepiej zaizolowany i zaprojektowany na zmaksymalizowanie pasywnych zysków ciepła. Pompy ciepła powietrze/woda dedykowane są jako źródła energii cieplnej właśnie budynkom niskoenergetycznym o wysokim poziomie izolacyjności cieplnej, niskich stratach wentylacyjnych i prawidłowym podejściu do maksymalnego wykorzystania zysków ciepła. Należy liczyć się z tym, iż wszystkie budynki tworzące razem z pompą ciepła system poddawany analizie plasować się będą właśnie w grupie o najwyższych rozbieżnościach wyników przy stosowaniu modeli uproszczonych do określania profilu zapotrzebowania na moc grzewczą. Opracowany z ich zastosowaniem profil zapotrzebowania na energię może znacząco różnić się od rzeczywistości. Nawet w przypadku zastosowania modelu B równomierny rozdział zysków ciepła od słońca i zysków wewnętrznych na kolejne temperatury w roku nie jest precyzyjny, ze względu na zmianę udziału zysków ciepła od nasłonecznienia w bilansie energetycznym obiektu w kolejnych okresach roku. W punkcie 3 niniejszego rozdziału pracy, poszukując rozwiązań do zastosowania w docelowym modelu miesięcznym, szczegółowej analizie poddano wpływ dokładności odwzorowania profilu zapotrzebowania na energię oraz modelu stosowanego do odzwierciedlenia wpływu obciążenia częściowego na wyniki analizy pracy pompy ciepła powietrze/woda, tj. na wartość *COP*, *SCOP* i zużycia energii elektrycznej do zasilania całego systemu grzewczego.

2. Metoda symulacji pracy pompy ciepła powietrze/woda w kroku godzinowym

W niniejszym punkcie opisano główne składowe algorytmu do symulacji pracy pompy ciepła w trybie ogrzewania budynku w kroku godzinowym. W rozdziale II symulacje z jego wykorzystaniem posłużyły do ustalenia wymaganej dokładności profilu obciążenia cieplnego budynku na takim poziomie, aby uzyskane z jego zastosowaniem wyniki symulacji charakteryzowały się dobrą zgodnością z symulacjami przeprowadzonymi na danych pomiarowych oraz do ustalenia, która z dostępnych metod modelowania wpływu obciążenia częściowego pompy ciepła na jej efektywność daje najlepsze rezultaty. W rozdziale III obliczenia te wspomagały proces tworzenia modelu do przeprowadzenia analizy pracy pompy ciepła w kroku miesięcznym.

2.1 Dane wejściowe

Do przeprowadzenia symulacji pracy pompy ciepła powietrze/woda w trybie ogrzewania budynku w kroku godzinowym niezbędne są zestawione poniżej dane:

T_{zew}^h – temperatura powietrza zewnętrznego w kolejnych godzinach roku, °C,

T_{Z}^{obl} – obliczeniowa temperatura zasilania instalacji grzewczej (górnego źródła), °C,

T_{P}^{obl} – obliczeniowa temperatura powrotu z instalacji grzewczej, °C,

Q_B^{obl} – obliczeniowe zapotrzebowanie na moc do ogrzewania, kW,

$\Sigma Q_B^{r,m,h}$ – roczne, miesięczne lub godzinowe zapotrzebowanie na energię do ogrzewania budynku, kWh,

Q_{PC} – moc pompy ciepła wyznaczona według normy EN 14511, kW,

COP – współczynnik efektywności pompy ciepła wyznaczony według EN 14511,

$Q_{PC,min}$ – moc pompy ciepła przy minimalnej częstotliwości pracy sprężarki, kW,

$T_{min,PC}$ – minimalna temperatura powietrza zewnętrznego do pracy pompy ciepła, °C,

$T_{max,PC}$ – maksymalna temperatura czynnika grzewczego wytwarzana przez pompę ciepła, °C.

Wprowadzany do obliczeń profil obciążenia cieplnego może być wynikiem pomiarów, symulacji godzinowych lub stosowania modeli uproszczonych opisanych w punkcie 1 niniejszego rozdziału. Obliczenie temperatury czynnika grzewczego zasilającego instalację grzewczą w kolejnych godzinach roku odbywa się na podstawie standardowych wzorów do obliczania krzywej grzewczej. Wszystkie analizy wykonano przy założeniu, że dodatkowym źródłem energii jest grzałka elektryczna.

2.2 Chwilowa wartość COP_d pompy ciepła

Podstawowa (deklarowana) wartość COP_d obliczana jest z wykorzystaniem interpolacji i ekstrapolacji liniowej na podstawie danych pomiarowych uzyskanych z testów przeprowadzonych według zaleceń normy EN 14511 [11]. Ponieważ testy wykonywane według [11] obejmują jedynie wartości zmierzone przy pełnym obciążeniu urządzenia, co nie będzie odpowiadało rzeczywistym warunkom pracy, to w celu zwiększenia dokładności symulacji pracy pompy ciepła należy przeliczyć wartość COP_d na wielkość COP , czyli efektywność energetyczną urządzenia pracującego pod obciążeniem częściowym. Aby tego dokonać, należy wcześniej obliczyć wartość współczynnika obciążenia częściowego w każdej godzinie roku (τ_{PC}^h), co wymaga oszacowania mocy pompy ciepła (Q_{PC}^h) i ewentualnej energii dostarczonej z innego niż pompa ciepła źródła, np. grzałki elektrycznej ($Q_{el,G}^h$), również w kroku godzinowym.

2.3 Chwilowa wartość mocy grzewczej pompy ciepła

Pierwszym etapem obliczeń jest ustalenie mocy pompy ciepła w danej temperaturze zewnętrznej i przy danej wymaganej przez obiekt mocy grzewczej (Q_B). Moc minimalna powinna być ustalona na podstawie informacji z karty katalogowej. Maksymalna moc pompy ciepła powietrze/woda określana jest poprzez interpolację lub ekstrapolację danych pomiarowych uzyskanych na podstawie testów opisanych w normie EN 14511 [11] dla temperatury powietrza zewnętrznego (T_{zew}^h) i temperatury czynnika grzewczego na zasilaniu instalacji (T_Z^h) w każdej godzinie roku. Procedurę ustalania wartości mocy pompy ciepła (Q'_{PC}^h) opisuje poniższy algorytm.

Jeżeli $T_{zew}^h \leq T_{min,PC}$, wtedy $Q'_{PC}^h = 0$,

jeżeli $T_{zew}^h > T_{min,PC}$,

wtedy:

jeżeli $Q_{PC}^h < Q_B^h$, wtedy $Q'_{PC}^h = Q_{PC}^h$,

jeżeli $Q_{PC,min} > Q_B^h$, wtedy $Q'_{PC}^h = Q_{PC,min}$,

inaczej $Q'_{PC}^h = Q_B^h$.

Jeżeli pompa ciepła powietrze/woda nie jest wyposażona w sprężarkę z inwerterem częstotliwości, wtedy $Q_{PC,min} = Q_{PC}$.

2.4 Chwilowa wartość mocy grzałki elektrycznej

Ustalenie mocy grzałki elektrycznej, gdy wymagana temperatura czynnika grzewczego na zasilaniu (T_Z^h) jest wyższa niż maksymalna temperatura wytwarzana pracą pompy ciepła ($T_{max,PC}$):

Jeżeli $T_Z^h > T_{max,PC}$, wtedy $Q_{el,T}^h = (T_Z^h - T_{max,PC}) / (T_Z^h - T_P^h) \cdot Q_B^h$, inaczej $Q_{el,T}^h = 0$.

Ustalenie mocy grzałki elektrycznej, gdy chwilowa moc grzewcza pompy ciepła jest niewystarczająca:

Jeżeli $Q_{PC}^h < Q_B^h - Q_{el,T}^h$, wtedy $Q_{el,Q}^h = Q_B^h - Q_{el,T}^h - Q_{PC}^h$, inaczej $Q_{el,Q}^h = 0$.

Całkowita moc grzałki elektrycznej:

$$Q_{el,G}^h = Q_{el,T}^h + Q_{el,Q}^h.$$

2.5 Udział czasu pracy aktywnej i pracy w trybie stand-by

Współczynnik τ_{PC} , czyli udział czasu pracy sprężarki pompy ciepła w czasie danego kroku obliczeniowego, wyznaczany jest na podstawie wzoru:

$$\tau_{PC}^h = (Q_B^h - Q_{el,G}^h) / Q_{PC}^h.$$

Wykorzystując współczynnik τ_{PC}^h , obliczyć można udział czasu pracy pompy ciepła w trybie stand-by:

$$\tau_{s-by}^h = (1 - \tau_{PC}^h).$$

Jeżeli udziały te pomnoży się przez krok czasowy, w którym wykonywane są obliczenia (np. 60 minut), uzyskuje się czasy pracy urządzenia w trybie aktywnym i w trybie stand-by w analizowanym okresie.

2.6 Chwilowa wartość COP i okresowa wartość SCOP

Model 1

W modelu 1 przyjęto, że obliczenie wartości COP wykonane zostanie z zastosowaniem współczynnika redukcji C_c . Jest on zdefiniowany w normie EN 14825 [16] oraz w wielu pozycjach literaturowych [18, 19, 20], a typowe równanie stosowane do obliczenia chwilowej wartości COP ma następującą postać:

$$COP^h = COP_d^h \cdot \tau_{PC}^h / (\tau_{PC}^h \cdot C_c + 1 - C_c).$$

Metodę wyznaczania wartości współczynnika redukcji C_c podaje [16]. Zgodnie z definicją jego wartość uwzględnia energię zużywaną przez pompę ciepła w czasie postoju sprężarki. W przypadku braku informacji o wartości tego współczynnika norma [16] zaleca przyjmować jego wartość jako 0,9. Wielu autorów dyskutuje z wartością tego współczynnika jako nieadekwatnie opisującą wielkość redukcji pomiędzy COP_d a COP rzeczywistym [42, 48, 49]. Problem ten może wynikać z niedostrzegania wymogów normy [16], iż wartość COP_d uwzględniać powinna obciążenie częściowe pompy ciepła. W praktyce dostęp do danych z testów przeprowadzonych według normy [16] jest nikły, a nawet jeśli dane te są dostępne, to stają się nieprzydatne do dalszych analiz. Ich nieprzydatność wynika z braku metody przeliczania wartości uzyskanych z przeprowadzanych testów na warunki inne niż testowe [50]. Metody takiego przeliczania

dostępne są jedynie dla danych uzyskanych z testów przeprowadzonych według zaleceń normy EN 14511 [11]. Stąd to one są powszechnie wykorzystywane jako dane wejściowe do wszelkich analiz pompy ciepła.

Całość energii elektrycznej dostarczanej do pompy ciepła, z wyłączeniem energii dostarczanej do grzałki elektrycznej, można wyliczyć ze wzoru:

$$Q_{el,PC}^h = (Q_B^h - Q_{el,G}^h) / COP^h.$$

Wartość $SCOP$ w analizowanym okresie będzie równa:

$$SCOP = \sum Q_B / \sum (Q_{el,G} + Q_{EL}).$$

Model 2

Model 2 bazuje na energii zużywanej przez pompę ciepła w trybie stand-by. Metoda oparta jest na wytycznych normy EN 15316-4-2 [17]. Norma ta, podobnie jak [16], pomija wpływ czynników innych niż energia zużywana w trybie stand-by na wartość COP . Również podobnie zaleca prowadzenie obliczeń na wartościach COP_d uzyskanych w wyniku testów przy obciążeniu częściowym (co omówiono powyżej).

Energia elektryczna zużywana w trybie stand-by obliczana jest na podstawie mocy urządzenia w trybie oczekiwania wyrażonego w kW ($Q_{el,s-by}$) oraz udziału czasu pracy urządzenia w tym trybie w danej godzinie:

$$\sum Q_{el,s-by}^h = Q_{el,s-by}^h \cdot \tau_{s-by}^h.$$

Energia elektryczna dostarczana do pompy ciepła z wyłączeniem energii dostarczanej do grzałki elektrycznej i energii pobieranej w trybie stand-by jest równa:

$$Q_{el,PC}^h = (Q_B^h - Q_{el,G}^h) / COP_d^h.$$

Wartość $SCOP$ w analizowanym okresie opisana jest wzorem:

$$SCOP = \sum Q_B / \sum (Q_{el,PC} + Q_{el,G} + Q_{el,s-by}).$$

Model 3

Istotnym problemem przy szacowaniu rzeczywistej wartości COP jest powszechnie stosowana definicja współczynnika redukcji Cc . Jak już wspomniano, w normie EN 14825 [16] został on zdefiniowany jako część energii zużywanej w trybie stand-by i podany jest stosowny sposób jego testowania, z którego wykorzystaniem uzyskiwane wartości Cc są wysokie i wynoszą 0,96–0,99. Sama norma definiuje ten wskaźnik na bardziej realnym poziomie, to znaczy w przypadku braku wyników testu zaleca użycie wartości 0,9. Dostępna literatura wyraźnie wskazuje, iż energia pobierana w trybie stand-by to niejedyna przyczyna obniżonej efektywności urządzenia [42, 48, 49]. Planowany proces tworzenia modelu miesięcznej efektywności pompy ciepła powie-

trze/woda wymaga stworzenia dobrego punktu odniesienia w postaci dokładnych symulacji w kroku godzinowym, stąd poszukiwania najlepszej metody do analizy wpływu obciążenia częściowego. Należy zauważyć, że analizy z zastosowaniem charakterystyk eksploatacyjnych pompy ciepła [51] dadzą wyniki różniące się od tych wykonanych na danych pozyskanych według testów w warunkach ustalonych, np. przeprowadzonych zgodnie z metodą opisaną w EN 14511 [11]. Autorzy artykułu [46] założyli więc, iż dla jasności i poprawności procesu obliczeniowego współczynnik redukcji powinien oddawać rzeczywistą i całościową redukcję pomiędzy testowaną wartością COP_d a COP . Taki eksploatacyjny współczynnik redukcji zdefiniowano jako parametr a przy funkcji logarytmicznej opisującej związek pomiędzy wartością COP a COP_d :

$$COP^h = COP_d^h \cdot (1 + a \cdot \ln(\tau_{PC}^h + e^{(-1/a)})).$$

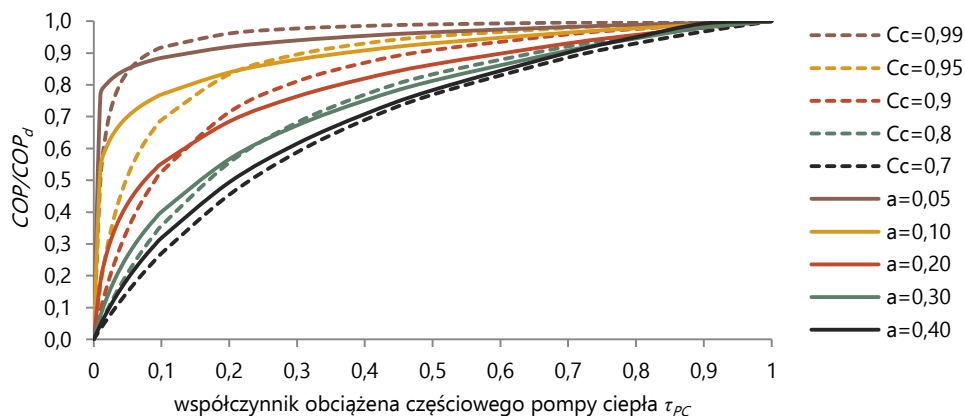
Całość energii elektrycznej dostarczonej do pompy ciepła, z wyłączeniem energii dostarczonej do grzałki elektrycznej, wynosi:

$$Q_{el,PC^h} = (Q_B^h - Q_{el,G^h}) / COP^h.$$

Wartość $SCOP$ w analizowanym okresie oblicza się jako:

$$SCOP = \sum Q_B / \sum (Q_{el,G} + Q_{EL}).$$

Dla ułatwienia przyjmowania wartości C_c i wartości a na rysunku 5 [46] zestawiono zmiany wartości funkcji opisujących redukcję efektywności pompy ciepła powietrze/woda w wyniku obciążenia częściowego dla przykładowych wartości tych parametrów.



Rysunek 5. Porównanie wartości funkcji opisujących wpływ obciążenia częściowego na efektywność pompy ciepła powietrze/woda dla różnych współczynników C_c oraz a [46]

3. Analiza i symulacja efektywności energetycznej pompy ciepła powietrze/woda

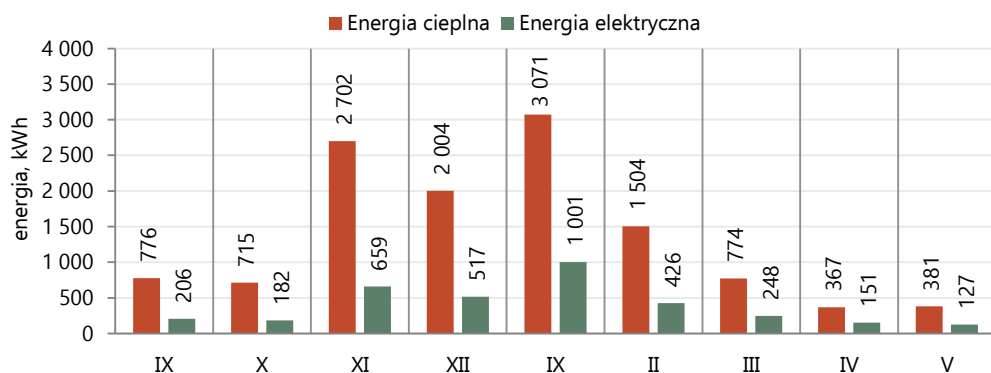
3.1 Opis pomiarów pracy pompy ciepła powietrze/woda

Przeprowadzone pomiary pracy systemu pompy ciepła powietrze/woda oraz ich analiza miały na celu pozyskanie danych do oceny rzeczywistej efektywności urządzenia i poszukiwania najlepszego sposobu modelowania jego pracy. Celem było odnalezienie w procesie symulacji źródeł największych niedokładności. Uzyskane dane pomiarowe stanowią też punkt odniesienia do oceny błędów analiz wykonanych w niniejszym i kolejnym rozdziale. Dane te posłużyły dodatkowo do skalibrowania eksploatacyjnego modelu efektywności energetycznej urządzenia. Przedstawione w pracy analizy oparto na danych pomiarowych pracy pompy ciepła powietrze/woda, dostarczającej ciepło do instalacji niskotemperaturowej o parametrach obliczeniowych 40/30°C. Ciepło to jest dystrybuowane do biur o powierzchni użytkowej wynoszącej około 300 m². Źródłem ciepła jest pompa ciepła powietrze/woda (typu split) o mocy znamionowej 10,6 kW (A2/W35°C). Dane dotyczące wydajności pompy ciepła, moc grzewcza (Q_{PC}) i deklarowany współczynnik wydajności (COP_d), zmierzone zgodnie z normą EN 14511 [11], przedstawiono w tabeli 6. Urządzenie pracuje w trybie monoeenergetycznym, w okresach niewystarczającej wydajności grzewczej lub przy temperaturze otoczenia poniżej -15°C wbudowana grzałka elektryczna dostarcza energię cieplną do budynku. Instalacja nie posiada bufora ciepła i nie jest używana do przygotowania ciepłej wody użytkowej. W celu dalszej analizy ważne jest również, że w urządzeniu zainstalowano sprężarkę inwerterową, która umożliwia kontrolę wydajności pompy ciepła do wartości mocy minimalnej ($Q_{PC,min}$) wynoszącej 4,4 kW.

Tabela 6. Charakterystyka badanej pompy ciepła powietrze/woda według normy EN 14511 [11]

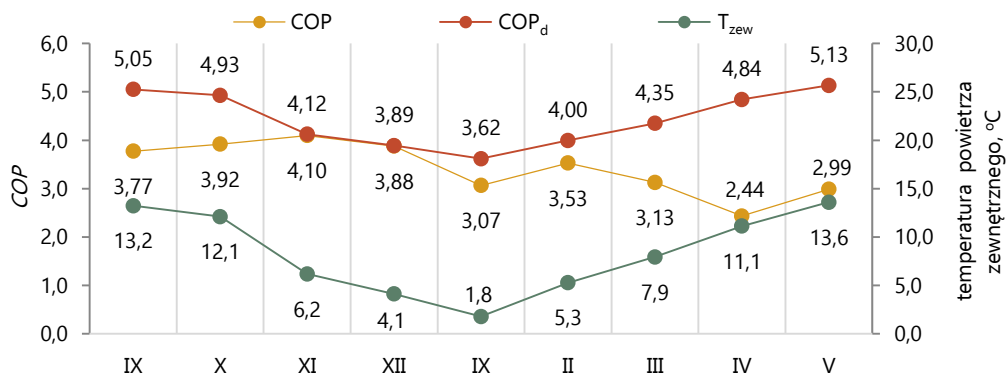
		$T_{zew}, ^\circ\text{C}$	-15	-7	2	7	10	12	20
Q_{PC} kW	$T_z = 35^\circ\text{C}$		5,80	8,47	10,60	14,60	14,80	15,82	17,90
	$T_z = 45^\circ\text{C}$		5,20	7,50	10,00	13,10	14,10	14,70	16,80
COP_d	$T_z = 35^\circ\text{C}$		1,89	2,62	3,25	4,29	4,40	4,63	5,29
	$T_z = 45^\circ\text{C}$		1,50	2,10	2,80	3,10	3,40	3,50	4,10

Podstawowe wyniki pomiarów badanego systemu pompy ciepła powietrze/woda zestawiono na rysunkach 6 i 7. Rysunek 6 zawiera zestawienie zużycia energii cieplnej przez budynek i zużycia energii elektrycznej przez system pompy ciepła w kroku miesięcznym dla jednego sezonu grzewczego. W dalszej części pracy omawiane będą wyniki o zdecydowanie bardziej szczegółowym charakterze.



Rysunek 6. Wyniki pomiarów: energia cieplna dostarczona do budynku i energia elektryczna dostarczona do systemu pompy ciepła powietrze/woda

Rysunek 7 zawiera wartości COP , COP_d i T_{zew} dla kolejnych miesięcy. Warto podkreślić, iż zależność współczynnika $SCOP$ od temperatury powietrza zewnętrznego nie jest taka, jak wynika bezpośrednio z modelu COP_d pod obciążeniem pełnym. W okresach przejściowych obniżenie wartości COP , widoczne na rysunku 7, względem wartości deklarowanej jest wynikiem wpływu obciążenia częściowego na pracę pompy ciepła. W związku z tym dane te dobrze nadają się do oceny wpływu sposobu modelowania tego czynnika na wyniki analiz energetycznych.



Rysunek 7. Wyniki pomiarów: średnia miesięczna wartość temperatury powietrza zewnętrznego oraz wartości średniomiesięczne COP_d i COP

3.2 Zakres analiz i symulacji

W tej części pracy analizie poddano dwa problemy. Pierwszy z nich dotyczył wpływu sposobu modelowania obciążenia częściowego pompy ciepła powietrze/woda na uzyskiwane wyniki efektywności systemu. Celem było ustalenie najlepszego modelu do dalszych prac badawczych. Drugim problemem była ocena wpływu dokładności od-

wzorowania profilu zapotrzebowania na energię do ogrzewania budynku na wyniki analizy pracy pompy ciepła. Celem było znalezienie pożądanej dokładności tego profilu do zastosowania w modelu obliczanym w kroku miesięcznym.

3.3 Wpływ sposobu modelowania obciążenia częściowego na wyniki symulacji

W poniższym fragmencie pracy porównywano wyniki uzyskane z pięciu symulacji z wynikami pomiarów. Wyniki symulacji oraz pomiarów dla poszczególnych miesięcy i całego roku zestawiono w tabeli 7. Parametry wyróżniające poszczególne symulacje opisano poniżej:

- model 1 (1) obliczony dla współczynnika redukcji C_c wynoszącego 0,9 (wartość C_c przyjęto według wytycznych normy EN 14825 [16]);
- model 1 (2) obliczony dla współczynnika redukcji C_c wynoszącego 0,8 (wartość C_c wyznaczono na podstawie pomiarów pracy pompy ciepła [46]);
- model 2 (1) obliczony dla wartości $Q_{el,s-by}$ wynoszącej 25 W (wartość $Q_{el,s-by}$ przyjęto według danych producenta pompy ciepła);
- model 2 (2) obliczony dla wartości $Q_{el,s-by}$ wynoszącej 91 W (wartość $Q_{el,s-by}$ obliczono na podstawie pomiarów pracy pompy ciepła [48]);
- model 3 dla współczynnika redukcji α wynoszącego 0,28 (wartość α obliczono na podstawie pomiarów pracy pompy ciepła [46]).

Tabela 7. Wyniki pomiarów i symulacji (badanie wpływu obciążenia częściowego na efektywność energetyczną pompy ciepła powietrze/woda)

Miesiąc	Pomiary			Model 1 (1)		Model 1 (2)		Model 2 (1)		Model 2 (2)		Model 3	
	ΣQ_B	$SCOP$	ΣQ_{el}	$SCOP$	ΣQ_{el}	$SCOP$	ΣQ_{el}	$SCOP$	ΣQ_{el}	$SCOP$	ΣQ_{el}	$SCOP$	ΣQ_{el}
IX	772	3,77	205	4,17	185	3,56	217	4,72	164	4,05	191	3,79	204
X	715	3,92	182	4,14	173	3,77	190	4,43	161	4,08	175	3,85	186
XI	2699	4,10	658	3,98	678	3,93	686	4,02	671	3,98	677	3,93	687
XII	2004	3,88	516	3,78	530	3,70	542	3,85	520	3,79	528	3,69	543
I	3071	3,07	1002	3,31	928	3,26	943	3,35	917	3,31	927	3,25	945
II	1504	3,53	426	3,79	397	3,53	427	4,02	374	3,81	394	3,52	427
III	772	3,13	247	3,49	221	2,94	263	4,04	191	3,50	221	3,02	256
IV	366	2,48	148	3,12	117	2,30	159	4,14	88	3,01	122	2,61	140
V	381	3,00	127	3,52	108	2,73	139	4,41	86	3,42	111	3,07	124
rok	12284	3,50	3511	3,68	3337	3,44	3566	3,87	3174	3,67	3347	3,50	3511

W celu porównania wyników symulacji z wynikami pomiarów obliczono błędy wyznaczenia miesięcznej wartości $SCOP$ (δ_{SCOP^m}) i godzinowych wartości COP (δ_{COP^h}). Wartości błędów przedstawiono na rysunkach 8 (δ_{SCOP^m}) i 9 (δ_{COP^h}) oraz zestawiono w tabeli 8.

Błędy obliczono według zależności:

$$\delta_{SCOP}^m = \frac{SCOP_p - SCOP_s}{SCOP_p},$$

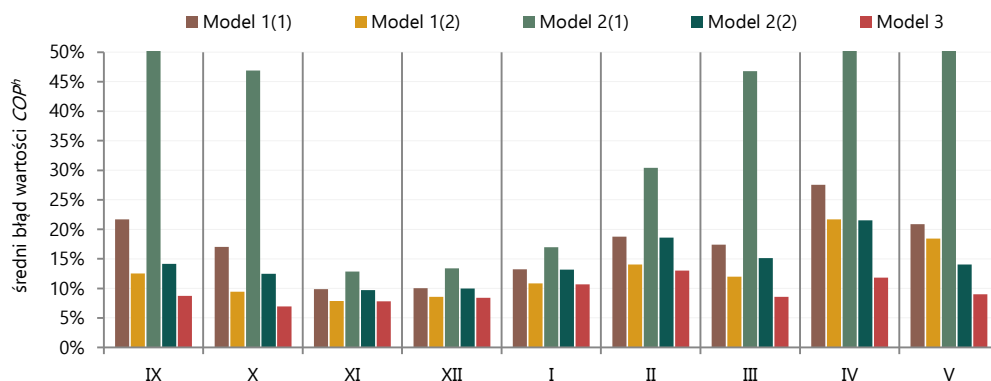
$$\delta_{COP}^h = \frac{\sum_1^i \left| \frac{COP_p - COP_s}{COP_p} \right|}{i}.$$

Porównując wyniki miesięcznej wartości $SCOP^m$ dla modelu 1 (1) i modelu 1 (2), należy zauważyć, iż błędy obu symulacji nie różnią się tak bardzo jak w przypadku porównania modelu 2 (1) z modelem 2 (2). Parametr C_c wynoszący 0,9 zalecany przez normę [16] w przypadku braku tej wartości w karcie katalogowej pompy ciepła jest relatywnie bardziej poprawny niż informacja na temat mocy pobieranej w trybie standby podana dla analizowanej pompy przez producenta. Zasadniczo trzeba stwierdzić, iż w przypadku tych dwóch modeli to model opierający się o współczynnik redukcji (model 1) pozwala na lepsze odwzorowanie pracy pompy ciepła powietrze/woda.



Rysunek 8. Błędy miesięcznych wartości $SCOP^m$ (wyniki symulacji wobec danych pomiarowych)

Ponadto należy zauważyć, iż modele skalibrowane danymi pomiarowymi uzyskały znacząco lepsze rezultaty. Wykorzystanie do symulacji danych od producenta urządzenia zamiast danych eksploatacyjnych może przynieść znaczące zawyżenie wyników, szczególnie w okresach przejściowych. Wartości współczynnika C_c podawane przez producentów oscylują w zakresie 0,96–0,99. Autorzy publikacji [42, 48, 49] sugerują, iż takie ujęcie całościowego wpływu obciążenia częściowego na pracę pompy ciepła jest niewłaściwe i prowadzi do błędów w wynikach symulacji. Skutkiem tego przeprowadzone zostały badania i opracowany został model 3 [46], który pozwolił uzyskać najlepsze wśród badanych dopasowanie do danych eksploatacyjnych. Błędy w wartościach miesięcznych $SCOP^m$ uzyskane przy takim sposobie modelowania wpływu obciążenia częściowego na efektywność urządzenia nie przekraczają 6%.



Rysunek 9. Średnie błędy godzinowych wartości COP^h (wyniki symulacji wobec danych pomiarowych)

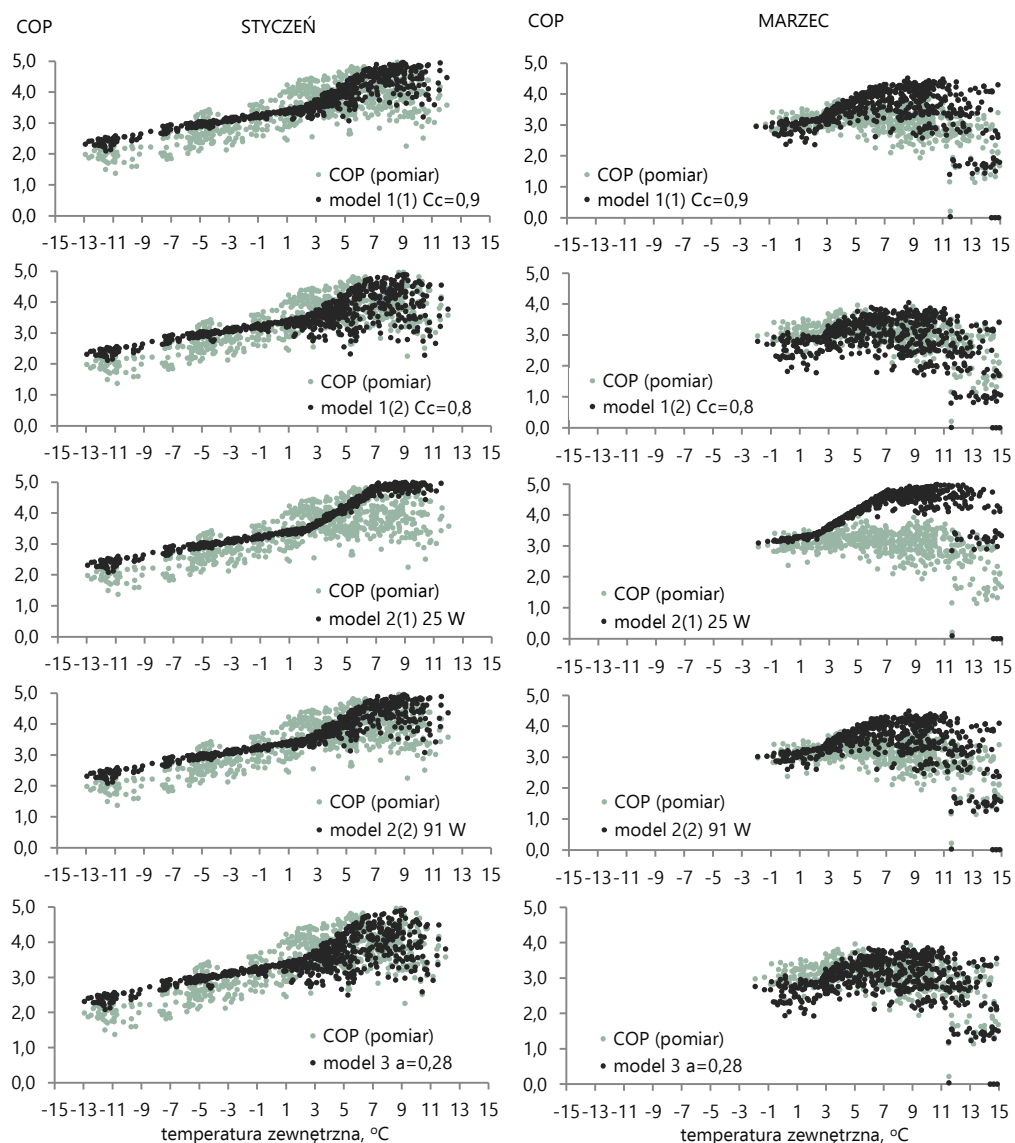
Błędy średnich wartości godzinowych COP^h zawiera rysunek 9. Szczególnie niekorzystnie w procesie symulacji zareagował model 2 (1), generując błędy w wynikach dochodzące do 100%. Są one poza skalę zamieszczonego rysunku 9, a ich dokładne wartości zawiera tabela 8. Na skutek uwzględnienia rzeczywistych wartości współczynnika redukcji uzyskuje się znaczącą poprawę dokładności odwzorowania COP^h w poszczególnych godzinach. Średni błąd godzinowy tej wartości wynosi w przypadku zastosowania modelu 1 (2) (obliczanego na podstawie $C_c = 0,80$) 12,8%, a modelu 2 (2) (obliczanego na podstawie $Q_{el,s-by} = 91$ W) – 14,3%. Podobnie jak dla danych miesięcznych dane pomiarowe godzinowe są najlepiej przybliżane wynikami uzyskanymi z zastosowaniem modelu 3, który charakteryzuje się średnim błędem godzinowej wartości COP^h wynoszącym 9,4%.

Tabela 8. Błędy wartości COP^h i $SCOP^m$ (wyniki symulacji wobec danych pomiarowych)

Miesiąc	Model 1 (1)		Model 1 (2)		Model 2 (1)		Model 2 (2)		Model 3	
	δ_{SCOP}	$\delta_{COP,h}$	δ_{SCOP}	$\delta_{COP,h}$	δ_{SCOP}	$\delta_{COP,h}$	δ_{SCOP}	$\delta_{COP,h}$	δ_{SCOP}	$\delta_{COP,h}$
IX	-10,6%	21,7%	5,7%	12,5%	-25,2%	78,6%	-7,4%	14,2%	-0,5%	8,7%
X	-5,5%	17,0%	3,9%	9,4%	-13,0%	46,9%	-4,1%	12,5%	1,7%	6,9%
XI	2,8%	9,9%	4,0%	7,9%	1,9%	12,9%	2,8%	9,7%	4,1%	7,8%
XII	2,5%	10,0%	4,7%	8,5%	0,8%	13,4%	2,3%	10,0%	4,9%	8,4%
I	-7,9%	13,2%	-6,2%	10,8%	-9,3%	17,0%	-8,0%	13,2%	-6,0%	10,7%
II	-7,5%	18,8%	0,1%	14,1%	-13,9%	30,4%	-8,1%	18,6%	0,2%	13,0%
III	-11,5%	17,4%	6,1%	12,0%	-29,2%	46,8%	-11,8%	15,1%	3,5%	8,6%
IV	-25,7%	27,5%	7,2%	21,7%	-66,9%	95,0%	-21,3%	21,5%	-5,3%	11,8%
V	-17,3%	20,9%	9,1%	18,4%	-47,0%	93,1%	-13,9%	14,0%	-2,3%	9,0%
rok	-5,2%	17,4%	1,5%	12,8%	-10,6%	48,2%	-4,9%	14,3%	0,0%	9,4%

Na rysunku 10 zamieszczono godzinowe wartości COP^h dla pomiarów i kolejnych symulacji dla dwóch wybranych miesięcy: stycznia i marca. Wykresy umożliwiają zaob-

serwowanie, jak kalibracja modelu poprawia wyniki obliczeń. Stwierdzono, że wykorzystany algorytm obliczeniowy przy zastosowaniu modelu 1 i modelu 3 obliczanych na podstawie eksploatacyjnych wartości współczynnika redukcji dobrze oddaje warunki pracy rzeczywistej instalacji z pompą ciepła powietrze/woda. W dalszych pracach badawczych stosowany jest model 3, najlepiej odwzorowujący wpływ obciążenia częściowego na efektywność energetyczną urządzenia.



Rysunek 10. Wartości COP^h z pomiarów zestawione z wynikami symulacji z analizowanych modeli

3.4 Wpływ profilu obciążenia cieplnego budynku na wyniki symulacji

W tej części pracy przeanalizowano wpływ dokładności odzwierciedlenia profilu obciążenia cieplnego budynku na wyniki symulacji efektywności energetycznej pompy ciepła powietrze/woda. Analizę tego problemu wykonano na podstawie symulacji, których charakterystyczne parametry opisano poniżej:

- model A (2) – jest to model obliczany w kroku godzinowym, w którym chwilowe obciążenie cieplne profilowane jest z wykorzystaniem obliczeniowego zapotrzebowania na moc budynku (analogicznie do metody zalecanej przez normę EN 14825 [16]); obliczenia przeprowadzono dla współczynnika redukcji $C_c = 0,8$;
- model B (2) – jest to model obliczany w kroku godzinowym, w którym chwilowe obciążenie cieplne profilowane jest na podstawie zapotrzebowania na energię do ogrzewania w poszczególnych miesiącach (analogicznie do metody zalecanej przez normę EN 15316-4-2 [17])⁴; obliczenia przeprowadzono dla wartości energii pobieranej przez pompę ciepła w trybie stand-by wynoszącej $Q_{el,s-by} = 91 \text{ W}$.

Wszystkie wykonane analizy opierają się na rzeczywistych wartościach temperatury powietrza zewnętrznego i rzeczywistych wartościach temperatury czynnika na zasilaniu systemu grzewczego. Zmieniano jedynie wartość chwilowego obciążenia cieplnego budynku oraz sposób modelowania wpływu obciążenia częściowego (odpowiednio dla modelu A (2) i modelu B (2)). Wyniki analiz dla poszczególnych modeli i wyniki pomiarów rzeczywistego układu pompy ciepła zamieszczono w tabeli 9.

Tabela 9. Wyniki pomiarów i symulacji (badanie wpływu dokładności odwzorowania profilu obciążenia cieplnego budynku na efektywność energetyczną pompy ciepła powietrze/woda)

Miesiąc	Pomiary			Model A (2)			Model 2 (2)		
	Q_B	$SCOP$	Q_{EL}	Q_B	$SCOP$	Q_{EL}	Q_B	$SCOP$	Q_{EL}
	kWh	–	kWh	kWh	–	kWh	kWh	–	kWh
IX	772	3,77	205	634	3,32	191	772	4,14	186
X	715	3,92	182	559	3,56	157	715	4,16	172
XI	2699	4,10	658	1637	3,64	450	2699	3,94	685
XII	2004	3,88	516	1725	3,59	481	2004	3,76	533
I	3071	3,07	1000	2791	3,2	872	3071	3,23	951
II	1504	3,53	426	1829	3,77	485	1504	3,85	391
III	772	3,13	247	1396	3,64	384	772	3,49	221
IV	366	2,48	148	962	3,79	254	366	3,06	120
V	381	3,00	127	725	3,59	202	381	3,29	116
rok	12284	3,50	3510	12 258	3,53	3475	12284	3,64	3374

⁴ W typowym podejściu obliczeniowym profil ten powstaje w oparciu o roczne zapotrzebowanie na energię do ogrzewania budynku. W analizach opisanych w tym rozdziale profil obciążenia cieplnego budynku wyznaczany był indywidualnie dla każdego miesiąca grzewczego w roku.

Aby ocenić wpływ odejścia od rzeczywistego profilu obciążenia cieplnego na wyniki symulacji, dokonano sprawdzenia, o ile pogorszyła się ich dokładność względem wyników zawartych w tabeli 8 (poprzedni punkt pracy). Symulacje, których wyniki zawarto w tabeli 8, przeprowadzono na rzeczywistym profilu obciążenia cieplnego wynikającym z pomiarów pracy układu pompy ciepła powietrze/woda. Porównanie takie zamieszczono na rysunku 11.

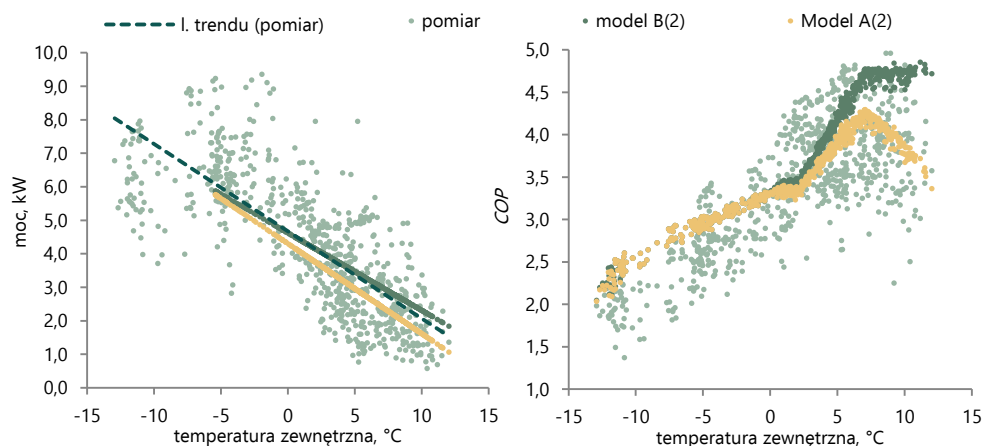


Rysunek 11. Porównanie błędów w miesięcznej wartości $SCOP^m$ pomiędzy modelowaniem przy rzeczywistym i teoretycznym profilu obciążenia cieplnego

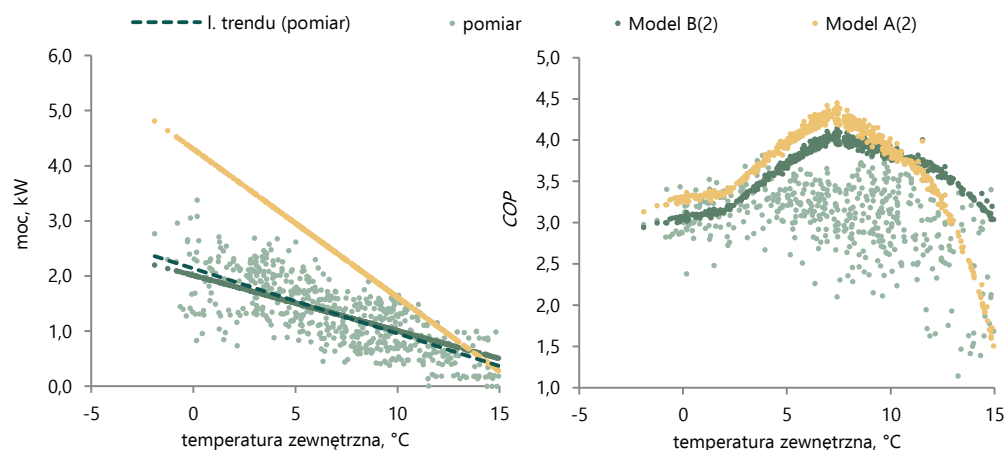
Dla modelu 1 (2) i modelu A (2) zmiana wartości błędów miesięcznych jest bardzo duża, szczególnie dla miesięcy cieplejszych, i sięga ponad 60% dla kwietnia. Wyniki dla modelu 2 (2) i modelu B (2) wykazują znacznie mniejsze niedokładności. Pogorszenie wyników symulacji o nie więcej niż 6% przy zastosowaniu tak znaczącego uproszczenia w modelowaniu chwilowego obciążenia cieplnego jest akceptowalne. Takie rezultaty pozwalają stwierdzić, że symulacje energetyczne pomp ciepła bazujące na modelu obciążenia cieplnego, w którym wartością wejściową jest miesięczne, a nie roczne zapotrzebowanie na energię, mogą dawać zadowalające rezultaty.

Na rysunkach 12 i 13 zamieszczono godzinowe wartości COP^h i wartości obciążenia cieplnego budynku uzyskane z modeli A (2) i B (2) w zestawieniu z wartościami pomiarowymi. Dane te uszeregowano według wartości temperatury powietrza zewnętrznego. Na wykresach można zaobserwować różnice, jakie niesie zastosowanie modelu A (2), uwzględniającego jeden profil obciążenia cieplnego, i modelu B (2), uwzględniającego profile obliczane osobno dla każdego miesiąca. Model A (2) nie daje możliwości odzwierciedlenia rzeczywistej wartości obciążenia cieplnego budynku, co można stwierdzić, porównując wyniki zamieszczone na obu rysunkach. Odchylenie profilu na podstawie modelu A (2) od linii trendu dla danych pomiarowych w styczniu jest małe, co skutkuje stosunkowo poprawnymi wartościami COP^h . Odchylenie profilu dla mode-

lu A (2) od linii trendu dla danych pomiarowych w marcu jest duże, co skutkuje znacznymi błędami wyznaczonych wartości COP^h . Dobre odwzorowanie chwilowego obciążenia cieplnego w przypadku modelu B (2) uzyskano poprzez opracowanie go indywidualnie dla każdego miesiąca. Pomimo tego wartości COP^h uzyskane z zastosowaniem tego modelu nie są do końca zadowalające, jednak jest to skutek metody przyjętej do obliczania wpływu obciążenia częściowego na efektywność energetyczną pompy ciepła. W przypadku poprawy sposobu uwzględniania tego czynnika, możliwe byłoby uzyskanie wyników symulacji charakteryzujących się większą zgodnością z pomiarami.



Rysunek 12. Obciążenie cieplne budynku i wartości COP^h uzyskane z modelu B (2) i A (2) względem wyników pomiarów dla stycznia



Rysunek 13. Obciążenie cieplne budynku i wartości COP^h uzyskane z modelu B (2) i A (2) względem wyników pomiarów dla marca

3.5 Podsumowanie

W rozdziale II przeanalizowano dwa problemy: wpływ sposobu modelowania obciążenia częściowego oraz wpływ dokładności danych wejściowych dotyczących profilu obciążenia cieplnego na wyniki symulacji pracy pompy ciepła powietrze/woda. Wykazano, iż najlepszą z rozważanych metod modelowania wpływu obciążenia częściowego jest zastosowanie funkcji logarytmicznej [46] oraz że dokładność parametru przyjmowanego do określenia wpływu obciążenia cieplnego ma istotny wpływ na wyniki symulacji. Zastosowanie takiego modelu stanowić będzie punkt wyjścia do tworzenia modelu miesięcznej efektywności pompy ciepła powietrze/woda. Stwierdzono, że w wynikach przeprowadzonych analiz widoczny jest bezpośredni związek między dopasowaniem chwilowego obciążenia cieplnego budynku do rzeczywistości a dokładnością symulacji $SCOP^m$ i COP^h pompy ciepła. Przy tej samej temperaturze powietrza zewnętrznego różnice w zapotrzebowaniu na moc grzewczą związane z różnym dla rozważanych profili udziałem zysków ciepła w całkowitym bilansie energetycznym budynku skutkują odmiennymi wartościami zdiagnozowanego stopnia niedopasowania mocy grzewczej pompy ciepła do potrzeb obiektu. W sposób istotny wpływa to na wartość COP^h , czyli wartość COP^h_d skorygowaną o wpływ obciążenia częściowego. Warto zauważyć, iż – posługując się wielkością wejściową w postaci miesięcznego zapotrzebowania na energię do ogrzewania budynku – możliwe jest stworzenie profilu obciążenia cieplnego, który pozwala na uzyskanie poprawnej odpowiedzi co do wartości COP^h , $SCOP^m$ – i tym samym poprawnej informacji o wartości miesięcznego zapotrzebowania na energię elektryczną do zasilania systemu pompy ciepła powietrze/woda. W związku z tym opracowanie prostej i skutecznej metody tworzenia takiego profilu obciążenia cieplnego będzie kluczowe dla uzyskania wysokiego stopnia poprawności wyników generowanych z zastosowaniem modelu miesięcznej efektywności pompy ciepła powietrze/woda.

KORELACYJNY MODEL EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ POMPY CIEPŁA POWIETRZE/WODA WSPÓŁPRACUJĄCEJ Z SYSTEMEM OGRZEWANIA BUDYNKU

1. Założenia do modelu

Modelowanie współpracy pompy ciepła powietrze/woda z instalacją grzewczą, rozumiane jako obliczenie wartości *SCOP* oraz zapotrzebowania na energię elektryczną dostarczaną do pompy ciepła i do dodatkowego źródła energii⁵, wymaga zestawienia informacji o chwilowej mocy grzewczej urządzenia z obciążeniem cieplnym obiektu. Niedokładności na tym poziomie analizy zaburzają obraz pracy urządzenia, dając w wyniku informacje dalekie od rzeczywistości. W rozdziale II wykazano, że w przypadku analizy współpracy pompy ciepła powietrze/woda z instalacją ogrzewania budynku znaczenia nabiera dość często pomijany lub zbyt uproszczony związek chwilowego obciążenia cieplnego budynku z nasłonecznieniem i wewnętrznymi zyskami ciepła. Wykazano, że stosowane w uproszczonej analizie efektywności pomp ciepła powietrze/woda sposoby szacowania chwilowego obciążenia cieplnego (przyp. profil A – na podstawie obliczeniowej mocy grzewczej budynku; profil B – na podstawie rocznego zapotrzebowania na energię do ogrzewania) dają znacząco odmienne wyniki. Wykazano też, że odpowiedni poziom precyzji możliwy jest do osiągnięcia wtedy, gdy profil chwilowego obciążenia cieplnego budynku tworzony jest indywidualnie dla kolejnych miesięcy, na podstawie miesięcznego zapotrzebowania na energię do ogrzewania. Wynikiem przeprowadzonej w rozdziale II dyskusji są następujące założenia i cele postawione dla nowego modelu do oceny efektywności pompy ciepła powietrze/woda współpracującej z systemem ogrzewania budynku.

- (1) Obliczenia wykonywane będą w kroku miesięcznym.
- (2) Dane wejściowe do obliczeń będą łatwo dostępne.
- (3) Model będzie umożliwiał obliczenie wartości *SCOP* i wartości zapotrzebowania na energię elektryczną do zasilania pompy ciepła powietrze/woda oraz zapo-

⁵ W układach monoenergetycznych dodatkowe źródło energii zasilane jest energią elektryczną – wtedy energia ta doliczana jest do wartości *SCOP*. Jeżeli nośnikiem energii dla dodatkowego źródła energii nie jest energia elektryczna, wtedy wartość tej energii nie jest doliczana do *SCOP*, jednak wyznaczenie prawidłowej jej ilości jest bardzo istotne dla poprawności analizy układu biwalentnego.

trzebowania na energię ciepłą dostarczaną z dodatkowego źródła w kolejnych miesiącach roku.

- (4) Istotną cechą modelu będzie wspomaganie decyzji o poprawności doboru urządzenia. Oznacza to, że model powinien prawidłowo reagować na przewymiarowanie lub niedowymiarowanie pompy ciepła powietrze/woda, pozwalając na oszacowanie ilości energii kierowanej do zasilenia dodatkowego źródła energii (np. grzałki elektrycznej). Powinien też informować o wpływie obszaru pracy z obciążeniem częściowym na efektywność urządzenia.

2. Ogólny opis modelu

2.1 Opis metody tworzenia modelu

Model efektywności energetycznej systemów grzewczych z pompami ciepła powietrze/woda w miesięcznym kroku obliczeniowym tworzony był z wykorzystaniem symulacji godzinowych (do oceny wpływu obciążenia częściowego na efektywność energetyczną urządzenia zastosowano funkcję logarytmiczną [46]) przeprowadzonych dla trzech pomp ciepła powietrze/woda, trzech lokalizacji i sześciu profili obciążenia cieplnego, co opisano w tabeli 10. Proces tworzenia modelu wspomagało łącznie 1 838 przypadków. Każdy przypadek to wyniki symulacji dla pojedynczego miesiąca we wszystkich obszarach pracy urządzenia. Wykonane analizy obejmowały, oprócz układów dobranych poprawnie, również przypadki, w których dobierano pompy ciepła o mocy grzewczej zbyt małej lub zbyt dużej. Bardzo ważnym założeniem modelu jest bowiem umiejętność diagnozowania niepoprawnego doboru pompy ciepła powietrze/woda. Na potrzeby modelu konieczne było opracowanie funkcji opisujących zmiany obciążenia cieplnego budynku i przewidywanego profilu występowania temperatur powietrza zewnętrznego w każdym miesiącu. W przypadku pierwszej funkcji przyjęto założenie o liniowym przebiegu zmian zapotrzebowania na moc grzewczą w każdym z miesięcy, a jako wartość wejściową wykorzystano miesięczne zapotrzebowanie na energię do ogrzewania budynku. W przypadku drugiej funkcji założono, iż częstości występowania danej temperatury zewnętrznej w miesiącu są zbliżone do rozkładu normalnego. Założenie to dotyczy sytuacji, gdy analiza wykonywana będzie dla statystycznych danych klimatycznych z szerokiego okresu, a nie dla danych z konkretnego roku. Wprowadzenie do obliczeń takiej funkcji umożliwiło zmianę kroku obliczeniowego z godzinowego czy temperaturowego na miesięczny. Model *częstości występowania temperatury* tworzony był dla danych klimatycznych 13 miast zlokalizowanych w Polsce. Dane klimatyczne (z lat 1961–1990) pobrano z bazy programu *Me-teonorm*.

Tabela 10. Symulacje wspomagające proces tworzenia modelu miesięcznej efektywności pompy ciepła powietrze/woda pracującej w trybie ogrzewania budynku

	Profil 1	Profil 2	Profil 3	Profil 4	Profil 5	Profil 6
Obciążenie cieplne budynku dla L3	8,1 kW	12,0 kW	20,8 kW	28,0 kW	32,3 kW	46,3 kW
PC (1) – 10 kW (A2/W35)	+	+	+			
PC (2) – 19 kW (A2/W35)			+	+	+	
PC (3) – 27 kW (A2/W35)				+	+	+
Współczynnik redukcji a	0,28					
	0,1; 0,15; 0,20; 0,35 dla symulacji: P2 / PC (1) / L1 i L3, P5 / PC (2) / L1 i L3, P6 / PC (3) / L1 i L3					
Lokalizacja	L1 – Wrocław, $T_{zew}^{obl} = -18^{\circ}\text{C}$ L2 – Koszalin, $T_{zew}^{obl} = -16^{\circ}\text{C}$ L3 – Lublin, $T_{zew}^{obl} = -20^{\circ}\text{C}$					

Zaproponowany model ukierunkowany jest na jak najlepsze, a jednocześnie proste odwzorowanie poprawnej wartości obciążenia cieplnego i mocy grzewczej pompy ciepła powietrze/woda w zadanych warunkach klimatycznych. Profil obciążenia cieplnego budynku (Q_B^m) jest funkcją temperatury powietrza zewnętrznego (T_{zew}) i tworzony jest na podstawie miesięcznego zapotrzebowania na energię do ogrzewania (ΣQ_B^m). W każdym miesiącu zakres temperatur pomiędzy minimalną (T_{min}^m) a maksymalną (T_{max}^m) dzielony jest na obszary pracy różniące się w sposób istotny charakterem eksploatacji pompy ciepła powietrze/woda. Te charakterystyczne obszary oznaczono jako I, II, III, IV i poglądowo oznaczono na rysunku 14. Dla każdego z obszarów obliczana jest wartość COP oraz jej wpływ na wartość $SCOP$ miesięcznego. Proces obliczania reprezentatywnej wartości COP w każdym z obszarów ma odmienny charakter, a zasady tych obliczeń podano w niniejszym rozdziale. Stwierdzono, że dzięki podzieleniu czasu pracy urządzenia na cztery obszary wartość średniej arytmetycznej temperatury powietrza zewnętrznego w każdym z nich będzie wystarczająca do precyzyjnego obliczenia wartości COP i mocy grzewczej dla danego zakresu temperatur. Wynikiem obliczeń wykonanych na podstawie modelu jest wartość $SCOP$ dla każdego miesiąca oraz dla całego roku, udział dodatkowego źródła ciepła w wytworzeniu energii cieplnej oraz udział strat energii związanych z obciążeniem częściowym pompy ciepła w wytworzonej energii cieplnej. Te ostatnie wyniki mają na celu ułatwienie podjęcia decyzji o poprawnym lub niepoprawnym doborze urządzenia wobec potrzeb danego systemu grzewczego.

Obszar I: $T_{zew} < T_{min,PC}$

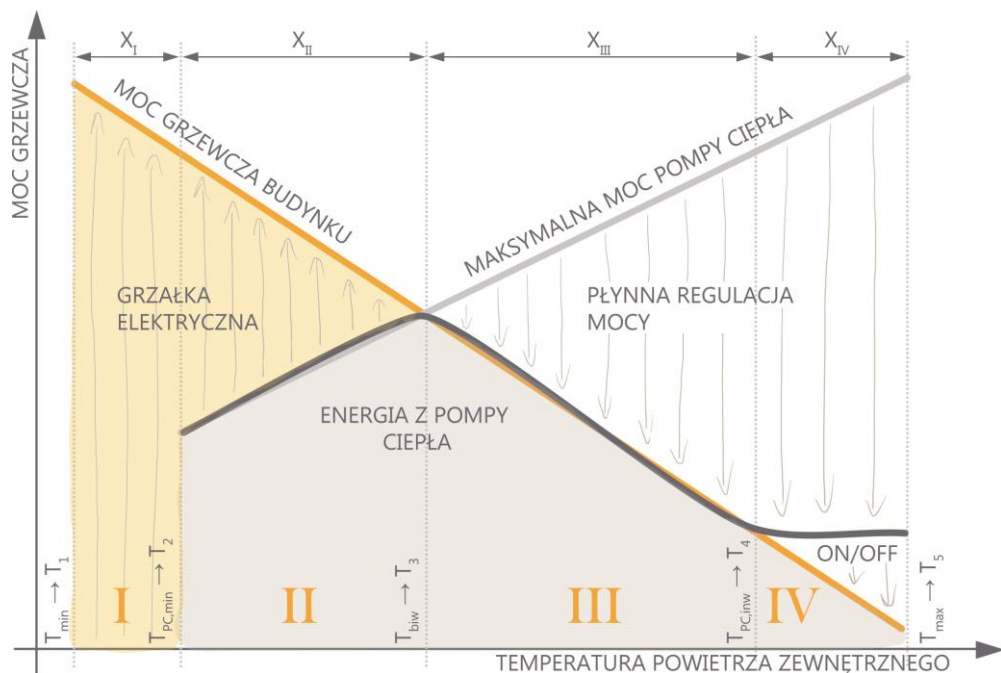
Obszar temperatur powietrza zewnętrznego w danym miesiącu poniżej minimalnej temperatury pracy pompy ciepła powietrze/woda. Energię do ogrzewania budynku dostarcza inne urządzenie, którym w układach monoenergetycznych jest grzałka elektryczna, a w układach biwalentnych – kocioł gazowy lub dowolne inne źródło.

Obszar II: $T_{zew} \in < T_{min,PC}, T_{biw} >$

Obszar temperatur powietrza zewnętrznego powyżej temperatury minimalnej pracy pompy ciepła, ale poniżej punktu biwalentnego. Energia do ogrzewania budynku dostarczana jest zarówno przez pompę ciepła, jak i dodatkowe źródło ciepła.

Obszar III: $T_{zew} \in < T_{biw}, T_{PC,inw} >$

Obszar temperatur powietrza zewnętrznego powyżej punktu biwalentnego, ale poniżej temperatury zewnętrznej, przy której minimalna moc pompy ciepła możliwa do osiągnięcia poprzez redukcję prędkości obrotowej sprężarki jest wyższa niż wymagana moc grzewcza w budynku. W tym obszarze dopasowanie mocy pompy ciepła powietrze/woda do obciążenia cieplnego budynku odbywa się, dla pomp ciepła z inwerterem częstotliwości, w sposób płynny. Dla pomp ciepła nieposiadających sprężarki z inwerterem częstotliwości obszar ten nie występuje, w takim przypadku po obszarze II wystąpi od razu obszar IV.



Rysunek 14. Schemat koncepcyjny obliczeń i oznaczeń dla modelu pompy ciepła powietrze/woda stosowanej do ogrzewania budynku

Obszar IV: $T_{zew} > T_{PC,inw}$

Obszar temperatur powietrza zewnętrznego powyżej temperatury zewnętrznej, przy której moc pompy ciepła powietrze/woda możliwa do osiągnięcia poprzez zmianę

częstotliwości pracy sprężarki jest wyższa niż wymagana przez budynek moc grzewcza. W obszarze tym dopasowanie mocy grzewczej pompy ciepła powietrze/woda do obciążenia cieplnego budynku odbywa się w trybie on/off (czyli poprzez wyłączenie i włączanie sprężarki).

2.2 Dane wejściowe do modelu

Dane klimatyczne

Danymi wejściowymi są podstawowe, powszechnie dostępne informacje dotyczące temperatur powietrza zewnętrznego dla danej lokalizacji dla każdego miesiąca w roku: średnia temperatura powietrza zewnętrznego w miesiącu (T_{sr}^m), minimalna temperatura powietrza zewnętrznego w miesiącu (T_{min}^m) i maksymalna temperatura powietrza zewnętrznego w miesiącu (T_{max}^m). Dodatkową informacją jest czas trwania danego miesiąca w godzinach (Lh^m). W niniejszej pracy wykorzystano informacje o danych klimatycznych pobrane z bazy danych programu *Meteonorm*.

Dane pompy ciepła

Założono, że podstawą do obliczenia wartości *SCOP* systemu z pompą ciepła będzie model opisujący wartości deklarowanego współczynnika efektywności (COP_d) oraz wartości mocy grzewczej urządzenia (Q_{PC}) opracowany przez Afjeiego [37]⁶. Ze względu na niską istotność statystyczną (powyżej 0,05) parametrów przy zmiennych drugiego stopnia zdecydowano o uproszczeniu modelu do wielomianu dwóch zmiennych stopnia pierwszego. W modelu tym parametry estymowane są z zastosowaniem regresji wielorakiej (metodą najmniejszych kwadratów) na podstawie danych pozyskanych zgodnie z normą EN 14511 [11]. Finalnie model urządzenia opisują podane poniżej wzory.

$$Q_{PC} = A + B \cdot T_{zew} + C \cdot T_Z + D \cdot T_{zew} \cdot T_Z$$

$$COP_d = A_1 + B_1 \cdot T_{zew} + C_1 \cdot T_Z + D_1 \cdot T_{zew} \cdot T_Z$$

Dodatkowymi informacjami wspomagającymi proces symulacji są: minimalna temperatura powietrza zewnętrznego, przy której możliwa jest praca pompy ciepła powietrze/woda ($T_{min,PC}$), maksymalna temperatura, do jakiej urządzenie jest w stanie pod-

⁶ Należy zaznaczyć, iż możliwe jest zastosowanie każdej innej funkcji opisującej moc (Q_{PC}) i wartość współczynnika efektywności (COP) pompy ciepła powietrze/woda. Zastosowany model może obejmować większą ilość zmiennych. Będzie to oczywiście wymagało pewnych modyfikacji względem zaproponowanych w dalszej części pracy metod obliczeniowych.

grażać czynnik grzewczy ($T_{max,PC}$), oraz minimalna moc możliwa do osiągnięcia w wyniku redukcji prędkości obrotowej sprężarki ($Q_{PC,min}$).

Dane o budynku

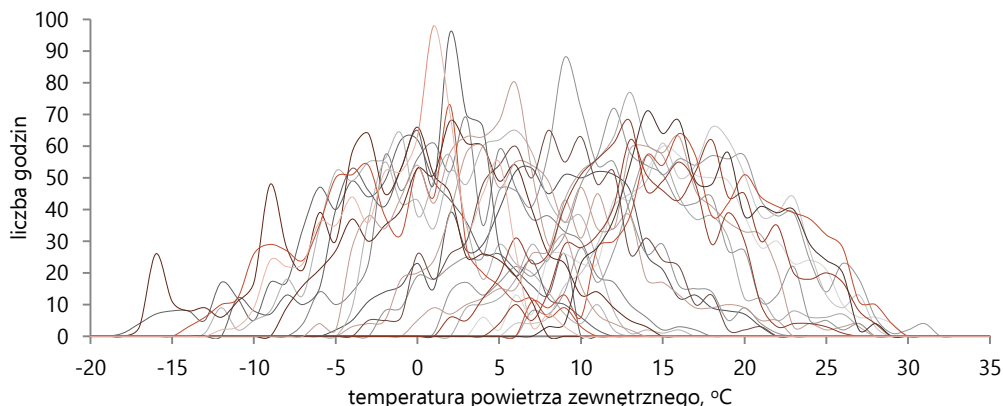
W procesie wykonywania obliczeń niezbędna jest również znajomość dwóch temperatur: temperatury wewnętrznej w pomieszczeniach (T_{weW}) oraz temperatury powietrza zewnętrznego oznaczającej koniec sezonu grzewczego dla obiektu (T_{ksG}). Podstawową wartością wejściową dla modelu jest zapotrzebowanie na energię końcową do ogrzewania budynku w danym miesiącu (ΣQ_B^m). Zapotrzebowanie to zdefiniowane jest jako stosunek miesięcznego zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania budynku (ΣQ_{CO}) do sprawności systemu uwzględniającej magazynowanie (η_m), przesył (η_p) i regulację (η_r):

$$\Sigma Q_B^m = \frac{\Sigma Q_{CO}^m}{\eta_m \cdot \eta_p \cdot \eta_r}$$

3. Szczegółowy opis modelu

3.1 Zmiany temperatury powietrza zewnętrznego w okresie miesiąca

Temperatura powietrza zewnętrznego jest podstawową wielkością determinującą efektywność pompy ciepła powietrze/woda. Ze względu na zależność pomiędzy zużyciem energii do ogrzewania budynku, efektywnością energetyczną pompy ciepła powietrze/woda a wartością i liczbą godzin występowania danej temperatury powietrza zewnętrznego, konieczne jest odzwierciedlenie częstości ich występowania.



Rysunek 15. Krzywe klimatyczne dla kolejnych miesięcy w roku dla Wrocławia i Warszawy

Rozkład częstości występowania danej temperatury powietrza zewnętrznego można analizować w różny sposób; krzywa klimatyczna jest jednym z nich. Na rysunku 15

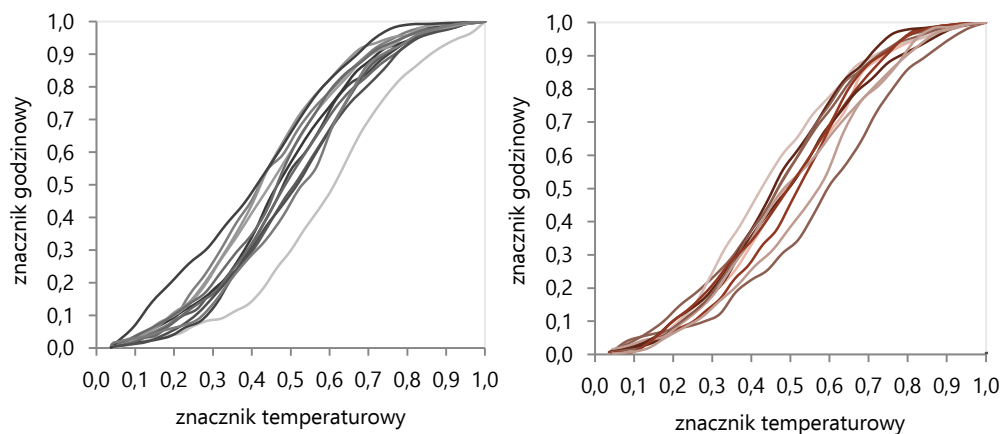
przedstawiono krzywe klimatyczne dla kolejnych miesięcy w roku dla Wrocławia i Warszawy (dane pobrane z bazy programu *Meteonorm* dla lat 1961–1990). Przeprowadzona w poprzednim rozdziale dyskusja wykazała, że stosowanie jednej, rocznej krzywej klimatycznej do analiz energetycznych pomp ciepła powietrze/woda skutkuje prowadzeniem ich na nieprawidłowych wartościach obciążenia cieplnego. Lepsze rezultaty osiągnąć się w wyniku analizowania każdego miesiąca oddzielnie, jednak sporządzanie krzywych klimatycznych dla każdego z nich jest procesem czasochłonnym i niedającym przewagi w stosunku do obliczeń przeprowadzonych w kroku godzinowym. W związku z tym w przypadku analiz miesięcznych proponuje się wykorzystanie profilu obciążenia cieplnego budynku wynikającego z miesięcznego zapotrzebowania na energię do ogrzewania oraz funkcję korelacyjną do opisanie rozkładu częstości występowania temperatury. *Funkcję częstości temperatury* w miesiącu opracowano na podstawie łatwo dostępnych znaczników: temperatury minimalnej, maksymalnej oraz średniej powietrza zewnętrznego w danym miesiącu. W pierwszym kroku, dla uporządkowania i uproszczenia informacji o przebiegu krzywych klimatycznych w różnych lokalizacjach, dokonano przekształcenia danych klimatycznych używanych do tworzenia modelu w opisany poniżej sposób.

Obliczono *znacznik temperatury* (oś pozioma):

$$x(T_x) = \frac{T_x - T_{min}^m}{T_{max}^m - T_{min}^m}$$

Obliczono *znacznik liczby godzin* (oś pionowa):

$$Lx(T_x) = \frac{Lh(T_x)^m}{\Sigma Lh^m}$$



Rysunek 16. Skumulowane i przeskalowane krzywe klimatyczne dla Wrocławia i Warszawy

Wyniki takiego przekształcenia, na przykładzie Warszawy i Wrocławia, zawiera rysunek 16. Powstały w ten sposób wykres przedstawia wartości skumulowane, zawierające się zawsze w przedziale od 0 do 1, zarówno dla wartości temperaturowych, jak i dla wartości liczby godzin w miesiącu przypisanych do danej temperatury.

Wykresy te następnie uporządkowano według dodatkowego znacznika, wartości DT^m , zdefiniowanego wzorem:

$$DT^m = \frac{T_{sr}^m - T_{min}^m}{T_{max}^m - T_{min}^m} - 0,5.$$

Znacznik ten, opisujący odległość pomiędzy średnimi wartościami temperatury powietrza zewnętrznego w miesiącu, rzeczywistą i arytmetyczną (obliczoną na podstawie minimalnej i maksymalnej temperatury w danym miesiącu), został uznany za determinujący do określenia położenia przeskalowanej krzywej klimatycznej względem osi x i y . Do przybliżenia znormalizowanych krzywych klimatycznych zastosowano funkcję błędu Gaussa, a dokładniej jej przybliżenie opisane równaniem:

$$erf(x) = \frac{2}{\pi} \cdot \arctan(2 \cdot x \cdot (1 + x^4)).$$

Funkcję tę przeskalowano do obszaru pomiędzy wartościami $\langle 0,1 \rangle$ i docelowo opisano równaniami:

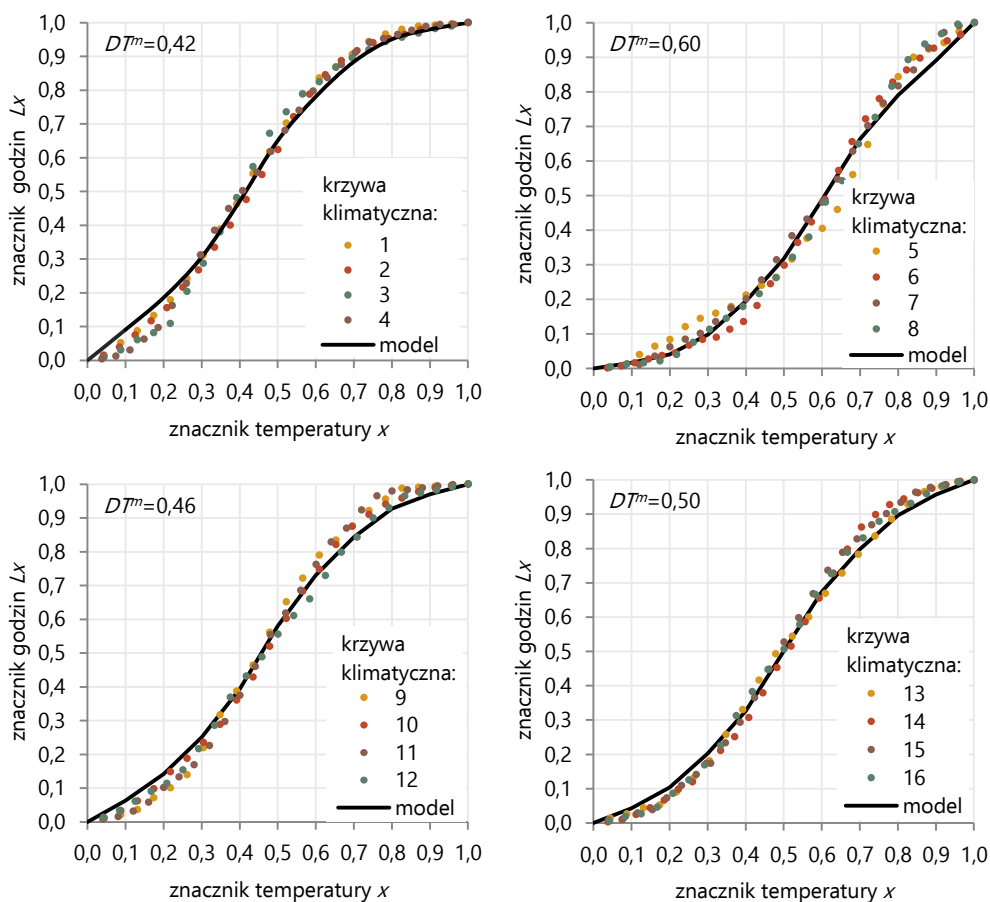
$$\text{jeżeli } x = 0, \text{ wtedy } Lx = 0,$$

$$\text{jeżeli } x = 1, \text{ wtedy } Lx = 1,$$

$$\text{inaczej: } Lx(x) = \frac{1}{\pi} \cdot \arctan(2 \cdot (3 \cdot x - 1,5 - 3,19 \cdot DT) \cdot (1 + (3 \cdot x - 1,5 - 3,19 \cdot DT)^4)) + 0,5.$$

W powyższym równaniu współczynnik przesunięcia (wynoszący 1,5) dobrano tak, aby ustabilizować położenie funkcji dla krzywych o współczynniku DT^m wynoszącym 0, co odpowiada sytuacji, gdy średnia temperatura powietrza zewnętrznego jest równa średniej arytmetycznej z wartości T_{max}^m i T_{min}^m . Parametr wzmocnienia dla funkcji (wynoszący 3,19) dobrano z wykorzystaniem pakietu *Statistica*. Wykorzystano moduł estymacji nieliniowej umożliwiający zdefiniowanie dowolnego modelu regresji. Jako funkcję straty wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów. Na potrzeby takiej estymacji nieliniowej wykorzystano algorytm proponowany do takich zadań w pakiecie *Statistica* - metodę Levenberga-Marquardta. Analizę statystyczną przeprowadzono dla danych klimatycznych z 13 lokalizacji. Uzyskano współczynnik dopasowania modelu na poziomie 0,99. Rysunek 17 zawiera porównanie wyników uzyskiwanych z zastosowaniem zaproponowanej *funkcji częstości temperatury* w zestawieniu z wynikami uzyskanymi ze szczegółowej analizy danych klimatycznych. Każdy z wykresów zawiera wyniki

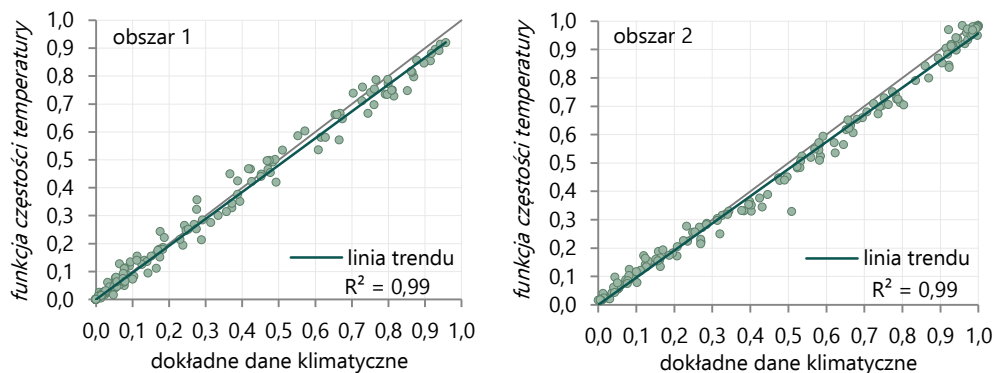
dla innej wartości współczynnika DT^m . Jak zaobserwowano, dane klimatyczne uporządkowane w ten sposób mają podobne charakterystyki opisujące skumulowane, zstandardyzowane wartości udziału godzin przypisanych do udziału temperatury w miesiącu. Zaproponowana *funkcja częstości temperatury* dobrze oddaje zmiany położenia tych charakterystyk.



Rysunek 17. *Funkcja częstości temperatury* zestawiona z dokładnymi miesięcznymi krzywymi klimatycznymi dla wybranych wartości DT^m

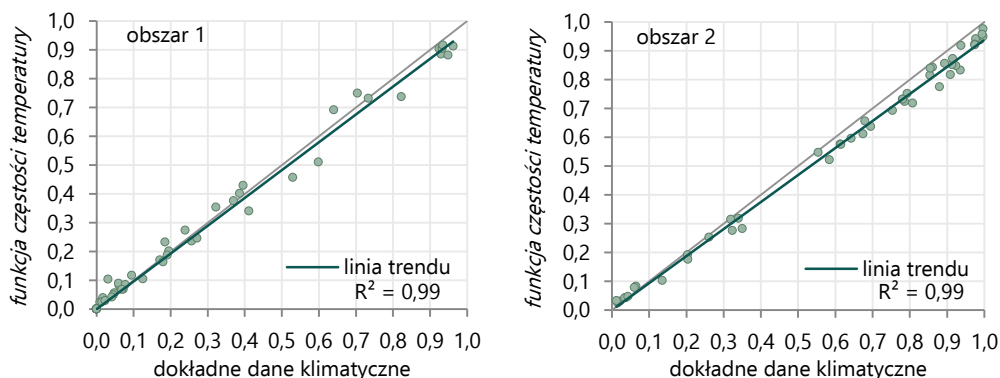
Reasumując, na podstawie zaproponowanej *funkcji częstości temperatury* dla zadanej zmiennej x , reprezentującej położenie danej temperatury powietrza zewnętrznego (T_x) względem całego przedziału temperatur w danym miesiącu oraz dla parametru charakterystycznego dla danego miesiąca DT^m , możliwe jest wyznaczenie wartości L_x , czyli udziału liczby godzin danego miesiąca, dla których temperatura jest niższa niż T_x . Rysunek 18 zawiera wyniki odpowiedzi *funkcji częstości temperatury* względem do-

kładnych obliczeń. Badania te przeprowadzono dla 152 przypadków (z bazy danych używanych do tworzenia modelu), losując temperaturę dzielącą zakres temperatur w danym miesiącu na trzy obszary. Dokładność odpowiedzi badanej funkcji w każdym przypadku była wysoka. Odchylenia linii trendu obrazujących korelację pomiędzy wynikami dla *funkcji częstości temperatury* a dokładnymi obliczeniami od przekątnej oznaczającej idealne dopasowanie nie przekraczały 7%. Rysunek 18 zawiera wyniki dla jednego z przeprowadzonych losowań. Wyniki dla obszaru 3, które nie zostały pokazane, stanowią uzupełnienie dwóch pozostałych obszarów do jedynki.



Rysunek 18. Odpowiedź *funkcji częstości temperatury* zestawiona z wynikami obliczonymi na podstawie szczegółowych danych klimatycznych (baza danych tworzących model)

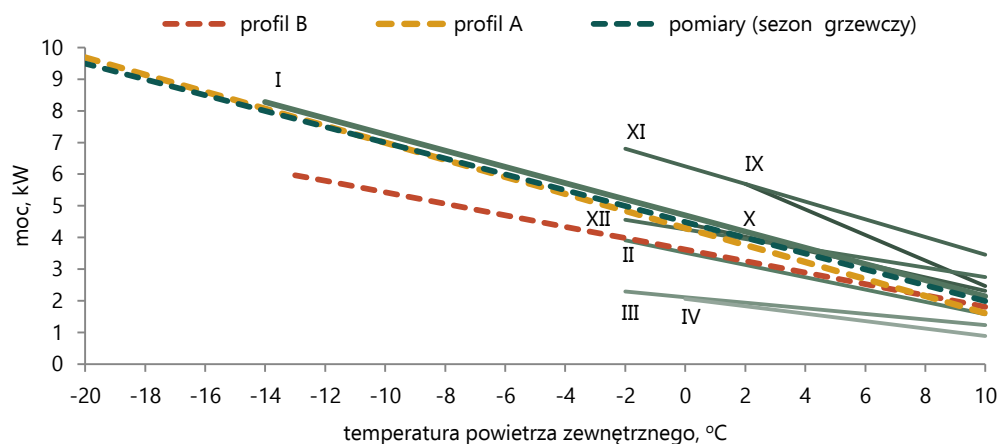
Dla sprawdzenia poprawności odpowiedzi uzyskiwanych przy zastosowaniu *funkcji częstości temperatury* przeprowadzono weryfikację na innych danych klimatycznych. Sprawdzono jej odpowiedź między innymi dla kilku miast europejskich: Kopenhagi, Mediolanu, Brukseli i Budapesztu. Odpowiedzi funkcji, o tej samej dokładności jak dla danych tworzących model, zawiera rysunek 19.



Rysunek 19. Odpowiedź *funkcji częstości temperatury* zestawiona z wynikami obliczonymi na podstawie szczegółowych danych klimatycznych (dane dla: Kopenhagi, Mediolanu, Brukseli i Budapesztu)

3.2 Miesięczny profil obciążenia cieplnego budynku

Ilość energii słonecznej docierającej do powierzchni ziemi w klimacie charakterystycznym dla regionu Polski jest odmienna w różnych miesiącach. W wyniku tego profile rzeczywistego obciążenia cieplnego budynku będą miały różny przebieg w każdym z nich. Przybliżanie takiego profilu pojedynczą dla całego roku funkcją zależną od wartości temperatury powietrza zewnętrznego daje rezultaty o nikłej dokładności w porównaniu z przybliżeniem w podziale na poszczególne miesiące. Rysunek 20 pokazuje zróżnicowanie pomiędzy rzeczywistymi profilami zapotrzebowania na moc grzewczą w różnych miesiącach roku względem wyników uzyskanych z modeli opracowanych na podstawie rocznej krzywej klimatycznej (profil A⁷ i profil B⁸). Profile rzeczywiste przedstawiono jako linie regresji wykonane na podstawie danych pomiarowych.



Rysunek 20. Rzeczywiste profile obciążenia cieplnego w różnych miesiącach roku względem wyników uzyskanych na podstawie rocznej krzywej klimatycznej

Widoczne jest, iż zarówno model pierwszy (profil A), jak i drugi (profil B), opracowany w oparciu o roczną krzywą klimatyczną, nie odzwierciedlają odpowiednio zakresu zmian zapotrzebowania na moc grzewczą w ciągu roku. W przypadku profilu A brak uwzględniania zysków ciepła nie pozwala na realne odzwierciedlenie chwilowego zapotrzebowania na energię w okresach, gdy wpływ ten jest duży, choć profil ten dobrze odzwierciedla przebieg linii regresji dla całego roku w badanym obiekcie. Widoczne jest również, że linie regresji opracowane dla danych pomiarowych z poszczególnych

⁷ Profil A powstał na podstawie obliczeniowego obciążenia cieplnego budynku. Zasady jego tworzenia opisano szczegółowo w rozdziale II.

⁸ Profil B powstał na podstawie rocznego zapotrzebowania na energię do ogrzewania budynku. Zasady jego tworzenia opisano szczegółowo w rozdziale II.

miesiący układają się różnie; w okresie jesiennym mają znacznie większe nachylenie niż w okresie wiosennym. Dzięki wykonywaniu profili obciążenia cieplnego dla pojedynczych miesięcy wzrasta dokładność odwzorowania stanu rzeczywistego pomimo faktu, że funkcja opisująca zapotrzebowanie na moc grzewczą w budynku nadal pozostanie funkcją jedynie temperatury powietrza zewnętrznego. Dodatkowo należy podkreślić, że bardziej szczegółowa analiza będzie umożliwiała poprawny dobór mocy grzewczej pompy ciepła powietrze/woda. Urządzenia te mają niekoherentny przebieg generowanej mocy grzewczej w stosunku do zapotrzebowania na nią i konsekwencje przewymiarowania urządzenia widoczne są w jego efektywności, podobnie jak konsekwencje niedowymiarowania. Warto zauważyć, iż punkt biwalentny i punkt, w którym pompa ciepła osiąga swoją moc minimalną dla każdego z miesięcy, będą miały inne położenie, znacząco wpływając na udział poszczególnych obszarów pracy pompy ciepła w produkcji energii cieplnej dla budynku, a tym samym – na jej efektywność.

W wyniku tej dyskusji zaproponowano, aby miesięczną analizę pracy pomp ciepła powietrze/woda wykonywać dla indywidualnego profilu obciążenia cieplnego dla każdego z nich. W tym celu opracowano model opisujący obciążenie cieplne budynku w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego. Model ten wymaga: obliczenia dla każdego miesiąca wartości zapotrzebowania na energię końcową (ΣQ_B^m), podania wartości temperatury końca sezonu grzewczego (T_{ksg}), temperatury minimalnej i maksymalnej powietrza zewnętrznego w danym miesiącu (T_{min}^m , T_{max}^m) oraz czasu trwania danego miesiąca (Lh^m). Parametr charakterystyczny, opisujący profil obciążenia grzewczego dla danego miesiąca, nazwano współczynnikiem kierunkowym obciążenia cieplnego budynku w kolejnych miesiącach roku (ΔQ_B^m). Wyznaczenie jego wartości następuje w sposób opisany poniżej.

W pierwszym kroku należy obliczyć parametr charakterystyczny *funkcji częstości temperatury*.

$$DT^m = \frac{(T_{sr}^m - T_{min}^m)}{(T_{max}^m - T_{min}^m)} - 0,5.$$

Następnie należy obliczyć znacznik temperaturowy końca sezonu grzewczego:

$$x_{ksg}^m = \frac{(T_{ksg} - T_{min}^m)}{(T_{max}^m - T_{min}^m)},$$

i dalej – znacznik godzinowy końca sezonu grzewczego:

$$Lx_{ksg}^m = \frac{1}{\pi} \cdot \arctan \left(2 \cdot (3 \cdot x_{ksg}^m - 1,5 - 3,19 \cdot DT^m) \cdot (1 + (3 \cdot x_{ksg}^m - 1,5 - 3,19 \cdot DT^m)^4) \right) + 0,5.$$

Dzięki powyższym obliczeniom można określić czas trwania sezonu grzewczego w danym miesiącu:

$$Lh_{ksg} = Lh^m \cdot Lx_{ksg}^m,$$

i w wyniku tego obliczyć wartość współczynnika kierunkowego obciążenia cieplnego budynku w danym miesiącu:

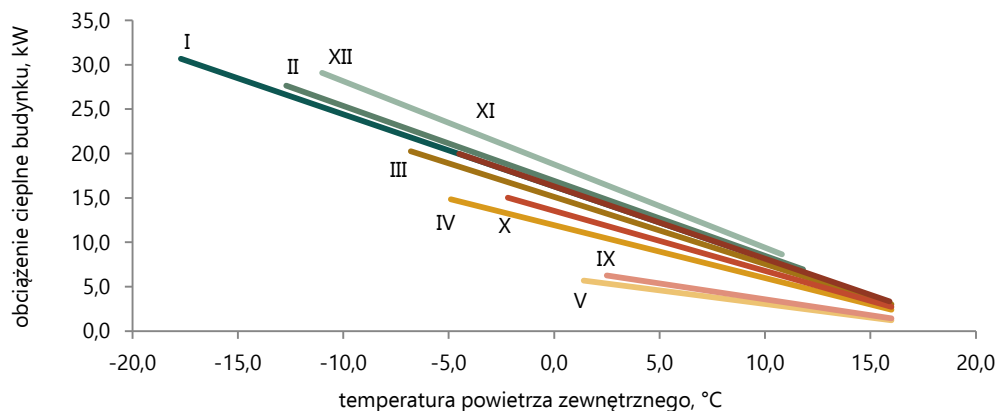
$$\Delta Q_B^m = \frac{\Sigma Q_B^m}{Lh_{ksg} \cdot (T_{weew} - T_{sr}^m)}.$$

Współczynnik ten (ΔQ_B^m) pozwala na obliczenie przybliżonej wartości chwilowego zapotrzebowania na moc grzewczą ($Q_{B,x}^m$) uwzględniającej wpływ zysków ciepła od słońca i wpływ zysków wewnętrznych dla dowolnej temperatury powietrza zewnętrznego ($T_{zew,x}$):

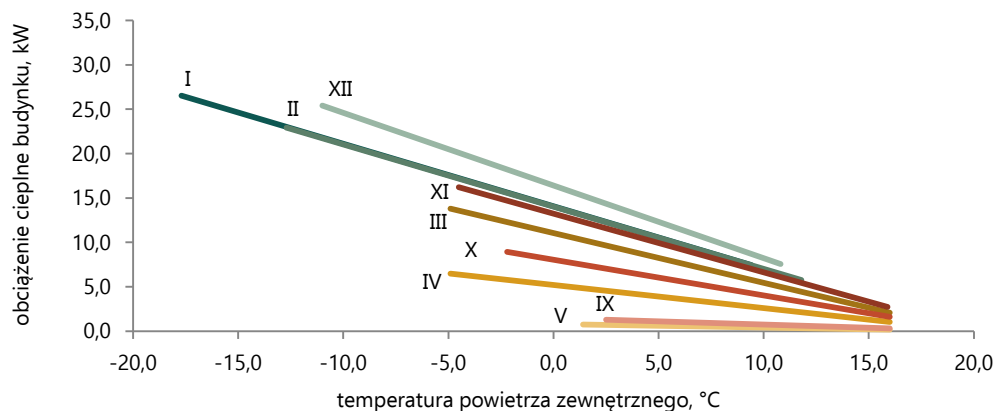
$$Q_{B,x}^m = \Delta Q_B^m \cdot (T_{weew} - T_{zew,x}).$$

Profile obciążenia cieplnego, obliczone z zastosowaniem opisanej metody, dla kolejnych miesięcy i dla dwóch przykładowych budynków przedstawiono na rysunkach 21 i 22. Profile zostały opracowane dla budynków o tej samej powierzchni i konstrukcji, różniących się jednak powierzchnią przeszkleń. Rysunek 21 wykonano dla budynku o powierzchni przeszkleń stanowiącej 10% powierzchni podłogi. Rysunek 22 wykonano dla budynku o powierzchni przeszkleń stanowiącej 20% powierzchni podłogi. Wykresy sporządzono przy założeniu granicy sezonu grzewczego (T_{ksg}) wynoszącej $+16^\circ\text{C}$. Zmiany współczynnika kierunkowego mocy grzewczej (ΔQ_B) opisującego profile zapotrzebowania na energię są znaczące. Dla budynku z rysunku 21 wynoszą one od 0,94 kW/K dla grudnia do wartości 0,31 kW/K dla maja. Względem wartości średniej współczynnika ΔQ_B dla tego budynku, wynoszącej 0,68 kW/K, są to odchylenia w przedziale od -55% do $+38\%$. Różnice te wywołane są wpływem zysków ciepła od nasłonecznienia. W miesiącach o większym nasłonecznieniu ilość energii potrzebnej do ogrzewania budynku jest mniejsza, co wpływa na obniżenie profilu mocy. Oczywiście wartości te będą różne dla każdej lokalizacji oraz dla każdej architektury budynku. Im lepiej budynek jest przystosowany do wykorzystania ciepła ze słońca w sposób pasywny, tym zróżnicowanie pomiędzy profilami będzie większe. Wpływ zwiększenia powierzchni przeszkleń na profil obciążenia cieplnego budynku można zaobserwować poprzez porównanie profili na rysunkach 21 i 22. Odchylenia wartości minimalnej i maksymalnej współczynnika ΔQ_B względem jego wartości średniej (wynoszącej 0,46 kW/K) wynoszą dla budynku z rysunku 22 od -91% do $+77\%$. Należy zauważyć, że istotnym parametrem przy konstruowaniu profili jest wartość temperatury końca sezonu grzewczego. Przyjęcie zbyt wysokiej lub zbyt niskiej wartości spowoduje zniżenie lub zawyżenie mocy grzewczej przypisanej do danej temperatury powietrza zewnętrznego w okresach cieplejszych. Wyznacznikiem poprawności może być obliczana

według profili moc maksymalna w miesiącach zimowych. Dobrze, aby uzyskiwana moc maksymalna była zbliżona do wartości obliczeniowego bilansu ciepła dla budynku. W omawianych przykładach wartości T_{ksg} zostały dobrane właśnie w podany sposób.



Rysunek 21. Miesięczne profile obciążenia cieplnego budynku o powierzchni okien przyjętej jako 10% powierzchni użytkowej obiektu



Rysunek 22. Miesięczne profile obciążenia cieplnego budynku o powierzchni okien przyjętej jako 20% powierzchni użytkowej obiektu

3.3 Temperatura czynnika grzewczego

Temperatura czynnika grzewczego na zasilaniu systemu grzewczego w danym miesiącu (T_{z^m}) obliczana jest według uproszczonej krzywej grzewczej. Wymaganymi danymi wejściowymi są: obliczeniowa temperatura zasilania ($T_{z^{obl}}$), temperatura zasilania na końcu sezonu grzewczego ($T_{z^{ksg}}$), temperatura obliczeniowa powietrza zewnętrznego ($T_{zew^{obl}}$) i temperatura końca sezonu grzewczego dla analizowanego obiektu (T_{ksg}).

W pierwszym kroku należy obliczyć wartość parametru charakterystycznego do obliczania krzywej grzewczej:

$$\Delta T = \frac{T_Z^{obl} - T_Z^{ksg}}{T_{ksg} - T_{zew}^{obl}}$$

i na tej podstawie obliczyć wartość temperatury czynnika grzewczego przy dowolnej temperaturze powietrza zewnętrznego:

$$T_{Z,x}^m = \Delta T \cdot (T_{ksg} - T_x^m) + T_Z^{ksg}.$$

Do obliczeń opisanych w punkcie 3.4 konieczna jest znajomość maksymalnej wartości temperatury zasilania w danym miesiącu:

$$T_{Z,max}^m = \Delta T \cdot (T_{ksg} - T_{max}^m) + T_Z^{ksg}.$$

Po wyznaczeniu temperatur zastępczych dla obszarów (T_R) obliczona zostanie temperatura zasilania w każdym z nich:

$$T_{Z,II}^m = \Delta T \cdot (T_{ksg} - T_{R,II}^m) + T_Z^{ksg},$$

$$T_{Z,III}^m = \Delta T \cdot (T_{ksg} - T_{R,III}^m) + T_Z^{ksg},$$

$$T_{Z,IV}^m = \Delta T \cdot (T_{ksg} - T_{R,IV}^m) + T_Z^{ksg}.$$

O obliczeniu wartości temperatury zastępczej dla obszarów (T_R) traktuje punkt 3.6.

3.4 Temperatury graniczne dla obszarów pracy pompy ciepła

Poniżej opisano zasady obliczania temperatur granicznych ($T_1^m, T_2^m, T_3^m, T_4^m, T_5^m$) dla poszczególnych miesięcy w roku i kolejnych obszarów obliczeniowych I, II, III, IV. Stosowne oznaczenia opisano na rysunku 14. Algorytm obliczeń wartości tych temperatur opisano następująco:

krok 1: $T_1^m = T_{min}^m,$

krok 2: $T_2^m = \min (T_{max}^m, \max (T_{min,PC}, T_{min}^m)),$

krok 3: $T_3^m = \min (T_{max}^m, \max (T_2^m, T_{biv}^m)),$

krok 4: $T_5^m = \min (T_{max}^m, T_{ksg}),$

krok 5: $T_4^m = \max (T_3^m, \min (T_{PC,inw}, T_5^m)).$

Wyznaczenie wartości temperatur granicznych opiera się o wartości temperatur charakteryzujących kolejne miesiące w roku, minimalną i maksymalną temperaturę powietrza zewnętrznego w danym miesiącu (T_{min}^m, T_{max}^m), temperaturę końca sezonu grzewczego (T_{ksg}) oraz minimalną temperaturę pracy pompy ciepła według danych producenta ($T_{PC,min}$). Dodatkowo dla każdego miesiąca, ze względu na zmiany nachyle-

nia profilu zapotrzebowania na ciepło budynku, konieczne jest obliczenie wartości temperatury w punkcie biwalentnym (T_{biw}^m) oraz temperatury zewnętrznej właściwej dla granicy pracy inwertera ($T_{PC,inw}^m$). Warunki brzegowe do obliczenia T_{biw}^m i $T_{PC,inw}^m$ oraz odpowiednie wzory podano poniżej.

Wartość temperatury powietrza zewnętrznego dla punktu biwalentnego w danym miesiącu obliczana jest dla warunku:

$$Q_{PC}^m = Q_B^m \Leftrightarrow A + B \cdot T_{biw}^m + C \cdot T_{Z,max}^m + D \cdot T_{biw}^m \cdot T_{Z,max}^m = \Delta Q_B^m \cdot (T_{wew} - T_{biw}^m),$$

tak więc:

$$T_{biw}^m = \frac{\Delta Q_B^m \cdot T_{wew} - A - C \cdot T_{Z,max}^m}{B + \Delta Q_B^m + D \cdot T_{Z,max}^m}.$$

Wartość temperatury powietrza zewnętrznego wyznaczająca granicę pracy inwertera częstotliwości wyznaczana jest dla warunku:

$$Q_{PC,min} = Q_B^m \Leftrightarrow Q_{PC,min} = \Delta Q_B^m \cdot (T_{wew} - T_{PC,inw}^m),$$

tak więc:

$$T_{PC,inw}^m = \frac{\Delta Q_B^m \cdot T_{wew} - Q_{PC,min}}{\Delta Q_B^m}.$$

3.5 Wpływ poszczególnych obszarów na efektywność pompy ciepła

Wpływ poszczególnych obszarów pracy pompy ciepła powietrze/woda na wartości współczynnika efektywności energetycznej urządzenia w danym miesiącu ($SCOP^m$) oraz ich udziały w potrzebach grzewczych budynku (Q_B^m) w danym miesiącu oznaczono jako: X_I^m , X_{II}^m , X_{III}^m , X_{IV}^m , odpowiednio do przedziałów: I, II, III i IV.

Wzór na wartość $SCOP^m$ opisuje równanie:

$$SCOP^m = \frac{1}{\frac{X_I^m}{COP_{II}^m} + \frac{X_{III}^m}{COP_{III}^m} + \frac{X_{IV}^m}{COP_{IV}^m}}.$$

Wartość zapotrzebowania na energię do ogrzewania w danym miesiącu jest sumą energii cieplnej dostarczanej w każdym z obszarów pracy pompy ciepła:

$$Q_B^m = Q_{B,I}^m + Q_{B,II}^m + Q_{B,III}^m + Q_{B,IV}^m.$$

W wyniku tego wartości zapotrzebowania na energię cieplną dostarczaną do budynku i na energię elektryczną dostarczaną do pompy ciepła powietrze/woda w poszczególnych przedziałach temperaturowych oblicza się z poniższych zależności:

$$\Sigma Q_{B,i}^m = X_i^m \cdot \Sigma Q_B^m, \quad \text{tak więc:} \quad \Sigma Q_{EL,i}^m = \frac{\Sigma Q_{B,i}^m}{COP_i^m},$$

gdzie $i = I, II, III, IV$.

Aby obliczyć udział przedziałów I, II, III i IV w zapotrzebowaniu na energię do ogrzewania budynku, konieczne jest obliczenie dla każdego miesiąca podstawowego parametru *funkcji częstości temperatury*.

$$DT^m = \frac{(T_{sr}^m - T_{min}^m)}{(T_{max}^m - T_{min}^m)} - 0,5,$$

oraz znaczników temperaturowych dla granic obliczanych obszarów:

$$x_2^m = \frac{(T_2^m - T_{min}^m)}{(T_{max}^m - T_{min}^m)},$$

$$x_3^m = \frac{(T_3^m - T_{min}^m)}{(T_{max}^m - T_{min}^m)},$$

$$x_4^m = \frac{(T_4^m - T_{min}^m)}{(T_{max}^m - T_{min}^m)},$$

$$x_5^m = \frac{(T_5^m - T_{min}^m)}{(T_{max}^m - T_{min}^m)}.$$

Na tej podstawie oblicza się znacznik skumulowanej liczby godzin występowania danej temperatury lub temperatury niższej, korzystając z poniższego algorytmu:

jeżeli $x_i^m = 0$, wtedy $Lx_i^m = 0$,

jeżeli $x_i^m = 1$, wtedy $Lx_i^m = 1$,

inaczej:
$$Lx_i^m = \frac{1}{\pi} \cdot \arctan \left(2 \cdot (3 \cdot x_i^m - 1,5 - 3,19 \cdot DT^m) \cdot (1 + (3 \cdot x_i^m - 1,5 - 3,19 \cdot DT^m)^4) \right) + 0,5,$$

gdzie $i = 2, 3, 4, 5$.

Na potrzeby modelu zdefiniowano pojęcie *stopniogodzin jednostkowych*. Obliczenie ich wartości w danym obszarze przebiega następująco:

$$Sthx_I^m = Lx_2^m \cdot (T_{wew} - T_{R,I}^m),$$

$$Sthx_{II}^m = (Lx_3^m - Lx_2^m) \cdot (T_{wew} - T_{R,II}^m),$$

$$Sthx_{III}^m = (Lx_4^m - Lx_3^m) \cdot (T_{wew} - T_{R,III}^m),$$

$$Sthx_{IV}^m = (Lx_5^m - Lx_4^m) \cdot (T_{wew} - T_{R,IV}^m).$$

W wyniku tego obliczyć można wartości udziałów poszczególnych obszarów w potrzebach grzewczych budynku w danym miesiącu:

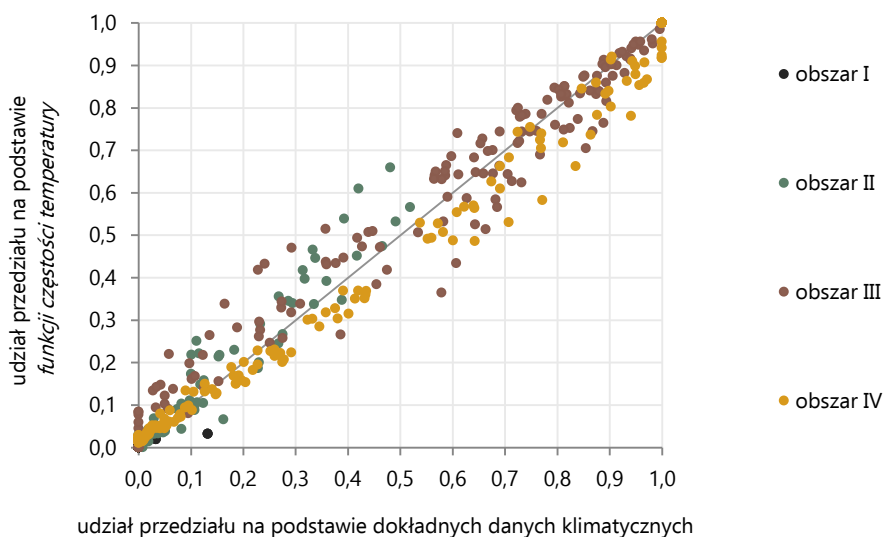
$$X_I^m = \frac{Sthx_I^m}{Sthx_I^m + Sthx_{II}^m + Sthx_{III}^m + Sthx_{IV}^m}$$

$$X_{II}^m = \frac{Sthx_{II}^m}{Sthx_I^m + Sthx_{II}^m + Sthx_{III}^m + Sthx_{IV}^m}$$

$$X_{III}^m = \frac{Sthx_{III}^m}{Sthx_I^m + Sthx_{II}^m + Sthx_{III}^m + Sthx_{IV}^m}$$

$$X_{IV}^m = \frac{Sthx_{IV}^m}{Sthx_I^m + Sthx_{II}^m + Sthx_{III}^m + Sthx_{IV}^m}$$

Na rysunku 23 zamieszczono udziały poszczególnych obszarów w zapotrzebowaniu na energię do ogrzewania budynku w danym miesiącu obliczone według powyższego algorytmu wraz z wynikami dokładnych obliczeń dla danych wspomagających tworzenie modelu efektywności pompy ciepła powietrze/woda w kroku miesięcznym. Wyniki należy uznać za wystarczające do wykonania analizy pracy pompy ciepła powietrze/woda na statystycznych danych klimatycznych. Średni błąd bezwzględny odpowiedzi funkcji wynosi $\pm 0,04$, a trend odpowiedzi funkcji jest zdecydowanie prawdziwy.



Rysunek 23. Wyniki obliczeń udziałów obszarów I-IV w zapotrzebowaniu na energię do ogrzewania budynku w danym miesiącu według funkcji częstości temperatury wobec obliczeń z dokładnych danych klimatycznych

3.6 Reprezentatywna wartość COP w poszczególnych obszarach pracy

Ogólne zasady obliczeń

Wartość COP w każdym z obszarów pracy, dla kolejnych miesięcy, wyznacza się indywidulanie na podstawie wartości COP_d oraz parametru k . Wartość COP_d jest współczynnikiem efektywności wyznaczonym na podstawie uproszczonego modelu Afjeiego [37] dla temperatury zastępczej obszaru (T_R) i dla odpowiadającej jej temperatury czynnika grzewczego w przewodzie zasilającym instalację grzewczą (T_Z). Stwierdzono, że wystarczająco dokładne będzie przybliżenie wartości temperatury zastępczej średnią arytmetyczną obliczoną na podstawie wartości temperatur na końcach przedziału. Parametr korygujący (k) ma na celu korektę wartości COP_d wynikającej z danych katalogowych do wartości zbliżonej do rzeczywistej (COP), z uwzględnieniem specyficznych warunków pracy pompy ciepła w danym obszarze oraz niedokładności w wyznaczeniu wartości temperatury zastępczej (T_R). Ogólne zasady obliczeń wartości COP w poszczególnych obszarach pracy pompy ciepła powietrze/woda opisano poniżej. Szczegółowe zasady obliczania parametru korygującego (k) dla każdego obszaru opisano w kolejnych podpunktach.

Obszar I – w obszarze tym pompa ciepła powietrze/woda pozostaje wyłączona. Energia do ogrzewania obiektu dostarczana jest dzięki pracy grzałki elektrycznej lub z innego, dodatkowego źródła ciepła.

Obszar II – w obszarze tym pompa ciepła powietrze/woda współpracuje z innym źródłem energii. Parametr k_{II} obrazuje wpływ dodatkowego źródła energii na wartość COP systemu monoenergetycznego lub w przypadku systemów bivalentnych służy jedynie do rozdzielania energii cieplnej produkowanej przez pompę ciepła i energii cieplnej dostarczanej z innego źródła energii. Wartość parametru k_{II} uwzględnia również niedokładności w wyznaczeniu temperatury reprezentatywnej dla obszaru.

Temperatura reprezentatywna w obszarze II w danym miesiącu obliczana jest jako:

$$T_{R,II}^m = \frac{T_2^m + T_3^m}{2}.$$

Deklarowana wartość współczynnika efektywności energetycznej w obszarze II w danym miesiącu opisana jest równaniem:

$$COP_{d,II}^m = A_1 + B_1 \cdot T_{R,II}^m + C_1 \cdot T_{Z,II}^m + D_1 \cdot T_{R,II}^m \cdot T_{Z,II}^m.$$

Wartość współczynnika COP jest wynikiem poniższego obliczenia:

$$COP_{II}^m = COP_{d,II}^m \cdot k_{II}^m.$$

Obszar III – wartość COP w obszarze III wynika z wartości temperatury powietrza zewnętrznego i temperatury zasilania instalacji grzewczej. Wartość parametru k_{III} związana jest z niedokładnością wyznaczenia temperatury reprezentatywnej dla obszaru.

Temperatura reprezentatywna w obszarze III w danym miesiącu obliczana jest jako:

$$T_{R,III}^m = \frac{T_3^m + T_4^m}{2}.$$

Deklarowana wartość współczynnika efektywności energetycznej w obszarze III w danym miesiącu opisana jest równaniem:

$$COP_{d,III}^m = A_1 + B_1 \cdot T_{R,III}^m + C_1 \cdot T_{Z,III}^m + D_1 \cdot T_{R,III}^m \cdot T_{Z,III}^m.$$

Wartość współczynnika COP jest wynikiem poniższego obliczenia:

$$COP_{III}^m = k_{III} \cdot COP_{d,III}^m.$$

Obszar IV – w obszarze tym, ze względu na pracę pompy ciepła powietrze/woda w trybie on/off, konieczna jest korekta k_{IV} , która oprócz niwelowania niedokładności związanych z przyjętą wartością temperatury reprezentatywnej uwzględnić będzie wpływ obciążenia częściowego, skutkującego w tym obszarze cyklicznym załączaniem i wyłączaniem sprężarki w pompie ciepła.

Temperatura reprezentatywna w obszarze IV w danym miesiącu obliczana jest jako:

$$T_{R,IV}^m = \frac{T_4^m + T_5^m}{2}.$$

Deklarowana wartość współczynnika efektywności energetycznej w obszarze IV w danym miesiącu opisana jest równaniem:

$$COP_{d,IV}^m = A_1 + B_1 \cdot T_{R,IV}^m + C_1 \cdot T_{Z,IV}^m + D_1 \cdot T_{R,IV}^m \cdot T_{Z,IV}^m.$$

Wartość współczynnika COP jest wynikiem poniższego obliczenia:

$$COP_{IV}^m = k_{IV} \cdot COP_{d,IV}^m.$$

Szczegółowa metoda obliczeń dla obszaru II

Do obliczenia wartości urealnionej współczynnika efektywności pompy ciepła powietrze/woda pracującej w obszarze II opracowano parametr korygujący k_{II} . Zdefiniowano go tak, aby pozwalał oddzielić energię cieplną dostarczoną z pompy ciepła powietrze/woda od energii z innego źródła (grzałki elektrycznej lub źródła alternatywnego). Wartość parametru k_{II} oblicza się dla każdego miesiąca następująco:

$$k_{II}^m = 1,02 \cdot \frac{Q_{PC,II}^m}{Q_{B,II}^m},$$

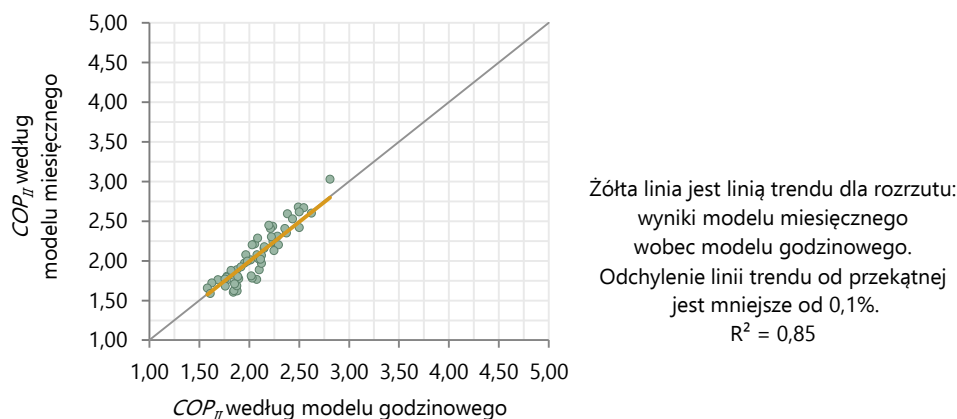
gdzie moc grzewcza pompy ciepła to:

$$Q_{PC,II}^m = A + B \cdot T_{R,II}^m + C \cdot T_{Z,II}^m + D \cdot T_{R,II}^m \cdot T_{Z,II}^m,$$

a obciążenie cieplne budynku to:

$$Q_{B,II}^m = \Delta Q_B^m \cdot (T_{weW} - T_{R,II}^m).$$

Korekta 1,02 jest parametrem empirycznym wyznaczonym w wyniku analizy statystycznej wykonanej na podstawie symulacji stanowiących bazę do tworzenia modelu. Wykorzystano moduł estymacji nieliniowej umożliwiający zdefiniowanie dowolnego modelu regresji. Jako funkcję straty wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów. Na potrzeby takiej estymacji nieliniowej wykorzystano algorytm proponowany do takich zadań w pakiecie *Statistica* - metodę Levenberga-Marquardta. Wyniki dopasowania zaproponowanego modelu do wyników symulacji godzinowych przedstawia rysunek 24. Uzyskano zadowalające rezultaty, tj. linia regresji (oznaczona na rysunku kolorem żółtym) wskazuje poprawny trend odpowiedzi modelu, jej odchylenie od przekątnej oznaczającej idealne dopasowanie wynosi poniżej 0,1%. Błędy wyznaczenia wartości COP_{II} dla większości przypadków są niskie; średnia wartość tych błędów dla badanych przypadków wynosi 4,9%.



Rysunek 24. Odzworowanie COP w obszarze II z zastosowaniem modelu miesięcznego wobec modelu godzinowego

Parametr k_{II} pozwala rozdzielić energię cieplną dostarczaną do budynku w obszarze II na energię dostarczaną z pompy ciepła powietrze/woda i na energię z innego źródła ciepła (grzałki elektrycznej lub alternatywnego źródła energii).

Energia cieplna dostarczona z pompy ciepła powietrze/woda:

$$Q_{PC,II}^m = k_{II}^m \cdot Q_{B,II}^m.$$

Energia cieplna dostarczona z grzałki elektrycznej:

$$Q_{eI,II}^m = (1 - k_{II}^m) \cdot Q_{B,II}^m,$$

lub gdy nośnikiem energii dla dodatkowego źródła nie jest energia elektryczna:

$$Q_{A\dot{z},II}^m = (1 - k_{II}^m) \cdot Q_{B,II}^m.$$

Jeżeli drugim źródłem ciepła jest grzałka elektryczna, to przyjmuje się, że wartość jej COP wynosi 1 i wlicza się ją do efektywności systemu pompy ciepła powietrze/woda ($COP_{II,S}$). Jeżeli drugim źródłem jest alternatywne źródło (o nośniku energii innym niż energia elektryczna), wtedy jego sprawność przyjmuje się zgodnie z odpowiednimi dla tego urządzenia wytycznymi, a energii dostarczanej do tego źródła, jak i energii ciepłej przekazanej z niego do budynku nie wlicza się do COP systemu.

W wyniku tego COP monoenergetycznego systemu pompy ciepła powietrze/woda wylicza się ze wzoru:

$$COP_{II,S}^m = \frac{1}{1 - k_{II}^m + \frac{k_{II}^m}{COP_{d,II}^m}}.$$

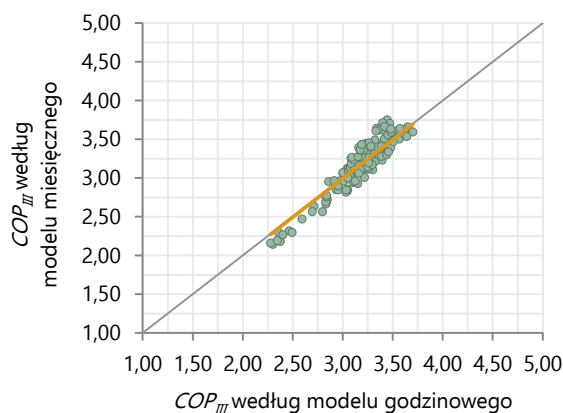
Szczegółowa metoda obliczeń dla obszaru III

Do obliczenia urealnionej wartości współczynnika efektywności pompy ciepła powietrze/woda w obszarze III opracowano parametr korygujący k_{III} . Ujmuje on wpływ niedokładności wyznaczenia temperatury reprezentatywnej (T_R) w obszarze III.

Wartość COP_{III} dla kolejnych miesięcy obliczana jest następująco:

$$COP_{III}^m = k_{III} \cdot COP_{d,III}^m = 0,95 \cdot COP_{d,III}^m.$$

Korekta k_{III} wynosząca 0,95 jest parametrem empirycznym wyznaczonym w wyniku analizy statystycznej wykonanej na podstawie symulacji stanowiących bazę do tworzenia modelu. Wykorzystano moduł estymacji nieliniowej umożliwiający zdefiniowanie dowolnego modelu regresji. Jako funkcję straty wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów. Na potrzeby takiej estymacji nieliniowej wykorzystano algorytm proponowany do takich zadań w pakiecie *Statistica* - metodę Levenberga-Marquardta. Wyniki dopasowania zaproponowanego modelu do wyników symulacji godzinowych przedstawia rysunek 25. Uzyskano zadowalające rezultaty, tj. linia regresji (oznaczona na rysunku kolorem żółtym) wskazuje poprawny trend odpowiedzi modelu, jej odchylenie od przekątnej oznaczającej idealne dopasowanie wynosi poniżej 0,1%. Błędy wyznaczenia wartości COP_{III} dla większości przypadków są niskie; średnia wartość tych błędów dla badanych przypadków wynosi 3,4%.



Żółta linia jest linią trendu dla rozrzutu:
wyniki modelu miesięcznego
wobec modelu godzinowego.
Odchylenie linii trendu od przekątnej
jest mniejsze od 0,1%.
 $R^2 = 0,87$

Rysunek 25. Odzworowanie COP w obszarze III z zastosowaniem modelu miesięcznego wobec modelu godzinowego

Szczegółowa metoda obliczeń dla obszaru IV

Do obliczenia wartości urealnionej współczynnika efektywności pompy ciepła powietrze/woda pracującej w obszarze IV opracowano parametr korygujący k_{IV} . Zdefiniowano go tak, aby pozwalał obliczyć zastępczą wartość wpływu obciążenia częściowego pompy ciepła powietrze/woda.

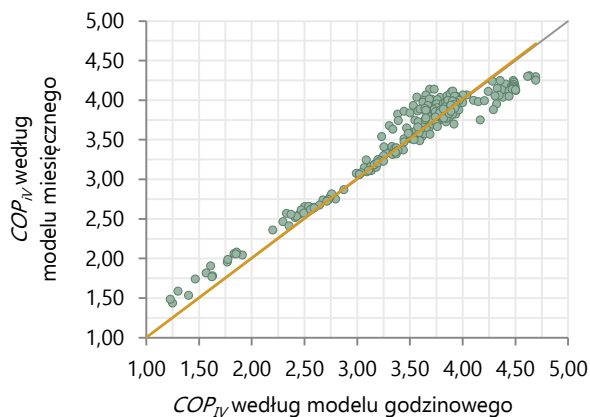
Wartość parametru k_{IV} oblicza się dla każdego miesiąca następująco:

$$k_{IV}^m = 1 + a \cdot \ln \left(0,88 \cdot \frac{Q_{B,IV}^m}{Q_{PC,min}} + e^{-\frac{1}{a}} \right),$$

gdzie obciążenie cieplne budynku to:

$$Q_{B,IV}^m = \Delta Q_B^m \cdot (T_{wew} - T_{R,IV}^m).$$

Korekta 0,88 jest parametrem empirycznym wyznaczonym w wyniku analizy statystycznej wykonanej na podstawie symulacji stanowiących bazę do tworzenia modelu. Wykorzystano moduł estymacji nieliniowej umożliwiający zdefiniowanie dowolnego modelu regresji. Jako funkcję straty wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów. Na potrzeby takiej estymacji nieliniowej wykorzystano algorytm proponowany do takich zadań w pakiecie *Statistica* - metodę Levenberga-Marquardta. Wyniki dopasowania zaproponowanego modelu do wyników symulacji godzinowych przedstawia rysunek 26. Uzyskano zadowalające rezultaty, tj. linia regresji (oznaczona na rysunku kolorem żółtym) wskazuje poprawny trend odpowiedzi modelu, jej odchylenie od przekątnej oznaczającej idealne dopasowanie wynosi poniżej 0,1%. Błędy wyznaczenia wartości COP_{IV} dla większości przypadków są niskie; średnia wartość tych błędów dla badanych przypadków wynosi 5,3%.



Żółta linia jest linią trendu dla rozrzutu:
wyniki modelu miesięcznego
wobec modelu godzinowego.
Odchylenie linii trendu
jest mniejsze od 0,1%.
 $R^2 = 0,94$

Rysunek 26. Odzworowanie COP w obszarze IV z zastosowaniem modelu miesięcznego wobec modelu godzinowego

4. Ocena modelu miesięcznego do symulacji pracy pompy ciepła powietrze/woda

4.1 Zakres analiz porównawczych

Model efektywności energetycznej pompy ciepła powietrze/woda pracującej w trybie ogrzewania budynku w miesięcznym kroku obliczeniowym sprawdzono poprzez porównanie wyników uzyskanych z jego zastosowaniem z wynikami symulacji godzinowych. Porównanie przeprowadzono dla trzech pomp ciepła powietrze/woda, pięciu lokalizacji i pięciu profili obciążenia grzewczego. Wykonano cztery zestawy symulacji: analiza 1, 2, 3 i 4, co szczegółowo opisano w tabeli 11.

Tabela 11. Zestawienie analiz porównawczych do oceny modelu miesięcznej efektywności pompy ciepła powietrze/woda stosowanej do ogrzewania budynku

	Analiza 1	Analiza 2	Analiza 3	Analiza 4	Analiza 5
Lokalizacja	Poznań	Szczecin	Bielsko-Biała	Zakopane	Wrocław
Moc grzewcza	9,1 kW	19,9 kW	36,1 kW	4,1 kW	6,9 kW
Roczne zapotrzebowanie na energię do ogrzewania	14 076 kWh	38 108 kWh	54 580 kWh	5 343 kWh	13 865 kWh
Pompa ciepła	5,0 kW (A2/W35)	14,4 kW (A2/W35)	30,2 kW (A2/W35)	5,0 kW (A2/W35)	5,0 kW (A2/W35)
Wykonane symulacje	M1–M4	M1–M4	M1–M4	M1–M5	M1–M5

Każda analiza obejmowała wyniki trzech symulacji opisanych poniżej:

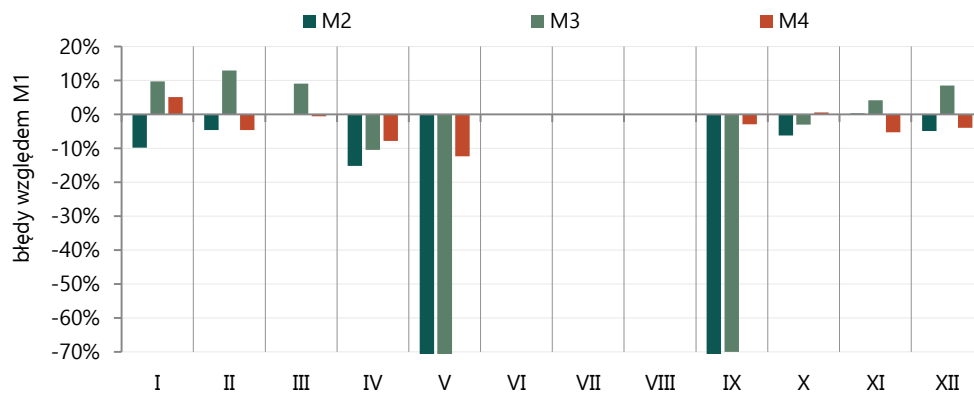
- (1) model M1 – symulacja wykonana z zastosowaniem modelu godzinowego uwzględniającego miesięczne zmiany profilu zapotrzebowania na energię do ogrzewania;

- (2) model M2 – symulacja wykonana z zastosowaniem modelu godzinowego, w którym profil zmian chwilowego obciążenia cieplnego budynku obliczany jest na podstawie rocznej wartości zapotrzebowania na energię do ogrzewania; analogicznie do metody opisanej w normie EN 15316-4-2 [17];
- (3) model M3 – symulacja wykonana z zastosowaniem modelu godzinowego, w którym profil zmian chwilowego obciążenia cieplnego budynku obliczany jest na podstawie wartości obliczeniowej mocy grzewczej budynku; analogicznie do metody opisanej w normie EN 14825 [16];
- (4) model M4 – symulacja wykonana z zastosowaniem modelu miesięcznego, szczegółowo opisanego w niniejszym rozdziale pracy;
- (5) model M5 – symulacja wykonana z zastosowaniem modelu godzinowego, w którym profil zmian chwilowego obciążenia cieplnego budynku przyjęto na podstawie danych o godzinowych zmianach zapotrzebowania na energię w budynku uzyskanych z programu *EDSL-TAS*; symulacja ta została wykonana tylko w analizach 4 i 5.

4.2 Wyniki i dyskusja

Analiza 1, 2 i 3

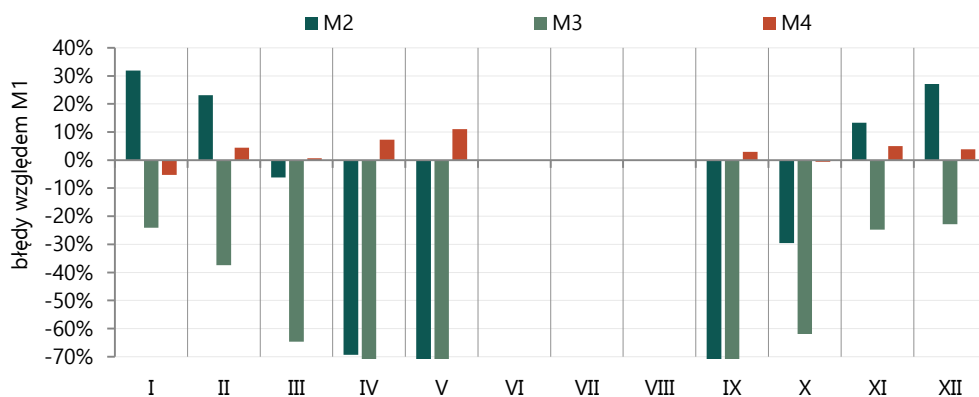
Na rysunku 27 zamieszczono porównanie błędów wartości $SCOP_m$ uzyskanych z wykorzystaniem modeli M2, M3, M4 wobec wartości wynikających z symulacji przeprowadzonych z zastosowaniem modelu M1 dla analizy 1.



Rysunek 27. Błąd wartości $SCOP_m$ dla modeli M2, M3 i M4 względem modelu M1 dla analizy 1

Na rysunku 28 zamieszczono porównanie błędów wartości zapotrzebowania na energię elektryczną przez system pompy ciepła uzyskane z wykorzystaniem modeli M2, M3, M4 z wartościami wynikającymi z symulacji przeprowadzonych z zastosowaniem modelu M1 dla analizy 1. Korelacja pomiędzy wynikami modelu M4 i M1 jest

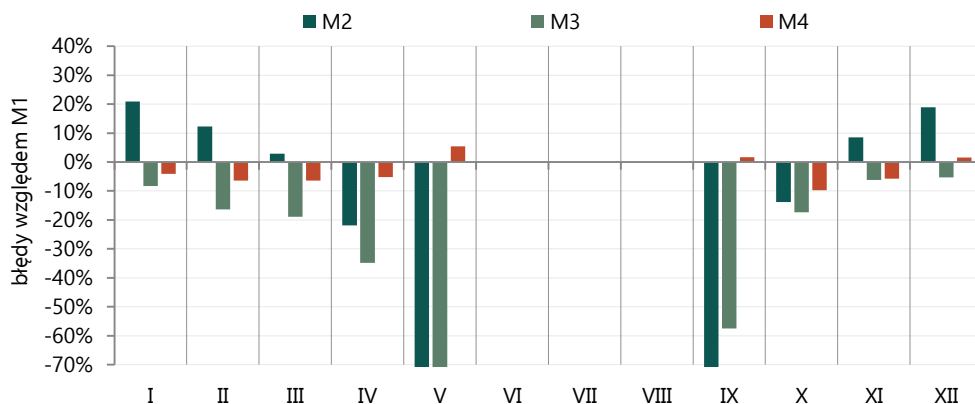
dobra, średnioroczny błąd wyniku wartości $SCOP$ wynosi -1% , a wartości zapotrzebowania na energię elektryczną $+1\%$. Maksymalny błąd w wynikach miesięcznych osiągnął -12% (w wartości $SCOP$ dla maja). Dla pozostałych miesięcy błędy są znacznie niższe, wynoszą od $\pm 1\%$ do $\pm 7\%$. Różnica pomiędzy wynikami dla modeli M2 i M3 a M1 pozwala stwierdzić, iż modele te nie dają prawidłowej odpowiedzi, szczególnie w okresach cieplejszych. Błędy modelu M2 względem wyników dla M1 wynoszą średniorocznie dla $SCOP$ 2% , a dla energii elektrycznej: -41% . Błędy modelu M2 względem wyników dla M1 wynoszą średniorocznie dla $SCOP$ 13% , a dla energii elektrycznej: 12% . Do zastosowań w symulacjach miesięcznych profile te nie znajdują zastosowania, błędy sięgają ponad 100% . Natomiast zastosowanie opisanego w tym rozdziale pracy modelu miesięcznego M4 jest uzasadnione i daje podobne rezultaty jak symulacja godzinowa M1.



Rysunek 28. Błąd wartości zapotrzebowania na energię elektryczną przez system pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S^{(m)}}$) w kolejnych miesiącach dla modeli M2, M3, i M4 względem modelu M1 dla analizy 1

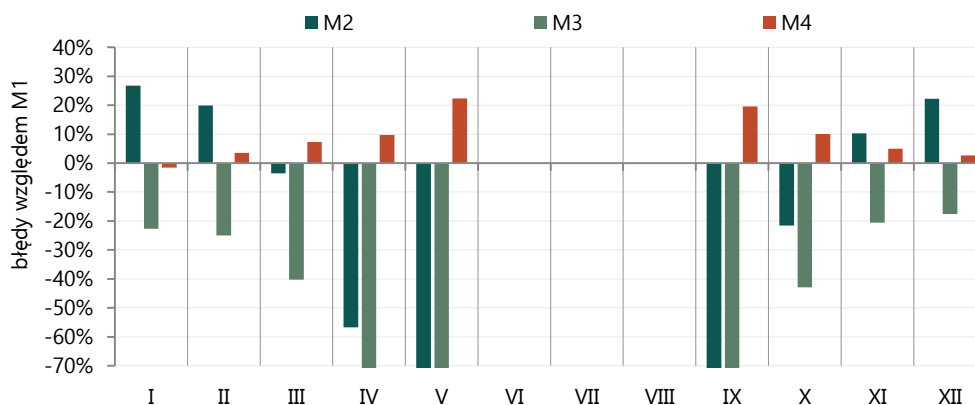
Na rysunku 29 zamieszczono porównanie błędów wartości zapotrzebowania na energię elektryczną przez system pompy ciepła uzyskane z wykorzystaniem modeli M2, M3, M4 wobec wartości wynikających z symulacji przeprowadzonych z zastosowaniem modelu M1 dla analizy 2. Korelacja pomiędzy wynikami modelu M4 i M1 jest zadowalająca, średnioroczny błąd wyniku tej wartości wynosi -4% . Maksymalny błąd w symulacji miesięcznej nie przekroczył 10% . Różnica pomiędzy wynikami dla modeli M2 i M3 a M1 pozwala stwierdzić, iż modele te nie dają prawidłowej odpowiedzi, szczególnie w okresach cieplejszych. Błędy modelu M2 względem wyników dla M1 wynoszą średniorocznie -15% . Błędy modelu M3 względem wyników dla M1 wynoszą średniorocznie $+6\%$. Te relatywnie poprawne wyniki w wartościach rocznych wynikają ze znoszących się wzajemnie błędów dodatnich i ujemnych w kolejnych miesiącach roku. Należy stwierdzić, że do zastosowania w symulacjach miesięcznych profile te nie znajdują zastosowania, błędy sięgają około 70% . Natomiast zastosowanie opisanego

w tym rozdziale pracy modelu miesięcznego M4 jest uzasadnione i daje podobne rezultaty jak symulacja godzinowa M1.



Rysunek 29. Błąd wartości zapotrzebowania na energię elektryczną przez system pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S^{(m)}}$) w kolejnych miesiącach dla modeli M2, M3, i M4 względem modelu M1 dla analizy 2

Na rysunku 30 zamieszczono porównanie błędów wartości zapotrzebowania na energię elektryczną przez system pompy ciepła uzyskane z wykorzystaniem modeli M2, M3, M4 wobec wartości wynikających z symulacji przeprowadzonych z zastosowaniem modelu M1 dla analizy 3.



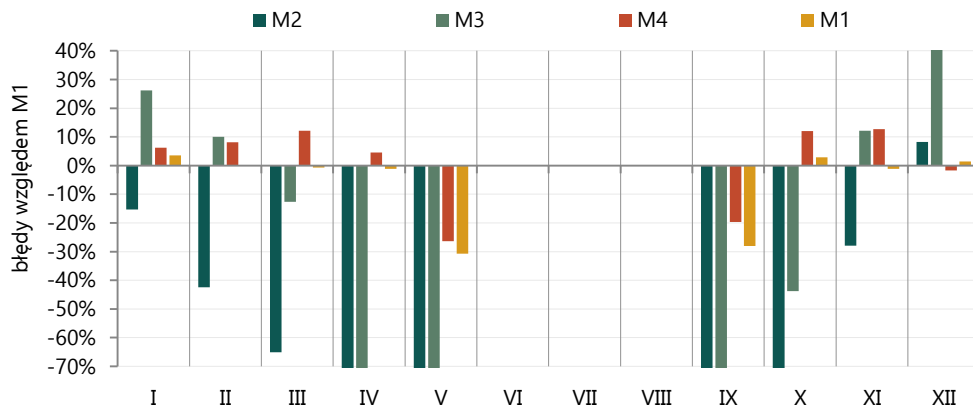
Rysunek 30. Błąd wartości zapotrzebowania na energię elektryczną przez system pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S^{(m)}}$) w kolejnych miesiącach dla modeli M2, M3, i M4 względem modelu M1 dla analizy 3

Korelacja pomiędzy wynikami modelu M4 i M1 jest zadowalająca, średnioroczny błąd wyniku tej wartości wynosi 4%. Błędy w wartościach miesięcznych są niskie dla wszystkich miesięcy z wyjątkiem maja i września. Budynek, dla którego prowadzono symulacje w analizie 3, charakteryzuje się bardzo wysokim udziałem zysków ciepła od

naśloniecznienia, co skutkuje nieco podwyższonymi błędami w wynikach obliczeń z zastosowaniem modelu miesięcznego M4 względem wyników z zastosowaniem modelu godzinowego M1 dla tej analizy.

Analizy 4 i 5

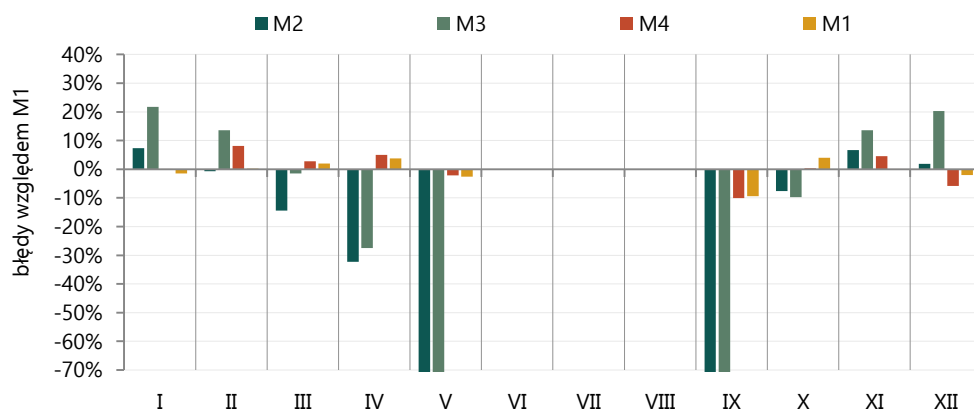
Na rysunku 31 zamieszczono porównanie błędów wartości zapotrzebowania na energię elektryczną przez system pompy ciepła uzyskane z wykorzystaniem modeli M1, M2, M3, M4 wobec wartości wynikających z symulacji przeprowadzonych z zastosowaniem modelu M5 (profil godzinowy opracowany w programie *EDSL-TAS*) dla analizy 4. Korelacja pomiędzy wynikami modelu M4 i M1 jest zadowalająca. Ich porównanie z wynikami symulacji na godzinowym profilu obciążenia cieplnego (M5) pozwala stwierdzić, iż dają one podobne rezultaty. Wyniki te potwierdzają, że uproszczenie profilu energii poprzez opracowanie go na podstawie miesięcznego zapotrzebowania na energię nie pogarsza znacząco wyników symulacji pracy pompy ciepła powietrze/woda, a model miesięczny nie daje może tak dobrych rezultatów jak symulacja godzinowa, ale nie są to wyniki dyskwalifikujące ten sposób obliczeń. Podkreślić należy, iż budynek, dla którego prowadzono symulację w analizie 4, należy zakwalifikować do grupy obiektów najbardziej problematycznych do symulacji uproszczonych, tj. udział zysków ciepła od naśloniecznienia w bilansie energetycznym budynku jest bardzo wysoki.



Rysunek 31. Błąd wartości zapotrzebowania na energię elektryczną przez system pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S^{(M)}}$) w kolejnych miesiącach dla modeli M1, M2, M3, i M4 względem modelu M5 dla analizy 4

Na rysunku 32 zamieszczono porównanie błędów wartości zapotrzebowania na energię elektryczną przez system pompy ciepła uzyskane z wykorzystaniem modeli M1, M2, M3, M4 wobec wartości wynikających z symulacji przeprowadzonych z zastosowaniem modelu M5 dla analizy 5. Korelacja pomiędzy wynikami modelu M4 i M1 jest zadowalająca. Ich porównanie z wynikami symulacji na podstawie godzinowego

profilu obciążenia cieplnego (M5) pozwala stwierdzić, iż dają one zbliżone rezultaty. Różnica pomiędzy wynikami dla modeli M2 i M3 a M5 pozwala stwierdzić, iż modele te w przeprowadzonej analizie dały dość poprawną odpowiedź dla miesięcy zimowych. Powodem większej niż w poprzednich przypadkach zgodności wyników uzyskanych na podstawie obliczeń z wykorzystaniem tych modeli z wynikami szczegółowej analizy jest niski udział zysków ciepła od nasłonecznienia w bilansie energetycznym budynku w analizie 5. Zgodność profili obciążenia cieplnego pozwoliła zachować poprawność rezultatów dla większej liczby miesięcy.



Rysunek 32. Błąd wartości zapotrzebowania na energię elektryczną przez system pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S}^{m}$) w kolejnych miesiącach dla modeli M1, M2, M3, i M4 względem modelu M5 dla analizy 5

4.3 Podsumowanie

Rozdział III pracy zawiera opis autorskiej metody do obliczania miesięcznej efektywności pracy systemu pompy ciepła powietrze/woda stosowanej do ogrzewania budynku. Podstawowymi danymi wejściowymi do obliczeń są: miesięczna wartość zapotrzebowania na energię końcową do ogrzewania budynku, temperatury: minimalna, maksymalna i średnia, powietrza zewnętrznego w każdym miesiącu oraz dane na temat wartości COP stosowanej pompy ciepła powietrze/woda opracowane zgodnie z wytycznymi EN 14511 [11]. Dokonano sprawdzenia wyników uzyskiwanych z obliczeń na podstawie zaproponowanego modelu miesięcznego względem obliczeń z modeli w kroku godzinowym dla dwóch skrajnych sposobów tworzenia profili obciążenia cieplnego: na podstawie danych rocznych (M2, M3) i miesięcznych (M1). Stwierdzono, iż zgodność odpowiedzi zaproponowanego modelu miesięcznego (M4) z dokładnymi symulacjami godzinowymi (M1) jest bardzo dobra i znacząco lepsza niż dla modeli obliczanych z wykorzystaniem profili obciążenia cieplnego utworzonych na podstawie projektowego obciążenia cieplnego (M2) czy rocznego zapotrzebowania na energię do ogrzewania budynku (M3). Dodatkowo sprawdzono zgodność wyników z modelu mie-

sięcznego (M4) względem wyników z modelu godzinowego obliczanego na dokładnym profilu obciążenia cieplnego wynikającym z symulacji godzinowych pracy budynku (M5). Uzyskano dobrą zgodność rezultatów, co potwierdza, że opracowany model miesięczny spełnia postawione założenia.

MODELOWANIE EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ POMP CIEPŁA POWIETRZE/WODA WSPÓŁPRACUJĄCYCH Z SYSTEMAMI PRZYGOTOWANIA CIEPŁEJ WODY UŻYTKOWEJ

1. Efektywność energetyczna systemu pomp ciepła powietrze/woda

1.1 Współpraca pompy ciepła z systemem przygotowania ciepłej wody użytkowej

Sezonową efektywność energetyczną systemu pompy ciepła powietrze/woda stosowanej jako źródło ciepła dla systemu przygotowania ciepłej wody użytkowej oblicza się, zestawiając energię cieplną dostarczoną do układu c.w.u. w analizowanym okresie (ΣQ_W) z energią elektryczną dostarczoną do systemu pompy ciepła w tym samym okresie (ΣQ_{EL}), co opisuje poniższe równanie:

$$SCOP = \frac{\Sigma Q_W}{\Sigma Q_{EL}}$$

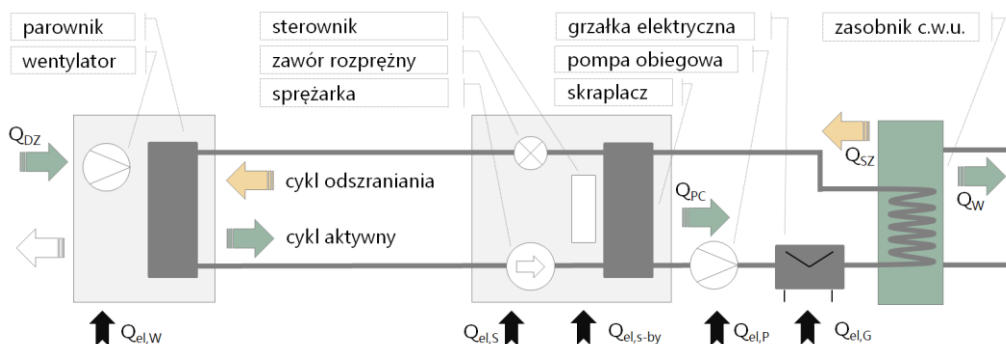
Energia cieplna, jaką ma dostarczyć pompa ciepła w zadanej jednostce czasu, wynika z zapotrzebowania na energię użytkową systemu c.w.u. (ΣQ_{CWU}), sprawności magazynowania (η_m) oraz przesyłu (η_p) i jest opisana poniższym wzorem:

$$\Sigma Q_W = \frac{\Sigma Q_{CWU}}{\eta_m \cdot \eta_p}$$

Doboru pompy ciepła powietrze/woda na potrzeby układu przygotowania c.w.u. dokonuje się przy założeniu, iż w systemie niezbędne jest dodatkowe źródło energii, którym może być grzałka elektryczna (układ monoenergetyczny) lub źródło ciepła korzystające z innego nośnika energii (układ biwalentny). Jeśli układ jest monoenergetyczny, zużycie energii elektrycznej przez system pompy ciepła powietrze/woda ($\Sigma Q_{EL,S}$) jest wynikiem sumowania energii dostarczonej do pompy ciepła (ΣQ_{EL}) i energii dostarczonej do grzałki elektrycznej ($\Sigma Q_{el,G}$). Jeśli układ jest biwalentny, energia cieplna dostarczona za pośrednictwem innego nośnika nie jest uwzględniana w wartości $SCOP$.

Schemat systemu przygotowania c.w.u. z pompą ciepła powietrze/woda wraz ze stosownymi oznaczeniami przedstawiono na rysunku 33. Przeważająca część energii elektrycznej dostarczanej do systemu pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S}$) kierowana jest do napędu sprężarki pompy ciepła ($\Sigma Q_{el,S}$). W szczegółowej analizie nie można jednak pomijać innych celów dostawy tej energii, takich jak: zasilanie wentylatorów ($\Sigma Q_{el,W}$), zasilanie

systemu podtrzymania pracy pompy ciepła ($\Sigma Q_{el,s-by}$), zasilanie pompy obiegowej ($\Sigma Q_{el,P}$) oraz grzałki elektrycznej ($\Sigma Q_{el,G}$). Należy również zauważyć, że pracę pompy ciepła powietrze/woda charakteryzuje cykliczność. Związana jest ona ze sposobem regulacji mocy urządzenia, minimalnym czasem pracy sprężarki i koniecznością okresowego odszraniania wymiennika po stronie dolnego źródła energii (parownika). Zasadniczo cykle te można sklasyfikować jako cykle pracy aktywnej i pracy w trybie stand-by. Dodatkowo cykle pracy aktywnej należy podzielić na takie, w których zachodzi proces odszraniania wymiennika dolnego źródła, i takie, w których proces ten nie występuje.



Rysunek 33. Schemat systemu pompy ciepła powietrze/woda stosowanej do przygotowania c.w.u.

Pompa ciepła powietrze/woda nie może pracować jako układ bezpośredniego przygotowania c.w.u. Przyczyną tego jest konieczność ograniczania mocy grzewczej urządzenia, sposób regulacji tej mocy, jak i konieczność zachowania minimalnego cyklu pracy sprężarki. System przygotowania c.w.u. współpracujący z pompą ciepła powietrze/woda wymaga więc zainstalowania zasobnika. Zasobnik powinien mieć możliwość zgromadzenia odpowiedniej ilości ciepłej wody (stosownie do przewidywanego rozbioru maksymalnego), a pompa ciepła powinna generować moc grzewczą, która pozwoli uzupełniać powstały w zasobniku deficyt energii przed pojawieniem się kolejnego rozbioru maksymalnego. Należy zauważyć, iż dla systemów, w których pompa ciepła jest źródłem energii zarówno dla instalacji c.w.u., jak i dla instalacji c.o., pojawia się dodatkowy problem. Przerwa w pracy systemu grzewczego, związana z przełączeniem się pompy ciepła w tryb przygotowania c.w.u., nie powinna być odczuwalna przez jego użytkowników⁹.

⁹ Pompy ciepła powietrze/woda pracują na cele c.w.u. i c.o. najczęściej jako układ dwufunkcyjny, tj. albo w trybie ogrzewania budynku, albo w trybie przygotowania c.w.u. Wynika to z konieczności optymalizacji wartości temperatury czynnika zasilającego systemy grzewcze.

Wykonanie obliczeń wartości $SCOP$ wymaga określenia wielkości COP w przyjętym kroku obliczeniowym¹⁰. Obecność zasobnika upraszcza nieco wyznaczenie wartości COP pompy ciepła powietrze/woda pracującej w trybie przygotowania c.w.u. w stosunku do analizy dla systemów centralnego ogrzewania. Uproszczenie to polega na tym, iż nie ma konieczności regulacji mocy grzewczej pompy ciepła. Urządzenie pracować będzie z maksymalną dostępną mocą, a w momencie naładowania zasobnika wyłączy się lub przejdzie w inny tryb pracy. Wyłączenie pompy ciepła skutkować będzie wyłączeniem wszystkich systemów. Dlatego tryb stand-by, tak problematyczny w systemach grzewczych jako element regulacji mocy grzewczej urządzenia, będzie zdecydowanie mniej energochłonny i może być pominięty w analizie. Zestawy komponentów pobierających energię w poszczególnych trybach pracy pompy ciepła pracującej na cele c.w.u. zestawiono w tabeli 12.

Tabela 12. Zużycie energii elektrycznej przez pompę ciepła powietrze/woda w trybie przygotowania c.w.u. w różnych cyklach pracy

	Cykl aktywny	Cykl stand-by	Cykl odszraniania
Sprężarka	+		+
Wentylatory	+		
Pompa obiegowa	+		+
Układ automatycznej regulacji	+	+	+
Grzałka elektryczna*	+		

*opcjonalnie

Oprócz obliczenia wartości COP konieczne jest odniesienie profilu chwilowego zapotrzebowania na moc układu c.w.u. (Q_W) do profilu obciążenia układu pompy ciepła (Q_{PC}). Wartość $SCOP$ jest wynikiem podzielenia energii cieplnej dostarczonej do systemu przygotowania c.w.u. (ΣQ_W) przez sumę energii elektrycznej dostarczonej do systemu pompy ciepła (ΣQ_{EL}). Chwilowa wartość zapotrzebowania na moc elektryczną (Q_{EL}), będącą podstawą do obliczenia okresowego zużycia energii (ΣQ_{EL}), zdefiniowana jest stosunkiem chwilowej mocy grzewczej dostarczanej do zasobnika c.w.u. przez pompę ciepła (Q_{PC}) do chwilowej wartości COP :

$$Q_{EL} = \frac{Q_{PC}}{COP}$$

Problem, który zdecydowano się rozważyć w niniejszym rozdziale pracy, dotyczy wyznaczania profilu obciążenia cieplnego pompy ciepła powietrze/woda wynikającego z pracy układu przygotowania ciepłej wody użytkowej. Zagadnienie profilowania zużycia ciepłej wody użytkowej jest szeroko dyskutowane w literaturze [52, 53, 54, 55, 56,

¹⁰ Dostępne możliwości w zakresie doboru kroku obliczeniowego do analizy $SCOP$ systemu pompy ciepła powietrze/woda omówiono w rozdziale I.

57]. Profil ten z powodów nieprzewidywalności zużycia c.w.u. musi zawierać pewnego rodzaju uproszczenia. Stawiane pytanie brzmi: jakie uproszczenie jest dopuszczalne, aby nie zaburzyło całkowicie charakteru pracy układu przygotowania c.w.u., a uzyskane wyniki symulacji efektywności pompy ciepła powietrze/woda były poprawne?

1.2 Chwilowa wartość COP pompy ciepła

Podstawą do obliczeń chwilowej wartości COP oraz mocy pompy ciepła (Q_{PC}) są najczęściej dane dostarczone przez producenta pompy ciepła. W niniejszej pracy wykorzystywane są dane pozyskiwane zgodnie z zaleceniami normy EN 14511 [11]. Szerzej temat ten omówiono w rozdziale II, w punkcie 1.2. W przypadku systemów c.w.u. zagadnienie ulega znaczącemu uproszczeniu. Deklarowana wartość COP_d urządzenia wyznaczona na podstawie danych uzyskanych z [11] dotyczy sytuacji, gdy pompa ciepła pracuje przy pełnym obciążeniu w cyklu aktywnym, co jest reprezentatywne dla współpracy pompy ciepła z systemem c.w.u.

1.3 Zapotrzebowanie na energię do przygotowania ciepłej wody użytkowej

Metoda obliczania zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. zaprezentowana w normie EN 15316-3-2 [58], powiązana tematycznie z analizami pracy pomp ciepła, bazuje na obliczeniu dobowego zapotrzebowania na energię (ΣQ_{cwu}^d) na podstawie dobowego zużycia ciepłej wody (V_{cwu}^d) i różnicy temperatur pomiędzy wodą zimną (T_{WZ}) a wodą ciepłą (T_{CWU}):

$$Q_{CWU}^d = V_{CWU}^d \cdot c_w \cdot (T_{CWU} - T_{WZ}).$$

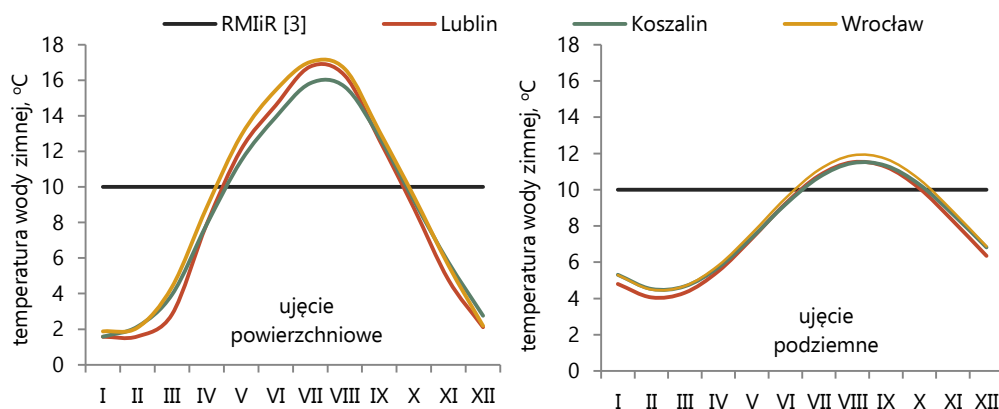
Zależność ta umożliwia wykonanie obliczeń w kroku tygodniowym, miesięcznym i rocznym poprzez pomnożenie przez odpowiednią liczbę dni, co wykorzystywane jest w wielu krajowych rozporządzeniach dotyczących charakterystyki energetycznej. W krajach, takich jak Niemcy, Włochy, Dania czy Wielka Brytania, obliczenia przeprowadzane są w kroku miesięcznym, natomiast w Polsce stosowana jest roczna metoda obliczeń zapotrzebowania na energię dla przygotowania c.w.u. [3]. W niniejszej rozprawie zastosowano metodę opisaną w pracy [59]. W zakresie koniecznym dla zrozumienia analizowanego tematu doświadczenia i badania zamieszczone w pracy [59] zostały przytoczone w niniejszym rozdziale.

1.4 Profil zmian temperatury wody zimnej

Zapisy normy [58] zdecydowanie podkreślają, iż w przypadku konieczności wykonania szczegółowych analiz zapotrzebowania na energię potrzebną do przygotowania c.w.u. należy w nich uwzględnić zmiany temperatury wody zimnej w ciągu roku. Zmiany te są skorelowane ze średnią miesięczną temperaturą powietrza zewnętrznego [60,

61, 62]. W przypadku braku informacji o zmianach tej temperatury w normie [58] sugerowane jest przyjęcie wartości T_{wz} wynoszącej 10°C , co zostało wdrożone w Polsce [3].

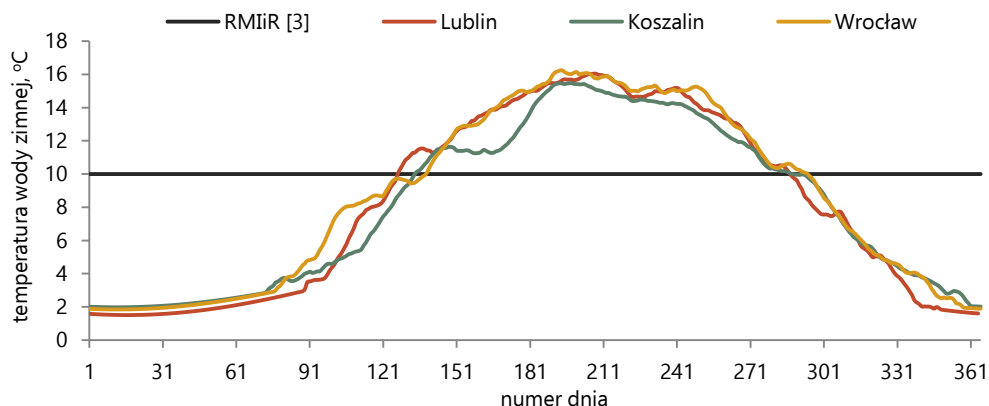
W niniejszej pracy do dalszych analiz przyjęto wartości temperatury wody zimnej obliczone na podstawie modeli zaproponowanych w pracy [59]. Modele te pozwalają obliczyć wartość temperatury wody zimnej na wejściu do budynku w kroku miesięcznym, dobowym i godzinowym w zależności od wartości temperatury powietrza zewnętrznego, głębokości posadowienia sieci wodociągowej oraz numeru dnia o najniższej temperaturze średniej powietrza zewnętrznego. Co ważne, model ten uwzględnia wpływ sposobu ujęcia wody przez zakład uzdatniania (powierzchniowe lub podziemne) na wartość temperatury wody zimnej u odbiorcy końcowego. Zmiany temperatury wody w wodociągu dla Wrocławia, Lublina i Koszalina obliczone z zastosowaniem modeli zaproponowanych w [59] przedstawiono na rysunkach 34 i 35.



Rysunek 34. Zmiany temperatury wody wodociągowej w wybranych miastach Polski wyznaczone na podstawie modelu miesięcznego [59]

Rysunek 34 obrazuje zmiany temperatury wody wodociągowej w trzech wybranych miastach Polski dla obu sposobów ujęcia wody: powierzchniowego i podziemnego. Różnica w profilu temperaturowym jest znacząca, co uzasadnia uwzględnianie tych informacji w obliczeniach energetycznych systemów c.w.u., jeśli pożądana jest prawdziwa informacja o miesięcznym profilu zapotrzebowania na energię [63]. Średnia roczna temperatura wody zimnej obliczona z tego modelu wynosi od $8,5^{\circ}\text{C}$ dla Lublina do $9,1^{\circ}\text{C}$ dla Wrocławia i jest nieco niższa niż zalecana przez [3] wartość 10°C . Zakres zmian dla powierzchniowego ujęcia wody zimnej obejmuje wartości od 2°C (w okresie zimowym) do 17°C (w okresie letnim). Natomiast dla ujęcia podziemnego jest mniejszy, wartości temperatury wody zimnej wynoszą od 4°C w okresie zimowym do 12°C w okresie letnim. Woda zimna pobierana z ujęć podziemnych charakteryzuje się nieco niższą temperaturą średnią; dla analizowanych lokalizacji od $7,8^{\circ}\text{C}$ do $8,2^{\circ}\text{C}$.

Na rysunku 35 przedstawiono profil zmian temperatury wody zimnej dla ujęcia powierzchniowego obliczony w kroku dobowym. Widoczne jest nieco większe zróżnicowanie wartości w stosunku do modelu miesięcznego, jednak ogólny trend nie ulega zaburzeniu. W pracy [59] wykazano, iż temperatura wody zimnej nie ulega istotnym zmianom w kolejnych godzinach doby i model dobowy stosowany powinien być również dla obliczeń w kroku godzinowym.

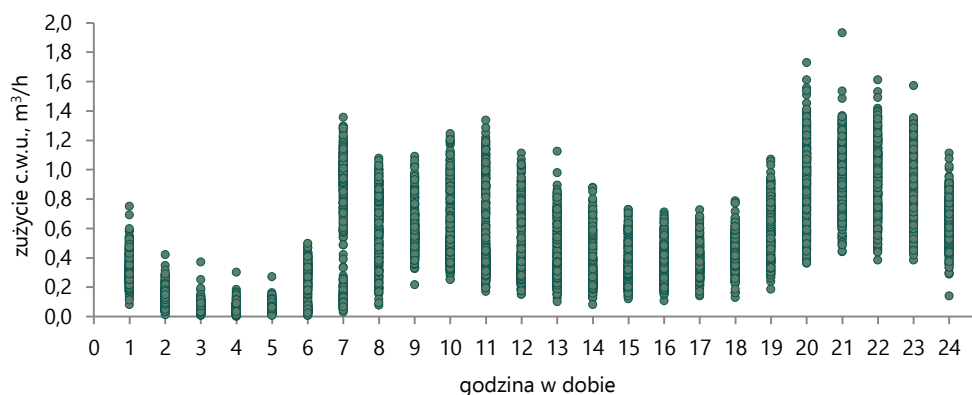


Rysunek 35. Zmiany temperatury wody wodociągowej w wybranych miastach Polski wyznaczone na podstawie modelu dobowego [59]

Modele zmian temperatury wody zimnej opisane w [58] zostały zastosowane w niniejszej pracy. Sprawdzone, czy uwzględnienie tych zmian w sposób istotny wpływa na wyniki analizy pracy pompy ciepła powietrze/woda jako źródła ciepła dla systemu c.w.u. wobec przyjęcia stałej wartości tej temperatury w ciągu całego roku.

1.5 Profil zużycia ciepłej wody użytkowej

Profile zużycia ciepłej wody użytkowej na potrzeby niniejszej pracy zaczerpnięto również z pracy [59]. Rzeczywisty profil godzinowy wyznaczony został na podstawie pomiarów prowadzonych w niskotemperaturowej kotłowni gazowej zasilającej trzy budynki wielorodzinne. Łączna powierzchnia ogrzewana budynków wynosi 7426 m². Pomiarów prowadzone były w latach 2012–2015. Na podstawie zebranych pomiarów opracowano profil zużycia ciepłej wody użytkowej w kroku godzinowym. Profil ten zaprezentowano na rysunku 36. Dane te wskazują, iż warto podczas prognozowania opierać się na konkretnych godzinach w ciągu doby. Jednak widoczny rozrzut danych w poszczególnych godzinach uniemożliwia precyzyjne prognozowanie godzinowego zużycia ciepłej wody użytkowej z pomocą jednego profilu zużycia wody w każdym dniu w roku [59, 64].



Rysunek 36. Zużycie ciepłej wody użytkowej w budynku mieszkalnym w poszczególnych godzinach doby (dane pomiarowe z jednego roku) [59]

W niniejszej pracy sprawdzono, jak dokładny powinien być profil zużycia c.w.u., aby poprawnie odwzorować pracę układu c.w.u. na potrzeby symulacji pracy pompy ciepła powietrze/woda. Profile poddawane analizie zaprezentowano na rysunkach 37 i 38 oraz w tabelach 13 i 14. Podane w nich wartości s_m i s_d należy odnosić do średniego dobowego zużycia ciepłej wody w roku (V_{CWU^d}).

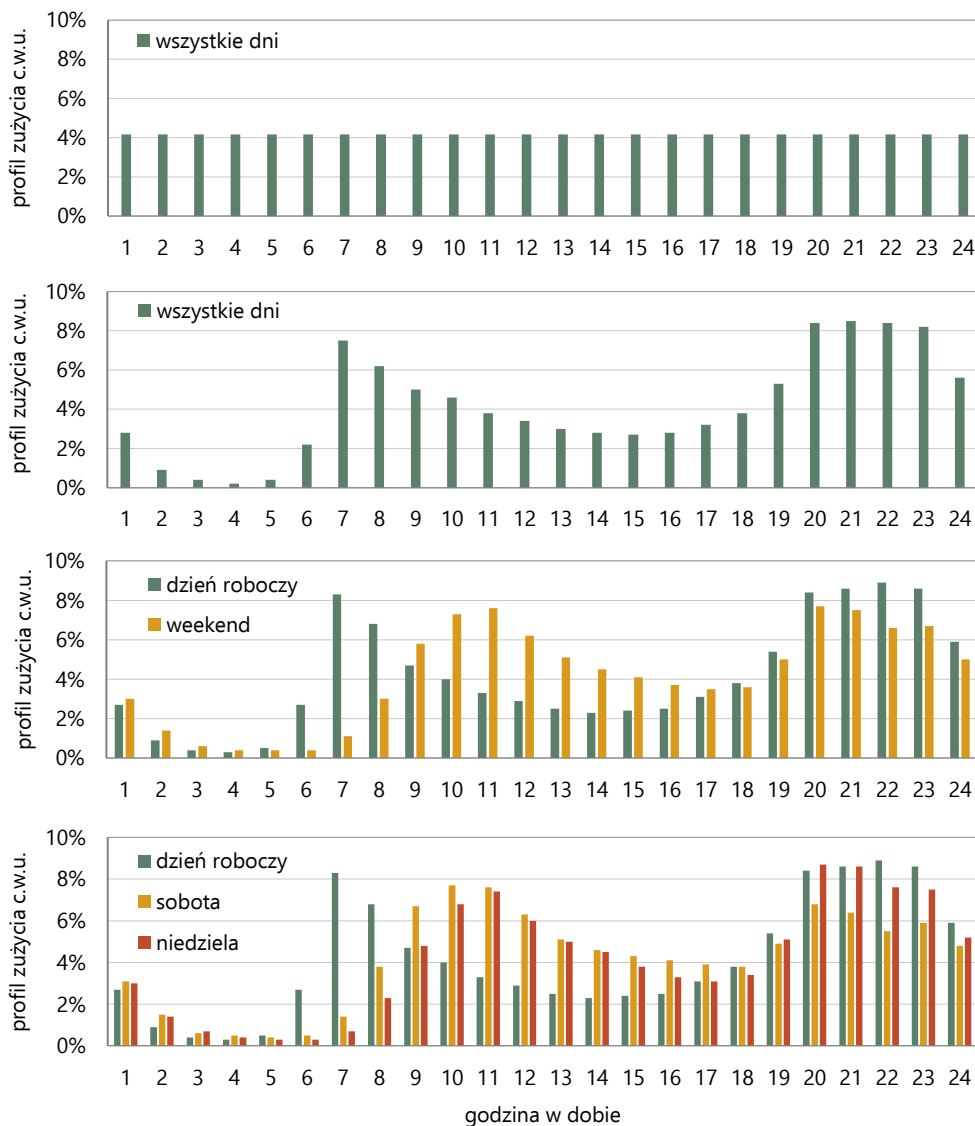
Tabela 13. Profil miesięczny zużycia ciepłej wody użytkowej w budynku mieszkalnym

Miesiąc	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
S_m	1,10	1,09	1,11	1,07	1,01	0,92	0,88	0,77	0,93	1,00	1,04	1,07

Tabela 14. Profil tygodniowy zużycia ciepłej wody użytkowej w budynku mieszkalnym

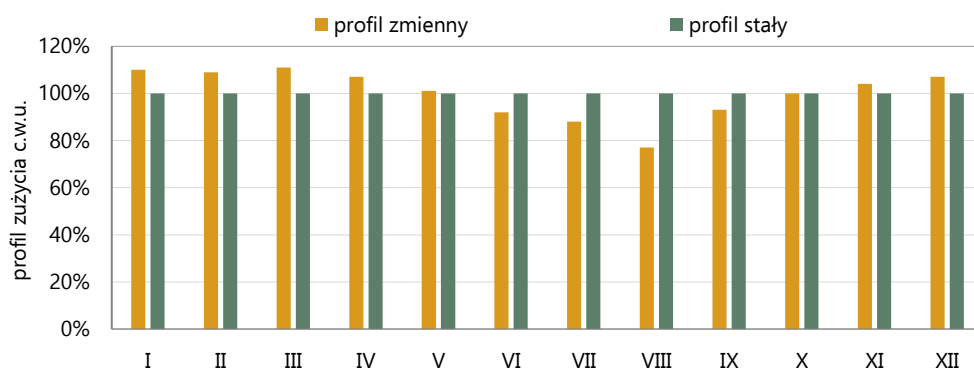
Dzień tygodnia	Poniedziałek	Wtorek	Środa	Czwartek	Piątek	Sobota	Niedziela
S_d	0,83	0,96	0,96	0,96	0,96	1,16	1,16

Rysunek 37 zawiera cztery profile godzinowe. Profil pierwszy (od góry) zakłada równomierny pobór c.w.u. w ciągu doby. Nie jest to założenie realne, ale to ono stosowane jest w najprostszyc analizach (w kroku temperaturowym) współpracy pompy ciepła powietrze/woda z układami przygotowania c.w.u. Profil drugi zakłada, że zmiany poboru c.w.u. są identyczne we wszystkich dniach tygodnia. Kolejny wykres rozróżnia dni robocze od dni wolnych od pracy. Czwarly profil rozdziela weekend na dwa osobne profile, profil dla dni roboczych pozostawiając bez zmian w stosunku do poprzedniego.



Rysunek 37. Profile godzinowe zużycia ciepłej wody użytkowej [59]

Oprócz zmian godzinowych niezmiernie ważne są sezonowe zmiany poboru c.w.u. W pracy [59] wykazano, iż są one znaczące. Na rysunku 38 pokazano różnicę pomiędzy profilem uwzględniającym zmiany miesięczne a założeniem o stałym poborze c.w.u. w kolejnych miesiącach roku. Różnice te zawierają się w zakresie od +10% w okresie zimowym do -22% w okresie letnim.



Rysunek 38. Profile miesięcznego zużycia ciepłej wody użytkowej [59]

1.6 Profil zapotrzebowania na energię do przygotowania ciepłej wody użytkowej

Do szczegółowej analizy mającej na celu sprawdzenie wpływu zastosowanego profilu zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. na wyniki symulacji pracy pompy ciepła powietrze/woda wybrano warianty scharakteryzowane w tabeli 15. Obliczenia zużycia wody w danej godzinie dokonywano na podstawie średniego zużycia dobowego c.w.u. korygowanego poprzez wartości s_m i s_d , a następnie rozkładanego na kolejne godziny w dobie według odpowiedniego dla danego przypadku profilu godzinowego.

Tabela 15. Warianty profili zapotrzebowania na energię przeznaczoną do przygotowania c.w.u.

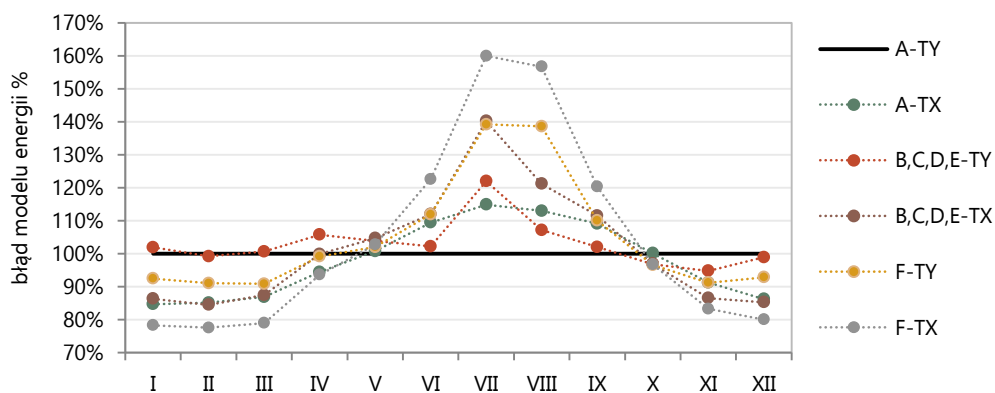
Profil zużycia ciepłej wody użytkowej	Model temperatury wody zimnej	Profil energii
Profil A – profil rzeczywisty (na podstawie pomiarów)	TY – temperatura zmienna (ujęcie powierzchniowe) TX – temperatura stała (10°C)	A-TY A-TX
Profil B – uwzględnia wartości s_m , s_d oraz 1 profil godzinowy	TY – temperatura zmienna (ujęcie powierzchniowe) TX – temperatura stała (10°C)	B-TY B-TX
Profil C – uwzględnia wartości s_m , s_d oraz 2 profile godzinowe	TY – temperatura zmienna (ujęcie powierzchniowe) TX – temperatura stała (10°C)	C-TY C-TX
Profil D – uwzględnia wartości s_m , s_d oraz 3 profile godzinowe	TY – temperatura zmienna (ujęcie powierzchniowe) TX – temperatura stała (10°C)	D-TY D-TX
Profil E – uwzględniający jedynie zmiany miesięczne s_m	TY – temperatura zmienna (ujęcie powierzchniowe) TX – temperatura stała (10°C)	E-TY E-TX
Profil F – stałe zużycie wody dla każdego dnia i godziny w roku	TY – temperatura zmienna (ujęcie powierzchniowe) TX – temperatura stała (10°C)	F-TY F-TX

Do analizy pracy układu pompy ciepła powietrze/woda zaproponowano 12 profili zapotrzebowania na energię do przygotowania ciepłej wody (tabela 15). Jako punkt odniesienia przyjęto profil A-TY. Profil ten opracowano na podstawie rzeczywistych pomiarów zużycia wody w badanych obiektach i przewidywanej temperatury wody zimnej obliczonej dla Wrocławia dla ujęcia powierzchniowego. W odniesieniu do tego

wariantu obliczono procentowe odchylenia ($\delta\Sigma Q_W^m$) miesięcznego zapotrzebowania na energię dla przygotowania ciepłej wody uzyskanego dla pozostałych profili. Odchylenia zostały obliczone zgodnie z poniższym wzorem:

$$\delta\Sigma Q_W^{m,profil\ sprawdzany} = \frac{\Sigma Q_W^{m,profil\ sprawdzany}}{\Sigma Q_W^{m,profil\ A-TY}}$$

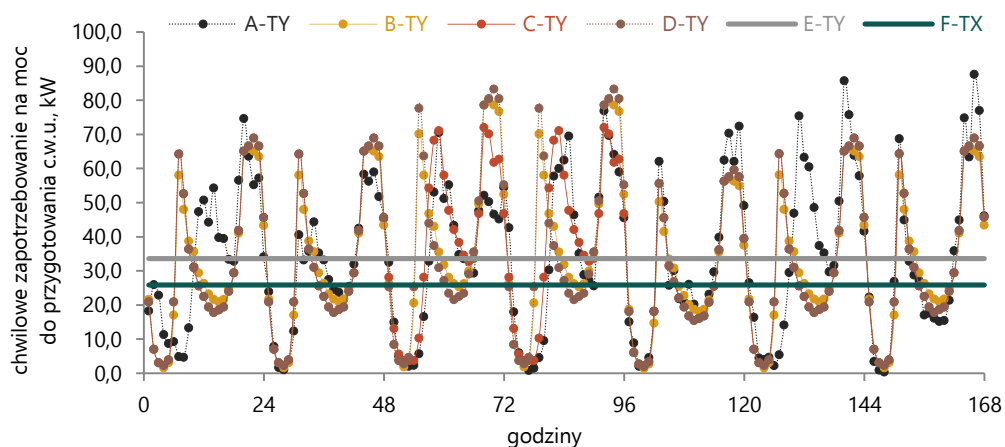
Wartości odchylenia miesięcznego zapotrzebowania na energię od wartości przyjmowanych jako poziom odniesienia dla różnych profili przedstawiono na rysunku 39. Znaczący błąd widoczny jest w wynikach uzyskanych dla profili, w których nie uwzględniono okresowych zmian zużycia wody. Błędy profilu F-TX w prognozie zapotrzebowania na energię do przygotowania ciepłej wody wynoszą od -22% w styczniu i lutym do $+60\%$ w lipcu. Uwzględnienie zmian temperatury wody zimnej poprawia wynik symulacji, profil F-TY charakteryzuje się zakresem błędów od -9% (w lutym) do $+39\%$ (w lipcu). Wpływ przyjęcia stałej temperatury wody zimnej w ciągu roku na zapotrzebowanie na energię potrzebną do przygotowania c.w.u. w stosunku do profilu odniesienia można zaobserwować w wynikach profilu A-TX. Różnica między wynikami A-TX a A-TY wynosi od -15% (w styczniu i lutym) do $+15\%$ (w lipcu). Najdokładniejsze wyniki symulacji uzyskano, stosując profile B, C, D i E, uwzględniające zmiany temperatury wody i zmiany okresowe w wartości jej zużycia. Maksymalny błąd dla nich wynosi $+22\%$ (w lipcu), zaś w okresie zimowym sięga do -5% (w listopadzie). W analizie miesięcznej nie można dostrzec różnic pomiędzy profilami B, C, D i E. Różnice te widoczne są dopiero w godzinowym profilu zapotrzebowania na energię, co pokazano na rysunku 40.



Rysunek 39. Odchylenia zapotrzebowania na energię do przygotowania ciepłej wody dla analizowanych modeli względem modelu A-TY

Na rysunku 40 przedstawiono zmiany zapotrzebowania na energię użytkową w kolejnych godzinach pierwszego tygodnia roku dla 6 z 12 analizowanych profili. Jak

można zauważyć, profile B, C, D stosunkowo dobrze odwzorowują profil rzeczywisty. Profil E nie odwzorowuje zmian godzinowych, gdyż uwzględnia jedynie zmiany sezonowe, czyli różne zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową w kolejnych miesiącach roku. Profil F również pokazuje stałą moc, aczkolwiek niższą, co wynika z zawyżonej względem realnej wartości temperatury wody zimnej i niższego od realnego zapotrzebowania na ciepłą wodę użytkową w tym okresie. Warto podkreślić, iż wszystkie przedstawione profile zapotrzebowania na moc grzewczą utrzymują się poniżej zapotrzebowania na moc średnią do przygotowania c.w.u., które dla badanego obiektu, zgodnie z normą PN-B-01706 [65], wynosi 84,5 kW. Moc maksymalna układu obliczona zgodnie z [65] wynosi 252,4 kW.



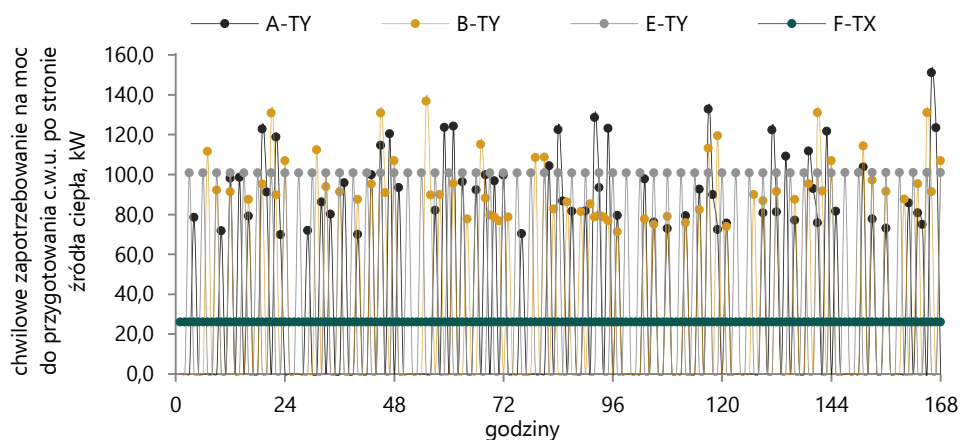
Rysunek 40. Przykładowe profile zapotrzebowania na moc grzewczą do przygotowania ciepłej wody użytkowej dla pierwszego tygodnia roku

Należy zauważyć, że przedstawiony profil zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. zostanie znacząco przekształcony poprzez wpływ zasobnika. W zależności od jego pojemności i dopuszczalnego czasu ładowania układu c.w.u. profil obciążenia po stronie urządzenia grzewczego, a więc wymagana moc grzewcza pompy ciepła powietrze/woda, może przyjąć znacząco inne wartości.

1.7 Akumulacja w systemie ciepłej wody użytkowej

Wpływ zasobnika na profil zapotrzebowania na energię po stronie źródła ciepła jest na tyle istotny, iż uwzględnienie go w analizie pracy pompy ciepła wydaje się kluczowe. Dla pierwszego tygodnia stycznia wykonano analizę pokazującą wpływ układu akumulacji o pojemności 3000 litrów na wartość obciążenia grzewczego układu pompy ciepła. Rysunek 41 wykonano przy założeniu czasu ładowania wynoszącego 1 h, dzięki czemu pokazano chwilowy deficyt energii w zbiorniku. Oczywiście jeśli istnieje możliwość, energia ta może być uzupełniana w czasie dłuższym niż 1 godzina. W sytuacji

skrajnej zapotrzebowanie na moc po stronie grzewczej osiągnie wartość stałą, co reprezentuje profil F-TX (jako wyjątek analizowany przy założeniu pełnej akumulacji energii). Moc ta musi być jednak dostarczana przez 24 h/d. Poprawność działania takiego układu uwarunkowana jest odpowiednią akumulacyjnością, która w analizowanym przypadku wynosiłaby około 7000 litrów. Dopiero taka objętość zasobnika umożliwia w badanym obiekcie rozdzielenie profilu dostawy energii od profilu jej rozbioru dla urządzenia grzewczego o mocy opisanej profilem F-TX. W rzeczywistych układach wymagana moc grzewcza pompy ciepła powietrze/woda kształtować się będzie pomiędzy tym profilem a profilem A-TY, natomiast dokładna jej wartość zależy będzie od dostępnego czasu pracy w trybie przygotowania c.w.u. i wielkości układu do magazynowania energii.



Rysunek 41. Przykładowe profile zapotrzebowania na moc grzewczą po stronie źródła ciepła dla pierwszego tygodnia roku (założenia: $V_z = 3000$ l, deficyt w zasobniku do uruchomienia układu grzewczego 44%, czas ładowania 1 h; wyjątek to profil F-TY analizowany przy założeniu układu z pełną akumulacją energii)

2. Metoda symulacji pracy systemu pompy ciepła powietrze/woda w kroku godzinowym

W niniejszym punkcie opisano główne składowe algorytmu do symulacji pracy pompy ciepła w trybie przygotowania ciepłej wody użytkowej w kroku godzinowym. W rozdziale IV symulacje z jego wykorzystaniem posłużyły do ustalenia wymaganej dokładności profilu zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. na takim poziomie, aby uzyskane z jego zastosowaniem wyniki symulacji charakteryzowały się dobrą zgodnością z symulacjami przeprowadzonymi na danych pomiarowych. W rozdziale V obliczenia te wspomagały proces tworzenia modelu do analizy pracy pompy ciepła w kroku miesięcznym.

2.1 Dane wejściowe

Do przeprowadzenia symulacji pracy pompy ciepła powietrze/woda pracującej w trybie przygotowania c.w.u. niezbędne są następujące dane:

T_{zew}^h – temperatura powietrza zewnętrznego w kolejnych godzinach roku, °C,

T_{CWU} – wymagana temperatura c.w.u., °C,

$T_{Z,W}$ – temperatura pracy pompy ciepła w trybie przygotowania c.w.u., °C,

T_{WZ}^m – temperatura wody zimnej w danym miesiącu, °C,

$\Sigma Q_{WZ}^{r,m,h}$ – roczne, miesięczne lub godzinowe zapotrzebowanie na energię do przygotowania c.w.u., kWh,

Q_{PC} – moc pompy ciepła wyznaczona według normy EN 14511 [11], kW,

COP – współczynnik efektywności pompy ciepła wyznaczony według [11],

$T_{min,PC}$ – minimalna temperatura powietrza zewnętrznego do pracy pompy ciepła, °C,

$T_{max,PC}$ – maksymalna temperatura czynnika grzewczego wytwarzana przez pompę ciepła, °C,

$Q_{el,G,max}$ – moc maksymalna grzałki elektrycznej, kW,

V_Z – objętość zasobnika c.w.u., l,

def_{PC} – deficyt energii w zasobniku do uruchomienia układu grzewczego, %,

def_G – deficyt energii w zasobniku do dodatkowego źródła energii cieplnej, %.

Wprowadzany do obliczeń profil zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. może być wynikiem pomiarów, symulacji godzinowych lub stosowania modeli uproszczonych, opisanych w punkcie 1 niniejszego rozdziału. Wartość temperatury wody zimnej może być przyjmowana jako stała lub zmienna. Wszystkie analizy wykonano przy założeniu, że dodatkowym źródłem energii jest grzałka elektryczna, stąd jako wartość wejściowa pojawia się jej moc maksymalna.

2.2 Chwilowa wartość COP pompy ciepła

Podstawowa (deklarowana) wartość COP_d obliczana jest z wykorzystaniem interpolacji i ekstrapolacji liniowej na podstawie danych pomiarowych uzyskanych z testów przeprowadzonych według zaleceń normy EN 14511 [11]. Danymi wejściowymi do modelu są temperatura zasilania układu ($T_{Z,W}$) oraz temperatura powietrza zewnętrznego (T_{zew}^h) w danej godzinie. Testy wykonywane według normy [11] obejmują wartości zmierzone przy pełnym obciążeniu urządzenia, co będzie odpowiadało rzeczywistym warunkom pracy, dlatego wartość COP^h jest równa COP_d^h .

2.3 Wymagana moc grzewcza układu przygotowania ciepłej wody użytkowej

Symulacja pracy układów magazynujących energię jest zagadnieniem trudnym, a do uzyskania precyzyjnej informacji o pracy takich systemów konieczne są analizy minutowe [66]. W niniejszej pracy zastosowanie takich symulacji nie jest możliwe ze względu na przyjęte założenia o docelowym, miesięcznym kroku obliczeniowym modelu. Na etapie analiz wstępnych pracę zasobnika c.w.u. zasymulowano zestawem równań bilansujących dostawę i pobór energii z układu na początku i na końcu każdego kroku obliczeniowego (godzinowego). Przyjęto trzy kluczowe parametry jako wystarczające do wykonania symulacji pracy zbiornika: objętość zasobnika (V_Z), deficyt energii w zasobniku powodujący uruchomienie układu grzewczego ($defPC$) oraz graniczny deficyt energii w zasobniku dla uruchomienia dodatkowego źródła energii ($defG$). Na podstawie godzinowego profilu zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. (Q_W^h) obliczany jest chwilowy deficyt energii w zasobniku (ΣQ_Z). W tym celu od wartości maksymalnej pojemności cieplnej zasobnika ($\Sigma Q_{Z,max}$) odejmowane jest zapotrzebowanie na energię do przygotowania c.w.u. (Q_W^h), które wystąpiło w poprzednich godzinach. Gdy deficyt ten przekroczy wartość $defPC$, to wartość tego deficytu uznawana jest za wartość chwilowego zapotrzebowania na moc grzewczą ($Q_{W,R}^h$). Uruchomienie układu grzewczego powoduje zmniejszanie deficytu na skutek dostawy energii z pompy ciepła (Q'_{PC}^h) oraz z dodatkowego źródła energii ($Q_{el,T}$). Jeśli pomimo dostawy energii z tych źródeł deficyt w zasobniku przekroczy wartość $defG$, to obliczana jest energia dodatkowa wynikająca z niedoboru mocy pompy ciepła w danej godzinie ($Q_{el,Q}$). Zasady obliczeń poszczególnych wartości mocy grzewczych opisano poniżej.

2.4 Chwilowa wartość mocy grzewczej pompy ciepła

Pierwszy etap obliczeń to ustalenie dostępnej mocy grzewczej pompy ciepła powietrze/woda (Q_{PC}^h). Jest ona obliczana poprzez interpolację/ekstrapolację danych pomiarowych uzyskanych na podstawie testów opisanych w normie EN 14511 [11] dla temperatury powietrza zewnętrznego i temperatury czynnika grzewczego na zasilaniu urządzenia w każdej godzinie roku. Procedurę ustalania rzeczywistej wartości mocy pompy ciepła (Q'_{PC}^h) opisuje poniższy algorytm.

Jeżeli $T_{zew}^h \leq T_{min,PC}$, wtedy $Q'_{PC}^h = 0$,

jeżeli $T_{zew}^h > T_{min,PC}$,

wtedy:

jeżeli $Q_W^h > 0$, wtedy $Q'_{PC}^h = Q_{PC}^h$,

inaczej $Q'_{PC}^h = 0$.

2.5 Chwilowa wartość mocy grzałki elektrycznej

Ustalenie mocy grzałki elektrycznej, gdy wymagana temperatura ciepłej wody użytkowej jest wyższa niż maksymalna temperatura pracy pompy ciepła, odbywa się następująco:

$$\begin{aligned} \text{jeżeli} \quad & T_{CWU} > T_{max,PC} - 3, \\ \text{wtedy} \quad & Q_{el,T^h} = (T_{CWU}^h - T_{max,PC} - 3) / (T_{CWU} - T_{WZ}^h) \cdot Q'_{PC^h}, \\ \text{inaczej} \quad & Q_{el,T^h} = 0. \end{aligned}$$

Ustalenie mocy grzałki elektrycznej, gdy moc grzewcza pompy ciepła jest zbyt mała, odbywa się następująco:

$$\begin{aligned} \text{Jeżeli} \quad & Q_{PC^h} < Q_W^h - Q_{el,T^h}, \text{ wtedy } Q_{el,Q^h} = Q_W^h - Q_{el,T^h} - Q_{PC^h}, \\ \text{inaczej} \quad & Q_{el,Q^h} = 0. \end{aligned}$$

Moc ta (Q_{el,Q^h}) ustalana jest tylko w sytuacji, gdy chwilowy deficyt energii w zasobniku (ΣQ_Z) przekroczy zadaną wartość deficytu granicznego do uruchomienia dodatkowego źródła energii (*defG*).

Całkowita moc grzałki elektrycznej:

$$Q_{el,G^h} = Q_{el,T^h} + Q_{el,Q^h}.$$

2.6 Ustalenie stanu układu na końcu kroku obliczeniowego

Dla określenia, czy i ile energii cieplnej przenoszone jest do następnego kroku obliczeniowego, algorytm sprawdza, czy suma mocy grzałki elektrycznej (Q_{el,G^h}) i pompy ciepła (Q'_{PC^h}) jest niższa niż wymagana moc układu (Q_{W,R^h}). Jeśli tak, to wylicza się dodatnią energię, która jest przenoszona na kolejną godzinę pracy układu ($Q_{W,dej^{h+1}}$) i uwzględniana w określaniu deficytu energii w zbiorniku (ΣQ_Z^{h+1}).

2.7 Czas pracy pompy ciepła w trybie przygotowania ciepłej wody użytkowej

Udział czasu pracy pompy ciepła w trybie przygotowania c.w.u. w danym kroku obliczeniowym wyznaczany jest na podstawie wzoru:

$$\tau_{PC^h} = (Q_W^h - Q_{el,G^h} - Q_{el,Q^h} - Q_{W,def}) / Q'_{PC^h}.$$

Jeżeli udział ten pomnoży się przez krok czasowy, w którym wykonywane są obliczenia, np. 60 minut, uzyskuje się czas pracy urządzenia w trybie przygotowania c.w.u. w analizowanym okresie.

2.8 Chwilowa wartość COP i okresowa wartość SCOP

Całość energii elektrycznej dostarczanej do pompy ciepła, z wyłączeniem energii dostarczanej do grzałki elektrycznej, wynosi:

$$Q_{el,PC^h} = (Q_{W^h} - Q_{el,G^h} - Q_{W,def}) / COP^h.$$

Wartość SCOP systemu pompy ciepła powietrze/woda w analizowanym okresie oblicza się jako:

$$SCOP = \sum Q_W / \sum (Q_{el,G} + Q_{el,PC}).$$

3. Symulacja efektywności energetycznej pompy ciepła powietrze/woda

3.1 Zakres symulacji i analiz

Zamieszczone w tym punkcie pracy wyniki analiz współpracy pompy ciepła powietrze/woda z systemem przygotowania c.w.u. przeprowadzono dla danych klimatycznych Wrocławia pozyskanych z bazy programu *Meteonorm*. Analizy przeprowadzono dla pompy ciepła powietrze/woda, której wartości deklarowanego współczynnika efektywności (COP_d) i mocy grzewczej (Q_{PC}) dla temperatury zasilania (T_z) wynoszącej 55°C zestawiono w tabeli 16. Pompa ciepła dostarcza energię do układu przygotowania c.w.u. charakteryzującego się rocznym zużyciem c.w.u. wynoszącym 4220 m³. Wykonano trzy zestawy analiz, które scharakteryzowano poniżej.

Analiza 1 przeprowadzona została dla pojedynczej pompy ciepła, dla zasobnika c.w.u. o objętości 1500 litrów. Założono, że uruchomienie grzałki elektrycznej (dodatkowego źródła ciepła) następuje, gdy pompa ciepła nie jest w stanie wytworzyć odpowiedniej ilości energii w ciągu 1 godziny. Przyjęto wspomaganie pracy pompy ciepła grzałką elektryczną o mocy 80 kW. Założono, że uruchomienie układu grzewczego następuje, gdy w zasobniku osiągnięty zostaje 44% deficyt energii.

Analiza 2 przeprowadzona została dla trzech współpracujących ze sobą pomp ciepła, dla zasobnika c.w.u. o objętości 3000 litrów. Założono, że uruchomienie grzałki elektrycznej (dodatkowego źródła ciepła) następuje, gdy w zasobniku osiągnięty zostaje deficyt 80%. Przyjęto wspomaganie pracy pompy ciepła grzałką elektryczną o mocy 50 kW. Założono, że uruchomienie pompy ciepła następuje, gdy w zasobniku osiągnięty zostaje 44% deficyt energii.

Analiza 3 przeprowadzona została dla pojedynczej pompy ciepła, dla zasobnika c.w.u. o objętości 1500 litrów. Założono, że uruchomienie grzałki elektrycznej (dodatkowego źródła ciepła) o mocy 80 kW następuje, gdy w zasobniku osiągnięty zostaje

deficyt 80%. Założono, że uruchomienie pompy ciepła następuje, gdy w zasobniku osiągnięty zostaje 44% deficyt energii.

We wszystkich analizach założono, że wymagana temperatura wody (T_{cwu}) w zasobniku wynosi 55°C, a maksymalna temperatura ciepłej wody użytkowej osiągnięta przez pompę ciepła ($T_{max,PC}$) wynosi 52°C.

Tabela 16. Charakterystyka pompy ciepła według normy EN 14511 [11]

T_{zew} , °C	-20	-15	-7	2	7	10	12	20
Q_{PC} , kW	17,20	21,37	27,44	36,90	44,00	48,40	50,40	61,10
COP_d	1,54	1,73	2,22	2,56	2,80	3,08	3,15	3,61

Każda z analiz zawiera symulacje przeprowadzone dla każdego z opisanych w punkcie 1 tego rozdziału pracy profili zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. (tabela 15). Uzyskane wyniki pozwoliły na analizę problemu: jaki jest wpływ przyjętego profilu zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. na wyniki symulacji pracy pompy ciepła powietrze/woda? W większości tych symulacji ujęto wpływ zasobnika c.w.u. na profil zapotrzebowania na energię (o objętościach zgodnych z założeniami dla analizy 1, 2 i 3). Wyjątkiem są symulacje F-TY i F-TX, w których wpływu zasobnika nie uwzględniono. Symulacje te odpowiadają sytuacji, gdy analiza pracy pompy ciepła wykonana jest w kroku temperaturowym, a nie czasowym. Symulacje, w których ujęto wpływ zasobnika na pracę układu, oznaczono literą Z.

3.2 Dyskusja wyników

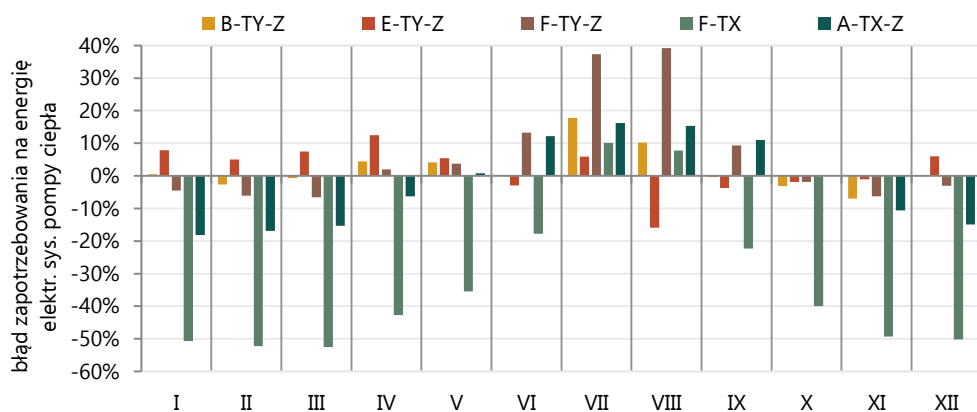
Analiza 1

W tabeli 17 zestawiono wyniki roczne symulacji przeprowadzonych w ramach analizy 1. Błędy wartości rocznego zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. są niskie i podobne dla wszystkich analiz. Błędy w wartości zapotrzebowania na energię elektryczną do zasilenia systemu pompy ciepła powietrze/woda są niskie dla analiz uwzględniających wpływ zasobnika na profil zapotrzebowania na moc po stronie źródła energii. Na tym tle wyróżniają się wyniki dla symulacji F-TY i F-TX. Pomimo iż wprowadzone dane o zapotrzebowaniu na energię roczną do przygotowania c.w.u. są analogiczne jak dla pozostałych symulacji, brak uwzględnienia wpływu zasobnika generuje istotne błędy. Należy też zauważyć, że wyższymi błędami charakteryzują się symulacje, w których nie uwzględniono zmian temperatury wody zimnej. Więcej informacji o skali niedokładności w przeprowadzonych symulacjach efektywności energetycznej pompy ciepła przynosi miesięczna analiza wyników przedstawiona na kolejnych rysunkach.

Tabela 17. Wyniki roczne symulacji przeprowadzonych w ramach analizy 1

Symulacja	ΣQ_{w^r} kWh/rok	Błąd ΣQ_{w^r}	$\Sigma Q_{EL,S^r}$ kWh/rok	Błąd $\Sigma Q_{EL,S^r}$	$\Sigma Q_{EL,Q^r}$ kWh/rok	Błąd $\Sigma Q_{EL,Q^r}$	$SCOP^r$	Błąd $SCOP^r$
A-TY-Z	231 229	–	153 041	–	108 555	–	1,51	–
A-TX-Z	221 020	–4,4%	143 410	–6,3%	99 685	–8,2%	1,54	2,0%
B-TY-Z	235 747	2,0%	153 910	0,6%	107 430	–1,0%	1,53	1,4%
B-TX-Z	226 147	–2,2%	145 405	–5,0%	100 087	–7,8%	1,56	2,9%
C-TY-Z	235 509	1,9%	154 373	0,9%	108 454	–0,1%	1,53	1,0%
C-TX-Z	225 919	–2,3%	144 906	–5,3%	99 390	–8,4%	1,56	3,2%
D-TY-Z	235 276	1,8%	156 567	2,3%	111 845	3,0%	1,50	–0,5%
D-TX-Z	225 919	–2,3%	144 906	–5,3%	99 390	–8,4%	1,56	3,2%
E-TY-Z	235 883	2,0%	158 267	3,4%	114 750	5,7%	1,49	–1,4%
E-TX-Z	226 273	–2,1%	148 352	–3,1%	104 687	–3,6%	1,53	0,9%
F-TY-Z	233 866	1,1%	155 945	1,9%	112 280	3,4%	1,50	–0,7%
F-TX-Z	226 608	–2,0%	148 687	–2,8%	105 023	–3,3%	1,52	0,9%
F-TY	233 866	1,1%	102 066	–33,3%	26 313	–75,8%	2,29	51,7%
F-TX	226 608	–2,0%	92 446	–39,6%	15 916	–85,3%	2,45	62,2%

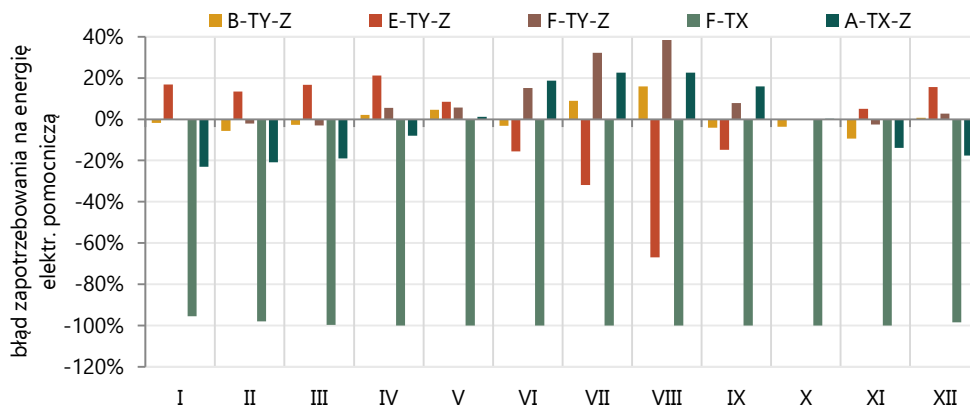
Rysunek 42 zawiera błędy wyników zapotrzebowania na energię elektryczną systemu pompy ciepła uzyskane dla symulacji B-TY-Z, E-TY-Z, F-TY-Z, F-TX oraz A-TX-Z względem wyników dla symulacji A-TY-Z.



Rysunek 42. Błędy wyników zapotrzebowania na energię elektryczną dla systemu pompy ciepła powietrze/woda uzyskane z wybranych modeli względem wyników dla modelu A-TY-Z dla analizy 1

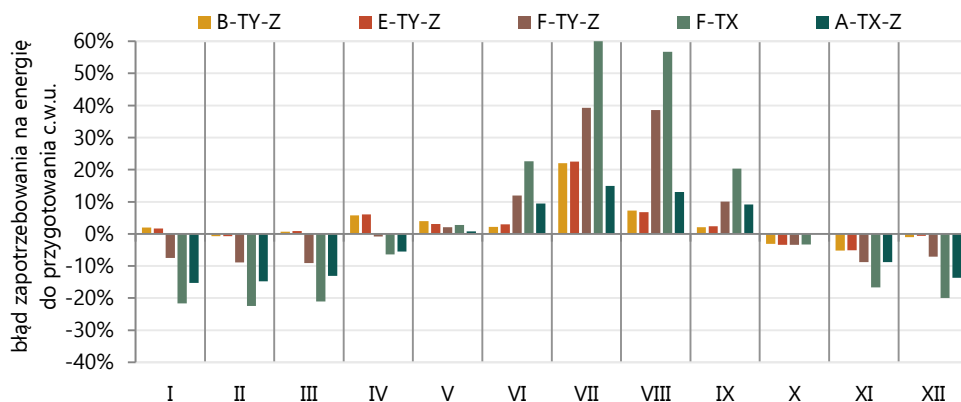
Symulacja B-TY-Z (podobnie jak C-TY-Z i D-TY-Z, których na rysunku nie przedstawiono) wykazuje dobrą zgodność z symulacją odniesienia. Największy błąd zaobserwować można w lipcu i wynika on z różnicy pomiędzy rzeczywistym a teoretycznym zużyciem wody (co widoczne jest na rysunku 39). Symulacja A-TX-Z dla rzeczywistego profilu zużycia wody, ale przy stałej temperaturze wody zimnej charakteryzuje się więk-

szymi błędami, sięgającymi 18%. Symulacja E-TY-Z dla profilu rozbioru c.w.u. uproszczonego poprzez uwzględnienie jedynie zmian miesięcznych charakteryzuje się nieco większymi błędami, niż gdy uwzględnia się w analizie profil godzinowy, jednak pogorszenie wyników symulacji nie jest tak duże jak dla symulacji A-TY-Z, F-TX-Z i dużo mniejsze niż dla F-TX. Pominięcie wpływu zasobnika powoduje znaczące błędy w wartości miesięcznego zapotrzebowania na energię elektryczną przez system pompy ciepła. Różnice wahają się od -53% zimą do +10% w okresie letnim.



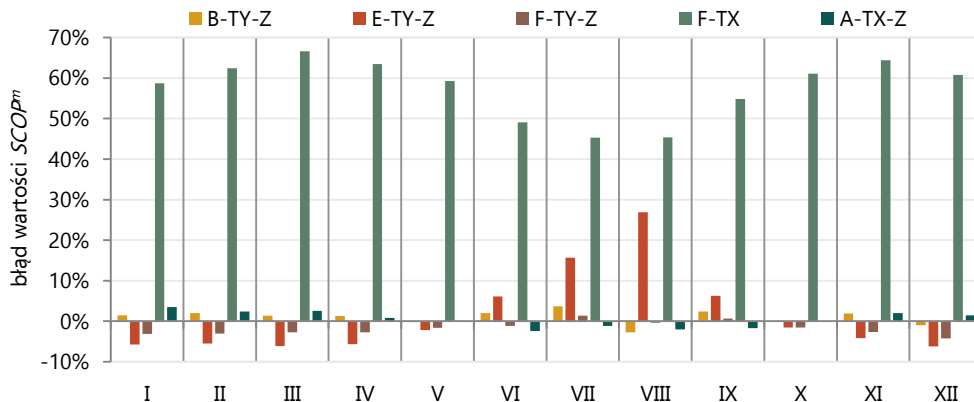
Rysunek 43. Błędy wyników zapotrzebowania na energię pomocniczą do zasilania grzałki elektrycznej uzyskane z wybranych modeli względem wyników dla modelu A-TY-Z dla analizy 1

Zanizenie wyniku w lipcu dla symulacji E-TY-Z wynika z faktu, iż profil zapotrzebowania na energię plasuje się poniżej dostępnej mocy grzewczej pompy ciepła, w wyniku czego symulacja nie odzwierciedla zapotrzebowania na energię elektryczną pomocniczą, które wystąpiło w przypadku analizy pracy systemu pompy ciepła na profilu rzeczywistym (A-TY-Z). Wyniki obrazujące błędy w oszacowaniu zapotrzebowania na energię elektryczną pomocniczą zawiera rysunek 43. Należy podkreślić, iż w tym przypadku żaden z profili nie dał w pełni satysfakcjonujących rezultatów. W każdym przypadku wygenerowany został błąd względem wyników uzyskanych dla profilu rzeczywistego. Wyjątkowo niekorzystnie sytuacja wygląda dla symulacji F-TX. W tym przypadku nakłada się na siebie szereg niedokładności: od nieprawidłowych danych wejściowych dotyczących zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. w kolejnych miesiącach (rysunek 44) poprzez brak uwzględnienia wpływu zasobnika, co skutkuje nieprawidłowym wynikiem zapotrzebowania na energię elektryczną pomocniczą (rysunek 43) i nieprawidłową wartością $SCOP^m$ (rysunek 45).



Rysunek 44. Błędy wyników zapotrzebowania na energię do przygotowania ciepłej wody użytkowej uzyskane z wybranych modeli względem wyników dla modelu A-TY-Z

Zasadniczo trzeba stwierdzić, iż błędy powstające na poszczególnych etapach analizy miesięcznej są wynikiem błędnych danych wejściowych, czyli wartości zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. Im są one większe, tym większe błędy uzyskuje się w analizie. Dodatkowo błędy te są wzmacniane przez brak odwzorowania wpływu zasobnika na pracę układu. W tym przypadku był on szczególnie istotny, gdyż analizowano układ z pompą ciepła o dość małej mocy grzewczej i przy założeniu, że jej praca ma być w znaczącym stopniu wspomagana przez pracę innego systemu grzewczego (tutaj grzałki elektrycznej). Przypadek taki jest typowy dla układów biwalentnych.



Rysunek 45. Błędy wyników $SCOP^m$ uzyskane z wybranych modeli względem wyników dla modelu A-TY-Z dla analizy 1

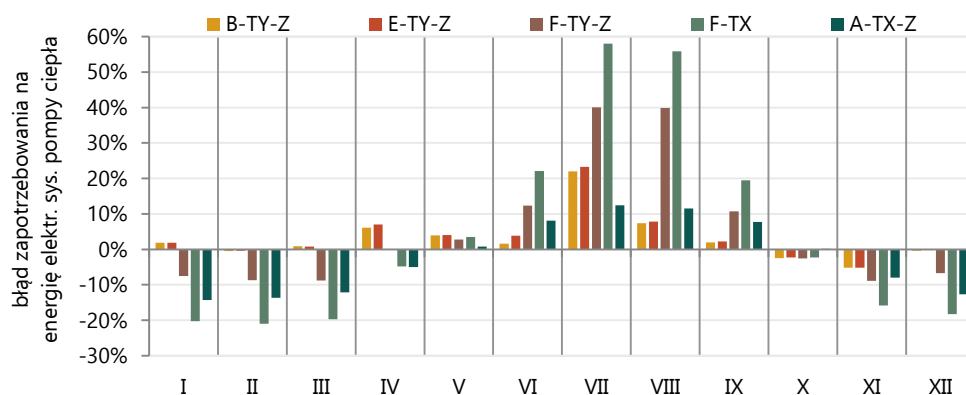
Analiza 2

W tabeli 18 zamieszczono wybrane wyniki symulacji przeprowadzonych w ramach analizy 2. W wynikach rocznych nie dostrzega się większych niedokładności. Układ akumulacji i moc układu grzewczego są tak zwymiarowane, że w żadnym okresie roku nie powstaje zapotrzebowanie na energię pomocniczą, co powoduje, że symulacja T-TX nie generuje większych błędów w wynikach rocznych.

Tabela 18. Wybrane wyniki roczne symulacji przeprowadzonych w ramach analizy 2

Symulacja	ΣQ_{w^r} kWh/rok	Błąd ΣQ_{w^r}	$\Sigma Q_{EL,S^r}$ kWh/rok	Błąd $\Sigma Q_{EL,S^r}$	$\Sigma Q_{EL,Q^r}$ kWh/rok	Błąd $\Sigma Q_{EL,Q^r}$	SCOP ^r	Błąd SCOP ^r
A-TY-Z	231 229	–	94 518	–	14 353	–	2,45	–
A-TX-Z	221 020	–4,4%	89 951	–4,8%	14 330	–0,2%	2,46	0,4%
B-TY-Z	235 747	2,0%	96 341	1,9%	14 708	2,5%	2,45	0,0%
E-TY-Z	235 883	2,0%	96 660	2,3%	14 756	2,8%	2,44	–0,2%
F-TY-Z	233 866	1,1%	95 341	0,9%	14 799	3,1%	2,45	0,3%
F-TX	226 608	–2,0%	92 024	–2,6%	15 107	5,3%	2,46	0,7%

W wynikach miesięcznych błędy wartości zapotrzebowania na energię elektryczną dla systemu pompy ciepła powietrze/woda są już widoczne i znaczące (rysunek 46). Odzworowują one błąd wartości wejściowej, czyli zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. (rysunek 39).



Rysunek 46. Błędy wyników zapotrzebowania na energię elektryczną dla systemu pompy ciepła powietrze/woda uzyskane z wybranych modeli względem wyników dla modelu A-TY-Z dla analizy 2

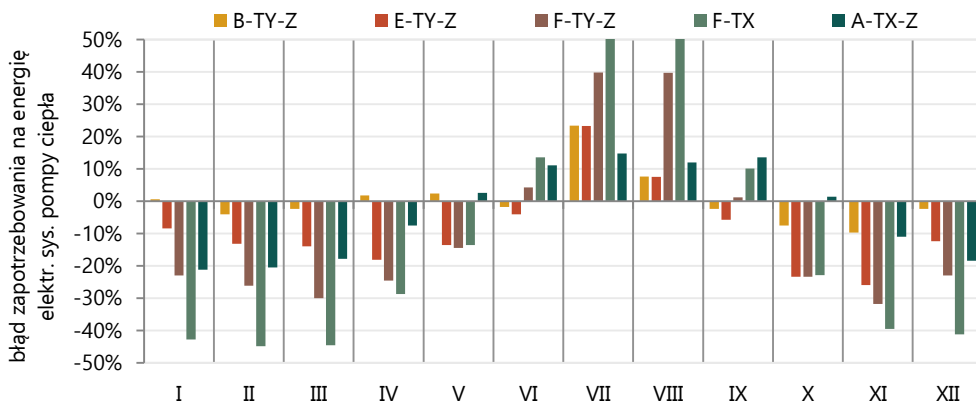
Analiza 3

W tabeli 19 zamieszczono wybrane wyniki symulacji przeprowadzonych w ramach analizy 3. W wynikach rocznych wyróżnia się dość istotny błąd dla symulacji F-TX, zapotrzebowanie na energię elektryczną dla systemu pompy ciepła obliczone zostało z błędem wynoszącym –25% względem symulacji A-TY-Z.

Tabela 19. Wybrane wyniki roczne symulacji przeprowadzonych w ramach analizy 3

Symulacja	ΣQ_{W^r} kWh/rok	Błąd ΣQ_{W^r}	$\Sigma Q_{EL,S^r}$ kWh/rok	Błąd $\Sigma Q_{EL,S^r}$	$\Sigma Q_{EL,Q^r}$ kWh/rok	Błąd $\Sigma Q_{EL,Q^r}$	$SCOP^r$	Błąd $SCOP^r$
A-TY-Z	231 229	–	123 309	–	61 801	–	1,88	–
A-TX-Z	221 020	–4,4%	112 539	–8,7%	51 262	–17,1%	1,96	4,7%
B-TY-Z	235 747	2,0%	121 584	–1,4%	56 665	–8,3%	1,94	3,4%
E-TY-Z	235 883	2,0%	108 129	–12,3%	34 284	–44,5%	2,18	16,3%
F-TY-Z	233 866	1,1%	101 663	–17,6%	25 703	–58,4%	2,30	22,7%
F-TX	226 608	–2,0%	92 446	–25,0%	15 916	–74,2%	2,45	30,7%

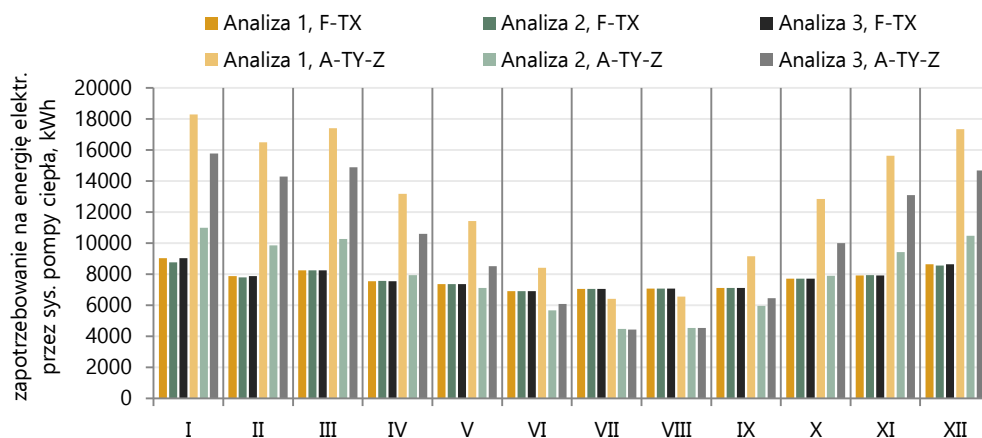
Widoczne w wynikach miesięcznych błędy wartości tego zapotrzebowania, przedstawione na rysunku 47, są znaczące. Wynikają one z błędu wielkości wejściowej, czyli zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. oraz, jak w przypadku analizy 1, z niewłaściwego odwzorowania pracy układu akumulacji energii. W układzie tym automatyka została skonfigurowana inaczej niż w układzie z analizy 1, tj. grzałka elektryczna uruchamiana jest dopiero w momencie, gdy deficyt w zbiorniku osiąga 80%. Symulacja B-TY-Z pozwoliła dobrze odwzorować pracę tego systemu. Błędy wynikające z zastosowania uproszczonego profilu E-TY-Z są już istotne, sięgają –26%. Wynika z tego wniosek, iż pominięcie wpływu profilu godzinowego w analizie efektywności pompy ciepła w niektórych przypadkach nie jest korzystne, aczkolwiek symulacja ta, pomimo tego uproszczenia, dała dużo lepsze rezultaty niż równomierne rozłożenie zapotrzebowania na energię na wszystkie godziny w dobie, co jest reprezentowane przez wyniki F-TX.



Rysunek 47. Błędy wyników zapotrzebowania na energię elektryczną dla systemu pompy ciepła powietrze/woda uzyskane z wybranych modeli względem wyników dla modelu A-TY-Z dla analizy 3

3.3 Podsumowanie

W podsumowaniu tego rozdziału warto przedstawić porównanie wyników analizy 1, 2 i 3 dla dwóch skrajnie różnych sposobów profilowania obciążenia grzewczego po stronie źródła ciepła, tj. profilu rzeczywistego uwzględniającego pracę zasobnika i profilu stałego bez układu akumulacji. Rysunek 48 zawiera porównanie wyników takich symulacji. Symulacja F-TX nie reaguje na zmiany konfiguracji analizowanego systemu. W rzeczywistości efekty pracy systemu zmieniają się drastycznie w zależności od wartości mocy grzewczej pompy ciepła, objętości zasobnika i założeń dotyczących sterowania załączaniem i wyłączeniem dodatkowego źródła energii.



Rysunek 48. Wyniki z symulacji F-TX wobec wyników z symulacji A-TY-Z

Konkludując, w analizie pracy pomp ciepła powietrze/woda konieczne jest uwzględnienie zmian wartości zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. Wykazano, że uwzględnienie zmian profilu godzinowego jest ważne, ale zdecydowanie ważniejsze jest uwzględnienie wpływu układu akumulacji i miesięcznych zmian w zużyciu c.w.u. oraz w wartości temperatury wody zimnej. Stwierdzono, iż duże znaczenie ma możliwość uwzględniania założeń odnośnie sterowania pracą układu grzewczego wspomagającego pracę pompy ciepła powietrze/woda. Zdecydowanie należy stwierdzić, iż analiza w kroku godzinowym pozwala na dokładne odzwierciedlenie pracy systemu c.w.u., dzięki czemu dostarczana jest rzetelna informacja o ewentualnym niedoborze mocy pompy ciepła, co jest kluczowe dla poprawnej diagnostyki efektywności energetycznej układu. Pozwala to również na zwiększenie precyzji doboru mocy grzewczej pompy ciepła i dokładniejsze oszacowanie zapotrzebowania na energię dodatkową, co może być ważne w układach bivalentnych. Nie zarejestrowano większych różnic pomiędzy zastosowaniem 1, 2 czy 3 zróżnicowanych ze względu na dzień tygodnia profili godzinowego zużycia c.w.u. Interesujące wyniki uzyskano dla profilu

E-TY-Z. Profil ten powstał w oparciu o miesięczne zmiany zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. oraz zadany deficyt energii w zbiorniku. Założenie o takim sposobie profilowania, z odpowiednią korektą dla poprawienia dokładności obliczenia zapotrzebowania na energię z dodatkowego źródła, postanowiono wdrożyć w obliczeniach w kroku miesięcznym.

MODEL KORELACYJNY DO OBLICZANIA EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ POMP CIEPŁA POWIETRZE/WODA WSPÓŁPRACUJĄCYCH Z SYSTEMAMI PRZYGOTOWANIA CIEPŁEJ WODY UŻYTKOWEJ

1. Założenia do modelu

Poprawne modelowanie współpracy pompy ciepła powietrze/woda z instalacją ciepłej wody użytkowej (c.w.u.), rozumiane jako obliczenie wartości *SCOP* oraz zapotrzebowania na energię elektryczną dostarczaną do pompy ciepła oraz do dodatkowego źródła energii¹¹, wymaga zestawienia informacji o chwilowej mocy grzewczej możliwej do wytworzenia przez urządzenie z profilem mocy wynikającym z pracy układu przygotowania c.w.u. W rozdziale IV przeprowadzono analizę wpływu dokładności odwzorowania tego profilu na wyniki symulacji pracy pompy ciepła. Wykazano, że wartości zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. wykazują bardzo istotne różnice w cyklu miesięcznym, a uwzględnienie tych wahań jest kluczowe dla poprawnej symulacji efektywności energetycznej systemów z pompami ciepła powietrze/woda. Drugą kluczową kwestią jest wpływ układu akumulacji energii na chwilowe zapotrzebowanie na moc po stronie źródła ciepła, a także odniesienie tej wartości do dostępnej mocy grzewczej pompy ciepła i dostępnego czasu ładowania zasobnika. W wyniku tego do opracowania nowego modelu obliczeniowego efektywności energetycznej pomp ciepła współpracujących z systemami przygotowania c.w.u. przyjęto opisane poniżej założenia i cele.

- (1) Obliczenia wykonywane będą w kroku miesięcznym.
- (2) Dane wejściowe do obliczeń będą łatwo dostępne.
- (3) Model będzie umożliwiał obliczenie wartości *SCOP* i wartości zapotrzebowania na energię elektryczną do zasilania pompy ciepła powietrze/woda oraz zapotrzebowania na energię cieplną dostarczaną z dodatkowego źródła w kolejnych miesiącach roku.

¹¹ Dodatkowe źródło energii w systemie pompy ciepła powietrze/woda może być zasilane innym nośnikiem niż energia elektryczna; w takim przypadku wartość energii dodatkowej nie jest wliczana do wartości *SCOP*. Mimo to wyznaczenie poprawnej ilości tej dodatkowej energii jest nadal bardzo istotne, gdyż pozwala na prawidłową symulację pracy układu biwalentnego.

- (4) Model będzie uwzględniał wpływ wielkości zasobnika c.w.u. na pracę układu pompy ciepła powietrze/woda.
- (5) Istotną cechą modelu będzie wspomaganie decyzji o poprawności doboru urządzenia. Oznacza to, że model powinien prawidłowo reagować na przewymiarowanie lub niedowymiarowanie pompy ciepła powietrze/woda, pozwalając oszacować ilość energii koniecznej do dostarczenia z dodatkowego źródła energii (np. grzałki elektrycznej).

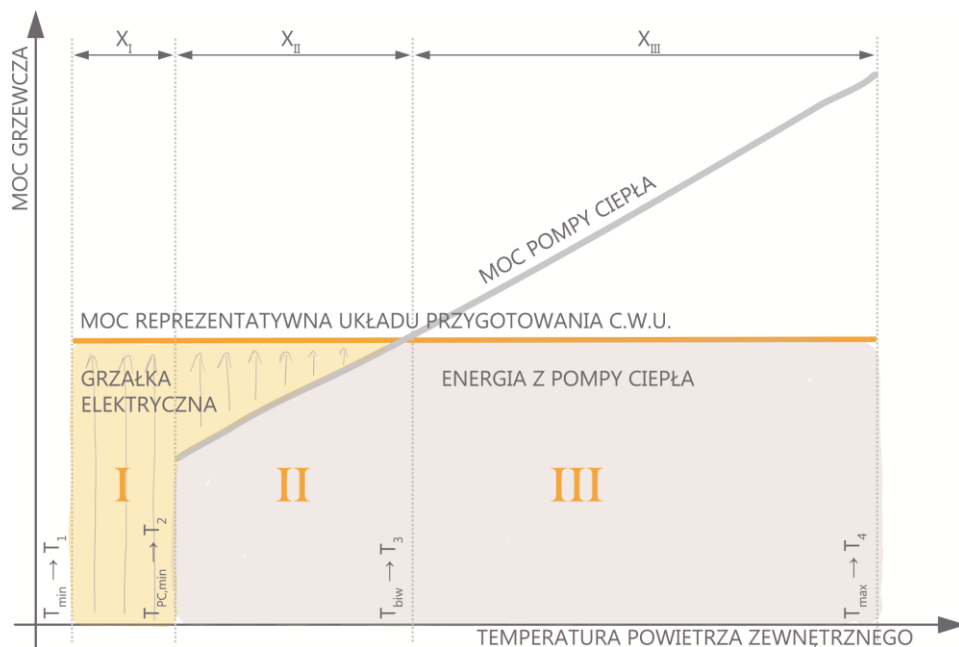
2. Ogólny opis modelu

2.1 Metoda tworzenia modelu

W celu opracowania modelu efektywności energetycznej pompy ciepła powietrze/woda, współpracującej z systemem przygotowania c.w.u. w kroku miesięcznym, konieczne było stworzenie metody obliczania przewidywanej częstości występowania poszczególnych wartości temperatur powietrza zewnętrznego oraz metody obliczania przewidywanego obciążenia cieplnego układu pompy ciepła w danym miesiącu.

Jako rozwiązanie pierwszego problemu zastosowano *funkcję częstości temperatury* opracowaną przy tworzeniu modelu pompy ciepła pracującej w trybie ogrzewania budynku, opisaną w rozdziale III.

Jako rozwiązanie problemu szacowania obciążenia cieplnego pompy ciepła pracującej w trybie przygotowania ciepłej wody użytkowej zaproponowana została metoda obliczania reprezentatywnej mocy grzewczej tego układu (Q_{CWU,R^m}). Moc reprezentatywna rozumiana jest jako moc wymagana po stronie źródła energii, tj. pompy ciepła powietrze/woda. Moc ta obliczana jest na podstawie wartości miesięcznego zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. (ΣQ_W^m) oraz podstawowych informacji na temat akumulacyjności układu i sposobu sterowania tym układem. Uzyskana wartość mocy reprezentatywnej jest wymagana, aby zakres temperatur pomiędzy minimalną (T_{min}^m) a maksymalną (T_{max}^m) w każdym miesiącu podzielić na obszary pracy różniące się w sposób istotny charakterem eksploatacji pompy ciepła powietrze/woda. Te charakterystyczne obszary oznaczono jako I, II, III i szczegółowo opisano poniżej. Dla każdego z obszarów obliczana jest wartość $COP_{W,d}$ oraz jej udział w wartości $SCOP_W^m$. Proces obliczania reprezentatywnej wartości $COP_{W,d}$ w każdym z obszarów ma odmienny charakter, a zasady tych obliczeń podano w niniejszym rozdziale. W ostatnim etapie obliczany jest czas pracy pompy ciepła do przygotowania c.w.u. w danym miesiącu oraz udział dodatkowego źródła ciepła w wytworzeniu energii cieplnej. Te ostatnie wyniki mają na celu ułatwienie podjęcia poprawnej decyzji o doborze urządzenia do potrzeb danego systemu przygotowania ciepłej wody użytkowej.



Rysunek 49. Schemat koncepcyjny do modelu pompy ciepła powietrze/woda stosowanej do przygotowania ciepłej wody użytkowej

Obszar I: $T_{zew} \leq T_{min,PC}$

Obszar temperatur powietrza zewnętrznego w danym miesiącu poniżej minimalnej temperatury pracy pompy ciepła powietrze/woda. Zapotrzebowanie na energię do przygotowania ciepłej wody użytkowej dostarcza inne źródło ciepła, którym w układach monoenergetycznych jest grzałka elektryczna.

Obszar II: $T_{zew} \in (T_{min,PC}, T_{biw,W})$

Obszar temperatur powietrza zewnętrznego powyżej temperatury minimalnej pracy pompy ciepła, ale poniżej punktu biwalentnego dla systemu c.w.u. Energia grzewcza do układu przygotowania ciepłej wody użytkowej dostarczana jest zarówno przez pompę ciepła powietrze/woda, jak i przez dodatkowe źródło ciepła.

Obszar III: $T_{zew} \geq T_{biw,W}$

Obszar temperatur powietrza zewnętrznego powyżej temperatury biwalentnej dla systemu c.w.u. W obszarze tym moc grzewcza pompy ciepła powietrze/woda jest wyższa niż wymagana moc grzewcza do przygotowania ciepłej wody użytkowej. Przy założeniu, że pompa ciepła powietrze/woda pracować będzie z maksymalną dostępną w danej chwili mocą, w obszarze tym czas pracy urządzenia będzie krótszy niż założony maksymalny czas ładowania zasobnika c.w.u.

2.2 Dane wejściowe

Dane klimatyczne

Danymi wejściowymi są podstawowe, powszechnie dostępne dane dotyczące temperatur powietrza zewnętrznego dla danej lokalizacji dla każdego miesiąca roku: średnia temperatura powietrza zewnętrznego w miesiącu ($T_{śr}^m$), minimalna (T_{min}^m) i maksymalna (T_{max}^m) temperatura powietrza zewnętrznego w miesiącu. Dodatkową informacją jest czas trwania danego miesiąca (Ld^m). W niniejszej pracy wykorzystano informacje o danych klimatycznych pobrane z bazy danych programu *Meteonorm*.

Dane pompy ciepła

Na potrzeby modelu systemu grzewczego do przygotowania c.w.u. z pompą ciepła powietrze/woda założono, iż podstawą do obliczenia wartości $SCOP_W$ będzie model opisujący deklarowane wartości współczynnika efektywności ($COP_{W,d}$) oraz wartości mocy grzewczej urządzenia ($Q_{PC,W}$) opracowany przez Afjeiego [37]. Ze względu na niską istotność statystyczną (powyżej 0,05) parametrów przy zmiennych drugiego stopnia zdecydowano o uproszczeniu modelu do wielomianu dwóch zmiennych stopnia pierwszego. W modelu tym parametry estymowane są z zastosowaniem regresji wielorakiej (metodą najmniejszych kwadratów) na podstawie danych pozyskanych zgodnie z normą EN 14511 [11]. Finalnie równania te mają postać:

$$Q_{PC,W} = A + B \cdot T_{zew} + C \cdot T_{Z,W} + D \cdot T_{zew} \cdot T_{Z,W},$$

$$COP_{W,d} = A_1 + B_1 \cdot T_{zew} + C_1 \cdot T_{Z,W} + D_1 \cdot T_{zew} \cdot T_{Z,W}.$$

Dodatkowymi informacjami wspomagającymi proces symulacji są: minimalna temperatura powietrza zewnętrznego, przy której możliwa jest praca pompy ciepła ($T_{min,PC}$), oraz maksymalna temperatura, do jakiej pompa ciepła jest w stanie podgrzać ciepłą wodę użytkową ($T_{max,PC}$).

Dane o systemie ciepłej wody użytkowej

Podstawową wartością wejściową jest zapotrzebowanie na energię końcową do przygotowania c.w.u. w danym miesiącu (ΣQ_W). Zapotrzebowanie to zdefiniowane jest jako stosunek miesięcznego zapotrzebowania na energię użytkową do przygotowania c.w.u. (ΣQ_{CWU}) do sprawności systemu: magazynowania (η_m) i przesyłu (η_p):

$$\Sigma Q_W^m = \frac{\Sigma Q_{CWU}^m}{\eta_m \cdot \eta_p}.$$

Zapotrzebowanie na energię użytkową do przygotowania c.w.u. (ΣQ_{CWU}^m) obliczać można według dowolnej metody, która umożliwi obliczenie tej wartości dla każdego miesiąca roku. Do zastosowania z niniejszym modelem rekomendowana

i wykorzystana w opisanych symulacjach jest metoda zaproponowana w pracy [59]. Wybrane fragmenty tej metody opisano również w rozdziale IV niniejszej pracy. Aby wykonać poprawne obliczenia zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. wskazaną metodą, konieczne jest pozyskanie informacji o dwóch wartościach temperatur: temperaturze ciepłej wody użytkowej (T_{CWU}) i temperaturze wody zimnej w każdym miesiącu (T_{WZ}^m) oraz o miesięcznym zużyciu ciepłej wody użytkowej (V_{CWU}^m).

$$Q_{CWU}^m = \frac{V_{CWU}^m \cdot (T_{CWU} - T_{WZ}^m) \cdot cw}{3600}.$$

3. Szczegółowy opis modelu

3.1 Utrzymanie wymaganej temperatury ciepłej wody użytkowej

Wymagana przepisami technicznymi [67] temperatura ciepłej wody w wielu przypadkach przekracza tę, która jest w stanie zostać osiągnięta poprzez pracę pompy ciepła powietrze/woda. Poniżej opisano proces obliczania udziału energii koniecznej do dostarczenia przez dodatkowe źródła ciepła ze względu na dogrzewanie ciepłej wody do wymaganej temperatury:

$$U_{T,W}^m = \frac{T_{CWU} - T_{max,PC}}{T_{CWU} - T_{WZ}^m}.$$

W wyniku tego energia dostarczona z grzałki elektrycznej w danym miesiącu ze względu na zbyt niską temperaturę wytwarzaną przez pompę ciepła obliczana jest z poniższego wzoru:

$$\Sigma Q_{el,T,W}^m = U_{T,W} \cdot \Sigma Q_W^m,$$

lub gdy dodatkowe źródło nie jest zasilane energią elektryczną:

$$\Sigma Q_{AZ,T,W}^m = U_{T,W} \cdot \Sigma Q_W^m.$$

3.2 Reprezentatywna moc układu przygotowania ciepłej wody użytkowej

Założono, że reprezentatywne zapotrzebowanie na moc do przygotowania ciepłej wody użytkowej w danym miesiącu ($Q_{CWU,R}^m$) może być opisane jako funkcja zapotrzebowania na energię końcową do przygotowania c.w.u. w danym miesiącu (Q_W^m), objętości zasobnika c.w.u. (V_z), założonego deficytu energii, po którym następuje uruchomienie układu grzewczego ($defPC$), oraz maksymalnego czasu ładowania zasobnika (τ_{max}). Parametry te pozwalają na wyliczenie ilości cykli ładowania zbiornika w ciągu doby (n) w danym miesiącu. W rzeczywistości ilość tych cykli może odbiegać od tak obliczonych, jednak – jak wykazano w rozdziale IV niniejszej pracy – najistotniejsze jest uniknięcie sytuacji, w której pojawia się założenie o równomiernym rozdziale zapotrze-

bowania na energię do przygotowania c.w.u. na poszczególne godziny doby. Odzwierciedlenie rzeczywistego profilu jest właściwie niemożliwe, jednak ważne jest przyjęcie założeń, które choć w przybliżeniu odzwierciedlają pracę rzeczywistego układu. Jednym z kluczowych jest maksymalny czas ładowania zbiornika (τ_{max}). W układach, w których pompa ciepła służy jedynie do przygotowania ciepłej wody użytkowej, jest to czas dostępny pomiędzy cyklami, silnie związany z objętością samego zasobnika. W układach, w których pompa ciepła wytwarza energię na potrzeby systemu c.w.u. oraz na potrzeby centralnego ogrzewania, pojawia się drugie kryterium w postaci maksymalnej dopuszczalnej przerwy w dostawie energii do systemu grzewczego. Oczywiście ograniczeniem maksymalnym są 24 godziny w trakcie doby. Wymagane wzory dla metody obliczeniowej podano poniżej.

Energia dla pojedynczego cyklu w danym miesiącu:

$$\Sigma Q_{CYKL}^m = \frac{V_Z \cdot defPC \cdot cw \cdot (T_{CWU} - T_{WZ}^m)}{3600}$$

Energia końcowa w pojedynczej dobie w danym miesiącu:

$$\Sigma Q_W^{d,m} = \frac{\Sigma Q_W^m}{Ld^m}$$

Maksymalny czas ładowania:

$$\tau_{max} = \frac{24}{\frac{V_{CWU}^d}{V_Z \cdot defPC}}$$

Jako czas ładowania (τ_{max}) do dalszych obliczeń można przyjąć wartości niższe od wyznaczonych powyżej, oczywiście zachowując rozsądną granicę dolną, wynoszącą około 1 godziny.

Maksymalna ilość cykli w dobie:

$$n_{max} = \frac{24}{\tau_{max}}$$

Liczba cykli ładowania w dobie w danym miesiącu:

$$n^m = \min\left(n_{max}, \frac{\Sigma Q_W^{d,m}}{\Sigma Q_{CYKL}^m}\right)$$

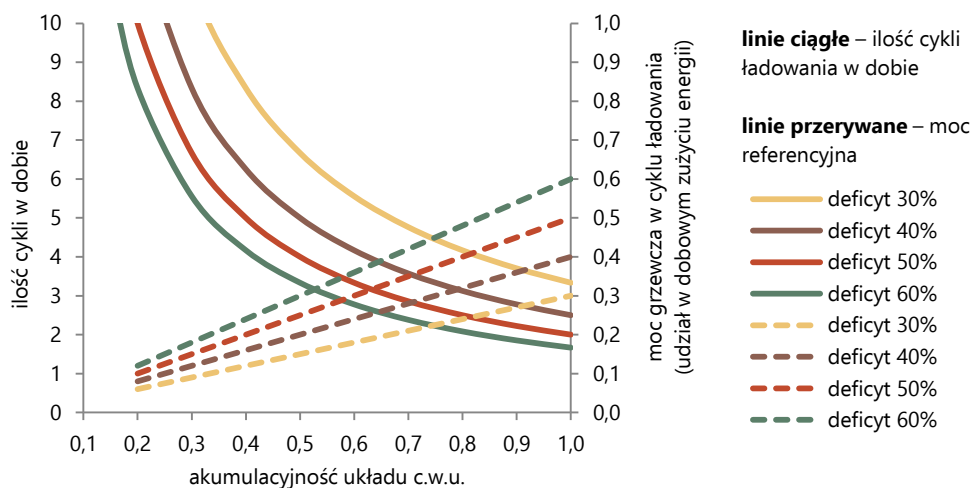
Reprezentatywna moc układu przygotowania c.w.u. w typowym cyklu pracy w danym miesiącu:

$$Q_{W,R}^m = \frac{\Sigma Q_W^{d,m}}{n^m \cdot \tau_{max}}$$

Moc reprezentatywna układu przygotowania c.w.u. w typowym cyklu pracy, zredukowana o energię dostarczoną z dodatkowego źródła energii:

$$Q'_{W,R}{}^m = (1 - U_{T,W}{}^m) \cdot Q_{W,R}{}^m.$$

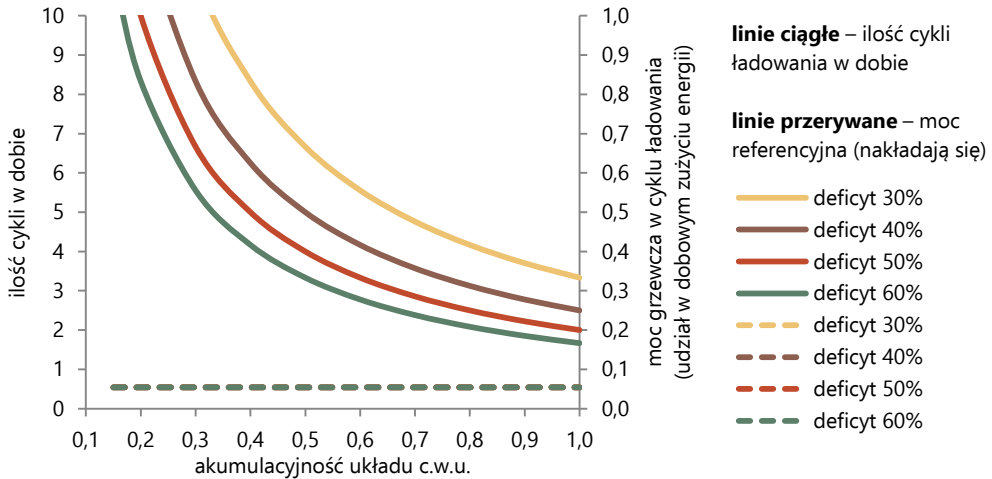
Przykładowe wyniki pracy układu do akumulacji ciepłej wody użytkowej uzyskane z przeprowadzonych w ten sposób obliczeń zobrazowano na rysunkach 50 i 51. Zostały one opracowane przy założeniu czasu ładowania zbiornika 1 h (rysunek 50) oraz maksymalnego dostępnego czasu ładowania (rysunek 51).



Rysunek 50. Liczba cykli ładowania zasobnika c.w.u. w ciągu doby i moc referencyjna układu w jednym cyklu w zależności od akumulacyjności układu (rozumianej jako udział energii możliwej do zgromadzenia w zasobniku względem potrzeb w ciągu doby) dla czasu ładowania 1 h

Na rysunkach pokazano ilość cykli ładowania zbiornika w ciągu doby (linie ciągłe) w zależności od akumulacyjności układu. Akumulacyjność układu rozumiana jest jako udział energii możliwej do zgromadzenia w zbiorniku o określonej pojemności w stosunku do energii potrzebnej do przygotowania c.w.u. w obiekcie w ciągu doby. Oprócz akumulacyjności wielkością bezpośrednio wpływającą na „hipotetyczną” ilość cykli uruchomienia się systemu grzewczego jest założony deficyt energii w zbiorniku (*defPC*). Deficyt ten jest związany z lokalizacją czujnika temperatury c.w.u. w zasobniku i ustawieniami połączonego z nim układu sterującego. W rzeczywistych systemach poziom deficytu, którego należy się spodziewać, to wartość od około 30% do 60%. Im większa jest objętość zbiornika (co zwiększa akumulacyjność układu), tym bardziej dostawa ciepła do przygotowania c.w.u. staje się niezależna od momentu jej rozbioru. Jednocześnie wielkość zbiornika i deficyt wpływają na ilość energii, którą należy dostarczyć w pojedynczym cyklu. Moc referencyjna układu przygotowania c.w.u. w cyklu pracy związana jest dodatkowo z przyjętym maksymalnym czasem ładowania zbiornika

w pojedynczym cyklu (τ_{max}). Moc referencyjna oznaczona jest na rysunkach 50 i 51 liniami przerywanymi i obliczona została względem całości energii potrzebnej w ciągu doby. Moc referencyjna jest wartością minimalną, pozwalającą w zadanym czasie uzupełnić powstały w zbiorniku deficyt energii. Oczywiście, gdy dostępna moc źródła ciepła będzie wyższa, czas ładowania ulegnie skróceniu.



Rysunek 51. Liczba cykli ładowania zasobnika c.w.u. w ciągu doby i moc referencyjna układu w jednym cyklu w zależności od akumulacyjności układu (rozumianej jako udział energii możliwej do zgromadzenia w zasobniku względem potrzeb w ciągu doby) dla maksymalnego możliwego czasu ładowania

Im dłuższy dopuszczalny czas ładowania, tym niższa wymagana moc grzewcza. Zwiększenie możliwego czasu ładowania z 1 h do dostępnej ilości czasu w dobie oznacza bardzo istotny spadek wymaganej mocy układu przygotowania c.w.u. Jednak zmniejszenie mocy oznacza zmianę profilu jej dostawy. Należy wyraźnie zaznaczyć, że przedstawiony model nie zastępuje doboru wielkości zbiornika do profilu rozbioru c.w.u. Należy mieć na uwadze zalecane poziomy akumulacyjności układu i dopasowanie wielkości zbiornika do planowanego rozbioru i profilu rozbioru c.w.u. Obliczona moc układu zapewni prawidłową pracę, jeśli zbiornik rzeczywiście będzie w stanie rozdzielić odbiór energii od jej dostawy. Jeśli, przykładowo, rzeczywisty pobór będzie skoncentrowany w jednym obszarze dnia, a analiza zostanie wykonana dla większej ilości cykli ładowania, czyli zbyt małej objętości zasobnika, to rzeczywisty system nie poradzi sobie z problemem dostawy energii.

3.3 Temperatury graniczne obszarów pracy pompy ciepła

Poniżej opisano sposób obliczenia temperatur granicznych obszarów I, II, III pracy pompy ciepła powietrze/woda w trybie przygotowania ciepłej wody użytkowej (wszystkie oznaczenia opisano na rysunku 49):

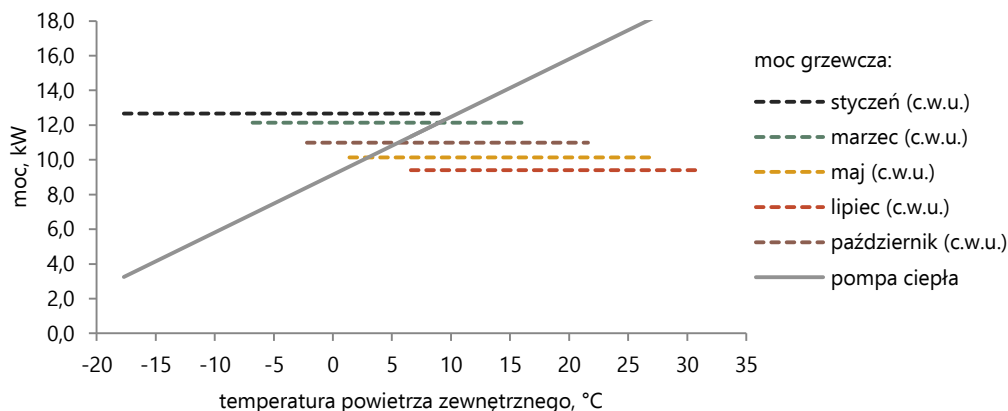
- krok 1: $T_{W,1}^m = T_{min}^m$,
- krok 2: $T_{W,2}^m = \min(T_{max}^m, \max(T_{PC,min}, T_{min}^m))$,
- krok 3: $T_{W,4}^m = T_{max}^m$,
- krok 4: $T_{W,3}^m = \min(\max(T_{W,2}^m, T_{biw,W}^m), T_{W,4}^m)$.

Temperatura powietrza zewnętrznego w punkcie biwalentnym ($T_{biw,W}^m$) obliczana jest dla każdego miesiąca dla podanego poniżej warunku i według podanego wzoru:

$$Q_{PC,W}^m = Q'_{W,R}^m \Leftrightarrow A + B \cdot T_{biw,W}^m + C \cdot T_{Z,W} + D \cdot T_{biw,W}^m \cdot T_{Z,W} = Q'_{W,R}^m,$$

$$T_{biw,W}^m = \frac{Q'_{W,R}^m - A - C \cdot T_{Z,W}}{B + D \cdot T_{Z,W}}.$$

Zmiany wartości temperatury powietrza zewnętrznego dla punktu biwalentnego w kolejnych miesiącach, choć w przypadku systemu c.w.u. nie są tak znaczące jak dla układu centralnego ogrzewania, jednak ich uwzględnienie urealnia czas pracy pompy ciepła jako źródła samodzielnego oraz czas, w jakim jej praca musi być wspomagana grzałką elektryczną lub innym źródłem energii. Przykładowy zakres zmian zamieszczono na rysunku 52.



Rysunek 52. Punkt biwalentny w przykładowym układzie przygotowania c.w.u. ($V_{cww,d} = 4000$ l/d, $V_z = 1000$ l, stosunek energii cieplnej dostarczonej z pompy ciepła powietrze/woda i dodatkowego źródła wynosi 80:20)

3.4 Parametry pracy pompy ciepła w poszczególnych obszarach

Poniżej opisano zasady obliczeń parametrów pracy pompy ciepła powietrze/woda w każdym obszarze pracy w systemie przygotowania ciepłej wody użytkowej.

Obszar I – pompa ciepła powietrze/woda pozostaje wyłączona. Zapotrzebowanie na energię do przygotowania ciepłej wody użytkowej dostarcza inne źródło ciepła, którym w układach monoenergetycznych jest grzałka elektryczna.

Obszar II – energia cieplna jest dostarczana do układu zarówno przez pracę pompy ciepła ($\Sigma Q_{PC,W,II}$), jak i pracę innego źródła, np. grzałki elektrycznej ($\Sigma Q_{el,G,W,II}$) lub alternatywnego źródła energii ($\Sigma Q_{AZ,W,II}$). Temperatura reprezentatywna obliczana jest jako średnia arytmetyczna skrajnych dla obszaru temperatur powietrza zewnętrznego¹²:

$$T_{R,W,II}^m = \frac{T_{W,2}^m + T_{W,3}^m}{2}.$$

Wartość COP i moc grzewcza pompy ciepła w obszarze II są funkcją temperatury reprezentatywnej i temperatury zasilania systemu (najczęściej $T_{z,W} = 55^\circ\text{C}$):

$$COP_{W,d,II}^m = A_1 + B_1 \cdot T_{R,W,II}^m + C_1 \cdot T_{z,W} + D_1 \cdot T_{R,W,II}^m \cdot T_{z,W},$$

$$Q_{PC,W,II}^m = A + B \cdot T_{R,W,II}^m + C \cdot T_{z,W} + D \cdot T_{R,W,II}^m \cdot T_{z,W}.$$

Dodatkowo obliczany jest parametr $k_{W,II}^m$ obrazujący wpływ grzałki elektrycznej na wartość $COP_{W,II}^m$ systemu monoenergetycznego z pompą ciepła w tym obszarze. W przypadku systemów biwalentnych parametr służy jedynie do rozdzielania energii produkowanej przez pompę ciepła i energii dostarczanej z innego źródła energii, zaś wartość $COP_{W,II}^m$ jest równa $COP_{W,d,II}^m$.

$$k_{W,II}^m = \frac{Q_{PC,W,II}^m}{Q'_{W,R}^m}$$

Obszar III – energia cieplna jest dostarczana do układu tylko poprzez pracę pompy ciepła. Temperatura reprezentatywna obliczana jest jako średnia arytmetyczna skrajnych dla obszaru temperatur powietrza zewnętrznego:

$$T_{R,W,III}^m = \frac{T_{W,3}^m + T_{W,4}^m}{2}.$$

Wartość COP i moc grzewcza pompy ciepła w obszarze III są funkcją temperatury reprezentatywnej i temperatury zasilania systemu (najczęściej $T_{z,W} = 55^\circ\text{C}$):

$$COP_{W,III}^m = A_1 + B_1 \cdot T_{R,W,III}^m + C_1 \cdot T_{z,W} + D_1 \cdot T_{R,W,III}^m \cdot T_{z,W},$$

$$Q_{PC,W,III}^m = A + B \cdot T_{R,W,III}^m + C \cdot T_{z,W} + D \cdot T_{R,W,III}^m \cdot T_{z,W}.$$

3.5 Wpływ poszczególnych obszarów na efektywność energetyczną pompy ciepła

Podobnie jak w przypadku systemów ogrzewania budynków, opisywany model wykorzystuje funkcję częstości temperatury opisaną szczegółowo w rozdziale III. Aby

¹² Stwierdzono, że podobnie jak dla modelu pompy ciepła powietrze/woda współpracującej z systemem ogrzewania budynku uznanie za temperaturę reprezentatywną średniej arytmetycznej temperatur powietrza zewnętrznego w danym obszarze pozwoli uzyskać wystarczającą dokładność symulacji.

obliczyć wpływ obszarów I, II, III na efektywność pompy ciepła powietrze/woda, konieczne jest obliczenie dla każdego miesiąca zdefiniowanych poniżej znaczników:

$$DT^m = \frac{(T_{sr}^m - T_{min}^m)}{(T_{max}^m - T_{min}^m)} - 0,5,$$

$$x_{W,2}^m = \frac{(T_{W,2}^m - T_{min}^m)}{(T_{max}^m - T_{min}^m)},$$

$$x_{W,3}^m = \frac{(T_{W,3}^m - T_{min}^m)}{(T_{max}^m - T_{min}^m)},$$

$$x_{W,4} = 1.$$

Na ich podstawie oblicza się znaczniki liczby godzin ($Lx_{W,i}^m$) przypisanych do znacznika temperaturowego ($x_{W,i}^m$) w danym miesiącu:

jeżeli $x_{W,i}^m = 0$, wtedy $Lx_{W,i}^m = 0$,

jeżeli $x_{W,i}^m = 1$, wtedy $Lx_{W,i}^m = 1$,

inaczej:

$$Lx_{W,i}^m = \frac{1}{\pi} \cdot \arctan \left(2 \cdot (3 \cdot x_{W,i} - 1,5 - 3,19 \cdot DT) \cdot (1 + (3 \cdot x_{W,i} - 1,5 - 3,19 \cdot DT)^4) \right) + 0,5,$$

gdzie $i = 2, 3, 4$.

Na podstawie tej informacji oblicza się wpływ danego obszaru na pracę pompy ciepła w danym miesiącu:

$$X_{W,I}^m = Lx_{W,2}^m,$$

$$X_{W,II}^m = Lx_{W,3}^m - Lx_{W,2}^m,$$

$$X_{W,III}^m = 1 - Lx_{W,3}^m.$$

3.6 Efektywność energetyczna systemu pompy ciepła

Zapotrzebowanie na energię do przygotowania c.w.u. w obszarze I w miesiącu:

$$\Sigma Q_{W,I}^m = X_{W,I}^m \cdot (\Sigma Q_W^m - \Sigma Q_{el,T,W}^m).$$

Energia ta przypisywana jest do energii dostarczonej z grzałki elektrycznej w danym miesiącu ($\Sigma Q_{el,G,W}^m$) lub do energii z alternatywnego źródła energii w danym miesiącu ($\Sigma Q_{A\dot{z},W}^m$).

Zapotrzebowanie na energię do przygotowania c.w.u. w obszarze II w miesiącu:

$$\Sigma Q_{W,II}^m = X_{W,II}^m \cdot (\Sigma Q_W^m - \Sigma Q_{el,T,W}^m).$$

Energia ta rozdzielana jest na dwie części: energię cieplną dostarczoną pracą pompy ciepła ($\Sigma Q_{PC,W,II}$) i energię z grzałki elektrycznej ($\Sigma Q_{el,G,W,II}$) lub alternatywnego źródła energii ($\Sigma Q_{A\dot{Z},W,II}$), z zastosowaniem współczynnika $k_{W,II}$:

$$\Sigma Q_{PC,W,II}^m = k_{W,II}^m \cdot \Sigma Q_{W,II}^m,$$

$$\Sigma Q_{el,G,W,II}^m = (1 - k_{W,II}^m) \cdot \Sigma Q_{W,II}^m,$$

lub gdy dodatkowe źródło energii nie jest zasilane energią elektryczną:

$$\Sigma Q_{A\dot{Z},W,II}^m = (1 - k_{W,II}^m) \cdot \Sigma Q_{W,II}^m.$$

Zapotrzebowanie na energię do przygotowania c.w.u. w obszarze III w miesiącu:

$$\Sigma Q_{W,III}^m = X_{W,III}^m \cdot (\Sigma Q_W^m - \Sigma Q_{el,T,W}^m).$$

Zapotrzebowanie na energię elektryczną dostarczaną do pompy ciepła w miesiącu:

$$\Sigma Q_{EL,W}^m = \frac{\Sigma Q_{PC,W,II}^m}{COP_{W,II}^m} + \frac{\Sigma Q_{W,III}^m}{COP_{W,III}^m}.$$

Zapotrzebowanie na energię cieplną do przygotowania c.w.u. dostarczaną z grzałki elektrycznej w danym miesiącu:

$$\Sigma Q_{el,G,W}^m = \Sigma Q_{el,T,W}^m + \Sigma Q_{W,I}^m + \Sigma Q_{el,G,W,II}^m,$$

lub gdy dodatkowe źródło energii nie jest zasilane energią elektryczną:

$$\Sigma Q_{A\dot{Z},W}^m = \Sigma Q_{A\dot{Z},T,W}^m + \Sigma Q_{W,I}^m + \Sigma Q_{A\dot{Z},W,II}^m.$$

Energia cieplna do przygotowania c.w.u. dostarczona w danym miesiącu przez pracę pompy ciepła:

$$\Sigma Q_{PC,W}^m = \Sigma Q_W^m - \Sigma Q_{el,G,W}^m,$$

lub gdy dodatkowe źródło energii nie jest zasilane energią elektryczną:

$$\Sigma Q_{PC,W}^m = \Sigma Q_W^m - \Sigma Q_{A\dot{Z},W}^m.$$

Miesięczny współczynnik efektywności samej pompy ciepła, bez wpływu grzałki elektrycznej:

$$SCOP_W^m = \frac{\Sigma Q_{PC,W}^m}{\Sigma Q_{EL,W}^m}.$$

Miesięczny współczynnik efektywności układu monoenergetycznego:

$$SCOP_{S,W}^m = \frac{\Sigma Q_W^m}{\Sigma Q_{EL,W}^m + \Sigma Q_{el,G,W}^m}.$$

Średni czas pracy pompy ciepła w dobie w trybie przygotowania ciepłej wody użytkowej w danym miesiącu:

$$\tau_{PC,W}^m = \frac{\Sigma Q_{W,III}^m}{Ld^m \cdot Q_{PC,W,III}^m} + \frac{\Sigma Q_{PC,W,III}^m}{Ld^m \cdot Q_{PC,W,II}^m}$$

Udział grzałki elektrycznej w wytworzeniu energii cieplnej do przygotowania c.w.u. w danym miesiącu:

$$U_{el,G,W}^m = \frac{\Sigma Q_{el,G,W}^m}{\Sigma Q_W^m},$$

lub gdy dodatkowe źródło energii nie jest zasilane energią elektryczną:

$$U_{A\dot{Z},W}^m = \frac{\Sigma Q_{A\dot{Z},W}^m}{\Sigma Q_W^m}.$$

4. Ocena modelu miesięcznego do symulacji pracy pompy ciepła powietrze/woda

4.1 Zakres analiz porównawczych

Model efektywności energetycznej systemów grzewczych z pompami ciepła powietrze/woda w miesięcznym kroku obliczeniowym sprawdzono poprzez porównanie wyników uzyskanych z jego zastosowaniem z wynikami symulacji godzinowych. Porównanie przeprowadzono dla dwóch pomp ciepła powietrze/woda, dwóch lokalizacji i łącznie ośmiu profili obciążenia grzewczego, wynikających z różnych wartości rozbioru c.w.u. Wykonano cztery zestawy symulacji: analiza 1, 2, 3 i 4, co opisano w tabeli 20. We wszystkich analizach założono, iż pompa ciepła uruchamia się przy 50% deficycie energii w zbiorniku. Każda analiza obejmowała wyniki trzech symulacji opisanych poniżej:

- (1) Symulacja wykonana na modelu godzinowym uwzględniającym zmiany profilu zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u.: miesięczne, dobowe i godzinowe, oraz bilansowy model ładowania i rozładowywania układu c.w.u.; w dalszym opisie wyniki tej symulacji nazwano modelem godzinowym.
- (2) Symulacja wykonana na modelu godzinowym, w którym założono równomierny rozkład zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. na poszczególne godziny i nie uwzględniono wpływu zasobnika na efektywność całego systemu; symulacja ta odpowiada wynikom dla analizy wykonanej w kroku temperaturowym, dlatego w dalszym opisie wyniki tej symulacji nazwano modelem temperaturowym.

- (3) Symulacja wykonana na modelu miesięcznym, szczegółowo opisanym w niniejszym rozdziale pracy; z przyczyn oczywistych wyniki tej symulacji nazwano modelem miesięcznym.

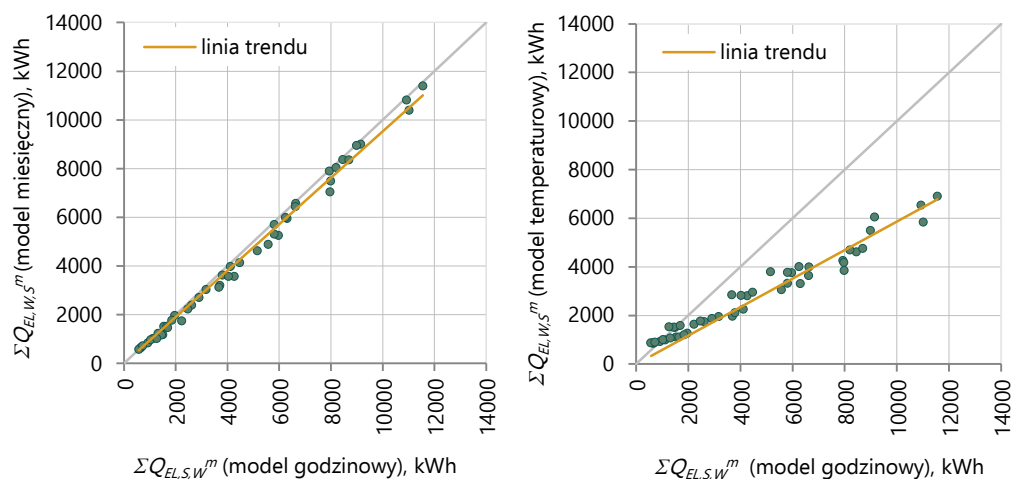
Tabela 20. Zestawienie analiz porównawczych do oceny modelu miesięcznej efektywności pompy ciepła powietrze/woda stosowanej do przygotowania ciepłej wody użytkowej

Analiza 1	PI, PC2, Z1, G1	PII, PC2, Z2, G1	PIII, PC2, Z3, G1	PIV, PC2, Z4, G1
Analiza 2	PI, PC2, Z1, G2	PII, PC2, Z2, G2	PIII, PC2, Z3, G2	PIV, PC2, Z4, G2
Analiza 1	PV, PC2, Z5, G1	PVI, PC2, Z6, G1	PVII, PC2, Z7, G1	PVIII, PC2, Z8, G1
Analiza 2	PV, PC2, Z5, G2	PVI, PC2, Z6, G2	PVII, PC2, Z7, G2	PVIII, PC2, Z8, G2
Szczegóły oznaczeń				
Profil	PI – 1 296 l/d PV – 7 200 l/d	PII – 2 304 l/d PVI – 10 080 l/d	PIII – 4 320 l/d PVII – 17280 l/d	PIV – 5 760 l/d PVIII – 21 600 l/d
Lokalizacja	Wrocław – analiza 1 i 2 Lublin – analiza 3 i 4			
Pompa ciepła	PC1 – 8,7 kW (A2/W55) PC2 – 29,3 kW (A2/W55)			
Zasobnik c.w.u.	Z1 – 400 l Z5 – 1500 l	Z2 – 600 l Z6 – 2000 l	Z3 – 1200 l Z7 – 3500 l	Z4 – 1500 l Z8 – 4500 l
Grzałka elektryczna	G1 – zawsze, przyjęto czas ładowania 1 h G2 – tylko przy pustym zbiorniku, maksymalny możliwy czas ładowania			

4.2 Wyniki i dyskusja

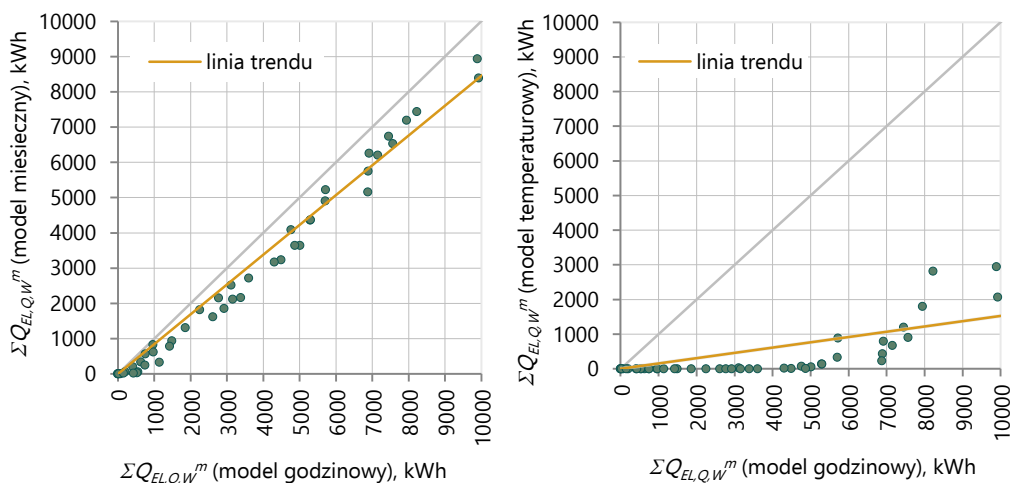
Analiza 1

Na rysunku 53 zamieszczono porównanie wartości zapotrzebowania na energię elektryczną dla monoenergetycznego systemu pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S,W}$) uzyskane z modelu miesięcznego i temperaturowego z wartościami wynikającymi z symulacji przeprowadzonych modelem godzinowym. Korelacja pomiędzy wynikami modelu miesięcznego i godzinowego jest zadowalająca. Odchylenie linii trendu od przekątnej wskazującej idealne odwzorowanie wynosi $-4,8\%$. Korelacja pomiędzy wynikami dla modelu temperaturowego i godzinowego pozwala stwierdzić, iż model temperaturowy nie daje prawidłowej odpowiedzi dla większości symulacji przeprowadzonych w tej analizie, znacząco zaniżając wartość zapotrzebowania na energię. Linia trendu pomiędzy odpowiedzią z modelu temperaturowego a wynikami z modelu godzinowego wykazuje odchylenie od oczekiwanego rezultatu wynoszące $-41,4\%$.



Rysunek 53. Wartości zapotrzebowania na energię elektryczną dla systemu pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S,W}^m$) modelu miesięcznego i temperaturowego wobec modelu godzinowego dla analizy 1

Na rysunku 54 zamieszczono porównanie wartości zapotrzebowania na energię z dodatkowego źródła energii w analizowanym systemie ($\Sigma Q_{EL,Q,W}^m$) uzyskane z modelu miesięcznego i temperaturowego z wartościami wynikającymi z symulacji przeprowadzonych modelem godzinowym.

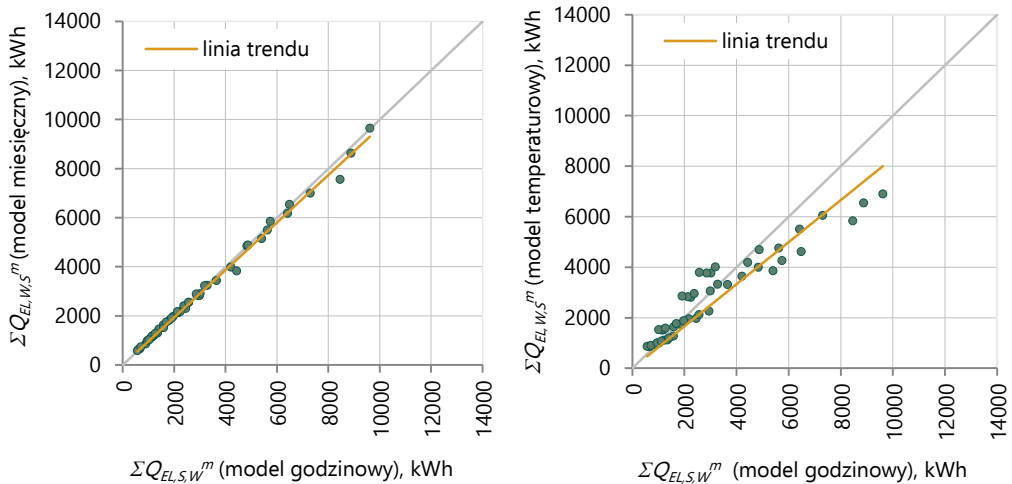


Rysunek 54. Wartości zapotrzebowania na energię ciepłą z dodatkowego źródła ($\Sigma Q_{EL,Q,W}^m$) modelu miesięcznego i temperaturowego względem modelu godzinowego dla analizy 1

Korelacja pomiędzy wynikami modelu miesięcznego i godzinowego jest zadowalająca. Odchylenie linii trendu od przekątnej wskazującej idealne odwzorowanie wynosi $-15,5\%$. Rozrzut pomiędzy wynikami dla modelu temperaturowego i godzinowego pozwala stwierdzić, iż model temperaturowy nie daje prawidłowej odpowiedzi dla symulacji przeprowadzonych w tej analizie oraz nie wykazuje istotnych dla tej analizy wartości zapotrzebowania na energię dodatkową wynikających z niedoboru mocy pompy ciepła.

Analiza 2

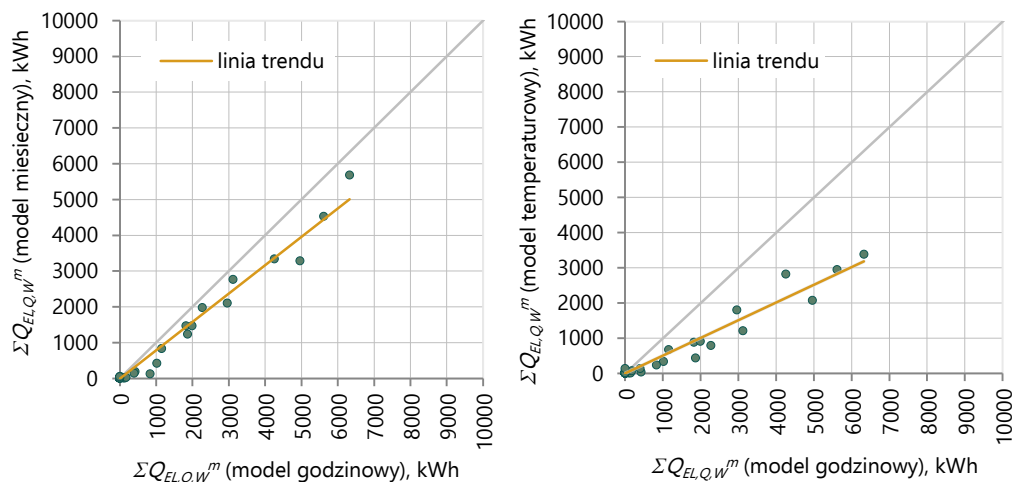
Symulacje opisane jako analiza 2 przeprowadzono dla systemu analogicznego jak w analizie 1, zakładając maksymalny dostępny czas ładowania zasobnika. Dokładność wyznaczenia wartości zapotrzebowania na energię elektryczną dla badanego systemu pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S,W}$) uzyskana z modelu miesięcznego i temperaturowego dla danych z analizy 2 wykazuje nieco więcej zbieżności niż w poprzednim przypadku (rysunek 55).



Rysunek 55. Wartości zapotrzebowania na energię elektryczną dla systemu pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S,W}^m$) modelu miesięcznego i temperaturowego wobec modelu godzinowego dla analizy 2

Korelacja pomiędzy wynikami modelu miesięcznego i godzinowego jest bardzo dobra. Odchylenie linii trendu od przekątnej wskazującej idealne odwzorowanie wynosi $-3,3\%$. Korelacja pomiędzy wynikami dla modelu temperaturowego i godzinowego pozwala stwierdzić, iż model temperaturowy nie podaje dokładnej odpowiedzi dla symulacji przeprowadzonych w tej analizie. Linia trendu pomiędzy odpowiedzią z modelu temperaturowego a wynikami z modelu godzinowego wykazuje odchylenie od oczekiwanego rezultatu wynoszące $-16,8\%$. Niedokładności te spowodowane są dwoma czynnikami. Pierwszym jest niewłaściwa wartość wejściowa, czyli zapotrzebo-

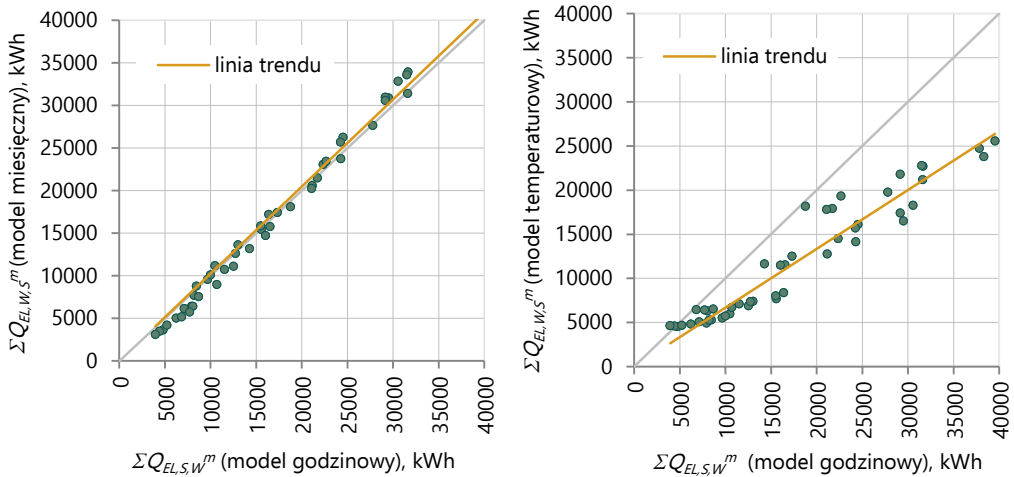
wanie na energię do przygotowania c.w.u. w danym miesiącu. Drugim jest brak uwzględniania dodatkowej energii elektrycznej potrzebnej w sytuacji, gdy zbiornik rozładuje się całkowicie, co opisuje rysunek 56. Dla modelu miesięcznego odchylenie linii trendu od przekątnej wskazującej idealne odwzorowanie wynosi tylko $-21,0\%$, dla modelu temperaturowego: $-50,0\%$.



Rysunek 56. Wartości zapotrzebowania na energię ciepłą z dodatkowego źródła ($\Sigma Q_{EL,Q,W}^m$) modelu miesięcznego i temperaturowego względem modelu godzinowego dla analizy 2

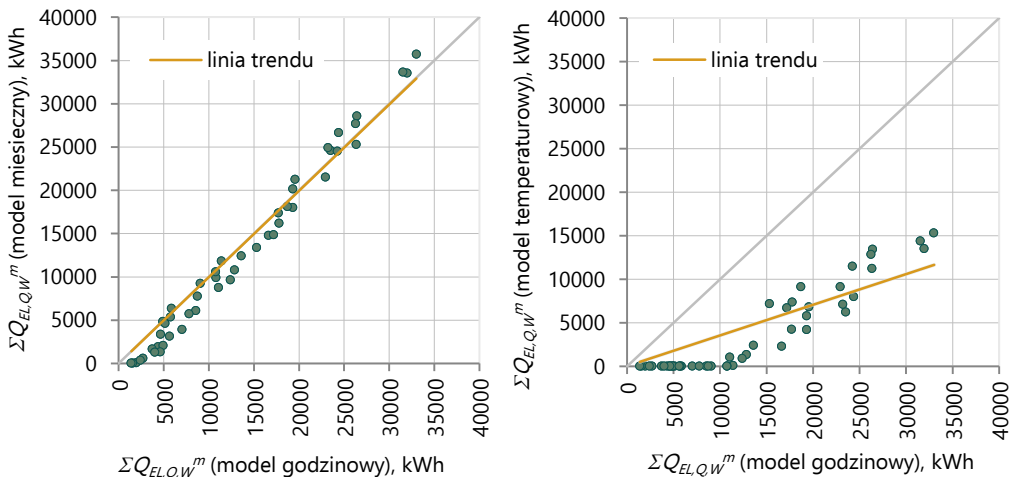
Analiza 3

Symulacje w analizie 3 przeprowadzono dla większej pompy ciepła i większego zużycia c.w.u. oraz dla innej lokalizacji geograficznej, co wpłynęło na wartości temperatury powietrza zewnętrznego i temperatury wody wodociągowej. Na rysunku 57 zamieszczono porównanie wartości zapotrzebowania na energię elektryczną dla monoeenergetycznego systemu pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S,W}$) uzyskane z modelu miesięcznego i temperaturowego z wartościami wynikającymi z symulacji przeprowadzonych w kroku godzinowym. Korelacja pomiędzy wynikami modelu miesięcznego i godzinowego jest zadowalająca. Odchylenie linii trendu od przekątnej wskazującej idealne odwzorowanie jest poniżej $0,1\%$. Korelacja pomiędzy wynikami dla modelu temperaturowego i godzinowego pozwala stwierdzić, iż model temperaturowy nie daje prawidłowej odpowiedzi dla większości symulacji przeprowadzonych w tej analizie, znacząco zaniżając wartość zapotrzebowania na energię. Linia trendu pomiędzy odpowiedzią z modelu temperaturowego a wynikami z modelu godzinowego wykazuje odchylenie od oczekiwanego rezultatu wynoszące $-37,3\%$.



Rysunek 57. Wartości zapotrzebowania na energię elektryczną dla systemu pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S,W}^m$) modelu miesięcznego i temperaturowego wobec modelu godzinowego dla analizy 3

Na rysunku 58 zamieszczono porównanie wartości zapotrzebowania na energię z dodatkowego źródła energii w analizowanym systemie ($\Sigma Q_{EL,Q,W}^m$) uzyskane z modelu miesięcznego i temperaturowego z wartościami wynikającymi z symulacji przeprowadzonych modelem godzinowym.



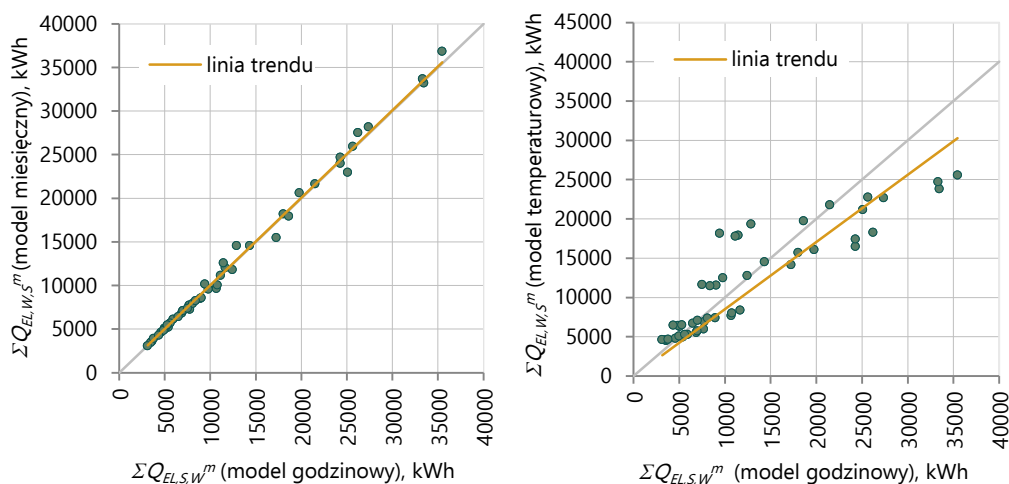
Rysunek 58. Wartości zapotrzebowania na energię cieplną z dodatkowego źródła ($\Sigma Q_{EL,Q,W}^m$) modelu miesięcznego i temperaturowego względem modelu godzinowego dla analizy 3

Korelacja pomiędzy wynikami modelu miesięcznego i godzinowego jest zadowalająca. Odchylenie linii trendu od przekątnej wskazującej idealne odwzorowanie jest poniżej 0,1%. Rozrzut pomiędzy wynikami dla modelu temperaturowego i godzinowe-

go pozwala stwierdzić, iż model temperaturowy nie daje prawidłowej odpowiedzi dla symulacji przeprowadzonych w tej analizie oraz nie wykazuje istotnych dla tej analizy wartości zapotrzebowania na energię dodatkową wynikających z niedoboru mocy pompy ciepła.

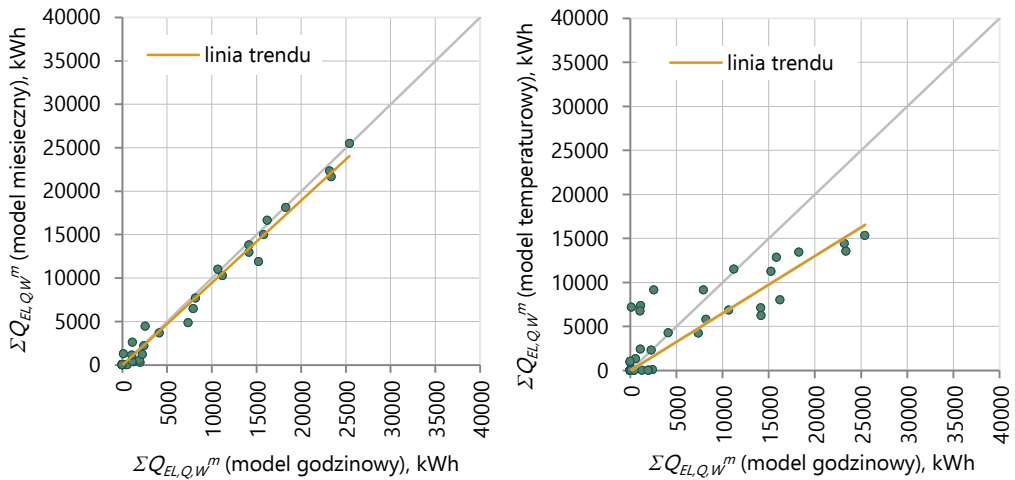
Analiza 4

Symulacje opisane w analizie 4 przeprowadzono dla systemu analogicznego jak w analizie 3, zakładając maksymalny dostępny czas ładowania zasobnika.



Rysunek 59. Wartości zapotrzebowania na energię elektryczną dla systemu pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S,W}^m$) modelu miesięcznego i temperaturowego wobec modelu godzinowego dla analizy 4

Korelacja pomiędzy wynikami zapotrzebowania na energię elektryczną dla badanego systemu pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S,W}$) z modelu miesięcznego i godzinowego jest bardzo dobra (rysunek 59). Odchylenie linii trendu od przekątnej wskazującej idealne odwzorowanie wynosi poniżej 0,1%. Korelacja pomiędzy wynikami dla modelu temperaturowego i godzinowego pozwala stwierdzić, iż model temperaturowy nie podaje dokładnej odpowiedzi dla symulacji przeprowadzonych w tej analizie. Linia trendu pomiędzy odpowiedzią z modelu temperaturowego a wynikami z modelu godzinowego wykazuje odchylenie od oczekiwanego rezultatu wynoszące $-14,6\%$, a rozproszenie odpowiedzi modelu jest bardzo duże. Niedokładności te spowodowane są dwoma czynnikami. Pierwszym jest niewłaściwa wartość wejściowa, czyli zapotrzebowanie na energię do przygotowania c.w.u. w danym miesiącu. Drugim jest brak uwzględniania dodatkowej energii elektrycznej potrzebnej w sytuacji, gdy zbiornik rozładuje się całkowicie, co opisuje rysunek 60. Dla modelu miesięcznego odchylenie linii trendu od przekątnej wskazującej idealne odwzorowanie wynosi tylko $-5,4\%$, dla modelu temperaturowego: $-45,0\%$.



Rysunek 60. Wartości zapotrzebowania na energię ciepłą z dodatkowego źródła ($\Sigma Q_{EL,Q,W}^m$) modelu miesięcznego i temperaturowego względem modelu godzinowego dla analizy 4

4.3 Podsumowanie

W rozdziale V zaproponowano model miesięcznej efektywności energetycznej pompy ciepła powietrze/woda współpracującej z systemem przygotowania ciepłej wody użytkowej. Danymi wejściowymi do modelu są: minimalna, średnia i maksymalna temperatura powietrza zewnętrznego w miesiącu, miesięczne wartości zapotrzebowania na energię końcową do przygotowania ciepłej wody użytkowej, charakterystyka pompy ciepła uzyskana na podstawie danych z normy EN 14511 [11] i objętość zasobnika ciepłej wody użytkowej. Wyniki symulacji efektywności energetycznej pompy ciepła powietrze/woda pracującej w trybie przygotowania c.w.u. uzyskane z zastosowaniem zaproponowanego modelu miesięcznego wykazują dobrą zgodność z wynikami uzyskanymi na podstawie modelu godzinowego, uwzględniającego dokładny profil zmian zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. Zaproponowany model miesięczny pozwala uzyskać poprawne wyniki miesięcznej wartości zapotrzebowania na energię elektryczną do zasilania systemu pompy ciepła powietrze/woda i dość dobre wyniki dotyczące zapotrzebowania na energię konieczną do dostarczenia z dodatkowego źródła energii, przy znacznie mniejszej skali trudności obliczeń niż dla modelu obliczanego w kroku godzinowym. Uwzględnienie zmian w wartościach miesięcznego zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. znacząco poprawia wyniki symulacji w stosunku do modelu temperaturowego, tj. symulacji, w której zakładane jest równomierne rozdzielenie tego zapotrzebowania na energię na kolejne godziny w roku.

MODEL ZINTEGROWANY DO ANALIZY PRACY POMP CIEPŁA POWIETRZE/WODA DLA SYSTEMÓW OGRZEWANIA BUDYNKU I PRZYGOTOWANIA CIEPŁEJ WODY UŻYTKOWEJ

1. Wprowadzenie

W rozdziałach III i V opisano modele do symulacji miesięcznej efektywności pompy ciepła powietrze/woda pracującej dla systemu ogrzewania budynku lub przygotowania ciepłej wody użytkowej. W praktycznych zastosowaniach źródło ciepła działa zazwyczaj na oba cele użytkowania energii. Modele indywidualne były tak konstruowane, aby ich połączenie nie było problematyczne, a analiza dwóch systemów jednocześnie pozwalała na dobór mocy grzewczej pompy ciepła powietrze/woda i wyznaczenie jej efektywności energetycznej w obu systemach. Danymi wejściowymi do modelu są bilanse miesięczne zapotrzebowania na energię do ogrzewania i przygotowania c.w.u. Priorytetowo w modelu zintegrowanym potraktowane jest zapotrzebowanie na energię do przygotowania ciepłej wody użytkowej. W pierwszej kolejności wyznaczana jest efektywność pracy pompy ciepła powietrze/woda oraz jej czas pracy w trybie przygotowania ciepłej wody użytkowej. Czas ten stanowi punkt wyjścia do analizy pracy urządzenia w trybie ogrzewania budynku. W wyniku przypisania części dostępnych godzin w każdym miesiącu na potrzeby pracy systemu przygotowania c.w.u. energia grzewcza potrzebna do utrzymania właściwej temperatury powietrza wewnętrznego w budynku musi być dostarczona w krótszym czasie. Na tej podstawie wyliczana jest zastępcza moc źródła ciepła do ogrzewania budynku i to ta wartość stanowi podstawę do określenia obszarów pracy pompy ciepła i ich udziałów w efektywności energetycznej urządzenia. Dzięki analizie wyników możliwe jest podjęcie decyzji o poprawności przyjętego czasu pracy układu w trybie przygotowania c.w.u. i wynikającym z tego wzroście wymaganej mocy grzewczej do ogrzewania. Podjęcie decyzji wspomagane jest obliczeniami udziału energii dodatkowej wynikającej z okresowych niedoborów mocy pompy ciepła dostarczonej do układu. Zwiększenie mocy grzewczej pompy ciepła skutkować będzie skróceniem czasu pracy urządzenia na cele przygotowania c.w.u. i tym samym zwiększeniem udziału pompy ciepła w pokryciu potrzeb grzewczych budynku. Z drugiej strony, przewymiarowanie pompy ciepła powietrze/woda widoczne będzie w wartości opisującej wpływ pracy w obszarze IV (obejmującym zakres pracy urządzenia w trybie regulacji mocy on/off) na efektywność systemu. Jeśli udział strat energii elektrycznej związanej z przewymiarowaniem urządzenia znacznie przekracza udział energii dodatkowej dostarczanej do budynku w obszarach I i II pracy pompy

ciepła, rozważyć należy sprawdzenie, czy mniejsza jednostka nie będzie charakteryzowała się wyższą efektywnością pracy.

Algorytm obliczeniowy dla modelu zintegrowanego do analizy miesięcznej efektywności systemu grzewczego z pompą ciepła powietrze/woda opisano w punkcie 2 tego rozdziału. Przykładowe wyniki symulacji z zastosowaniem tego modelu wraz z bardziej szczegółowym komentarzem na temat zasad interpretacji wyników obliczeń opisano w punkcie 3.

2. Algorytm modelu zintegrowanego

2.1 Dane wejściowe i obliczenia podstawowe

T_{sr}^m – średnia temperatura powietrza zewnętrznego w miesiącu, °C,

T_{min}^m – minimalna temperatura powietrza zewnętrznego w miesiącu, °C,

T_{max}^m – maksymalna temperatura powietrza zewnętrznego w miesiącu, °C,

Ld^m – liczba dni w miesiącu.

$T_{min,PC}$ – minimalna temperatura powietrza zewnętrznego, przy której możliwa jest praca pompy ciepła powietrze/woda, °C,

$T_{max,PC}$ – maksymalna temperatura, do jakiej urządzenie jest w stanie podgrzać czynnik grzewczy, °C,

$Q_{PC,min}$ – minimalna moc możliwa do osiągnięcia w wyniku redukcji prędkości obrotów sprężarki, kW,

a – parametr do obliczenia współczynnika redukcji opisującego wpływ obciążenia częściowego pompy ciepła na jej efektywność.

Na podstawie danych pozyskanych zgodnie z normą EN 14511 [11], stosując metodę regresji wielorakiej, należy wyznaczyć parametry modeli COP_d oraz mocy grzewczej pompy ciepła opisanych poniżej.

$$Q_{PC} = A + B \cdot T_{zew} + C \cdot T_Z + D \cdot T_{zew} \cdot T_Z$$

$$COP_d = A_1 + B_1 \cdot T_{zew} + C_1 \cdot T_Z + D_1 \cdot T_{zew} \cdot T_Z$$

T_{zew} – temperatura wewnętrzna w pomieszczeniach, °C,

T_{ksg} – temperatura powietrza zewnętrznego dla końca sezonu grzewczego dla obiektu, °C,

ΣQ_B^m – zapotrzebowanie na energię końcową do ogrzewania w miesiącu, kWh,

T_Z^{obl} – obliczeniowa temperatura zasilania, °C,

T_Z^{ksq} – temperatura zasilania na końcu sezonu grzewczego, °C,

T_{zew}^{obl} – temperatura obliczeniowa powietrza zewnętrznego, °C,

V_{CWU}^d – dobowe zużycie c.w.u., l,

V_Z – objętość zasobnika c.w.u., l,

$defPC$ – deficyt energii w zasobniku do uruchomienia układu grzewczego, %,

$T_{Z,W}$ – temperatura pracy pompy ciepła w trybie przygotowania c.w.u., °C,

T_{CWU} – wymagana temperatura c.w.u., °C,

T_{WZ}^m – temperatura wody zimnej w danym miesiącu, °C.

Parametr charakterystyczny *funkcji częstości temperatury* oblicza się na podstawie poniższego wzoru:

$$DT^m = \frac{(T_{sr}^m - T_{min}^m)}{(T_{max}^m - T_{min}^m)} - 0,5.$$

2.2 Efektywności pompy ciepła względem układu ciepłej wody użytkowej

Maksymalny czas ładowania zasobnika c.w.u.:

$$\tau_{max} = \frac{24}{\frac{V_{CWU}^d}{V_Z \cdot defPC}}.$$

Jest to maksymalny czas ładowania, jaki należy przyjąć do obliczeń. Można przyjąć wartości niższe od wyznaczonych powyżej, oczywiście zachowując rozsądną granicę dolną, wynoszącą około 1 godziny.

Maksymalna ilość cykli ładowania zasobnika c.w.u. w dobie:

$$n_{max} = \frac{24}{\tau_{max}}.$$

Dzięki analizie ilości cykli w dobie możliwe jest kontrolowanie poprawności doboru zasobnika do zadanego zużycia c.w.u. Jeśli przekracza ona rozsądne wartości, należy zwiększyć objętość zasobnika c.w.u.

Udział dodatkowego źródła energii ze względu na maksymalną temperaturę pracy pompy ciepła:

$$U_{T,W}^m = \frac{T_{CWU} - T_{max,PC}}{T_{CWU} - T_{WZ}^m}.$$

Energia dostarczona z grzałki elektrycznej ze względu na zbyt niską temperaturę ciepłej wody wytwarzaną przez pompę ciepła:

$$\Sigma Q_{el,T,W}^m = U_{T,W} \cdot \Sigma Q_W^m,$$

lub gdy dodatkowe źródło nie jest zasilane energią elektryczną:

$$\Sigma Q_{AZ,T,W}^m = U_{T,W} \cdot \Sigma Q_W^m.$$

Energia konieczna do dostarczenia w jednym cyklu ładowania w danym miesiącu:

$$\Sigma Q_{CYKL}^m = \frac{V_Z \cdot defPC \cdot cp \cdot (T_{CWU} - T_{WZ}^m)}{3600}.$$

Energia końcowa do przygotowania c.w.u. w dobie w danym miesiącu:

$$\Sigma Q_{W,d}^m = \frac{\Sigma Q_W^m}{Ld^m}.$$

Liczba cykli ładowania w dobie w danym miesiącu:

$$n_m = \min \left(n_{max}; \frac{\Sigma Q_{W,d}^m}{\Sigma Q_{CYKL}^m} \right).$$

Reprezentatywna moc układu przygotowania c.w.u. w typowym cyklu ładowania w danym miesiącu:

$$Q_{W,R}^m = \frac{\Sigma Q_{W,d}^m}{n \cdot \tau_{max}}.$$

Reprezentatywna moc układu przygotowania c.w.u. w typowym cyklu ładowania zredukowana o energię dostarczoną z dodatkowego źródła energii w danym miesiącu:

$$Q'_{W,R}^m = (1 - U_{T,W}^m) \cdot Q_{W,R}^m.$$

Temperatura powietrza zewnętrznego w punkcie biwalentnym w danym miesiącu:

$$T_{biw,W}^m = \frac{Q'_{W,R}^m - A - C \cdot T_{Z,W}}{B + D \cdot T_{Z,W}}.$$

Temperatury graniczne obszarów pracy pompy ciepła powietrze/woda w trybie c.w.u. w danym miesiącu:

$$\text{krok 1: } T_{W,1}^m = T_{min}^m,$$

$$\text{krok 2: } T_{W,2}^m = \min (T_{max}^m, \max (T_{PC,min}, T_{min}^m)),$$

$$\text{krok 3: } T_{W,4}^m = T_{max}^m,$$

$$\text{krok 4: } T_{W,3}^m = \min (\max (T_{W,2}^m, T_{biw,W}^m), T_{W,4}^m).$$

Znaczniki temperaturowe dla *funkcji częstości temperatury* w danym miesiącu:

$$x_{W,2}^m = \frac{(T_{W,2}^m - T_{min}^m)}{(T_{max}^m - T_{min}^m)},$$

$$x_{W,3}^m = \frac{(T_{W,3}^m - T_{min}^m)}{(T_{max}^m - T_{min}^m)},$$

$$x_{W,4} = 1.$$

Znaczniki liczby godzin w danym miesiącu:

Jeżeli $x_{W,i}^m = 0$, wtedy $Lh_{W,i}^m = 0$,

jeżeli $x_{W,i}^m = 1$, wtedy $Lh_{W,i}^m = 1$,

w innym przypadku: $Lx_{W,i}^m = \frac{1}{\pi} \cdot \arctan \left(2 \cdot (3 \cdot x_{W,i} - 1,5 - 3,19 \cdot DT) \cdot (1 + (3 \cdot x_{W,i} - 1,5 - 3,19 \cdot DT)^4) \right) + 0,5$,

gdzie $i = 2, 3$ lub 4 .

Wpływ obszaru na pracę pompy ciepła w danym miesiącu:

$$X_{W,I}^m = Lx_{W,2}^m,$$

$$X_{W,II}^m = Lx_{W,3}^m - Lx_{W,2}^m,$$

$$X_{W,III}^m = 1 - Lx_{W,3}^m.$$

Energia do przygotowania c.w.u. w obszarze I w danym miesiącu:

$$\Sigma Q_{W,I}^m = X_{W,I}^m \cdot (\Sigma Q_W^m - \Sigma Q_{el,T,W}^m).$$

Energia ta przypisywana jest do energii dostarczonej z grzałki elektrycznej w danym miesiącu ($\Sigma Q_{el,G,W}^m$) lub do energii z alternatywnego źródła energii w danym miesiącu ($\Sigma Q_{A\dot{z},W}^m$).

Energia do przygotowania c.w.u. w obszarze II w danym miesiącu:

$$\Sigma Q_{W,II}^m = X_{W,II}^m \cdot (\Sigma Q_W^m - \Sigma Q_{el,T,W}^m).$$

Parametry pracy pompy ciepła powietrze/woda w obszarze II w danym miesiącu:

$$T_{R,W,II}^m = \frac{T_{W,2}^m + T_{W,3}^m}{2},$$

$$COP_{W,d,II}^m = A_1 + B_1 \cdot T_{R,W,II}^m + C_1 \cdot T_{Z,W} + D_1 \cdot T_{R,W,II}^m \cdot T_{Z,W},$$

$$Q_{PC,W,II}^m = A + B \cdot T_{R,W,II}^m + C \cdot T_{Z,W} + D \cdot T_{R,W,II}^m \cdot T_{Z,W}.$$

Rozdzielenie energii w obszarze II na energię ciepłą dostarczoną z pompy ciepła i z innego źródła energii:

$$k_{W,II}^m = \frac{Q_{PC,W,II}^m}{Q'_{W,R}{}^m},$$

$$\Sigma Q_{PC,W,II}^m = k_{W,II}^m \cdot \Sigma Q_{W,II}^m,$$

$$\Sigma Q_{el,G,W,II}^m = (1 - k_{W,II}^m) \cdot \Sigma Q_{W,II}^m,$$

lub gdy dodatkowe źródło energii nie jest zasilane energią elektryczną:

$$\Sigma Q_{A\dot{Z},W,II}^m = (1 - k_{W,II}^m) \cdot \Sigma Q_{W,II}^m.$$

Energia do przygotowania c.w.u. w obszarze III w danym miesiącu:

$$\Sigma Q_{W,III}^m = X_{W,III}^m \cdot (\Sigma Q_W^m - \Sigma Q_{el,T,W}^m).$$

Parametry pracy pompy ciepła powietrze/woda w obszarze III w danym miesiącu:

$$T_{R,W,III}^m = \frac{T_{W,3}^m + T_{W,4}^m}{2},$$

$$COP_{W,III}^m = A_1 + B_1 \cdot T_{R,W,III}^m + C_1 \cdot T_{Z,W} + D_1 \cdot T_{R,W,III}^m \cdot T_{Z,W},$$

$$Q_{PC,W,III}^m = A + B \cdot T_{R,W,III}^m + C \cdot T_{Z,W} + D \cdot T_{R,W,III}^m \cdot T_{Z,W}.$$

Całkowita energia elektryczna dostarczana do pompy ciepła w danym miesiącu:

$$\Sigma Q_{EL,W}^m = \frac{\Sigma Q_{PC,W,II}^m}{COP_{W,II}^m} + \frac{\Sigma Q_{W,III}^m}{COP_{W,III}^m}.$$

Całkowita energia elektryczna dostarczona do grzałki w danym miesiącu:

$$\Sigma Q_{el,G,W}^m = \Sigma Q_{el,T,W}^m + \Sigma Q_{W,I}^m + \Sigma Q_{el,G,W,II}^m,$$

lub gdy dodatkowe źródło energii nie jest zasilane energią elektryczną:

$$\Sigma Q_{A\dot{Z},W}^m = \Sigma Q_{A\dot{Z},T,W}^m + \Sigma Q_{W,I}^m + \Sigma Q_{A\dot{Z},W,II}^m.$$

Energia cieplna produkowana przez pompę ciepła na potrzeby przygotowania c.w.u. w danym miesiącu:

$$\Sigma Q_{PC,W}^m = \Sigma Q_W^m - \Sigma Q_{el,G,W}^m,$$

lub gdy dodatkowe źródło energii nie jest zasilane energią elektryczną:

$$\Sigma Q_{PC,W}^m = \Sigma Q_W^m - \Sigma Q_{A\dot{Z},W}^m.$$

Miesięczny współczynnik efektywności pompy ciepła:

$$SCOP_W^m = \frac{\Sigma Q_{PC,W}^m}{\Sigma Q_{EL,W}^m}.$$

Miesięczny współczynnik efektywności pompy ciepła układu monoenergetycznego:

$$SCOP_{S,W}^m = \frac{\Sigma Q_W^m}{\Sigma Q_{EL,W}^m + \Sigma Q_{el,G,W}^m}.$$

Średni czas pracy pompy ciepła w dobie w trybie przygotowania ciepłej wody użytkowej w danym miesiącu:

$$\tau_{PC,W}^m = \frac{\Sigma Q_{W,III}^m}{Ld^m \cdot Q_{PC,W,III}^m} + \frac{\Sigma Q_{PC,W,II}^m}{Ld^m \cdot Q_{PC,W,II}^m}.$$

Udział energii z grzałki elektrycznej w danym miesiącu:

$$U_{el,G,W}^m = \frac{\Sigma Q_{el,G,W}^m}{\Sigma Q_W^m},$$

lub gdy dodatkowe źródło energii nie jest zasilane energią elektryczną:

$$U_{A\dot{z},W}^m = \frac{\Sigma Q_{A\dot{z},W}^m}{\Sigma Q_W^m}.$$

2.3 Efektywność pompy ciepła względem układu ogrzewania budynku

Znacznik temperaturowy końca sezonu grzewczego w danym miesiącu:

$$x_{ksg}^m = \frac{(T_{ksg} - T_{min}^m)}{(T_{max}^m - T_{min}^m)}.$$

Znacznik godzinowy końca sezonu grzewczego w danym miesiącu:

$$Lx_{ksg}^m = \frac{1}{\pi} \cdot \arctan \left(2 \cdot (3 \cdot x_{ksg}^m - 1,5 - 3,19 \cdot DT^m) \cdot (1 + (3 \cdot x_{ksg}^m - 1,5 - 3,19 \cdot DT^m)^4) \right) + 0,5.$$

Czas trwania sezonu grzewczego w danym miesiącu:

$$Lh_{ksg} = Lh^m \cdot Lx_{ksg}^m.$$

Współczynnik kierunkowy obciążenia cieplnego budynku w danym miesiącu:

$$\Delta Q_B^m = \frac{\Sigma Q_B^m}{(Lh_{ksg} - Ld \cdot \tau_{PC,W}^m) \cdot (T_{weW} - T_{sr}^m)},$$

gdzie $\tau_{PC,W}^m$ - czas pracy pompy ciepła w trybie przygotowania c.w.u. w ciągu doby.

Maksymalna temperatura zasilania w danym miesiącu:

$$\Delta T = \frac{T_Z^{obl} - T_Z^{ksg}}{T_{ksg} - T_{zew}^{obl}},$$

$$T_{Z,max}^m = \Delta T \cdot (T_{ksg} - T_{min}^m) + T_Z^{ksg}.$$

Temperatura powietrza zewnętrznego w punkcie biwalentnym w danym miesiącu:

$$T_{biw}^m = \frac{\Delta Q_B^m \cdot T_{wew} - A - C \cdot T_{Z,max}^m}{B + \Delta Q_B^m + D \cdot T_{Z,max}^m}.$$

Temperatura powietrza zewnętrznego dla granicy pracy inwertera w danym miesiącu:

$$T_{PC,inw}^m = \frac{\Delta Q_B^m \cdot T_{wew} - Q_{PC,min}^m}{\Delta Q_B^m}.$$

Temperatury graniczne dla obszarów pracy pompy ciepła w trybie ogrzewania budynku w danym miesiącu:

$$\text{krok 1: } T_1^m = T_{min}^m,$$

$$\text{krok 2: } T_2^m = \min (T_{max}^m, \max (T_{min,PG}, T_{min}^m)),$$

$$\text{krok 3: } T_3^m = \min (T_{max}^m, \max (T_2^m, T_{biw}^m)),$$

$$\text{krok 4: } T_4^m = \min (T_{max}^m, T_{ksg}),$$

$$\text{krok 5: } T_5^m = \max (T_3^m, \min (T_{PC,inw}, T_5^m)).$$

Znaczniki temperaturowe dla granic obliczanych obszarów w danym miesiącu:

$$x_2^m = \frac{(T_2^m - T_{min}^m)}{(T_{max}^m - T_{min}^m)},$$

$$x_3^m = \frac{(T_3^m - T_{min}^m)}{(T_{max}^m - T_{min}^m)},$$

$$x_4^m = \frac{(T_4^m - T_{min}^m)}{(T_{max}^m - T_{min}^m)},$$

$$x_5^m = \frac{(T_5^m - T_{min}^m)}{(T_{max}^m - T_{min}^m)}.$$

Znaczniki liczby godzin skumulowanych dla granic obliczanych obszarów w danym miesiącu:

$$\text{jeżeli } x_i^m = 0, \text{ wtedy } Lx_i^m = 0,$$

$$\text{jeżeli } x_i^m = 1, \text{ wtedy } Lx_i^m = 1,$$

$$\text{w innym przypadku: } Lx_i^m = \frac{1}{\pi} \cdot \arctan \left(2 \cdot (3 \cdot x_i^m - 1,5 - 3,19 \cdot DT^m) \cdot (1 + (3 \cdot x_i^m - 1,5 - 3,19 \cdot DT^m)^4) \right) + 0,5,$$

gdzie $i = 2, 3, 4, 5$.

Wartości *stopniogodzin jednostkowych* w poszczególnych obszarach i miesiącach:

$$Sthx_I^m = Lx_2^m \cdot (T_{wew} - T_{R,I}^m),$$

$$Sthx_{II}^m = (Lx_3^m - Lx_2^m) \cdot (T_{wew} - T_{R,II}^m),$$

$$Sthx_{III}^m = (Lx_4^m - Lx_3^m) \cdot (T_{wew} - T_{R,III}^m),$$

$$Sthx_{IV}^m = (Lx_5^m - Lx_4^m) \cdot (T_{wew} - T_{R,IV}^m).$$

Wartości udziałów obszarów w danym miesiącu:

$$X_I^m = \frac{Sthx_I^m}{Sthx_I^m + Sthx_{II}^m + Sthx_{III}^m + Sthx_{IV}^m},$$

$$X_{II}^m = \frac{Sthx_{II}^m}{Sthx_I^m + Sthx_{II}^m + Sthx_{III}^m + Sthx_{IV}^m},$$

$$X_{III}^m = \frac{Sthx_{III}^m}{Sthx_I^m + Sthx_{II}^m + Sthx_{III}^m + Sthx_{IV}^m},$$

$$X_{IV}^m = \frac{Sthx_{IV}^m}{Sthx_I^m + Sthx_{II}^m + Sthx_{III}^m + Sthx_{IV}^m}.$$

Temperatura reprezentatywna w danym miesiącu w obszarze II:

$$T_{R,II}^m = \frac{T_2^m + T_3^m}{2}.$$

Temperatura zasilania czynnika grzewczego w danym miesiącu w obszarze II:

$$T_{Z,II}^m = \Delta T \cdot (T_{ksg} - T_{R,II}^m) + T_Z^{ksg}.$$

Deklarowana wartość współczynnika efektywności energetycznej w danym miesiącu w obszarze II:

$$COP_{d,II}^m = A_1 + B_1 \cdot T_{R,II}^m + C_1 \cdot T_{Z,II}^m + D_1 \cdot T_{R,II}^m \cdot T_{Z,II}^m.$$

Moc pompy ciepła w danym miesiącu w obszarze II:

$$Q_{PC,II}^m = A + B \cdot T_{R,II}^m + C \cdot T_{Z,II}^m + D \cdot T_{R,II}^m \cdot T_{Z,II}^m.$$

Obciążenie cieplne budynku w danym miesiącu w obszarze II:

$$Q_{B,II}^m = \Delta Q_B^m \cdot (T_{wew} - T_{R,II}^m).$$

Wartość parametru k_{II} w danym miesiącu:

$$k_{II}^m = \frac{Q_{PC,II}^m}{Q_{B,II}^m}.$$

Energia cieplna w obszarze w danym miesiącu w obszarze II:

$$\Sigma Q_{B,II}^m = X_{II}^m \cdot \Sigma Q_B^m.$$

Energia cieplna dostarczona z pompy ciepła powietrze/woda w danym miesiącu:

$$\Sigma Q_{PC,II}^m = k_{II}^m \cdot \Sigma Q_{B,II}^m.$$

Energia cieplna dostarczona z grzałki elektrycznej w danym miesiącu (obszar II):

$$\Sigma Q_{el,G,II}^m = (1 - k_{II}^m) \cdot \Sigma Q_{B,II}^m,$$

lub gdy dodatkowe źródło energii nie jest zasilane energią elektryczną:

$$\Sigma Q_{A\dot{z},II}^m = (1 - k_{II}^m) \cdot \Sigma Q_{B,II}^m.$$

Wartość współczynnika COP monoenergetycznego systemu pompy ciepła powietrze/woda w danym miesiącu w obszarze II:

$$COP_{II,S}^m = \frac{1}{1 - k_{II}^m + \frac{k_{II}^m}{COP_{d,II}^m}},$$

lub współczynnik COP pompy ciepła w systemie biwalentnym w danym miesiącu:

$$COP_{II,S}^m = COP_{d,II}^m.$$

Temperatura reprezentatywna w danym miesiącu w obszarze III:

$$T_{R,III}^m = \frac{T_3^m + T_4^m}{2}.$$

Temperatura zasilania czynnika grzewczego w danym miesiącu w obszarze III:

$$T_{Z,III}^m = \Delta T \cdot (T_{ksg} - T_{R,III}^m) + T_Z^{ksg}.$$

Deklarowana wartość współczynnika efektywności energetycznej w danym miesiącu w obszarze III:

$$COP_{d,III}^m = A_1 + B_1 \cdot T_{R,III}^m + C_1 \cdot T_{Z,III}^m + D_1 \cdot T_{R,III}^m \cdot T_{Z,III}^m.$$

Wartość współczynnika COP w danym miesiącu w obszarze III:

$$COP_{III}^m = k_{III} \cdot COP_{d,III}^m = 0,95 \cdot COP_{d,III}^m.$$

Temperatura reprezentatywna w danym miesiącu w obszarze IV:

$$T_{R,IV}^m = \frac{T_4^m + T_5^m}{2}.$$

Temperatura zasilania czynnika grzewczego w danym miesiącu w obszarze IV:

$$T_{Z,IV}^m = \Delta T \cdot (T_{ksg} - T_{R,IV}^m) + T_Z^{ksg}.$$

Deklarowana wartość współczynnika efektywności energetycznej w danym miesiącu w obszarze IV:

$$COP_{d,IV}^m = A_1 + B_1 \cdot T_{R,IV}^m + C_1 \cdot T_{Z,IV}^m + D_1 \cdot T_{R,IV}^m \cdot T_{Z,IV}^m.$$

Obciążenie cieplne budynku w danym miesiącu w obszarze IV:

$$Q_{B,IV}^m = \Delta Q_B^m \cdot (T_{wew} - T_{R,IV}^m).$$

Wartość parametru k_{IV} w danym miesiącu:

$$k_{IV}^m = 1 + a \cdot \ln \left(0,88 \cdot \frac{Q_{B,IV}^m}{Q_{PC,min}} + e^{-\frac{1}{a}} \right).$$

Wartość współczynnika COP w danym miesiącu w obszarze IV:

$$COP_{IV}^m = k_{IV} \cdot COP_{d,IV}^m.$$

Efektywność energetyczna pompy ciepła w danym miesiącu:

$$SCOP^m = \frac{1}{\frac{X_{II}^m}{COP_{II}^m} + \frac{X_{III}^m}{COP_{III}^m} + \frac{X_{IV}^m}{COP_{IV}^m}}.$$

Energia elektryczna dostarczona do systemu pompy ciepła:

$$Q_{EL,S}^m = \frac{Q_B^m}{SCOP^m}.$$

Całkowita energia dostarczona z grzałki elektrycznej:

$$\Sigma Q_{el,G}^m = \Sigma Q_{el,T}^m + \Sigma Q_{B,I}^m + \Sigma Q_{el,G,II}^m = \Sigma Q_{el,T}^m + X_I^m \cdot \Sigma Q_B^m + \Sigma Q_{el,G,II}^m,$$

lub gdy dodatkowe źródło energii nie jest zasilane energią elektryczną:

$$\Sigma Q_{A\dot{Z}}^m = \Sigma Q_{A\dot{Z},T}^m + \Sigma Q_{B,I}^m + \Sigma Q_{A\dot{Z},II}^m = \Sigma Q_{A\dot{Z},T}^m + X_I^m \cdot \Sigma Q_B^m + \Sigma Q_{el,A\dot{Z},II}^m.$$

Udział energii dostarczonej z grzałki elektrycznej w danym miesiącu:

$$U_{el,G}^m = \frac{\Sigma Q_{el,G}^m}{\Sigma Q_B^m},$$

lub gdy dodatkowe źródło energii nie jest zasilane energią elektryczną:

$$U_{A\dot{Z}}^m = \frac{\Sigma Q_{A\dot{Z}}^m}{\Sigma Q_B^m}.$$

Straty energii związane z pracą pompy ciepła w obszarze IV w danym miesiącu:

$$Q_{el,IV}^m = \left(\frac{X_{IV}^m}{COP_{IV}^m} - \frac{X_{IV}^m}{COP_{d,IV}^m} \right) \cdot \Sigma Q_B^m.$$

2.4 Obliczenia podsumowujące

Roczne zapotrzebowanie na energię ciepłą do przygotowania c.w.u.:

$$\Sigma Q_W^r = \sum_i Q_W^m,$$

gdzie $i = 1, 2, 3... 12$ oznacza kolejne miesiące w roku.

Roczne zapotrzebowanie na energię elektryczną do zasilania pompy ciepła w trybie przygotowania c.w.u.:

$$\Sigma Q_{PC,W}^r = \sum_i Q_{PC,W}^m,$$

gdzie $i = 1, 2, 3... 12$ oznacza kolejne miesiące w roku.

Roczne zapotrzebowanie na energię do zasilania grzałki elektrycznej pracującej w trybie przygotowania c.w.u.:

$$\Sigma Q_{el,G,W}^r = \sum_i Q_{el,G,W}^m,$$

gdzie $i = 1, 2, 3... 12$ oznacza kolejne miesiące w roku,

lub gdy dodatkowe źródło energii nie jest zasilane energią elektryczną:

$$\Sigma Q_{A\dot{z},W}^r = \sum_i Q_{A\dot{z},W}^m.$$

Roczny współczynnik efektywności dla systemu c.w.u.:

$$SCOP_W^r = \frac{\Sigma Q_W^r}{\Sigma Q_{PC,W}^r + \Sigma Q_{el,G,W}^r}.$$

Roczne zapotrzebowanie na energię ciepłą do ogrzewania budynku:

$$\Sigma Q_B^r = \sum_i Q_B^m,$$

gdzie $i = 1, 2, 3... 12$ oznacza kolejne miesiące w roku.

Roczne zapotrzebowania na energię elektryczną do zasilania pompy ciepła w trybie ogrzewania budynku:

$$\Sigma Q_{PC}^r = \sum_i Q_{PC}^m,$$

gdzie $i = 1, 2, 3... 12$ oznacza kolejne miesiące w roku.

Roczne zapotrzebowanie na energię do zasilania grzałki elektrycznej pracującej w trybie ogrzewania budynku:

$$\Sigma Q_{el,G}^r = \sum_i Q_{el,G}^m,$$

gdzie $i = 1, 2, 3... 12$ oznacza kolejne miesiące w roku,

lub gdy dodatkowe źródło energii nie jest zasilane energią elektryczną:

$$\Sigma Q_{A\dot{Z}}^r = \sum_i Q_{A\dot{Z}}^m.$$

Roczny współczynnik efektywności dla systemu ogrzewania budynku:

$$SCOP^r = \frac{\Sigma Q_B^r}{\Sigma Q_{PC}^r + \Sigma Q_{el,G}^r}.$$

Udział grzałki elektrycznej w bilansie energii do przygotowania c.w.u.:

$$U_{el,G,W}^r = \frac{\Sigma Q_{el,G,W}^r}{\Sigma Q_W^r},$$

lub gdy dodatkowe źródło energii nie jest zasilane energią elektryczną:

$$U_{A\dot{Z},W}^r = \frac{\Sigma Q_{A\dot{Z},W}^r}{\Sigma Q_W^r}.$$

Udział grzałki elektrycznej w bilansie energii do ogrzewania budynku:

$$U_{el,G}^r = \frac{\Sigma Q_{el,G}^r}{\Sigma Q_B^r},$$

lub gdy dodatkowe źródło energii nie jest zasilane energią elektryczną:

$$U_{A\dot{Z}}^r = \frac{\Sigma Q_{A\dot{Z}}^r}{\Sigma Q_B^r}.$$

Roczne straty energii związane z pracą pompy ciepła w obszarze IV:

$$\Sigma Q_{el,IV}^r = \sum_i Q_{el,IV}^m,$$

gdzie $i = 1, 2, 3... 12$ oznacza kolejne miesiące w roku.

Udział strat energii związanych z pracą pompy ciepła w obszarze IV w bilansie energii do ogrzewania budynku:

$$U_{el,IV}^r = \frac{\Sigma Q_{el,IV}^r}{\Sigma Q_B^r}.$$

Całkowity udział grzałki elektrycznej w rocznych potrzebach grzewczych systemu:

$$U_{el,G,S}^r = \frac{\Sigma Q_{el,G}^r + \Sigma Q_{el,G,W}^r}{\Sigma Q_B^r + \Sigma Q_W^r},$$

lub gdy dodatkowe źródło energii nie jest zasilane energią elektryczną:

$$U_{A\dot{Z},S}^r = \frac{\Sigma Q_{A\dot{Z}}^r + \Sigma Q_{A\dot{Z},W}^r}{\Sigma Q_B^r + \Sigma Q_W^r}.$$

Roczny współczynnik efektywności pompy ciepła:

$$SCOP^r = \frac{\Sigma Q_B^r + \Sigma Q_W^r}{\Sigma Q_{PC}^r + \Sigma Q_{el,G}^r + \Sigma Q_{PC,W}^r + \Sigma Q_{el,G,W}^r}.$$

3. Zastosowanie modelu i przykładowe wyniki symulacji

3.1 Przykład 1 – dobór pompy ciepła

Dla zobrazowania sposobu posługiwania się zaproponowanym w pracy modelem efektywności energetycznej pompy ciepła powietrze/woda w kroku miesięcznym rozważono następujący przykład doboru pompy ciepła dla budynku o danych:

- (1) zapotrzebowanie na energię do ogrzewania budynku wynosi: 15 423 kWh/rok,
- (2) zapotrzebowanie na energię do przygotowania c.w.u. wynosi: 11 957 kWh/rok,
- (3) lokalizacja: Koszalin,
- (4) rozważano dobór jednej z trzech pomp ciepła, których moce grzewcze dla parametrów A2/W35 wynoszą: 5,1 kW – PC (1), 9,5 kW – PC (2), 12,3 kW – PC (3).

Szczegółowe wyniki analizy pracy urządzenia PC (2) obliczone z zastosowaniem modelu miesięcznego dla zadanych parametrów wejściowych zawiera tabela 21. Istotny udział energii cieplnej dostarczanej z grzałki elektrycznej na cele ogrzewania budynku wykazany został jedynie dla stycznia i wynosi 4,0%. Uwagę należy zwrócić na straty energii w okresie wiosennym związane z pracą pompy ciepła w obszarze IV, w kwietniu jest to 22,3%. Istotny z punktu widzenia podjęcia decyzji o wyborze urządzenia jest też czas pracy pompy ciepła w trybie przygotowania c.w.u., który wynosi maksymalnie 5,2 h w styczniu. Jest to wartość dość wysoka, lecz akceptowalna ze względu na dopuszczalną przerwę w pracy instalacji ogrzewania budynku pod warunkiem, że jest to system ogrzewania płaszczyznowego o znaczącej akumulacyjności.

Tabela 21. Wyniki analizy pracy pompy ciepła PC (2) dla budynku mieszkalnego z przykładu 1

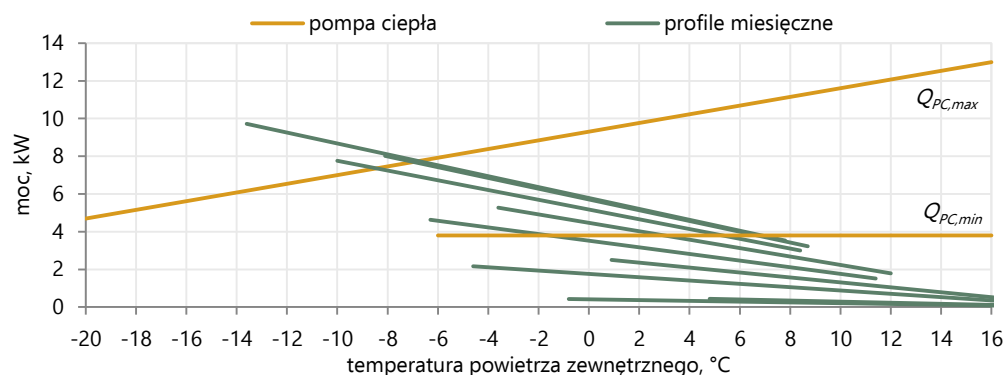
M-c	ΣQ_{W^m}	ΣQ_{B^m}	Q_{el,S,W^r}	$SCOP_{W^r}$	τ_{PC,W^m}	Q_{el,S^r}	$SCOP^r$	U_{G,W^r}	U_{G^r}	U_{G,S^r}	U_{el,IV^r}	$SCOP_{S^r}$
	kWh	kWh	kWh	–	h/d	kWh	–	%	%	%	%	–
I	1288	3590	556	2,31	5,2	1109	3,24	0,0%	4,0%	2,9%	0,0%	2,93
II	1036	2942	427	2,43	4,4	825	3,57	0,0%	0,2%	0,1%	0,0%	3,18
III	1249	1899	479	2,61	4,5	482	3,94	0,0%	0,0%	0,0%	1,6%	3,28
IV	1046	658	371	2,82	3,6	186	3,54	0,0%	0,0%	0,0%	6,1%	3,06
V	960	62	308	3,11	2,8	27	2,32	0,0%	0,0%	0,0%	22,3%	3,05
VI	753	–	231	3,26	2,2	–	–	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	3,26
VII	780	–	227	3,44	2,1	–	–	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	3,44
VIII	669	–	201	3,33	1,8	–	–	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	3,33
IX	821	59	257	3,19	2,4	22	2,65	0,0%	0,0%	0,0%	18,7%	3,15
X	1024	722	342	3,00	3,2	177	4,07	0,0%	0,0%	0,0%	4,3%	3,36
XI	1085	2166	402	2,69	3,9	522	4,15	0,0%	0,0%	0,0%	0,9%	3,52
XII	1248	3325	502	2,49	4,7	884	3,76	0,0%	0,1%	0,1%	0,0%	3,30

Wyniki analizy pracy wszystkich rozważanych pomp ciepła uzyskane z zastosowaniem modelu miesięcznego dla zadanych parametrów wejściowych zawiera tabela 22. Dane te opisują parametry pracy urządzeń dla całego roku i są oczywiście jedynie podsumowaniem analizy miesięcznej, w tym przypadku wystarczającym do podjęcia decyzji o wyborze mocy grzewczej źródła ciepła.

Tabela 22. Wyniki analizy pracy trzech pomp ciepła dla budynku mieszkalnego z przykładu 1

Pompa ciepła	Q_{el,S,W^r}	$SCOP_{W^r}$	Q_{el,S^r}	$SCOP^r$	U_{G,W^r}	U_{G^r}	U_{G,S^r}	U_{el,IV^r}	$SCOP_{S^r}$
	kWh/rok	–	kWh/rok	–	%	%	%	%	–
PC (1)	4304	2,78	6743	2,29	0,0%	24,6%	13,9%	0,2%	2,48
PC (2)	4304	2,78	4234	3,64	0,0%	1,0%	0,6%	1,0%	3,21
PC (3)	4304	2,78	4365	3,53	0,0%	0,0%	0,0%	1,9%	3,16

Za najlepszy wybór uznano pompę ciepła PC (2). Pompa ciepła PC (1) ma zbyt małą moc grzewczą, udział grzałki elektrycznej w potrzebach grzewczych budynku wynosi 24,6%. Pompa ciepła PC (3) jest z kolei nieznacznie przewymiarowana, udział strat energii w obszarze IV wynosi 1,9%, w wyniku czego $SCOP_{S^r}$ jest niższy niż dla PC (2). Współpracę dobranej pompy ciepła z systemem grzewczym pokazano na rysunku 61. Zaznaczono na nim zastępcze miesięczne profile obciążenia cieplnego pompy ciepła, uwzględniające skrócony czas pracy urządzenia na cele grzewcze (zielone linie). Proponowana metoda zintegrowanego doboru uwzględniająca obie potrzeby grzewcze równocześnie pokazuje, że punkt biwalentny w analizowanym systemie wystąpi w okresie od grudnia do lutego dla temperatur pomiędzy -8°C a -7°C . W pozostałych miesiącach pompa ciepła pracuje pod obciążeniem częściowym z płynną regulacją mocy lub w trybie on/off.



Rysunek 61. Współpraca pompy ciepła PC (2) z systemem grzewczym w budynku z przykładu 1

3.2 Przykład 2 – warunki klimatyczne a efektywność energetyczna pompy ciepła

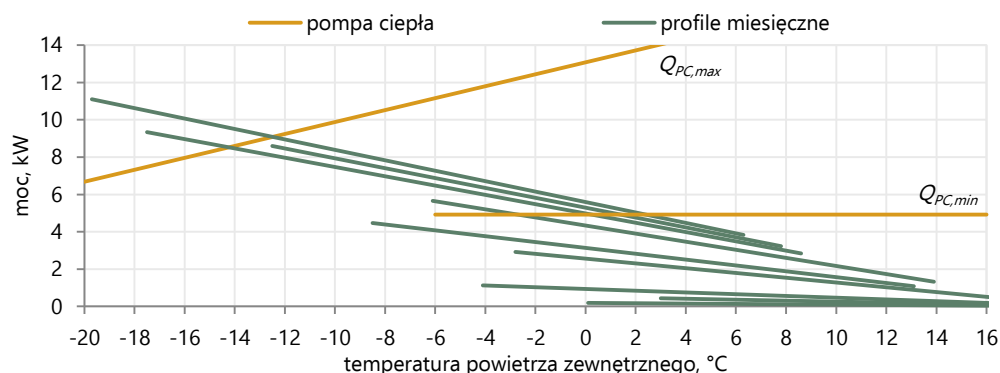
Analogiczną symulację przeprowadzono dla instalacji zlokalizowanej w Lublinie. Wyniki analizy pracy wszystkich rozważanych pomp ciepła uzyskane z zastosowaniem modelu miesięcznego dla zadanych parametrów wejściowych zawiera tabela 23. Dane te opisują parametry pracy urządzeń dla całego roku i są oczywiście jedynie podsumowaniem analizy miesięcznej, w tym przypadku wystarczającym do pokazania, że model reaguje prawidłowo na zmianę warunków klimatycznych. Efektywność energetyczna wszystkich analizowanych pomp ciepła ze względu na chłodniejszy niż dla przypadku 1 klimat jest niższa, udział grzałki elektrycznej – wyższy, a straty energii związane z pracą w obszarze IV – nieco niższe.

Tabela 23. Wyniki analizy pracy trzech pomp ciepła dla budynku mieszkalnego z przykładu 2

Pompa ciepła	$Q_{el,s,W}^r$ kWh/rok	$SCOP_{W}^r$ –	$Q_{el,s}^r$ kWh/rok	$SCOP^r$ –	$U_{G,W}^r$ %	U_G^r %	$U_{G,s}^r$ %	$U_{el,IV}^r$ %	$SCOP_s^r$ –
PC (1)	4396	2,72	8919	1,84	0,0%	37,7%	21,8%	0,2%	2,13
PC (2)	4396	2,72	5428	3,02	0,0%	6,7%	3,9%	0,7%	2,88
PC (3)	4396	2,72	4955	3,30	0,0%	0,7%	0,4%	1,5%	3,03

W analizowanym przypadku za najlepszy wybór uznano pompę ciepła PC (3). Pompa ciepła PC (1) ma zbyt małą moc grzewczą, udział pracy grzałki elektrycznej w realizacji potrzeb grzewczych budynku wynosi 37,7%. Pompa ciepła PC (2) jest również niedowymiarowana. Współpracę dobranej pompy ciepła z systemem grzewczym pokazano na rysunku 62. Zaznaczono na nim zastępcze miesięczne profile obciążenia cieplnego pompy ciepła uwzględniające skrócony czas pracy urządzenia na cele grzewcze (zielone linie). Proponowana metoda zintegrowanego doboru, uwzględniająca obie potrzeby grzewcze równocześnie pokazuje, że punkt biwalentny w analizowanym systemie wystąpi w dwóch miesiącach dla temperatur pomiędzy -14°C a -12°C .

W pozostałych miesiącach pompa ciepła pracuje pod obciążeniem częściowym z płynną regulacją mocy lub w trybie on/off.



Rysunek 62. Współpraca pompy ciepła PC (3) z systemem grzewczym w budynku z przykładu 2

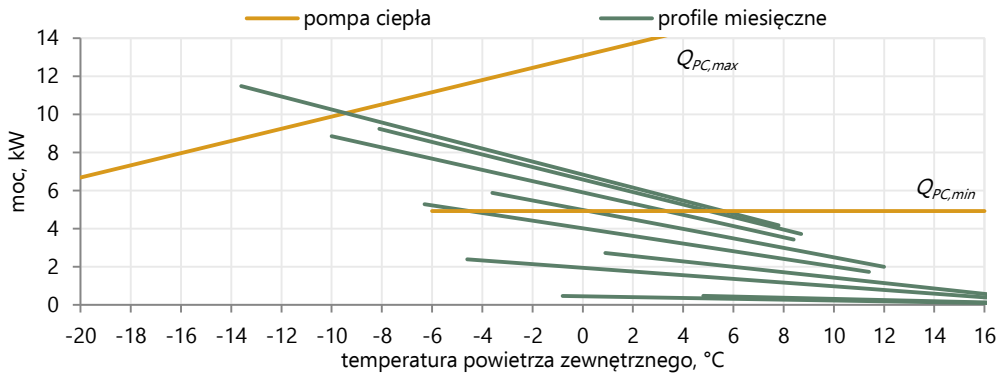
3.3 Przykład 3 – udział ciepłej wody użytkowej w bilansie energetycznym

Bardzo ważną cechą zaproponowanego modelu miesięcznego jest dobór i analiza pracy systemu, uwzględniające udział zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. w bilansie energetycznym budynku. Dla zobrazowania tego problemu zwiększono ten udział dla budynku z przykładu opisanego w punkcie 3.1 z 44% do 64%. Wyniki analizy pracy wszystkich rozważanych pomp ciepła uzyskane z zastosowaniem modelu miesięcznego dla zadanych parametrów wejściowych zawiera tabela 24. Dane te opisują parametry pracy urządzeń dla całego roku i są oczywiście jedynie podsumowaniem analizy miesięcznej, w tym przypadku wystarczającym do pokazania, iż model reaguje prawidłowo na zmianę udziału energii koniecznej do przygotowania ciepłej wody użytkowej w bilansie energetycznym budynku. Znacząco wzrósł udział energii cieplnej dostarczanej z grzałki elektrycznej.

Tabela 24. Wyniki analizy pracy trzech pomp ciepła dla budynku mieszkalnego z przykładu 3

Pompa ciepła	$Q_{el,S,W}^f$ kWh/rok	$SCOP_W^f$ –	$Q_{el,S}^f$ kWh/rok	$SCOP^f$ –	$U_{G,W}^f$ %	U_G^f %	$U_{G,S}^f$ %	$U_{el,NV}^f$ %	$SCOP_S^f$ –
PC (1)	20517	1,36	6073	2,54	59,4%	18,5%	44,9%	0,2%	1,63
PC (2)	14925	1,87	4251	3,63	28,3%	1,5%	18,8%	0,8%	2,26
PC (3)	10043	2,78	4234	3,64	0,0%	0,2%	0,1%	1,3%	3,03

W tym przypadku za najlepszy wybór uznano pompę ciepła PC (3). Pompy ciepła PC (1) i PC (2) mają zbyt małą moc grzewczą, udział pracy grzałki elektrycznej w realizacji potrzeb grzewczych budynków wynosi odpowiednio 44,9% i 18,8%. Współpracę dobranej pompy ciepła z systemem grzewczym pokazano na rysunku 63.



Rysunek 63. Współpraca pompy ciepła PC (3) z systemem grzewczym w budynku z przykładu 3

Warto podkreślić, że opracowany model do analizy miesięcznej efektywności pompy ciepła powietrze/woda daje możliwość przybliżonej oceny poprawności doboru mocy grzewczej urządzenia oraz objętości zasobnika ciepłej wody użytkowej do przewidywanego profilu rozbioru ciepłej wody użytkowej. W tym celu należy przeanalizować informację na temat liczby cykli pracy układu. Jeżeli liczba ta jest rozbieżna z przewidywanym profilem rozbioru c.w.u., oznacza to, że zasobnik ma zbyt małą objętość. Ilość cykli wyznaczana jest na podstawie miesięcznego zapotrzebowania na energię, objętości zasobnika i zadanego czasu jego ładowania. Wielkością zasobnika można regulować ilość cykli, z zachowaniem rozsądnej akumulacyjności układu, obniżając tym samym wymaganą moc cieplną urządzenia grzewczego w ramach dostępnego czasu pracy. Czas pracy pompy ciepła w trybie przygotowania c.w.u. wpływa na miesięczne profile obciążenia cieplnego budynku, co pozwala na ocenę poprawności doboru mocy pompy ciepła. Należy podkreślić, że algorytm zawarty w modelu ma na celu jedynie oszacowanie liczby cykli ładowania zasobnika w dobie i to użytkownik modelu musi podjąć decyzję o poprawności tej wartości w stosunku do planowanego profilu rozbioru c.w.u. w budynku.

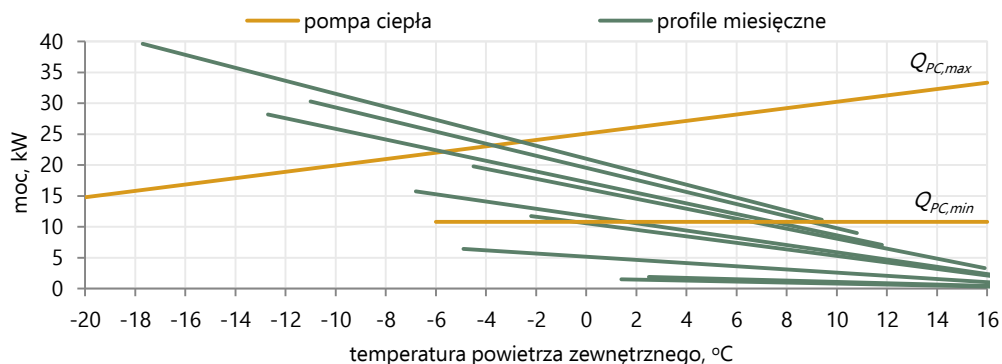
3.4 Przykład 4 – wpływ charakterystyki COP_d na dobór pompy ciepła

Zaproponowany model miesięcznej efektywności pompy ciepła powietrze/woda pozwala na dobór urządzenia z uwzględnieniem nie tylko charakterystyki mocy grzewczej, ale i charakterystyki COP_d . To ważny element poprawiający jakość tego procesu. Dla zobrazowania tego problemu rozważono następujący przykład:

- (1) zapotrzebowanie na energię do ogrzewania budynku wynosi: 46 633 kWh/rok,
- (2) zapotrzebowanie na energię do przygotowania c.w.u. wynosi: 49 820 kWh/rok,
- (3) lokalizacja: Wrocław,

- (4) rozważano dobór jednej z dwóch pomp ciepła, których moce grzewcze dla parametrów A2/W35 wynoszą: 26,8 kW – PC (1), 30,2 kW – PC (2).

Szczegółowe wyniki analizy pracy urządzenia PC (1) obliczone z zastosowaniem modelu miesięcznego dla zadanych parametrów wejściowych zawiera tabela 25. Współpracę tej pompy ciepła z systemem grzewczym pokazano na rysunku 64.



Rysunek 64. Współpraca pompy ciepła PC (1) z systemem grzewczym w budynku z przykładu 4

Udział pracy grzałki elektrycznej w realizacji potrzeb grzewczych budynku jest dość znaczący i np. w styczniu wynosi 21,2%. Warto zauważyć, że czas pracy pompy ciepła w trybie przygotowania c.w.u. wynosi w styczniu 7,7 h. Jest to wartość dość wysoka i to ona powoduje wzrost profilu miesięcznego obciążenia i znaczący udział grzałki elektrycznej w wyniku przesunięcia się punktu biwalentnego dla stycznia do wartości $-2,2^{\circ}\text{C}$. Sugeruje to zasadność doboru większej jednostki grzewczej, co zostało dalej rozważone.

Tabela 25. Wyniki analizy pracy pompy ciepła PC (1) dla budynku mieszkalnego z przykładu 4

M-c	ΣQ_{W^m}	ΣQ_{B^m}	Q_{el,S,W^r}	$SCOP_{W^r}$	τ_{PC,W^m}	Q_{el,S^r}	$SCOP^r$	U_{G,W^r}	U_{G^r}	U_{G,S^r}	U_{el,W^r}	$SCOP_{S^r}$
	kWh	kWh	kWh	–	h/d	kWh	–	%	%	%	%	–
I	5366	11615	2296	2,34	7,7	5263	2,21	0,0%	21,2%	14,5%	0,0%	2,25
II	4315	8762	1747	2,47	6,4	2868	3,06	0,0%	4,9%	3,3%	0,0%	2,83
III	5202	5043	1956	2,66	6,4	1397	3,61	0,0%	0,0%	0,0%	0,8%	3,06
IV	4357	1297	1569	2,78	5,3	382	3,39	0,0%	0,0%	0,0%	4,7%	2,90
V	3999	139	1332	3,00	4,3	50	2,76	0,0%	0,0%	0,0%	13,2%	2,99
VI	3137	0	1022	3,07	3,4	0	0,00	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	3,07
VII	3250	0	1027	3,16	3,3	0	0,00	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	3,16
VIII	2786	0	900	3,10	2,9	0	0,00	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	3,10
IX	3422	183	1135	3,02	3,8	62	2,96	0,0%	0,0%	0,0%	11,0%	3,01
X	4269	2476	1506	2,83	4,9	638	3,88	0,0%	0,0%	0,0%	1,7%	3,15
XI	4519	6872	1679	2,69	5,7	1856	3,70	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	3,22
XII	5198	10246	2094	2,48	6,9	3337	3,07	0,0%	6,0%	4,0%	0,0%	2,84

Podstawowe wyniki analizy pracy rozważanych dwóch pomp ciepła powietrze/woda dla zadanych parametrów wejściowych zawiera tabela 26. Dane te opisują parametry pracy urządzeń dla całego roku i są podsumowaniem analizy miesięcznej. Moc grzewcza pompy ciepła PC (2) w stosunku do PC (1) jest wyższa, udział strat energii w obszarze IV – podobny, a udział energii cieplnej dostarczonej z grzałki elektrycznej – niższy. Pomimo tego urządzenie PC (2) charakteryzuje się niższym $SCOP_{S^r}$ i jego dobór jest nieuzasadniony. Wynika to z gorszej niż w przypadku PC (1) charakterystyki COP_d przy tej samej temperaturze powietrza zewnętrznego. W tym przypadku zastosowanie tej jednostki, pomimo zwiększenia mocy grzewczej, nie przyniesie korzyści ekonomicznych. Należy zastosować jednostkę PC (1) lub pompę ciepła o wyższej mocy, ale i lepszej charakterystyce efektywności energetycznej.

Tabela 26. Wyniki analizy pracy dwóch pomp ciepła dla budynku mieszkalnego z przykładu 4

Pompa ciepła	Q_{el,S,W^r}	$SCOP_{W^r}$	Q_{el,S^r}	$SCOP^r$	U_{G,W^r}	U_{G^r}	U_{G,S^r}	U_{el,IV^r}	$SCOP_{S^r}$
	kWh/rok	–	kWh/rok	–	%	%	%	%	–
PC (1)	18262	2,73	15854	2,94	0,0%	7,5%	3,6%	0,4%	2,83
PC (2)	19197	2,60	16073	2,90	0,0%	3,8%	1,8%	0,7%	2,73

4. Podsumowanie i wnioski

W niniejszej pracy postawiono tezę, że modelowanie efektywności energetycznej systemu pompy ciepła powietrze/woda w kroku miesięcznym może spełnić kryterium odpowiedniej dokładności analiz, dostarczając precyzyjnej informacji o zmianach efektywności urządzenia w ciągu roku, zapewniając jednocześnie krótki czas wykonywania obliczeń i pozwalając na dostosowanie się do powszechnie stosowanego kroku obliczeniowego przy wyznaczaniu zapotrzebowania na energię do ogrzewania budynków.

W celu znalezienia rozwiązania potwierdzającego powyższą tezę przeanalizowano szereg problemów związanych z metodami analizy efektywności energetycznej pomp ciepła powietrze/woda. Zakres wykonanych prac oraz wnioski z nich wynikające opisano poniżej.

- (1) W celu określenia jakości danych wejściowych do modelu miesięcznej efektywności pomp ciepła powietrze/woda pracujących w trybie ogrzewania budynku, w rozdziale II przeanalizowano wpływ dokładności odwzorowania profilu obciążenia cieplnego i dokładności współczynnika opisującego wpływ obciążenia częściowego pompy ciepła na wyniki symulacji pracy tych urządzeń. Opisano w nim algorytm do obliczania efektywności energetycznej pomp ciepła w kroku godzinowym. Model ten wykorzystuje trzy różne mechanizmy do obliczania wpływu obciążenia częściowego na efektywność energetyczną pomp ciepła i umożliwia obliczenia dla różnych profili obciąże-

nia cieplnego. Dysponując danymi pomiarowymi rzeczywistego systemu, dokonano kalibracji współczynników determinujących wpływ obciążenia częściowego na efektywność układu, sprawdzając, która z metod pozwala uzyskać najlepszą dokładność. **Wykazano, że wśród rozważanych najlepszą metodą modelowania wpływu obciążenia częściowego na efektywność energetyczną pompy ciepła powietrze/woda jest zastosowanie funkcji logarymicznej, oraz że dokładność parametru przyjmowanego do określenia wpływu obciążenia cieplnego ma istotne znaczenie dla wyników symulacji.** Wykazano, że bez względu na sposób modelowania wpływu obciążenia częściowego na efektywność pompy ciepła kluczowe jest odpowiednio dokładne określenie chwilowego obciążenia cieplnego budynku. **Stwierdzono, że wystarczającą dokładność zapewnia zastosowanie w symulacjach efektywności energetycznej pomp ciepła powietrze/woda profili obciążenia cieplnego tworzonych w oparciu o miesięczne wartości zapotrzebowania na energię do ogrzewania budynku.** Dla takiego sposobu tworzenia profili nie wykazano znaczącego pogorszenia wyników symulacji względem wyników dla profilu rzeczywistego. Prowadzenie analiz na profilach tworzonych na podstawie rocznego zapotrzebowania na energię lub projektowego obciążenia cieplnego prowadzi do błędnego wyznaczenia współczynnika obciążenia częściowego, będącego bardzo istotnym parametrem w symulacjach.

- (2) W wyniku prac opisanych w rozdziale II opracowano założenia dla modelu miesięcznej efektywności energetycznej pompy ciepła powietrze/woda pracującej w trybie ogrzewania budynku. Stwierdzono, że podział każdego miesiąca na obszary różniące się sposobem eksploatacji pompy ciepła powietrze/woda pozwala na obliczenie efektywności reprezentatywnej dla każdego z nich. Dzięki znajomości udziałów poszczególnych obszarów w zapotrzebowaniu na energię do ogrzewania budynku możliwe jest precyzyjne określenie efektywności urządzenia w danym miesiącu. W celu obliczenia wpływu poszczególnych obszarów na efektywność urządzenia opracowano *funkcję częstości temperatury*, która na podstawie temperatur: minimalnej, maksymalnej i średniej, powietrza zewnętrznego w danym miesiącu pozwala przybliżyć czas pracy urządzenia w każdym z nich. Dodatkowo opracowano prostą i skuteczną metodę tworzenia indywidualnych profili obciążenia cieplnego dla każdego miesiąca w roku. Dokonano sprawdzenia proponowanego modelu miesięcznego względem wyników dla modeli obliczanych w kroku godzinowym i temperaturowym, oceniając tym samym dokładność uzyskiwanych rezultatów. **Stwierdzono, że symulacje z wykorzystaniem opracowanego modelu miesięcznego dają bardzo dobre rezultaty w postaci poprawnej wartości miesięcznej wartości SCOP, miesięcznego**

zapotrzebowania na energię elektryczną do zasilania pompy ciepła i energii koniecznej do dostarczenia z dodatkowego źródła energii. W związku z tym postulat dokładności tego modelu jest spełniony.

- (3) W celu określenia jakości danych wejściowych do modelu miesięcznej efektywności pomp ciepła powietrze/woda pracujących w trybie przygotowania ciepłej wody użytkowej w rozdziale IV przedyskutowano wpływ dokładności odwzorowania profilu obciążenia cieplnego na wyniki symulacji pracy tych urządzeń. Opisano w nim algorytm do obliczania efektywności energetycznej pompy ciepła w kroku godzinowym. Jako podstawę procesu obliczeniowego zastosowano model opisany w rozdziale II, rozszerzony jednak o typowy dla układów c.w.u. aspekt akumulacji energii. Algorytm umożliwia analizę dla różnych profili zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. i dla różnych stopni akumulacyjności układu. Poprzez ocenę błędów wyników modelowania dla różnych sposobów profilowania zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. względem wyników dla profilu rzeczywistego oceniono, jakie uproszczenia są dopuszczalne w procesie symulacji efektywności energetycznej pomp ciepła powietrze/woda. **Wykazano, że uwzględnienie zmian profilu godzinowego jest ważne, ale zdecydowanie ważniejsze jest uwzględnienie miesięcznych zmian w zużyciu c.w.u. i temperaturze wody zimnej oraz wpływu układu akumulacji na chwilową moc grzewczą wymaganą po stronie źródła ciepła. Stwierdzono, że duże znaczenie dla dokładności wyników symulacji ma możliwość uwzględnienia założeń odnośnie dopuszczalnego czasu ładowania zasobnika c.w.u. i sterowania pracą układu grzewczego wspomagającego pracę pompy ciepła powietrze/woda.**
- (4) Efektem prac opisanych w rozdziale IV są założenia do opracowania modelu miesięcznej efektywności energetycznej pompy ciepła powietrze/woda działającej w trybie przygotowania c.w.u. Na potrzeby skonstruowania modelu, podobnie jak dla trybu ogrzewania, zastosowano podział każdego miesiąca na obszary różniące się sposobem eksploatacji urządzenia i obliczanie efektywności reprezentatywnej w każdym z nich. Dzięki znajomości udziałów poszczególnych obszarów w zapotrzebowaniu na energię do przygotowania c.w.u. możliwe jest precyzyjne określenie efektywności całego systemu w danym miesiącu. Do obliczania tych udziałów wykorzystano *funkcję częstotliwości temperatury*. W celu uzyskania wymaganej precyzji opracowano metodę obliczania reprezentatywnej mocy grzewczej układu. Dokonano sprawdzenia wyników uzyskiwanych z wykorzystaniem modelu miesięcznego względem wyników z modeli obliczanych w kroku godzinowym i temperaturowym, oceniając tym samym dokładność uzyskiwanych rezultatów. Stwier-

dzono, że uproszczenie profilu zapotrzebowania na energię do przygotowania c.w.u. na uwzględniający zmiany jedynie w kroku miesięcznym, a nie godzinowym jest dopuszczalne, natomiast powstające na poziomie wyników miesięcznych błędy są akceptowalne. **Symulacje z wykorzystaniem opracowanego modelu miesięcznego dają bardzo dobre rezultaty w postaci poprawnej miesięcznej wartości SCOP, miesięcznego zapotrzebowania na energię elektryczną do zasilania pompy ciepła i energii koniecznej do dostarczenia z dodatkowego źródła energii.** W związku z tym postulat dokładności tego modelu został spełniony.

- (5) W rozdziale VI opisano algorytm modelu zintegrowanego do analizy miesięcznej efektywności systemu z pompą ciepła powietrze/woda. Model ten umożliwia dobór i analizę pracy pompy ciepła powietrze/woda na potrzeby ogrzewania i jednocześnie przygotowania ciepłej wody użytkowej. Elementem łączącym oba podmodele jest czas pracy pompy ciepła powietrze/woda w trybie przygotowania c.w.u.
- (6) **Zaproponowany model analizy miesięcznej efektywności pompy ciepła powietrze/woda, dając podobne rezultaty w zakresie dokładności co model obliczany w kroku godzinowym, zmniejsza ilość koniecznych przeliczeń z 8760 do 12 wierszy. Proces obliczeń wymaga, aby dla każdego z tych wierszy ocenić 7 stanów pracy pompy ciepła, lecz – nawet uwzględniając te dodatkowe przeliczenia – stanowi to 84 kroki obliczeniowe zamiast 8760.** Podobną do wyników modelu miesięcznego dokładność można uzyskać, wykonując obliczenia w kroku temperaturowym, pod warunkiem przeprowadzenia ich indywidualnie dla każdego miesiąca. Wymaga to opracowania 12 krzywych klimatycznych i około 40 wierszy przeliczeń dla każdego z nich, co daje łącznie 480 wierszy, pomijając wcześniejsze przygotowanie danych klimatycznych. **Podstawowe dane wejściowe do zaproponowanego modelu to: minimalna, maksymalna i średnia temperatura powietrza zewnętrznego w miesiącu, miesięczne wartości zapotrzebowania na energię od przygotowania c.w.u. i ogrzewania budynku oraz dane o pojemności zasobnika c.w.u. i charakterystyce pompy ciepła powietrze/woda. Dane te są powszechnie dostępne.** W związku z tym postulat czasu obliczeń i dostępności danych wejściowych został spełniony.
- (7) Model zintegrowany umożliwia ocenę poprawności doboru pompy ciepła powietrze/woda. Diagnostyka ta jest wspomagana obliczonym udziałem pracy grzałki elektrycznej (lub innego alternatywnego źródła ciepła) oraz udziałem strat energii związanych z pracą pompy ciepła powietrze/woda w obszarze regulacji w trybie on/off w potrzebach grzewczych budynku. W wyniku tego ocenie podlega zarówno niedowymiarowanie, jak

i przewymiarowanie urządzenia. Stwierdza się, że jest to dokładniejsza metoda doboru mocy grzewczej pompy ciepła niż wykonywana w oparciu o jeden profil obciążenia cieplnego i jedną wartość punktu biwalentnego. Zaproponowany model uwzględnia problem obliczania dodatku mocy wymaganego ze względu na układ przygotowania c.w.u. W pierwszym kroku obliczeniowym szacowany jest czas pracy urządzenia w trybie przygotowania c.w.u., który może być sprawdzany i korygowany przez projektanta, a następnie względem niego ustalana jest wymagana moc grzewcza pompy ciepła w taki sposób, aby w dostępnym czasie dostarczyć wymaganą energię cieplną do budynku. Przypadek pojawienia się deficytu mocy objawia się wzrostem udziału dodatkowego źródła energii. Wszystkie te obliczenia wykonywane są dla każdego miesiąca w roku, dając możliwość sprawdzenia efektywności urządzenia w każdym z nich. **Możliwość sprawdzenia strat energii wynikających zarówno z przewymiarowania, jak i z niedowymiarowania pozwala optymalizować dobór mocy pompy ciepła powietrze/woda do potrzeb grzewczych budynku w zadanych warunkach klimatycznych. W procesie doboru pompy ciepła model uwzględnia zarówno wartość mocy grzewczej urządzenia, jak i wartość COP_d , dzięki czemu poprawiona została precyzja tego procesu.**

- (8) Opracowany model pozwala na wykonanie obliczeń na statystycznych danych klimatycznych. Nie jest jednak właściwy do przeprowadzania analiz prowadzonych na danych z konkretnego sezonu grzewczego. Opracowana *funkcja częstości temperatury* została zweryfikowana na podstawie danych statystycznych z okresów dziesięcioletnich oraz dłuższych i dla takich gwarantuje dobrą zgodność odpowiedzi z obliczeniami prowadzonymi na szczegółowych danych klimatycznych.
- (9) Należy podkreślić szerokie możliwości praktycznego zastosowania wyników obliczeń uzyskiwanych z zastosowaniem opracowanego modelu miesięcznej efektywności pomp ciepła powietrze/woda. Model umożliwia precyzyjny dobór urządzenia do potrzeb grzewczych obiektu i daje możliwość diagnostyki poprawności pracy pompy ciepła w przeciągu roku. Wyniki te mogą być szczególnie przydatne do analizy pracy pomp ciepła w układach biwalentnych, gdzie precyzyjna informacja o deficycie energii w każdym miesiącu pozwala lepiej zaplanować współpracę obu systemów. Model umożliwia lepsze planowanie współpracy pomp ciepła powietrze/woda z ogniwami fotowoltaicznymi, która jest kluczowa w koncepcji budynków zeroenergetycznych i dla planowania współpracy tych urządzeń z siecią elektroenergetyczną. Dodatkowo należy podkreślić, że model umożliwia precyzyjne planowanie kosztów eksploatacji na przestrzeni roku.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN ISO 13790:2009, *Energetyczne właściwości użytkowe budynków – Obliczanie zużycia energii na potrzeby ogrzewania i chłodzenia*.
- [2] PN-EN ISO 52016-1:2017-09, *Energetyczne właściwości użytkowe budynków – Zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia, wewnętrzne temperatury oraz jawne i utajone obciążenia cieplne – Część 1: Procedury obliczania*.
- [3] *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej z późniejszymi zmianami* (obowiązujący stan na dzień wydania zawarto w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 20 grudnia 2016 r.).
- [4] Dott R., Afjei T., Genkinger A., Dalibard A., Carbonell D., Consul R., Heinz A., Haller M., Witzig A., Facão J., Ochs F., Pärish P., *Models of Sub-Components and Validation for the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38, Part C: Heat Pump Models* (2013).
- [5] Wemhöner C., Dott R., Afjei T., Huber H., Helfenfinger D., Keller P., Furter R., *Calculation method for the seasonal performance of heat pump compact units and validation* (2007).
- [6] Hadom J.-C. (red.), *Solar and Heat Pump Systems for Residential Buildings, First Edition* (2015).
- [7] Willem H., Lin Y., Lekov A., *Review of energy efficiency and system performance of residential heat pump water heaters*, „Energy and Buildings” 143 (2017), s. 191–201.
- [8] Piechurski K., Szulgowska-Zgrzywa M., *Obliczanie rocznej efektywności pomp ciepła powietrze/woda*, „Rynek Instalacyjny” 6 (2016), s. 35.
- [9] Piechurski K., Szulgowska-Zgrzywa M., *Wpływ warunków klimatycznych i obciążenia cieplnego budynku na efektywność energetyczną pomp ciepła powietrze/woda z płynną regulacją mocy*, „Rynek Instalacyjny” 10 (2016), s. 21.
- [10] Piechurski K., Stefanowicz E., *Wpływ doboru pompy ciepła powietrze/woda na koszty eksploatacyjne instalacji grzewczej*, „Rynek Instalacyjny” 7/8 (2018), s. 49.
- [11] PN-EN 14511:2018-08, *Klimatyzatory, zbiorniki cieczy i pompy ciepła do grzania i ziębienia oraz zbiorniki do procesów przemysłowych, ze sprężarkami o napędzie elektrycznym*.
- [12] Madani H., Claesson J., Lundqvist P., *Capacity control in ground source heat pump systems. Part I: modeling and simulation*, „International Journal of Refrigeration” 34 (2011), s. 1338–1347.
- [13] Madani H., Claesson J., Lundqvist P., *Capacity control in ground source heat pump systems. Part II: Comparative analysis between on/off controlled and variable capacity systems*, „International Journal of Refrigeration” 34 (2011), s. 1934–1942.
- [14] Corberán J.M., Donadello D., Martínez-Galván I., Montagud C., *Partialization losses of ON/OFF operation of water-to-water refrigeration/heat-pump units*, „International Journal of Refrigeration” 36 (2013), s. 2251–2261.
- [15] Yang L., Yuan H., Peng J.W., Zhang Ch.L., *Performance modeling of air cycle heat pump water heater in cold climate*, „Renewable Energy” 87 (2015), s. 1067–1075.
- [16] PN-EN 14825:2016-08, *Klimatyzatory, agregaty do chłodzenia cieczy i pompy ciepła ze sprężarkami o napędzie elektrycznym, do grzania i ziębienia – Badanie i ocena w warunkach niepełnego obciążenia oraz obliczanie wydajności sezonowej*.
- [17] PN-EN 15316-4-2:2017-06, *Charakterystyka energetyczna budynków – Metoda obliczania zapotrzebowania na ciepło przez instalację i sprawności układu – Część 4-2: Źródła ciepła w pomieszczeniach, instalacje z pompami ciepła*.
- [18] Naldi C., Morini G.L., Zanchini E., *A method for the choice of the optimal balance-point temperature of air-to-water heat pumps for heating*, „Sustainable Cities and Society” 12 (2014), s. 85–91.
- [19] Naldi C., Dongellini M., Morini G.L., *Climate influence on seasonal performances of air-to-water heat pumps for heating*, „Energy Procedia” 81 (2015), s. 100–107.

- [20] Dongellini M., Naldi C., Morini G.L., *Annual performances of reversible air source heat pumps for space conditioning*, „Energy Procedia” 78 (2015), s. 1123–1128.
- [21] Mattarelli A., Piva S., *EN 15316 Calculation methods for the generation sub-system: the influence of input data on the results*, „Energy Procedia” 45 (2014), s. 473–481.
- [22] Wemhoener C., Afjei T., Dott R., *IEA HPP Annex 28 – standardised testing and seasonal performance calculation for multifunctional heat pump systems*, „Applied Thermal Engineering” 28 (2008), s. 2062–2069.
- [23] Dongellini M., Naldi C., Morini G.L., *Seasonal performance evaluation of electric air-to-water heat pump systems*, „Applied Thermal Engineering” 90 (2015), s. 1072–1081.
- [24] Dar U.I., Georges L., Sartori I., Novacovic V., *Influence of occupant’s behavior on heating needs and energy system performance: A case of well-insulated detached houses in cold climates*, „Building Simulation” 8 (2015), s. 499–513.
- [25] Byrne P., Miriel J., Lénat Y., *Modelling and simulation of a heat pump for simultaneous heating and cooling*, „Building Simulation” 5 (2015), s. 2019–2032.
- [26] Arabzadeh V., Alimohammadisagvand B., Jokisalo J., Siren K., *A novel cost-optimizing demand response control for a heat pump heated residential building*, „Building Simulation” (2017).
- [27] Wang Z., Wang F., Wang X., Ma Z., Wu X., Song M., *Dynamic character investigation and optimization of a novel air-source heat pump system*, „Applied Thermal Engineering” 111 (2017), s. 122–133.
- [28] Jiang S., Wang S., Jin X., Yu Y., *Optimum compressor cylinder volume ratio for two-stage compression air source heat pump systems*, „International Journal of Refrigeration” (2016).
- [29] Mader G., Madani H., *Capacity control in air-water heat pumps: Total cost of ownership analysis*, „Energy and Buildings” 81 (2014), s. 296–304.
- [30] Huang P., Huang G., Wang Y., *HVAC system design under peak load prediction uncertainty using multiple-criterion decision making technique*, „Energy and Buildings” 91 (2015), s. 26–36.
- [31] Trčka M., Hensen J.L.M., *Overview of HVAC system simulation*, „Automation in Construction” 19 (2010), s. 93–99.
- [32] Vakiloroaia V., Ha Q.P., Samali B., *Energy-efficient HVAC systems: Simulation–empirical modelling and gradient optimization*, „Automation in Construction” 31 (2013), s. 176–185.
- [33] Dokumentation Be10 beregningskerne, Aarhus Universitat (2014).
- [34] Shen B., New J., Baxter V., *Air source integrated heat pump simulation model for EnergyPlus*, „Energy and Buildings” 156 (2017), s. 197–206.
- [35] VDI 4650 wydanie PORT PC, cześć 1, wrzesień 2014, *Projektowanie instalacji z pompami ciepła. Skrócona metoda obliczania rocznego współczynnika efektywności pomp ciepła. Pompy ciepła z napędem elektrycznym do centralnego ogrzewania pomieszczeń i podgrzewania c.w.u.*
- [36] Mengjie S., Shiming D., Chaobin D., Ning M., Zhihua W., *Review on improvement for air source heat pump units during frosting and defrosting*, „Applied Energy” 211 (2018), s. 1150–1170.
- [37] Afjei T., Wetter M., *Compressor heat pump including frost and cycle losses* (1997).
- [38] Ruschenburg J., utić T., Herkel S., *Validation of a black-box heat pump simulation model by means of field test results from five installation*, „Energy and Buildings” 84 (2014), s. 506–515.
- [39] Simon F., Ordoñez J., Reddy T.A., Girard A., Muneer T., *Developing multiple regression models from the manufacturer’s ground-source heat pump catalogue data*, „Renewable Energy” 95 (2016), s. 413–421.
- [40] Zhijiang W., Yansheng X., Xuewei Z., *Study on Performance Factors of Variable Frequency Heat Pump Water Heater*, International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering (2015), s. 537–540.
- [41] Madani H., Ahmadi N., Claesson J., Lundqvist P., *Experimental Analysis of a Variable Capacity Heat Pump System Focusing on the Compressor and Inverter Loss Behavior*, International Refrigeration and Air Conditioning Conference (2010).

- [42] Fuentes E., Waddicor D., Salom J., *Improved characterization of water-to-water heat pumps part load performance*, „REHVA Journal” (2016), s. 45–49.
- [43] UNI 10963, *Air conditioners, chillers and heat pumps. Determination of the part load performances*.
- [44] Waddicor D.A., Fuentes E., Azar M., Salom J., *Partial load efficiency degradation of a water-to-water heat pump under fixed set-point control*, „Applied Thermal Engineering” 106 (2016), s. 275–285.
- [45] Bettanini E., Gastaldello A., Schibuola L., *Simplified models to simulate part load performances of air conditioning equipments*, Eighth International IBPSA Conference (2003), s. 107–114.
- [46] Piechurski K., Szulgowska-Zgrzywa M., Danielewicz J., *Quasi-dynamic model of the energy efficiency degradation coefficient for an air-to-water heat pump*, „EDP Sciences” (2018), art. 00139, s. 1–8 (E3S Web of Conferences, ISSN 2267-1242; t. 44).
- [47] Piechurski K., *Porównanie efektywności eksploatacyjnej pompy ciepła powietrze/woda z wynikami symulacji uzyskanych za pomocą wybranych metod analitycznych*, praca magisterska (2016).
- [48] Piechurski K., Szulgowska-Zgrzywa M., Danielewicz J., *The impact of the work under partial load on the energy efficiency of an air-to-water heat pump*, „EDP Sciences” (2017), art. 00072, s. 1–8 (E3S Web of Conferences, ISSN 2267-1242, t. 17).
- [49] Underwood C.P., Royapoor M., Sturm B., *Parametric modelling of domestic air-source heat pumps*, „Energy and Buildings” 139 (2017), s. 578–589.
- [50] Piechurski K., Stefanowicz E., Szulgowska-Zgrzywa M., *Jak powstaje etykieta energetyczna pompy ciepła*, „Rynek Instalacyjny” 6 (2017), r. 25, s. 28–33.
- [51] Madonna F., Bazzocchi F., *Annual performances of reversible air-to-water heat pumps in small residential buildings*, „Energy and Buildings” 65 (2013), s. 299–309.
- [52] Burch J., Hendron R., *Development of Standardized Domestic Hot Water Event Schedules for Residential Buildings*, National Renewable Energy Laboratory (2007).
- [53] Feng X., Yan D., Yu R., Gao Y., *Investigation and modeling of centralized solar domestic hot water system in residential buildings*, „Building Simulation” 10 (2017), s. 87–96.
- [54] Yao R., Steemers K., *A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK*, „Energy and Buildings” 37 (2005), s. 663–671.
- [55] Xue P., Hong T., Dong B., Mak C., *A preliminary investigation of water usage behavior in single-family homes*, „Building Simulation” 10 (2017), s. 949–962.
- [56] Yang L., Yuan H., Peng J.W., Zhang Ch.L., *Performance modeling of air cycle heat pump water heater in cold climate*, „Renewable Energy” 87 (2016), s. 1067–1075.
- [57] Xue P., Hong T., Dong B., Mak C., *A preliminary investigation of water usage behavior in single-family homes*, „Building Simulation” 10 (2017), s. 949–962.
- [58] PN-EN 15316-3-2:2007, *Instalacje ogrzewcze w budynkach – Metoda obliczania zapotrzebowania na energię instalacji i sprawności instalacji – Część 3-2: Instalacje centralnej ciepłej wody, rozprzewadzenie wody*.
- [59] Chmielewska A., *Modelowanie zapotrzebowania na energię użytkową do przygotowania ciepłej wody w budynkach wielorodzinnych*, „Raporty Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej” 7 (2017), ser. PRE, s. 159.
- [60] Ndoye B., Sarr M., *Analysis of domestic hot water energy consumption in large buildings under standard conditions in Senegal*, „Building and Environment” 43 (2008), s. 1216–1224.
- [61] Annex 42: *European and Canadian non-HVAC Electric and DHW Load Profiles for USE in Simulating the Performance of Residential Cogeneration System*. International Energy Agency (2017), Energy Conservation in Buildings and Community System Programme.
- [62] Fischer D., Wolf T., Scherer J., Wille-Hausmann B., *A stochastic bottom-up model for space heating and domestic hot water load profiles for German households*, „Energy and Buildings” 124 (2016), s. 120–128.

- [63] Chmielewska A., Szulgowska-Zgrzywa M., Bartnicki G., Danielewicz J., *Zapotrzebowanie na energię ciepłą do przygotowania c.w.u. w budynku mieszkalnym*, „Rynek Instalacyjny” 11 (2016), r. 24, s. 20–25.
- [64] Szulgowska-Zgrzywa M., Chmielewska A., Piechurski K., Danielewicz J., *The analysis of the air-to-water heat pump operation with consideration of the actual profile of the domestic hot water demand*, International Conference on Advances in Energy Systems and Environmental Engineering ASEE17 (2017).
- [65] PN-B-01706:1992, *Instalacje wodociągowe – Wymagania w projektowaniu*.
- [66] Farooq A.A., Afram A., Schulz N., Janabi-Sharifi F., *Grey-box modeling of a low pressure electric boiler for domestic hot water system*, „Applied Thermal Engineering” 84 (2015), s. 257–267.
- [67] *Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z późniejszymi zmianami (obowiązujący stan na dzień wydania zawarto w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 14 listopada 2017 r.)*.

SUMMARY IN ENGLISH

Monthly energy efficiency of air/water heat pump systems

The main theme of this book are the methods of energy efficiency analysis of the air/water heat pumps. In chapter I the systematics of the methods has been presented, in relation to buildings energy efficiency models. In this review, the models enabling simulations of air/water heat pumps in monthly steps seemed particularly significant. Such models, widely applied in many areas of civil engineering, have not been yet used for air/water heat pumps – no theoretical solutions were found for this group of models. Chapters II and IV present the discussion of the impact of the partial load modelling approach of an air/water heat pump and of the precision of heat load representation on the energy efficiency simulation results. To support this, the proper calculation algorithms have been prepared and research results analyses have been considered. The discussion resulted in the decisions about the scope and precision of the input data used for the air/water heat pump efficiency model, calculated in the monthly steps. In chapters III and IV original models of energy efficiency calculation in monthly steps have been described for the air/water heat pumps working with building heating systems or hot domestic water preparation systems. When constructing the models it was assumed that splitting each month into four areas, different by the heat pump's exploitation method, will enable the calculation of a representative efficiency for each area and knowing the share of the energy demand for every area will enable a precise calculation of the device efficiency in each month. In order to calculate the impact of each area on the device efficiency, the *temperature frequency function* has been defined, that basing on the minimum, maximum and average monthly ambient temperatures estimates the duration of the device operation in every area. Additionally, for the model considering heating, a method of construction of individual heat load profiles for every month of a year was proposed, and for the model considering the preparation of DHW – a method of calculation of the representative heating power. The results acquired from the proposed models of air/water heat pumps energy efficiency were verified with the results of models with hourly steps calculations. It was concluded that the proposed models with monthly steps calculations provide good precision and can be a valid alternative for complex energy simulations of such devices. In chapter VI the algorithm for the integrated model was proposed, that enables proper choice and analysis of the air/water heat pumps operation that supply both heating and domestic hot water preparation.

SPIS RYSUNKÓW

Rysunek 1. Schemat systemu pompy ciepła powietrze/woda stosowanej do ogrzewania budynku	16
Rysunek 2. Przykładowe profile obciążenia cieplnego budynku: profil A [16] i profil B [17]	23
Rysunek 3. Parametry pracy pompy ciepła powietrze/woda w zależności od profilu obciążenia cieplnego budynku	24
Rysunek 4. Profile obciążenia cieplnego budynku w zależności od udziału zysków ciepła od nasłonecznienia w bilansie energetycznym obiektu	25
Rysunek 5. Porównanie wartości funkcji opisujących wpływ obciążenia częściowego na efektywność pompy ciepła powietrze/woda dla różnych współczynników C_c oraz a [46]	30
Rysunek 6. Wyniki pomiarów: energia cieplna dostarczona do budynku i energia elektryczna dostarczona do systemu pompy ciepła powietrze/woda	32
Rysunek 7. Wyniki pomiarów: średnia miesięczna wartość temperatury powietrza zewnętrznego oraz wartości średniomiesięczne COP_d i COP	32
Rysunek 8. Błędy miesięcznych wartości $SCOP^m$ (wyniki symulacji wobec danych pomiarowych)	34
Rysunek 9. Średnie błędy godzinowych wartości COP^h (wyniki symulacji wobec danych pomiarowych)	35
Rysunek 10. Wartości COP^h z pomiarów zestawione z wynikami symulacji z analizowanych modeli	36
Rysunek 11. Porównanie błędów w miesięcznej wartości $SCOP^m$ pomiędzy modelowaniem przy rzeczywistym i teoretycznym profilu obciążenia cieplnego	38
Rysunek 12. Obciążenie cieplne budynku i wartości COP^h uzyskane z modelu B (2) i A (2) względem wyników pomiarów dla stycznia	39
Rysunek 13. Obciążenie cieplne budynku i wartości COP^h uzyskane z modelu B (2) i A (2) względem wyników pomiarów dla marca	39
Rysunek 14. Schemat koncepcyjny obliczeń i oznaczeń dla modelu pompy ciepła powietrze/woda stosowanej do ogrzewania budynku	44
Rysunek 15. Krzywe klimatyczne dla kolejnych miesięcy w roku dla Wrocławia i Warszawy	46
Rysunek 16. Skumulowane i przeskalowane krzywe klimatyczne dla Wrocławia i Warszawy	47
Rysunek 17. Funkcja częstości temperatury zestawiona z dokładnymi miesięcznymi krzywymi klimatycznymi dla wybranych wartości DT^m	49
Rysunek 18. Odpowiedź funkcji częstości temperatury zestawiona z wynikami obliczonymi na podstawie szczegółowych danych klimatycznych (baza danych tworzących model)	50
Rysunek 19. Odpowiedź funkcji częstości temperatury zestawiona z wynikami obliczonymi na podstawie szczegółowych danych klimatycznych (dane dla: Kopenhagi, Mediolanu, Brukseli i Budapesztu)	50
Rysunek 20. Rzeczywiste profile obciążenia cieplnego w różnych miesiącach roku względem wyników uzyskanych na podstawie rocznej krzywej klimatycznej	51
Rysunek 21. Miesięczne profile obciążenia cieplnego budynku o powierzchni okien przyjętej jako 10% powierzchni użytkowej obiektu	54
Rysunek 22. Miesięczne profile obciążenia cieplnego budynku o powierzchni okien przyjętej jako 20% powierzchni użytkowej obiektu	54
Rysunek 23. Wyniki obliczeń udziałów obszarów I–IV w zapotrzebowaniu na energię do ogrzewania budynku w danym miesiącu według funkcji częstości temperatury wobec obliczeń z dokładnych danych klimatycznych	58
Rysunek 24. Odzworowanie COP w obszarze II z zastosowaniem modelu miesięcznego wobec modelu godzinowego	61

Rysunek 25. Odzworowanie COP w obszarze III z zastosowaniem modelu miesięcznego wobec modelu godzinowego	63
Rysunek 26. Odzworowanie COP w obszarze IV z zastosowaniem modelu miesięcznego wobec modelu godzinowego	64
Rysunek 27. Błąd wartości $SCOP^m$ dla modeli M2, M3 i M4 względem modelu M1 dla analizy 1	65
Rysunek 28. Błąd wartości zapotrzebowania na energię elektryczną przez system pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S^m}$) w kolejnych miesiącach dla modeli M2, M3, i M4 względem modelu M1 dla analizy 1	66
Rysunek 29. Błąd wartości zapotrzebowania na energię elektryczną przez system pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S^m}$) w kolejnych miesiącach dla modeli M2, M3, i M4 względem modelu M1 dla analizy 2	67
Rysunek 30. Błąd wartości zapotrzebowania na energię elektryczną przez system pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S^m}$) w kolejnych miesiącach dla modeli M2, M3, i M4 względem modelu M1 dla analizy 3	67
Rysunek 31. Błąd wartości zapotrzebowania na energię elektryczną przez system pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S^m}$) w kolejnych miesiącach dla modeli M1, M2, M3, i M4 względem modelu M5 dla analizy 4	68
Rysunek 32. Błąd wartości zapotrzebowania na energię elektryczną przez system pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S^m}$) w kolejnych miesiącach dla modeli M1, M2, M3, i M4 względem modelu M5 dla analizy 5	69
Rysunek 33. Schemat systemu pompy ciepła powietrze/woda stosowanej do przygotowania c.w.u.....	72
Rysunek 34. Zmiany temperatury wody wodociągowej w wybranych miastach Polski wyznaczone na podstawie modelu miesięcznego [59]	75
Rysunek 35. Zmiany temperatury wody wodociągowej w wybranych miastach Polski wyznaczone na podstawie modelu dobowego [59]	76
Rysunek 36. Zużycie ciepłej wody użytkowej w budynku mieszkalnym w poszczególnych godzinach doby (dane pomiarowe z jednego roku) [59]	77
Rysunek 37. Profile godzinowe zużycia ciepłej wody użytkowej [59]	78
Rysunek 38. Profile miesięcznego zużycia ciepłej wody użytkowej [59]	79
Rysunek 39. Odchylenia zapotrzebowania na energię do przygotowania ciepłej wody dla analizowanych modeli względem modelu A-TY.....	80
Rysunek 40. Przykładowe profile zapotrzebowania na moc grzewczą do przygotowania ciepłej wody użytkowej dla pierwszego tygodnia roku.....	81
Rysunek 41. Przykładowe profile zapotrzebowania na moc grzewczą po stronie źródła ciepła dla pierwszego tygodnia roku (założenia: $V_z = 3000$ l, deficyt w zasobniku do uruchomienia układu grzewczego 44%, czas ładowania 1 h; wyjątek to profil F-TY analizowany przy założeniu układu z pełną akumulacją energii)	82
Rysunek 42. Błędy wyników zapotrzebowania na energię elektryczną dla systemu pompy ciepła powietrze/woda uzyskane z wybranych modeli względem wyników dla modelu A-TY-Z dla analizy 1.....	88
Rysunek 43. Błędy wyników zapotrzebowania na energię pomocniczą do zasilania grzałki elektrycznej uzyskane z wybranych modeli względem wyników dla modelu A-TY-Z dla analizy 1	89
Rysunek 44. Błędy wyników zapotrzebowania na energię do przygotowania ciepłej wody użytkowej uzyskane z wybranych modeli względem wyników dla modelu A-TY-Z	90
Rysunek 45. Błędy wyników $SCOP^m$ uzyskane z wybranych modeli względem wyników dla modelu A-TY-Z dla analizy 1	90
Rysunek 46. Błędy wyników zapotrzebowania na energię elektryczną dla systemu pompy ciepła powietrze/woda uzyskane z wybranych modeli względem wyników dla modelu A-TY-Z dla analizy 2.....	91
Rysunek 47. Błędy wyników zapotrzebowania na energię elektryczną dla systemu pompy ciepła powietrze/woda uzyskane z wybranych modeli względem wyników dla modelu A-TY-Z dla analizy 3.....	92
Rysunek 48. Wyniki z symulacji F-TX wobec wyników z symulacji A-TY-Z.....	93
Rysunek 49. Schemat koncepcyjny do modelu pompy ciepła powietrze/woda stosowanej do przygotowania ciepłej wody użytkowej	97

Rysunek 50. Liczba cykli ładowania zasobnika c.w.u. w ciągu doby i moc referencyjna układu w jednym cyklu w zależności od akumulacyjności układu (rozumianej jako udział energii możliwej do zgromadzenia w zasobniku względem potrzeb w ciągu doby) dla czasu ładowania 1 h.....	101
Rysunek 51. Liczba cykli ładowania zasobnika c.w.u. w ciągu doby i moc referencyjna układu w jednym cyklu w zależności od akumulacyjności układu (rozumianej jako udział energii możliwej do zgromadzenia w zasobniku względem potrzeb w ciągu doby) dla maksymalnego możliwego czasu ładowania	102
Rysunek 52. Punkt bivalentny w przykładowym układzie przygotowania c.w.u. ($V_{CWU,d} = 4000$ l/d, $V_z = 1000$ l, stosunek energii cieplnej dostarczonej z pompy ciepła powietrze/woda i dodatkowego źródła wynosi 80:20)	103
Rysunek 53. Wartości zapotrzebowania na energię elektryczną dla systemu pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S,W^{m}}$) modelu miesięcznego i temperaturowego wobec modelu godzinowego dla analizy 1.....	109
Rysunek 54. Wartości zapotrzebowania na energię cieplną z dodatkowego źródła ($\Sigma Q_{EL,Q,W^{m}}$) modelu miesięcznego i temperaturowego względem modelu godzinowego dla analizy 1.....	109
Rysunek 55. Wartości zapotrzebowania na energię elektryczną dla systemu pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S,W^{m}}$) modelu miesięcznego i temperaturowego wobec modelu godzinowego dla analizy 2.....	110
Rysunek 56. Wartości zapotrzebowania na energię cieplną z dodatkowego źródła ($\Sigma Q_{EL,Q,W^{m}}$) modelu miesięcznego i temperaturowego względem modelu godzinowego dla analizy 2.....	111
Rysunek 57. Wartości zapotrzebowania na energię elektryczną dla systemu pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S,W^{m}}$) modelu miesięcznego i temperaturowego wobec modelu godzinowego dla analizy 3.....	112
Rysunek 58. Wartości zapotrzebowania na energię cieplną z dodatkowego źródła ($\Sigma Q_{EL,Q,W^{m}}$) modelu miesięcznego i temperaturowego względem modelu godzinowego dla analizy 3.....	112
Rysunek 59. Wartości zapotrzebowania na energię elektryczną dla systemu pompy ciepła ($\Sigma Q_{EL,S,W^{m}}$) modelu miesięcznego i temperaturowego wobec modelu godzinowego dla analizy 4.....	113
Rysunek 60. Wartości zapotrzebowania na energię cieplną z dodatkowego źródła ($\Sigma Q_{EL,Q,W^{m}}$) modelu miesięcznego i temperaturowego względem modelu godzinowego dla analizy 4.....	114
Rysunek 61. Współpraca pompy ciepła PC (2) z systemem grzewczym w budynku z przykładu 1	130
Rysunek 62. Współpraca pompy ciepła PC (3) z systemem grzewczym w budynku z przykładu 2	131
Rysunek 63. Współpraca pompy ciepła PC (3) z systemem grzewczym w budynku z przykładu 3	132
Rysunek 64. Współpraca pompy ciepła PC (1) z systemem grzewczym w budynku z przykładu 4	133

SPIS TABEL

Tabela 1. Klasyfikacja modeli pomp ciepła powietrze/woda ze względu na krok obliczeniowy modelu i w kontekście stosowanych modeli do analizy efektywności energetycznej budynków	12
Tabela 2. Zużycie energii elektrycznej przez pompę ciepła powietrze/woda działającej w trybie ogrzewania budynku w różnych cyklach pracy.....	17
Tabela 3. Modele COP_d i mocy pompy ciepła powietrze/woda.....	18
Tabela 4. Zasada obliczania krzywej klimatycznej oraz zapotrzebowania na moc i energię dla profili A oraz B	22
Tabela 5. Wyniki obliczeń efektywności pompy ciepła powietrze/woda według norm [16] i [17].....	24
Tabela 6. Charakterystyka badanej pompy ciepła powietrze/woda według normy EN 14511 [11]	31
Tabela 7. Wyniki pomiarów i symulacji (badanie wpływu obciążenia częściowego na efektywność energetyczną pompy ciepła powietrze/woda).....	33
Tabela 8. Błędy wartości COP^h i $SCOP^m$ (wyniki symulacji wobec danych pomiarowych)	35
Tabela 9. Wyniki pomiarów i symulacji (badanie wpływu dokładności odwzorowania profilu obciążenia cieplnego budynku na efektywność energetyczną pompy ciepła powietrze/woda).....	37
Tabela 10. Symulacje wspomagające proces tworzenia modelu miesięcznej efektywności pompy ciepła powietrze/woda pracującej w trybie ogrzewania budynku.....	43
Tabela 11. Zestawienie analiz porównawczych do oceny modelu miesięcznej efektywności pompy ciepła powietrze/woda stosowanej do ogrzewania budynku	64
Tabela 12. Zużycie energii elektrycznej przez pompę ciepła powietrze/woda w trybie przygotowania c.w.u. w różnych cyklach pracy.....	73
Tabela 13. Profil miesięczny zużycia ciepłej wody użytkowej w budynku mieszkalnym	77
Tabela 14. Profil tygodniowy zużycia ciepłej wody użytkowej w budynku mieszkalnym	77
Tabela 15. Warianty profili zapotrzebowania na energię przeznaczoną do przygotowania c.w.u.	79
Tabela 16. Charakterystyka pompy ciepła według normy EN 14511 [11].....	87
Tabela 17. Wyniki roczne symulacji przeprowadzonych w ramach analizy 1.....	88
Tabela 18. Wybrane wyniki roczne symulacji przeprowadzonych w ramach analizy 2.....	91
Tabela 19. Wybrane wyniki roczne symulacji przeprowadzonych w ramach analizy 3.....	92
Tabela 20. Zestawienie analiz porównawczych do oceny modelu miesięcznej efektywności pompy ciepła powietrze/woda stosowanej do przygotowania ciepłej wody użytkowej	108
Tabela 21. Wyniki analizy pracy pompy ciepła PC (2) dla budynku mieszkalnego z przykładu 1.....	129
Tabela 22. Wyniki analizy pracy trzech pomp ciepła dla budynku mieszkalnego z przykładu 1	129
Tabela 23. Wyniki analizy pracy trzech pomp ciepła dla budynku mieszkalnego z przykładu 2	130
Tabela 24. Wyniki analizy pracy trzech pomp ciepła dla budynku mieszkalnego z przykładu 3	131
Tabela 25. Wyniki analizy pracy pompy ciepła PC (1) dla budynku mieszkalnego z przykładu 4.....	133
Tabela 26. Wyniki analizy pracy dwóch pomp ciepła dla budynku mieszkalnego z przykładu 4.....	134

SPIS TREŚCI

WYKAZ OZNACZEŃ I AKRONIMÓW	5
----------------------------------	---

ROZDZIAŁ I

METODY ANALIZY EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ POMP CIEPŁA POWIETRZE/WODA W KONTEKŚCIE ANALIZY EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ BUDYNKÓW	9
---	---

1. Wprowadzenie.....	9
2. Klasyfikacja metod obliczeniowych.....	10
3. Zdefiniowanie problemu badawczego	13

ROZDZIAŁ II

MODELOWANIE EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ POMP CIEPŁA POWIETRZE/WODA WSPÓŁPRACUJĄCYCH Z SYSTEMAMI OGRZEWANIA BUDYNKÓW	15
--	----

1. Efektywność energetyczna pompy ciepła powietrze/woda	15
1.1 Współpraca pompy ciepła z systemem grzewczym	15
1.2 Chwilowa wartość COP oraz mocy grzewczej pompy ciepła	17
1.3 Zapotrzebowanie na moc i energię do ogrzewania budynku	20
2. Metoda symulacji pracy pompy ciepła powietrze/woda w kroku godzinowym.....	26
2.1 Dane wejściowe	26
2.2 Chwilowa wartość COP_g pompy ciepła	27
2.3 Chwilowa wartość mocy grzewczej pompy ciepła.....	27
2.4 Chwilowa wartość mocy grzałki elektrycznej.....	27
2.5 Udział czasu pracy aktywnej i pracy w trybie stand-by.....	28
2.6 Chwilowa wartość COP i okresowa wartość $SCOP$	28
3. Analiza i symulacja efektywności energetycznej pompy ciepła powietrze/woda	31
3.1 Opis pomiarów pracy pompy ciepła powietrze/woda	31
3.2 Zakres analiz i symulacji	32
3.3 Wpływ sposobu modelowania obciążenia częściowego na wyniki symulacji.....	33
3.4 Wpływ profilu obciążenia cieplnego budynku na wyniki symulacji	37
3.5 Podsumowanie.....	40

ROZDZIAŁ III

KORELACYJNY MODEL EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ POMPY CIEPŁA POWIETRZE/WODA WSPÓŁPRACUJĄCEJ Z SYSTEMEM OGRZEWANIA BUDYNKU	41
--	----

1. Założenia do modelu	41
2. Ogólny opis modelu	42
2.1 Opis metody tworzenia modelu	42
2.2 Dane wejściowe do modelu	45

3.	Szczegółowy opis modelu	46
3.1	Zmiany temperatury powietrza zewnętrznego w okresie miesiąca	46
3.2	Miesięczny profil obciążenia cieplnego budynku	51
3.3	Temperatura czynnika grzewczego	54
3.4	Temperatury graniczne dla obszarów pracy pompy ciepła	55
3.5	Wpływ poszczególnych obszarów na efektywność pompy ciepła	56
3.6	Reprezentatywna wartość <i>COP</i> w poszczególnych obszarach pracy.....	59
4.	Ocena modelu miesięcznego do symulacji pracy pompy ciepła powietrze/woda	64
4.1	Zakres analiz porównawczych.....	64
4.2	Wyniki i dyskusja	65
4.3	Podsumowanie.....	69

ROZDZIAŁ IV

MODELOWANIE EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ POMP CIEPŁA POWIETRZE/WODA WSPÓŁPRACUJĄCYCH Z SYSTEMAMI PRZYGOTOWANIA CIEPŁEJ WODY UŻYTKOWEJ		71
1.	Efektywność energetyczna systemu pomp ciepła powietrze/woda	71
1.1	Współpraca pompy ciepła z systemem przygotowania ciepłej wody użytkowej	71
1.2	Chwilowa wartość <i>COP</i> pompy ciepła	74
1.3	Zapotrzebowanie na energię do przygotowania ciepłej wody użytkowej	74
1.4	Profil zmian temperatury wody zimnej.....	74
1.5	Profil zużycia ciepłej wody użytkowej	76
1.6	Profil zapotrzebowania na energię do przygotowania ciepłej wody użytkowej.....	79
1.7	Akumulacja w systemie ciepłej wody użytkowej.....	81
2.	Metoda symulacji pracy systemu pompy ciepła powietrze/woda w kroku godzinowym.....	82
2.1	Dane wejściowe	83
2.2	Chwilowa wartość <i>COP</i> pompy ciepła	83
2.3	Wymagana moc grzewcza układu przygotowania ciepłej wody użytkowej.....	84
2.4	Chwilowa wartość mocy grzewczej pompy ciepła.....	84
2.5	Chwilowa wartość mocy grzałki elektrycznej.....	85
2.6	Ustalenie stanu układu na końcu kroku obliczeniowego.....	85
2.7	Czas pracy pompy ciepła w trybie przygotowania ciepłej wody użytkowej.....	85
2.8	Chwilowa wartość <i>COP</i> i okresowa wartość <i>SCOP</i>	86
3.	Symulacja efektywności energetycznej pompy ciepła powietrze/woda	86
3.1	Zakres symulacji i analiz	86
3.2	Diskusja wyników	87
3.3	Podsumowanie.....	93

ROZDZIAŁ V

MODEL KORELACYJNY DO OBLICZANIA EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ POMP CIEPŁA POWIETRZE/WODA WSPÓŁPRACUJĄCYCH Z SYSTEMAMI PRZYGOTOWANIA CIEPŁEJ WODY UŻYTKOWEJ		95
1.	Założenia do modelu	95
2.	Ogólny opis modelu	96
2.1	Metoda tworzenia modelu.....	96
2.2	Dane wejściowe	98

3.	Szczegółowy opis modelu.....	99
3.1	Utrzymanie wymaganej temperatury ciepłej wody użytkowej.....	99
3.2	Reprezentatywna moc układu przygotowania ciepłej wody użytkowej.....	99
3.3	Temperatury graniczne obszarów pracy pompy ciepła.....	102
3.4	Parametry pracy pompy ciepła w poszczególnych obszarach.....	103
3.5	Wpływ poszczególnych obszarów na efektywność energetyczną pompy ciepła.....	104
3.6	Efektywność energetyczna systemu pompy ciepła.....	105
4.	Ocena modelu miesięcznego do symulacji pracy pompy ciepła powietrze/woda.....	107
4.1	Zakres analiz porównawczych.....	107
4.2	Wyniki i dyskusja.....	108
4.3	Podsumowanie.....	114

ROZDZIAŁ VI

MODEL ZINTEGROWANY DO ANALIZY PRACY POMP CIEPŁA POWIETRZE/WODA DLA SYSTEMÓW OGRZEWANIA BUDYNKU I PRZYGOTOWANIA CIEPŁEJ WODY UŻYTKOWEJ		115
1.	Wprowadzenie.....	115
2.	Algorytm modelu zintegrowanego	116
2.1	Dane wejściowe i obliczenia podstawowe.....	116
2.2	Efektywności pompy ciepła względem układu ciepłej wody użytkowej.....	117
2.3	Efektywność pompy ciepła względem układu ogrzewania budynku.....	121
2.4	Obliczenia podsumowujące.....	126
3.	Zastosowanie modelu i przykładowe wyniki symulacji.....	128
3.1	Przykład 1 – dobór pompy ciepła	128
3.2	Przykład 2 – warunki klimatyczne a efektywność energetyczna pompy ciepła.....	130
3.3	Przykład 3 – udział ciepłej wody użytkowej w bilansie energetycznym.....	131
3.4	Przykład 4 – wpływ charakterystyki COP_d na dobór pompy ciepła.....	132
4.	Podsumowanie i wnioski	134
BIBLIOGRAFIA		139
SUMMARY IN ENGLISH		143
SPIS RYSUNKÓW.....		144
SPIS TABEL.....		147

CONTENTS

LIST OF SYMBOLS AND ACRONYMS	5
------------------------------------	---

CHAPTER I

METHODS OF ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY OF AIR/WATER HEAT PUMPS IN THE CONTEXT OF ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY OF BUILDINGS	9
---	---

1. Introduction	9
2. Classification of calculation methods	10
3. Research problem determination	13

CHAPTER II

MODELING OF ENERGY EFFICIENCY OF AIR/WATER HEAT PUMPS OPERATING IN BUILDING HEATING SYSTEMS	15
---	----

1. Energy efficiency of an air/water heat pump.....	15
1.1 Heat pump cooperation with the heating system	15
1.2 Instantaneous COP and the heating power of the heat pump.....	17
1.3 Demand for power and energy for heating the building.....	20
2. The method of simulating the operation of an air/water heat pump in an hourly step	26
2.1 Input data.....	26
2.2 Instantaneous COP of the heat pump	27
2.3 Instantaneous heating power of the heat pump.....	27
2.4 Instantaneous power of the electric back-up heater.....	27
2.5 Share of active-mode and stand-by mode working time	28
2.6 Instantaneous COP and the periodic $SCOP$ value.....	28
3. Analysis and simulation of the energy efficiency of an air/water heat pump.....	31
3.1 Description of air/water heat pump operation measurements.....	31
3.2 Scope of analyzes and simulations.....	32
3.3 The influence of partial load modeling method on simulation results.....	33
3.4 The influence of the thermal load profile of the building on simulation results	37
3.5 Summary.....	40

CHAPTER III

CORRELATIONAL MODEL OF ENERGY EFFICIENCY OF AIR/WATER HEAT PUMPS OPERATING IN BUILDING HEATING SYSTEM	41
---	----

1. Assumptions for the model	41
2. General description of the model.....	42
2.1 Description of the method of the model development	42
2.2 Input data.....	45

3.	Detailed description of the model	46
3.1	Monthly changes in ambient temperature	46
3.2	Monthly thermal load profile of the building	51
3.3	The flow temperature of the heating system	54
3.4	Limiting temperatures for heat pump working areas	55
3.5	The impact of individual areas on the energy efficiency of the heat pump	56
3.6	Representative <i>COP</i> value in individual working areas	59
4.	Evaluation of the monthly model to simulate the operation of the air/water heat pump	64
4.1	The scope of comparative analyzes	64
4.2	Results and discussion	65
4.3	Summary	69

CHAPTER IV

MODELING OF ENERGY EFFICIENCY OF AIR/WATER HEAT PUMPS OPERATING IN DOMESTIC HOT WATER PREPARATION SYSTEMS	71
1. Energy efficiency of an air/water heat pump	71
1.1 Heat pump cooperation with the domestic hot water preparation system	71
1.2 Instantaneous <i>COP</i> of the heat pump	74
1.3 Demand for power and energy for domestic hot water preparation	74
1.4 Profile of the changes in tap water temperature	74
1.5 Profile of the domestic hot water consumption	76
1.6 Profile of the energy demand for the domestic hot water preparation	79
1.7 Accumulation in the domestic hot water preparation system	81
2. The method of simulating the operation of an air/water heat pump in an hourly step	82
2.1 Input data	83
2.2 Instantaneous <i>COP</i> of the heat pump	83
2.3 Required heating power of the domestic hot water preparation system	84
2.4 Instantaneous heating power of the heat pump	84
2.5 Instantaneous power of the electric back-up heater	85
2.6 Determining the system state at the end of the calculation step	85
2.7 Heat pump operating time in the domestic hot water preparation mode	85
2.8 Instantaneous <i>COP</i> and the periodic <i>SCOP</i> value	86
3. Simulation of the energy efficiency of an air/water heat pump	86
3.1 Scope of analyzes and simulations	86
3.2 Results and discussion	87
3.3 Summary	93

CHAPTER V

CORRELATIONAL MODEL OF ENERGY EFFICIENCY OF AN AIR/WATER HEAT PUMP OPERATING IN A DOMESTIC HOT WATER PREPARATION SYSTEM	95
1. Assumptions for the model	95
2. General description of the model	96
2.1 Description of the method of the model development	96
2.2 Input data	98

3.	Detailed description of the model	99
3.1	Maintaining the required temperature of the domestic hot water	99
3.2	Representative heating power of the domestic hot water preparation system.....	99
3.3	Limiting temperatures for heat pump working areas	102
3.4	Parameters of the heat pump operation in individual areas.....	103
3.5	The impact of individual areas on the energy efficiency of a heat pump	104
3.6	Energy efficiency of an air/water heat pump system	105
4.	Evaluation of the monthly model to simulate the operation of an air/water heat pump.....	107
4.1	The scope of comparative analyzes	107
4.2	Results and discussion	108
4.3	Summary.....	114

CHAPTER VI

INTEGRATED MODEL FOR ANALYSIS OF AN AIR/WATER HEAT PUMP OPERATING IN BUILDING HEATING AND DOMESTIC HOT WATER PREPARATION SYSTEMS	115
1. Introduction	115
2. The integrated model algorithm	116
2.1 Input data and basic calculations	116
2.2 Efficiency of the heat pump in relation to the domestic hot water preparation system ..	117
2.3 Efficiency of the heat pump in relation to the heating system	121
2.4 Summary calculations.....	126
3. Application of the model and sample simulation results.....	128
3.1 Example 1 – sizing of the heat pump	128
3.2 Example 2 – climatic conditions in relation to the energy efficiency	130
3.3 Example 3 – share of the DHW preparation system in the energy balance	131
3.4 Example 4 – the influence of COP_d characteristic on the sizing of a heat pump	132
4. Summary and conclusions.....	134
LITERATURE	139
SUMMARY IN ENGLISH	143
LIST OF DRAWINGS.....	144
LIST OF TABLES	147

Uzupełnieniem analizy efektywności energetycznej budynku powinna być analiza efektywności systemów do dystrybucji energii w obiekcie. W związku z koniecznością oszczędzania energii oraz zmniejszania emisji zanieczyszczeń do atmosfery ważne jest wdrożenie skutecznych, relatywnie prostych metod i narzędzi symulacyjnych, które efektywnie wspomogą pracę projektanta. W niniejszej pracy rozważono ten problem na przykładzie modelowania efektywności pomp ciepła powietrze/woda. W pracy opisano autorskie modele do obliczania efektywności energetycznej pomp ciepła powietrze/woda współpracujących z systemami do ogrzewania budynków i przygotowania ciepłej wody użytkowej w kroku miesięcznym. W celu skonstruowania modeli założono, iż podział każdego miesiąca na obszary różniące się sposobem eksploatacji pompy ciepła powietrze/woda pozwoli na obliczenie efektywności reprezentatywnej dla tego obszaru, a dzięki wiedzy o udziale poszczególnych obszarów w zapotrzebowaniu na energię możliwe będzie precyzyjne określenie efektywności urządzenia w danym miesiącu. Stwierdzono, iż zaproponowane modele miesięczne zapewniają dobrą dokładność obliczeń, umożliwiają dobór i analizę pracy pompy ciepła powietrze/woda na potrzeby ogrzewania i jednocześnie przygotowania ciepłej wody użytkowej i mogą stanowić alternatywę do zaawansowanych symulacji energetycznych tych urządzeń.



Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej są do nabycia w księgarni
ul. C.K. Norwida 9, 50-374 Wrocław, tel. 71 328 08 95
Prowadzimy sprzedaż wysyłkową: zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl

ISBN 978-83-7493-062-8