INŻYNIERIA ROLNICZA

Seria: Monografie i Rozprawy

ISBN 978-83-64377-25-9

Andrzej Marian Bochniak

Kształtowanie mikroklimatu w budynkach dla bydła mlecznego z wykorzystaniem modelowania komputerowego

Komitet Inżynierii Rolniczej
Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej

Kraków 2018

Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej

Kształtowanie mikroklimatu w budynkach dla bydła mlecznego z wykorzystaniem modelowania komputerowego

Andrzej Marian Bochniak

Monografia

Kraków 2018

Patronat naukowy: Komitet Inżynierii Rolniczej

Rada Naukowa Wydawnictwa

Prof. dr hab. Janusz Haman – czł. rzecz. PAN
Prof. dr hab. Rudolf Michałek – czł. rzecz. PAN
Prof. dr hab. Małgorzata Bzowska-Bakalarz
Prof. dr hab. Jan Bronisław Dawidowski
Prof. dr hab. Józef Szlachta
Prof. dr hab. Jerzy Weres
Prof. dr hab. Zdzisław Wójcicki
Prof. Radomir Adamovsky (Rep. Czeska)
Prof. Stefan Cenkowski (Kanada)
Doc. Ing. JánFrančák, CSc. (Słowacja)
Prof. Jürgen Hahn (Niemcy)
Prof. Dorota Haman (USA)
Doc. Ing. Zuzana Hlaváčová, CSc. (Słowacja)
Prof. Gerard Wiliam Isaacs (USA)
Prof. Vladimir Kosołapov (Rosja)
Prof. Piotr Savinykh (Rosja)
Prof. Oleg Sidorczuk (Ukraina)

Komitet Redakcyjny

Prof. dr hab. inż. Rudolf Michałek, czł. rzecz. PAN – redaktor naczelny
Prof. dr hab. inż. Janusz Haman, czł. rzecz. PAN
Prof. dr hab. inż. Maciej Kuboń – sekretarz
Dr hab. inż. Sławomir Kocira
Dr hab. inż. Dariusz Kwaśniewski

Wydawca:
Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków, ul. Balicka 116B

Recenzenci:
Dr hab. inż. Urszula Malaga-Toboła – Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Dr hab. inż. Wojciech Golimowski prof. UE – Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu

ISBN 978-83-64377-25-9

Druk i oprawa:
NOVA SANDEC
ul. Lwowska 143, 33-300 Nowy Sącz
tel. +48 (18) 547 45 45
e-mail: biuro@novasandec.pl; http://www.novasandec.pl
Ark. wyd. 9,20; ark. druk. 8,25
Nakład: 100 egz.

Spis treści:

WYKAZ NAJWAŻNIEJSZYCH SKRÓTÓW I OZNACZEŃ 5
1. WPROWADZENIE 7
2. PRZEGLĄD LITERATURY 9
   2.1. Elementy bilansu cieplnego i wilgotnościowego 9
   2.2. Budynek inwentarski 14
   2.3. Produkcja ciepła i wilgoci przez zwierzęta 17
   2.4. Aktywność zwierząt 21
   2.5. Wentylacja powietrza 23
   2.6. Nasłonecznienie 31
   2.7. System utrzymania zwierząt i system produkcyjny 32
3. CEL PRACY 34
4. MODELE MATEMATYCZNE OPISUJĄCE MIKROKLIMAT W BUDYNKACH INWENTARSKICH 36
   4.1. Model deterministyczny (D) 38
   4.2. Model wykorzystujący szeregi czasowe ze zmiennymi towarzyszącymi (TS) 39
   4.3. Model matematyczny oparty o stochastyczne równania różnicowe (SDE) .. 42
5. OPIS DANYCH SŁUŻĄCYCH DO WALIDACJI MODELI MATEMATYCZNYCH 45
   5.1. Charakterystyka budynków inwentarskich 45
   5.2. Metodyka badań i opis pomiarów mikroklimatu 51
   5.3. Opis aplikacji komputerowej 55
6. OMÓWIENIE WYNIKÓW SYMULACJI KOMPUTEROWYCH 65
   6.1. Metodyka analizy statystycznej otrzymanych wyników 65
   6.2. Analiza zbieżności i stabilności rozwiązań numerycznych dla zastosowanych modeli matematycznych 65
   6.3. Ocena dopasowania omawianych modeli 70
   6.4. Wpływ wielkości zaburzeń losowych 78
7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI 83
LITERATURA 88
SPIS TABEL 94
SPIS ILUSTRACJI 94
ZAŁĄCZNIK A. MIARY DOPASOWANIA MODELI 97

ZAŁĄCZNIK B. WYKRESY RZECZYWISTYCH I OSZACOWANYCH WARTOŚCI PARAMETRÓW MIKROKLIMATU 100
ZAŁĄCZNIK C. ZESTAWIENIE OCEN DOPASOWANIA MODELI 114
ZAŁĄCZNIK D. SCHEMATY BUDYNKÓW INWENTARSKICH 118
STRESZCZENIE 128
SUMMARY 130

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ:

A_i – powierzchnia otworów doprowadzających powietrze zewnętrzne (m^2),
A_o – powierzchnia otworów odprowadzających powietrze wewnętrzne (m^2),
C – ilość dwutlenku węgla produkowanego przez zwierzęta ($kg \cdot s^{-1}$),
C_d – współczynnik oporu przepływu powietrza przez otwór w budynku (0,5-0,6) (-),
c_p – ciepło właściwe powietrza ($J \cdot (m^3 \cdot K)^{-1}$),
D – deterministyczny model matematyczny mikroklimatu uwzględniający elementy składowe bilansu cieplnego,
D_B – zewnętrzna długość budynku inwentarskiego (m),
DJP – duża jednostka produkcyjna (1DJP=500kg masy ciała) (szt.),
F – powierzchnia przegrody budowlanej (m^2),
F_{p1} – powierzchnia podłogi w strefie pierwszej (m^2),
F_{p2} – powierzchnia podłogi w strefie drugiej (m^2),
g – przyspieszenie ziemskie 9,81 ($m \cdot s^{-2}$),
H – wysokość czynna między otworami wywiewnymi i nawiewnymi (m),
Hpu – jednostka produkcji ciepła równa 1000W ciepła całkowitego w temperaturze otoczenia 20°C,
k_j – współczynnik korekcyjny uwzględniający wilgotność podłogi i paszy przy szacowaniu ciepła jawnego od zwierząt (-),
m – masa zwierząt (kg),
p_w – ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu (Pa),
p_{wn} – ciśnienie cząstkowe pary wodnej w powietrzu w stanie nasyconym (Pa),
S_B – zewnętrzna szerokość budynku inwentarskiego (m),
SDE – model matematyczny mikroklimatu oparty o stochastyczne równania różniczkowe,
t – czas (s),
T – temperatura powietrza (K),
T_c – temperatura powietrza (°C),
TS – model matematyczny mikroklimatu uwzględniający pojęcie szeregów czasowych,
U – współczynnik przenikania ciepła przez przegrodę budowlaną ($W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$),
V – kubatura pomieszczenia (m^3),
V_g – strumień powietrza wentylacyjnego wywołanego siłą grawitacji ($m^3 \cdot s^{-1}$),
V_p – strumień powietrza wentylacyjnego ($m^3 \cdot s^{-1}$),
V_w – strumień powietrza wentylacyjnego wywołanego przez wiatr ($m^3 \cdot s^{-1}$),
v_p – prędkość przepływu powietrza ($m \cdot s^{-1}$),
W_b – strumień pary wodnej usuwanej przez przegrody ($kg \cdot s^{-1}$),
W_v – strumień pary wodnej usuwanej drogą wentylacji powietrza ($kg \cdot s^{-1}$),
W_z – strumień pary wodnej produkowanej przez zwierzęta ($kg \cdot s^{-1}$),
w – wilgotność bezwzględna masowa powietrza ($kg \cdot (kg\ powietrza)^{-1}$),
ΔT – różnica temperatur powietrza wewnętrznego i zewnętrznego (K),

ρ – gęstość powietrza (kg·m^{-3}),
φ – wilgotność względna, RH (%),
Φ_b – straty ciepła przez przegrody budowlane (W),
Φ_v – straty ciepła drogą wentylacji (W),
Φ_{zc} – ciepło całkowite emitowane przez zwierzęta (W),
Φ_{zj} – ciepło jawne emitowane przez zwierzęta (W),
Φ_{zu} – ciepło utajone emitowane przez zwierzęta (W),
i – indeks odnoszący się do pomiarów wewnątrz budynku,
e – indeks odnoszący się do pomiarów zewnątrz budynku.

1. WPROWADZENIE

Mikroklimatem pomieszczenia inwentarskiego nazywa się stan obszaru powietrznego wewnątrz budynku, określony zespołem parametrów fizycznych, biologicznych oraz mikrobiologicznych. W sposób istotny oddziałuje on na komfort przebywających w pomieszczeniu roślin, zwierząt czy ludzi. Dobre samopoczucie organizmów, obok ich genetyki, stosowanych sposobów technologicznych, wpływa na osiągane efekty produkcji. Do głównych czynników kształtujących mikroklimat zalicza się: temperaturę i wilgotność powietrza, prędkość przepływu strumieni powietrza w pomieszczeniu, zapylenie, hałas, natężenie oświetlenia oraz stężenia gazów, takich jak: dwutlenek węgla CO_2, amoniak NH_3 oraz siarkowodór H_2S.

Na wytwarzany mikroklimat wpływa szereg składników rozpatrywanego układu. Jednym z nich są warunki zewnętrzne panujące dookoła budynku. Istotne w rozważaniach są takie parametry jak: temperatura powietrza, jego wilgotność, a także prędkość i kierunek wiatru oraz nasłonecznienie. Funkcję przeciwdziałającą niekorzystnemu oddziaływaniu zmian klimatu zewnętrznego na mikroklimat pełnią właściwości termiczne budynku. Mają one szczególne znaczenie w okresach ekstremalnych, takich jak mroźna zima czy upalne lato. Kolejnym składnikiem wpływającym na mikroklimat jest obsada organizmów (roślin czy zwierząt) hodowanych w pomieszczeniach. Stanowi ona źródło emitowanego ciepła, pary wodnej oraz wytwarzanych przez organizmy zanieczyszczeń chemicznych. W celu poprawnego kształtowania mikroklimatu konieczne jest właściwe zaprojektowanie wentylacji, której rolą jest odprowadzenie szkodliwych substancji. Jednakże konieczna wymiana powietrza, potrzebna do zachowania odpowiedniego mikroklimatu, wiąże się z jednoczesną stratą ciepła. Musi więc ona być odpowiednio dopasowana, aby nie powodować nadmiarowych strat ciepła. Dodatkowymi elementami mogą być także wspomagające ogrzewanie, które w celu utrzymania optymalnej temperatury w pomieszczeniu dostarcza brakującego ciepła do wnętrza budynku, czy dodatkowe źródła wilgoci, które w lecie mogą pełnić funkcję ochładzającą powietrze.

W budynkach inwentarskich wykorzystywane są różne typy systemów wentylacyjnych. Część z nich to wentylacja naturalna (grawitacyjna), wymuszona przez siłę wyporu wynikającą z energii potencjalnej mas powietrza o różnych temperaturach lub energię kinetyczną wiatrów. Inne z kolei wykorzystują wentylację mechaniczną poprzez zastosowanie urządzeń wymuszających ruch powietrza. O rodzaju systemu wentylacji decyduje rodzaj obsady, jej wielkość oraz czas przebywania organizmów w budynkach. W przypadku produkcji zwierzęcej, w budynkach dla kur czy trzody chlewnej, najczęściej projektowana jest wentylacja mechaniczna umożliwiająca właściwe dostosowanie warunków do zapotrzebowania na ciepło. Natomiast wentylacja naturalna jest w zasadzie dopuszczalna tylko w budynkach dla bydła, ze względu na większą odporność tych zwierząt na niskie temperatury.

Procesy, które zachodzą wewnątrz budynków inwentarskich są złożonymi procesami, wzajemnie ze sobą powiązanymi, których natura jest silnie nieliniowa. Podstawą sformułowania matematycznych modeli tych procesów są równania bilansu ciepła i wilgoci dla powietrza znajdującego się wewnątrz pomieszczeń. Zrozumienie zachodzących procesów w budynku oraz opisanie ich dobrze dopasowanymi modelami matematycznymi pozwala na realizację procesów technologicznych, poprzez zapewnienie optymalnych warun-

ków bytowych zwierząt z uwzględnieniem kosztów ekonomicznych, które trzeba ponieść na budowę budynku oraz późniejsze utrzymanie w nich właściwego mikroklimatu. W dzisiejszych czasach rynek oferuje szeroką gamę materiałów budowlanych pozwalających na wybudowanie budynków, które będą spełniały dowolne wymagania w odniesieniu do utrzymania stawianych im warunkom ochrony ciepła. Jednak budowa budynku charakteryzującego się dobrymi właściwościami termicznymi związana jest z poniesieniem kosztów jego budowy czy utrzymania. Z kolei słabe właściwości termiczne budynku przyczyniają się do pogorszenia wskaźników produkcyjnych przy niekorzystnych warunkach zewnętrznych w czasie zimy. W obu przypadkach ponoszone koszty wpływają na obniżenie zysków osiąganych przez gospodarstwo. Dobór optymalnych rozwiązań ze względu na właściwości termiczne budynku, obsadę zwierząt, zaprojektowaną wentylację oraz sposób utrzymania zwierząt jest ważnym problemem i trudnym do modelowania, ponieważ w tym złożonym systemie większość czynników jest zmienna w czasie.

W obecnych czasach, do analiz zmian mikroklimatu w budynkach inwentarskich coraz częściej wykorzystuje się możliwości obliczeniowe komputerów, dzięki czemu można stosować coraz to bardziej rozbudowane modele matematyczne opisujące przebieg procesów kształtujących stan powietrza w pomieszczeniach dla roślin i zwierząt. Dzięki zastosowaniu algorytmów numerycznych można wierniej oddać zmiany parametrów mikroklimatu, niż przy stosowaniu tradycyjnych metod obliczeniowych, zakładających ustabilizowane warunki zarówno mikroklimatu, jak i klimatu zewnętrznego. W literaturze rozważa się najczęściej modele deterministyczne. W rzeczywistości procesy zachodzące w pomieszczeniach inwentarskich cały czas pewnym zaburzeniom losowym, zatem bardzo użyteczne są metody stochastyczne pozwalające uwzględnić ich wpływ. Umożliwia to zbadanie stabilności oraz wrażliwości stosowanych metod do wymiarowania budynków, wentylacji oraz prognozowania przyszłych warunków, co może mieć zastosowanie w przypadku zautomatyzowanego sterowania mikroklimatem.

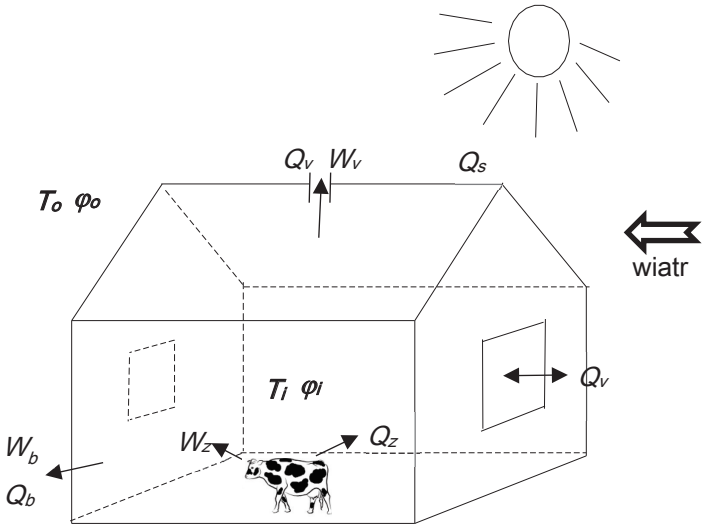
Badania związane z kształtowaniem mikroklimatu w budynkach inwentarskich dotyczą zarówno produkcji zwierzęcej, jak i roślinnej. Zagadnienie związane z oddziaływaniem hodowli zwierząt na środowisko naturalne zyskuje w ostatnim czasie na znaczeniu. Jakość powietrza w pomieszczeniach nie tylko oddziałuje na zwierzęta. Odór wydzielany z budynków inwentarskich ma znaczenie dla komfortu mieszkających w pobliżu ludzi. Coraz częściej gazy cieplarniane wytwarzane przy produkcji mięsa wymieniane są jako istotny czynnik wpływający na globalne ocieplanie klimatu Ziemi. W związku z tym prowadzone są badania związane z oceną ilościową produkowanych gazów, ekonomicznym aspektem redukcji odprowadzanych zanieczyszczeń do środowiska, czy możliwością przechwytywania wydzielanych gazów i wykorzystania ich jako biopaliw (Dumont, 2016; Lashof i Ahuja, 1990; Leip, 2010; Leip i in., 2015; Liu i Liu, 2018; Modongo i Kulshreshtha, 2018). Kwestia negatywnego oddziaływania produkcji zwierzęcej na otaczający nas klimat coraz częściej poruszana jest też w mediach publicznych (Albińska, 2014; Burda, 2018). Poprawny opis matematyczny mikroklimatu może posłużyć do szukania właściwych rozwiązań w tym zakresie.

2. PRZEGLĄD LITERATURY

2.1. Elementy bilansu cieplnego i wilgotnościowego

Metody związane z projektowaniem termicznym i wilgotnościowym budynków inwentarskich związane są z zestawieniem zysków i strat ciepła oraz wilgoci. Parametry stanu bilansu zależą od wielu czynników, które są zmienne w czasie, jednak najczęściej w metodach projektowania zakłada się wymianę ciepła w warunkach ustalonych, uwzględniając temperatury obliczeniowe dla powietrza wewnętrznego i zewnętrznego, które są zależne od rodzaju i kategorii zwierząt oraz strefy klimatycznej, w której umiejscowiony ma być budynek. Na rysunku 2.1 schematycznie przedstawiono podstawowe czynniki, które rozważane są przy dokonywaniu bilansu ciepła w budynku.

Mikroklimatem nazywa się stan powietrza wewnątrz budynku, który określony jest przez zespołów parametrów fizycznych, biologicznych oraz mikrobiologicznych (Wolski, 1988). Celem projektowania mikroklimatu w budynkach inwentarskich jest wytworzenie odpowiedniego środowiska zarówno dla zwierząt, obsługi, jak też i samego budynku. Kształtowanie mikroklimatu rozważa się głównie w dwóch okresach charakteryzujących się skrajnymi parametrami powietrza atmosferycznego, a mianowicie w zimie oraz w lecie. Związane jest to z możliwością wystąpienia u zwierząt szoku termicznego na zbyt mroźne lub gorące warunki przebywania.



Rys. 2.1. Elementy składowe mające wpływ na mikroklimat panujący w budynku inwentarskim
Fig. 2.1. Factors affecting the microclimate prevailing in the livestock building

Źródło: opracowanie własne

Projektowanie ma na celu ustalenie pożądanej temperatury powietrza, zakresu jego wilgotności względnej oraz prędkości przepływu strumieni powietrza w pomieszczeniu. Dodatkowo rozpatruje się maksymalne poziomy stężenia zanieczyszczeń powietrza jakimi są: dwutlenek węgla (CO_2), amoniak (NH_3), siarkowodór (H_2S), zapylenie czy mikroorganizmy (Kavolelis i in., 2010; Pedersen i in., 2008; Samer i in., 2011; Zhang i in., 2005).

Problemy związane z ustaleniem kształtowania mikroklimatu w budynkach rolniczych można spotkać zarówno w związku z produkcją roślinną, jak i zwierzęcą (Radoń, 2005; Romaniuk i Karbowy, 2008). W przypadku produkcji roślinnej, utrzymanie właściwego mikroklimatu ma wpływ zarówno na wzrost roślin w szklarniach (Kurpaska i in., 2003; Raczek i Wachowicz, 2014; Rutkowski, 2008; Stankiewicz, 2009a, b), jak i magazynowania płodów (Wachowicz, 2013). Badania związane z oceną mikroklimatu wytworzonego w budynkach inwentarskich były prowadzone z uwzględnieniem różnych gatunków zwierząt: kur (Gürdil, 2009), brojlerów (Radoń, 2004), trzody chlewnej (Panagakis i Axaopoulos, 2004, 2008; Schauberger i in., 1999, 2000; Wrotkowski, 2006) i bydła (m.in. Fiedorowicz, 2001, 2006; Fiedorowicz i Mazur, 2011a,b; Głuski, 2005b; Mazur, 2011; Teye i in., 2008). W niniejszym opracowaniu, ze względu na przeprowadzone pomiary, skoncentrowano się na kształtowaniu mikroklimatu w budynkach dla bydła mlecznego.

Niedotrzymanie optymalnych warunków w dłuższym okresie czasu wpływa niekorzystnie na zdrowie i zachowanie zwierząt, efektywność karmienia, szybkość przyrostu ciała u młodych zwierząt, wydajność udojową, jak również zdolności rozmnażania się. Prace w tym zakresie prowadzili z udziałem różnych zwierząt m.in. Hahn i Sällvik (1979), Hahn i in. (1983), Sällvik i Wallberg (1984). Zalecane wartości parametrów mikroklimatu w budynkach dla bydła można znaleźć w literaturze. Ich wartości przyjmowane są na podstawie wytycznych Instytutu Zootechniki (Dobkowski i Staśkiewicz, 2002; Lewandowski, 1997; Szlachta i Szewczyk, 1983; Wolski, 1988, 2001). Bydło dobrze znosi niskie temperatury, ale w przypadku gdy zwierzęta dysponują ograniczoną możliwością ruchu (układ stanowiskowy) temperatura w pomieszczeniu nie powinna obniżać się poniżej 0°C. Z kolei, w temperaturze powyżej 20°C, przy wilgotności powietrza powyżej 80%, może u zwierząt wystąpić stres termiczny (CIGR, 1984). Podczas opróżniania kanałów gnojowych dopuszcza się możliwość wystąpienia krótkotrwałego wzrostu stężenia H_2S. W tabeli 2.1 przedstawiono zalecane parametry mikroklimatu w halach, gwarantujące optymalne środowisko produkcyjne dla bydła mlecznego (Fiedorowicz i Mazur, 2011; Głuski, 2005b; Instytut Zootechniki, 1977; Winnicki i in., 2003; Wolski, 1988).

Utrzymanie właściwych warunków biologicznych wpływa nie tylko na dobrostan zwierząt, ale również na komfort pracy obsługi i na stan elementów konstrukcyjnych i elewacyjnych budynku, które w przypadku długotrwałego utrzymywania niekorzystnych parametrów powietrza ulegają szybszemu zniszczeniu lub zmiany żądanych właściwości. Na komfort wpływa także poziom oświetlenia, czy hałasu (Szlachta i Szewczyk, 1983).

Podczas projektowania budynku należy wziąć pod uwagę warunki klimatyczne dla lokalizacji geograficznej, w której będzie funkcjonował budynek. Związane jest to z prawdopodobieństwem, częstotliwością oraz długością okresu występowania niekorzystnych warunków klimatycznych. Wpływa to na wybór odpowiedniej struktury budynku, materiałów użytych do jego budowy, izolacji przegród zewnętrznych, konieczność montażu dodatkowych urządzeń wentylacyjnych, doprowadzenia dodatkowych źródeł ciepła lub ochładzania, czy nawilżania pomieszczeń.

Tabela/Table 2.1.
Zalecane parametry powietrza w budynku inwentarskim do optymalnej produkcji dla bydła mlecznego
Recommended air parameters in the livestock building for optimal production for dairy cattle

Parametr	Min	Max
Temperatura (°C)	8	16
Wilgotność względna (%)	60	80
Stężenie CO_2 ($mg \cdot m^{-3}$ (ppm))	-	5930 (3000)
Stężenie HN_3 ($mg \cdot m^{-3}$ (ppm))	-	15,4 (20)
Stężenie H_2S ($mg \cdot m^{-3}$ (ppm))	-	0,75 (0,5)
Zapylenie ($mg \cdot m^{-3}$)	-	3

Źródło: Fiedorowicz i Mazur (2011); Głuski (2005b); Instytut Zootechniki (1977); Winnicki i in. (2003); Wolski (1988)

Dokonując dodatkowych inwestycji należy mieć na uwadze względy ekonomiczne związane z budową i utrzymaniem budynku oraz prowadzoną w nim produkcją gospodarczą. Wprowadzenie dodatkowych źródeł ciepła, urządzeń wentylacyjnych, materiałów budowlanych o większej skuteczności termoizolacyjnej wiąże się z poniesieniem dodatkowych kosztów inwestycyjnych, co wpływa na stopę zwrotu działalności gospodarczej. Należy więc dokonać bilansu zysków, które one przyniosą i strat, które mogą wyniknąć w przypadku niekorzystnego oddziaływania mikroklimatu oraz kosztów inwestycyjnych.

Procesy, które zachodzą wewnątrz budynków inwentarskich są procesami złożonymi. Postawą sformułowania ich matematycznych modeli są równania bilansu ciepła i wilgoci dla powietrza znajdującego się wewnątrz pomieszczeń (Axaopoulos i in., 1992, 1994; Holm i in., 2004; Radoń, 2004; Liberati i Zappavigna, 2007). Opracowanie poprawnych modeli matematycznych umożliwia nie tylko właściwe wymiarowanie budynków, przyjęcie obsady zwierząt, ale także wpływa na możliwość prognozowania przyszłych wartości parametrów oraz zbudowanie systemów automatycznego sterowania mikroklimatem w budynkach rolniczych (Wachowicz, 2013; Stankiewicz, 2009a,b).

Modele wymiarowania termicznego oparte są o procesy wymiany ciepła, uwzględniając wszystkie składowe stanowiące zyski lub straty ciepła w budynku. Ogólnie bilans cieplny można zapisać w postaci:

$$\Phi_{zj} + \Phi_s + \Phi_u + \Phi_b + \Phi_v = 0 \tag{2.1}$$

gdzie:

- Φ_{zj} – chwilowe zyski ciepła od zwierząt (ciepło sensytywne) (W),
- Φ_s – chwilowe zyski ciepła od nasłonecznienia budynku (W),
- Φ_u – chwilowe zyski ciepła od dodatkowych urządzeń ogrzewających (W),
- Φ_b – chwilowe zyski/straty ciepła wynikające z transmisyjnego przepływu ciepła przez przegrody zewnętrzne budynku (W),
- Φ_v – chwilowe zyski/straty ciepła wentylacyjnego (W).

Analogicznie można rozważyć bilans wilgotnościowy przedstawiający elementy składowe będące źródłem wilgoci oraz formy odprowadzania wilgoci z budynku:

$$W_z + W_u + W_b + W_v = 0 \tag{2.2}$$

gdzie:

W_z – produkcja wilgoci przez zwierzęta (kg·s^{-1}),
W_u – wydajność źródła wilgoci w pomieszczeniu (kg·s^{-1}),
W_b – straty/zyski wilgoci w wyniku przenikania przez przegrody zewnętrzne budynku (kg·(m^2·s)$^{-1}$),
W_v – straty/zyski wilgoci w powietrzu wewnętrznym na skutek wymiany powietrza (kg·s^{-1}).

Dynamiczne zmiany temperatury powietrza wewnątrz pomieszczenia inwentarskiego kształtujące się według chwilowego bilansu wymiany ciepła powietrza wewnętrznego z otoczeniem można zapisać w postaci równania różniczkowego analogicznie jak w opracowaniu pod redakcją Klemma (ed. 2005):

$$c_p \cdot \rho_i \cdot V \cdot \frac{dT_i}{dt} = \sum_j F_j \cdot \alpha_j \cdot \left[T_j(t) - T_i(t)\right] + \Phi_{zj} + \Phi_s + \Phi_u + \Phi_v \tag{2.3}$$

gdzie:

T_i – temperatura powietrza wewnętrznego (K),
c_p – ciepło właściwe powietrza (J·(kg·K)$^{-1}$),
ρ_i – gęstość powietrza wewnętrznego (kg·m^{-3}),
V – kubatura pomieszczenia w świetle przegród (m^3),
F_j – wewnętrzna powierzchnia *j*-tej przegrody (także posadzki) (m^2),
α_j – współczynnik przejmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni *j*–tej przegrody,
T_j – temperatura wewnętrznej powierzchni *j*–tej przegrody (K).

Bilans wilgotnościowy powietrza wewnętrznego opisujący chwilowe zmiany bezwzględnej wilgotności powietrza w czasie, na skutek niestacjonarnych dopływów i odpływów wilgoci można przedstawić w postaci (Klemm ed., 2005):

$$V \cdot \rho_i \cdot \frac{dw_i}{dt} = \sum_j F_j \cdot \Psi_j + W_z + W_v \tag{2.4}$$

gdzie:

w_i – wilgotność bezwzględna masowa powietrza wewnętrznego (kg·(kg powietrza)$^{-1}$),
F_j – wewnętrzna powierzchnia *j*-tej przegrody (m^2),
Ψ_j – strumień wilgoci na powierzchni *j*-tej przegrody (kg·(m^2·s)$^{-1}$).

W równaniach bilansowych (2.3) i (2.4) zakłada się, że temperatura i wilgotność powietrza wewnętrznego są uśrednione i charakteryzują jednorodne powietrze w strefie przebywania zwierząt. Wewnętrzne źródło ciepła w równaniu (2.3), które pochodzi od zwierząt jest zależne od temperatury panującej wewnątrz budynku inwentarskiego, co zostało przedstawione w dalszej części rozdziału. Wilgotność bezwzględna uwzględniona w równaniu

(2.4) jest funkcją temperatury i najczęściej określana jest za pomocą wilgotności względnej, wyrażającą procent maksymalnego nawilżenia powietrza przy danej temperaturze powietrza. Ponadto przyrost wilgoci w powietrzu wewnętrznym na wskutek wymiany powietrza (opisany w równaniu 2.4) zależy od temperatury. W związku z powyższym, temperatura powietrza jest parametrem sprzęgającym równania (2.3) i (2.4).

Występujące we wzorach (2.3) i (2.4) gęstość ρ oraz ciepło właściwe c_p powietrza zależą od jego temperatury. W literaturze często są one podawane w postaci tabelarycznej. Korzystanie z takiego zapisu jest nieefektywne z punktu widzenia modelowania komputerowego. Wygodniejsze jest w tym przypadku korzystanie z zapisu funkcyjnego. Jedną z prostszych postaci funkcji przybliżającej wartości gęstości powietrza ρ w zakresie użytkowych temperatur w budynkach inwentarskich jest określona za pomocą wzoru (Recknagel i Sprenger, 1976):

$$\rho(T) = \frac{353{,}4}{T} \ (\mathrm{kg \cdot m^{-3}}) \tag{2.5}$$

Wartości ciepła właściwego powietrza c_p mogą być z kolei przybliżone za pomocą następującej zależności funkcyjnej:

$$c_p(T) = 1030{,}5 - 0{,}19975 \cdot T + 3{,}9734 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 \ (\mathrm{J \cdot (m^3 \cdot K)^{-1}}) \tag{2.6}$$

W równaniach bilansowych (2.3) i (2.4) określających chwilowy stan mikroklimatu w budynku inwentarskim uwzględniana jest wilgotność bezwzględna powietrza w_i. W praktyce, parametrem używanym do opisu wilgotności powietrza jest wartość względna φ odnoszona do maksymalnej możliwej wilgotności w zależności od temperatury. Wielkości względnej i bezwzględnej wilgotności powietrza są ze sobą związane prawem gazowym (ASHRAE, 2013):

$$w = 0{,}622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_{wn}(T)}{101325 - \varphi \cdot p_{wn}(T)} \ (\mathrm{kg \cdot (kg\ powietrza)^{-1}}) \tag{2.7}$$

Liczba 0,622 występująca w powyższym równaniu uwzględnia udziały masowe poszczególnych pierwiastków chemicznych wchodzących w skład powietrza atmosferycznego. Wzór uwzględnia także ciśnienie normalne1013,25 hPa.

Maksymalne nasycenie powietrza parą wodną określane jest poprzez ciśnienie cząstkowe pary wodnej w stanie nasycenia $p_{wn}(T)$. Można je obliczyć ze wzoru aproksymacyjnego (Recknagel i Sprenger, 1976):

$$p_{wn}(T_c) = a \cdot \left(b + \frac{T_c}{100} \right)^n \ (\mathrm{Pa}) \tag{2.8}$$

gdzie stałe a, b, n zależne są od zakresu temperatur. Dla temperatur w zakresie $0^{\circ}\mathrm{C} \le T_c \le 30^{\circ}\mathrm{C}$ wynoszą one odpowiednio a=288,68; b=1,098 oraz n=8,02, natomiast dla temperatur $-20^{\circ}\mathrm{C} \le T_c < 0^{\circ}\mathrm{C}$ – a=4,689; b=1,486 oraz n=12,30.

Korzystając z powyższej zależności można wyznaczyć ciśnienie cząstkowe pary wodnej p_w dla ustalonej temperatury otoczenia. Obliczana jest ona z następującego wyrażenia uwzględniającego wilgotność względną powietrza oraz ciśnienie pary wodnej w warunkach nasycenia dla ustalonej temperatury powietrza:

$$p_w = p_{wn}(t_\Theta) \cdot \varphi(t_\Theta) \text{ (Pa)} \tag{2.9}$$

Ostatecznie znając wartości wilgotności względnej i temperatury powietrza, można wyliczyć wilgotność bezwzględną, która jest składową równania bilansowego (2.4).

2.2. Budynek inwentarski

Podstawowym zadaniem budynku inwentarskiego jest odizolowanie przebywających w nim zwierząt od niekorzystnych warunków panujących na zewnątrz (Wolski, 1988), aby zapewnić im optymalne warunki, pozwalające osiągnąć wyższe wskaźniki produkcyjne i wyższe zyski z prowadzonej działalności gospodarczej. Kierunki rozwoju nowoczesnych konstrukcji w przypadku budynków dla bydła mlecznego przedstawia Głuski (2013). W procesie kształtowania mikroklimatu należy mieć na względzie, że wymagania utrzymania odpowiednich warunków dotyczą wyłącznie strefy przebywania zwierząt i nie muszą być zachowane w całym budynku. W związku z tym, istotna jest strefa powietrza wewnętrznego ulokowana w dolnej części pomieszczenia rozpoczynająca się od posadzek do pewnej wysokości wynoszącej od ok. 0,8m do 1,5m. Wysokość ta zależy od rodzaju przebywających w pomieszczeniu zwierząt. Najniższa dotyczy kur, trzody chlewnej oraz owiec, natomiast w przypadku bydła jest ona najwyższa.

Rozpatrując rolę budynku jako elementu odgraniczającego zwierzęta od warunków zewnętrznych, należy mieć na uwadze różne cechy budynku oddziaływujące na stan panującego w nim mikroklimatu. Do najistotniejszych należą: konstrukcja i forma architektoniczna, użyte materiały budowlane, grubość przegród zewnętrznych, zwartość bryły pomieszczeń inwentarskich, wysokość budynku, grubość i jakość ułożenia izolacji termicznej w ścianach zewnętrznych, czy szczelność budynku. Przy ustalaniu bilansu cieplnego należy wziąć pod uwagę wszystkie te czynniki dobierając odpowiednie wymiary budynku, grubości warstw oraz materiały, z których zbudowane są przegrody budynku.

Przy modelowaniu strat i zysków ciepła w budynku, z punktu widzenia właściwości termoizolacyjnych uwzględnia się zjawisko przenikania przez przegrody zewnętrzne, mające na celu ustalenie powierzchni i grubości ścian oraz dobrania odpowiednich materiałów, z których są zbudowane. Zjawisko przenikania ciepła przez przegrody jest procesem dobrze znanym i opisanym w literaturze (Bogosłowski, 1985; Gdula, 1984; Klemm ed., 2005; Płoński i Pogorzelski, 1979; Pogorzelski, 1976; Taler i Duda, 2003). Ustalając bilans ciepła w budynkach inwentarskich, jako temperaturę wewnętrzną przyjmuje się minimalną temperaturę z zakresu temperatur optymalnych, ustalonych dla poszczególnych rodzajów zwierząt. Nosi ona nazwę temperatury obliczeniowej. Także w odniesieniu do temperatur zewnętrznych oraz temperatur dla pomieszczeń nieogrzewanych sąsiadujących z właściwym pomieszczeniem, przyjmuje się wartości podane w normach (PN-82/B-02403, 1982).

Biorąc pod uwagę właściwości termiczne możemy wyróżnić dwie grupy elementów wchodzących w skład przegród zewnętrznych: wykazujących znikomą akumulacyjność cieplną (np. okna, drzwi) oraz posiadających tę właściwość ze względu na zastosowane materiały.

Do pierwszej grupy można zaliczyć okna, drzwi oraz wrota w budynku inwentarskim. W tym przypadku przepływy chwilowe ciepła przez te przegrody można określić wzorem:

$$\Phi_p = A \cdot U' \cdot (T_e - T_i) \text{ (W)} \tag{2.10}$$

gdzie:

A – powierzchnia okna lub drzwi (m^2),
U' – współczynnik przenika ciepła okna U z uwzględnieniem prędkości i kierunku wiatru ($W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$),
T_i – temperatura powietrza wewnętrznego (K),
T_e – temperatura powietrza zewnętrznego (K).

Uwzględniając wszystkie okna oraz drzwi występujące w ścianach zewnętrznych, łączny przepływ ciepła w odniesieniu do całego budynku przez tego typu przegrody można zapisać za pomocą sumy:

$$\Phi_{s_1} = \sum_j A_j \cdot U'_j \cdot (T_e - T_i) \text{ (W)} \tag{2.11}$$

gdzie:

j – oznacza numer okna lub drzwi w bryle budynku,
A_j – powierzchnia j-tej przegrody (m^2),
U'_j – współczynnik przenika ciepła dla j-tej przegrody ($W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$).

W przypadku przegród ze zdolnością akumulacji ciepła, łączny chwilowy przepływ ciepła otrzymuje się z wyrażenia (Żelazny, 2004):

$$\Phi_{s_2} = \sum_j F_j \cdot \alpha_j \cdot \left(T_i - T_j\right) \text{ (W)} \tag{2.12}$$

gdzie:

F_j – oznacza wewnętrzną powierzchnię j-tej przegrody (m^2),
α_j – współczynnik przejmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni j–tej przegrody,
T_j – temperatura wewnętrznej powierzchni j-tej przegrody (K).

Dla przegród wielowarstwowych, w celu wyznaczenia temperatury powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej przegrody, można wykorzystać metodę bilansów elementarnych z wykorzystaniem oporów cieplnych poszczególnych warstw. Całkowity współczynnik przenikania U jest odwrotnością całkowitego oporu cieplnego R przegrody budowlanej.

$$U = \frac{1}{R} \text{ (W} \cdot (\text{m}^2\text{K})^{-1}) \tag{2.13}$$

przy czym całkowity opór przegrody oblicza się uwzględniając opory przejmowania ciepła R_j dla kolejnych warstw, z których zbudowana jest przegroda oraz oporów przejmowania ciepła pomiędzy powietrzem i powierzchnią ściany od strony wewnętrznej R_i i zewnętrznej R_e:

$$R = R_i + \sum_{j=1}^{n} R_j + R_e \text{ (m}^2\text{K} \cdot \text{W}^{-1}) \tag{2.14}$$

Opory *j*-tej warstwy przegrody można wyznaczyć korzystając ze wzoru:

$$R_j = \frac{d_j}{\lambda_j} \ (\mathrm{m^2K \cdot W^{-1}}) \tag{2.15}$$

gdzie:

j – numer warstwy licząc od strony wewnętrznej, j=1,…,n,
n – liczba warstw w przegrodzie (szt.),
d_j – szerokość *j*-tej warstwy ściany (m),
λ_j – współczynnik przewodzenia ciepła $(\mathrm{W \cdot (mK)^{-1}})$.

Wartości oporów przejmowania ciepła od ścian wewnętrznej R_i i zewnętrznej R_e podaje norma PN-EN ISO 6946 (1999). Problem wymiany ciepła przez grunt uwzględnia norma PN-EN ISO 13370 (2001). Straty ciepła wynikające z jego przenikania do gruntu obliczane są przy podziale powierzchni podłoża na dwie strefy. Pierwsza obejmuje pas o szerokości 1m przylegający do ścian zewnętrznych, przy czym w narożach jego powierzchnia liczona jest podwójnie dla obu ścian. Pozostała część podłogi zalicza się do strefy drugiej. Straty ciepła dla obu stref wyznacza się ze wzorów (2.16) dla strefy pierwszej i (2.17) dla strefy drugiej:

$$\Phi_1 = F_{p1} \cdot U_{pg} \cdot \left(T_i - T_j\right) \ (\mathrm{W}) \tag{2.16}$$

$$\Phi_2 = F_{p2} \cdot U_{pg} \cdot \left(T_i - T_g\right) \ (\mathrm{W}) \tag{2.17}$$

gdzie:

F_{p1} – powierzchnia podłogi w strefie pierwszej $(\mathrm{m^2})$,
F_{p2} – powierzchnia podłogi w strefie drugiej $(\mathrm{m^2})$,
T_g – temperatura gruntu pod budynkiem (K),
U_{pg} – współczynnik przenika ciepła dla przegrody przylegającej do gruntu $(\mathrm{W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}})$.

Występujący w powyższych formułach współczynnik przenikania ciepła U_{pg} dla przegród przylegających do gruntu wyznacza się ze wzoru:

$$U_{pg} = \frac{1}{R_p + R_g} \ (\mathrm{W \cdot (m^2K)^{-1}}) \tag{2.18}$$

gdzie:

R_p – opór cieplny podłogi, $(\mathrm{m^2K \cdot W^{-1}})$,
R_g – opór cieplny gruntu $(\mathrm{W/(m^2K)^{-1}})$, wartości dla pierwszej i drugiej strefy podane są w normie PN-EN ISO 6946 (1999).

Łączne straty ciepła przez podłogę Φ_p wyznacza się z sumy strat w strefie pierwszej i drugiej:

$$\Phi_p = \Phi_1 + \Phi_2 \ (\mathrm{W}) \tag{2.19}$$

Biorąc pod uwagę wszystkie powyższe wzory na straty ciepła drogą przenikania dla przez przegrody zewnętrzne, zarówno łączne straty ciepła dla całego budynku można zapisać jako sumę poszczególnych składników:

$$\Phi_b = \Phi_{s_1} + \Phi_{s_2} + \Phi_p \text{ (W)} \tag{2.20}$$

W warunkach nieustalonych przepływ strumieni ciepła przez przegrody zewnętrzne wiąże się z koniecznością wyznaczenia opóźnień zmian temperatury poszczególnych warstw w stosunku do temperatury powietrza wewnętrznego i zewnętrznego (Asan, 1998, 2000, 2006; PN-EN ISO 13786, 2001; Radoń, 1986) oraz gruntu (Nowakowski i Radoń, 1990).

2.3. Produkcja ciepła i wilgoci przez zwierzęta

Wszystkie zwierzęta gospodarcze są stałocieplne i w związku z tym muszą utrzymywać temperaturę swojego ciepła w przybliżeniu na stałym poziomie. Ciepło produkowane przez nie można podzielić na ciepło potrzebne na zaspokojenie potrzeb bytowych oraz ciepło związane z innymi czynnościami, jak np. z produkcją mleka. Całkowita ilość ciepła wydzielanego przez zwierzęta zależy od: masy ciała, poziomu produkcji (ilość wytwarzanego mleka), wzrostu masy ciała oraz okresu ciąży, wielkości tkanki tłuszczowej w budowie ciała, czy też od energii przyjmowanej w żywności.

Na potrzeby projektowania budynków oraz modelowania mikroklimatu opracowano równania służące od obliczeń emisji ciepła emitowanego przez różne zwierzęta (CIGR, 1984, 1992, 1999, 2002; Chepete i Xin, 2002; Głuski, 2005b). Równania te odnoszą się do tzw. warunków termonaturalnych. W przypadku większości dorosłych zwierząt hodowlanych przyjmuje się, że jest to temperatura otoczenia wynosząca 20°C. Wzory opracowano dla różnych gatunków zwierząt: krów, owiec, świń, koni, gęsi czy też innego drobiu. Niniejsza praca koncentruje się na kształtowaniu mikroklimatu w budynkach dla bydła, więc przytoczone zostaną jedynie te związane z tym gatunkiem zwierząt.

Emisję ciepła całkowitego emitowanego przez jedno zwierzę można wyznaczyć z następujących wzorów w zależności od jego kategorii wiekowej:

– cielęta

$$\Phi_{zc} = 6{,}44 \cdot m^{0{,}70} + \frac{13{,}3 \cdot Y_1 \cdot (6{,}28 + 0{,}0188 \cdot m)}{1 - 0{,}3 \cdot Y_1} \text{ (W)} \tag{2.21}$$

– bukaty

$$\Phi_{zc} = 7{,}64 \cdot m^{0{,}69} + Y_2 \cdot \left(\frac{23}{M} - 1\right)\left(\frac{57{,}27 + 0{,}302 \cdot m}{1 - 0{,}171 \cdot Y_2}\right) \text{ (W)} \tag{2.22}$$

– jałówki

$$\Phi_{zc} = 7{,}64 \cdot m^{0{,}69} + Y_3 \cdot \left(\frac{23}{M} - 1\right)\left(\frac{57{,}27 + 0{,}302 \cdot m}{1 - 0{,}171 \cdot Y_3}\right) + 1{,}6 \cdot 10^{-5} \cdot p^3 \text{ (W)} \tag{2.23}$$

– krowy mleczne

$$\Phi_{zc} = 5{,}6 \cdot m^{0,75} + 22 \cdot Y_4 + 1{,}6 \cdot 10^{-5} \cdot p^3 \text{ (W)} \tag{2.24}$$

W powyższych wzorach podane parametry mają następujące znaczenie:

m – masa ciała (kg),

M – energia zawarta w dostarczanym pożywieniu w przeliczeniu na suchą substancję ($MJ \cdot kg^{-1}$): M=10 $MJ \cdot kg^{-1}$ suchej substancji dla niestrawnych części pożywienia, natomiast dla koncentratów M=11-12 $MJ \cdot kg^{-1}$ suchej substancji,

Y_1 – dzienny przyrost masy ciała (kg na dzień), średnio 0,5 kg na dzień,

Y_2 – dzienny przyrost masy ciała (kg na dzień), wahający się w granicach 0,7-1,1 kg na dzień,

Y_3 – dzienny przyrost masy ciała (kg na dzień), średnio 0,6 kg na dzień,

Y_4 – wydajność mleka (kg na dzień),

p – dzień ciąży.

We wszystkich wzorach służących do wyznaczania ciepła całkowitego można wyróżnić człon wynikający z potrzeb bytowych zwierząt, np. w przypadku krów potrzeby bytowe wynoszą $5{,}6m^{0,75}$ W.

Przytoczone wzory określono dla temperatury otoczenia wynoszącej 20°C. W przypadku innych temperatur produkcja ciepła całkowita ulega zmianom. Wtedy zachodzi u zwierząt zjawisko termoregulacji, przy pomocy którego zwierzę dostosowuje się do otaczających warunków termicznych. Przy niższych temperaturach panujących w budynkach inwentarskich produkcja ciepła przez zwierzęta rośnie, a maleje ilość produkowanej pary wodnej. Z kolei dla temperatur wyższych ilość produkowanego ciepła maleje, ale wzrasta z kolei ilość produkowanej przez zwierzęta wilgoci.

Do przeliczania ilości produkowanego przez zwierzęta ciepło przy różnych wartościach temperatury otoczenia opracowano wzór, który może być stosowany dla wszystkich gatunków zwierząt oraz do każdej kategorii zwierząt hodowlanych. W tym celu wprowadzono jednostkę produkcji ciepła określaną mianem *hpu*. Jako definicję przyjęto, że jedna jednostka *hpu* określa 1000 W wytwarzanego przez dużą jednostkę przeliczeniową (500kg żywca) w temperaturze powietrza 20ºC. Wzór określający ciepło całkowite produkowane przez zwierzęta przy ustalonej temperaturze powietrza ma postać (Strøm, 1978; CIGR, 1984; Pedersen i Sällvik, 2002):

$$\Phi_{tot}(T_C) = 1000 + 4 \cdot (20 - T_C)^3 \text{ (W)} \tag{2.25}$$

Wzór (2.25) podany jest ogólnie dla wszystkich rodzajów zwierząt. Nie uwzględnia on ani rodzaju ani wielkości zwierzęcia, a także nie brany jest pod uwagę poziom produkcji. Jednak powyższe oszacowanie w przypadku bydła okazuje się mało dokładne, z tego względu, że ten gatunek zwierząt jest w dużym stopniu odporny na zmiany temperatury i w niewielkim stopniu reaguje na zmiany temperatury otoczenia. Proponuje się zatem bardziej liniową postać zmian ciepła całkowitego w odniesieniu do jednostki *hpu* (Głuski, 2005b):

$$\Phi_{tot}(T_C) = 1000 + 4 \cdot (20 - T_C) \text{ (W)} \tag{2.26}$$

W przypadku kształtowania mikroklimatu w budynkach inwentarskich istotne znaczenie ma wydzielenie z ciepła całkowitego tzw. ciepła jawnego Φ_{zj} i ciepła utajonego Φ_{zu}. Ciepło jawne związane jest z gradientem temperatur pomiędzy temperaturą ciała zwierzęcia i temperaturą otaczającego go powietrza. W przypadku, gdy obie te temperatury są równe, to wówczas ilość ciepła jawnego jest równa zeru. Z kolei ciepło utajone powiązane jest z wydzielaniem wilgoci z układu oddechowego zwierzęcia oraz przez jego skórę. Wraz ze wzrostem temperatury otoczenia, ponieważ spada wydzielanie ciepła jawnego, to zgodnie z fizjologią zwierząt w celu utrzymania równowagi cieplnej oraz temperatury ciała, wzrasta produkcja ciepła utajonego. Podział ciepła całkowitego na jawne i utajone zależy od wielu czynników, do których zaliczyć można m.in.: rodzaj zwierząt, powierzchnię ciała, typ sierści, suchość skóry oraz zdolność pocenia się (Głuski, 2005b). Na proporcje pomiędzy ilością ciepła jawnego i utajonego wpływa także poziom produkcji mleka. Krowy o większej wydajności mlecznej produkują więcej ciepła całkowitego, niż krowy o mniejszej laktacji lub zasuszone. Powierzchnia ciała jednak ogranicza zdolność oddawania ciepła jawnego, a z tego wynika większy udział ciepła utajonego dla krów dających dużo mleka, w stosunku do krów mniej mlecznych.

Jeszcze bardziej skomplikowany okazuje się proces wydzielania ciepła i wilgoci na poziomie budynku. Wielkość emisji ciepła zależy od parowania wody z wilgotnej paszy, odchodów, wody pitnej czy mokrej podłogi. Należy też uwzględnić aktywność zwierząt związaną z porami dnia i czasami zadawania paszy oraz technologię obsługi zwierząt czy stopień zagęszczenia zwierząt, a także wilgotność samego powietrza. Rozpatrując bilans cieplny na poziomie budynku zauważono, że część ciepła jawnego jest zużywana na parowanie wody z wilgotnych powierzchni pasz, co skutkuje zmianą w podziale między ciepłem jawnym i utajonym.

Wzór na wielkość emisji ciepła jawnego przy założeniu, że dzienna produkcja mleka wynosi 25kg na krowę przy uwzględnieniu zmian temperatury otoczenia wyrażony w jednostkach *hpu* podany jest w następującej postaci (Pedersen i Sällvik, 2002; Panagakis i Axaopoulos, 2004, 2008):

$$\Phi_j(T_C) = 0{,}71 \cdot \Phi_{tot}(T_C) - 0{,}408 \cdot T_C^2 \text{ (W)} \tag{2.27}$$

Biorąc pod uwagę wzory (2.25) i (2.27) można wprowadzić współczynnik κ pozwalający oszacować udział ciepła jawnego w produkowanym przez zwierzęta cieple całkowitym:

$$\kappa(T_C) = \frac{\Phi_j(T_C)}{\Phi_{tot}(T_C)} \text{ (W)} \tag{2.28}$$

W literaturze światowej można też znaleźć inne oszacowania wielkości emisji ciepła jawnego. W przypadku niepełnych danych o systemach budynków oraz rodzajach zwierząt dla warunków normalnych panujących w krajach Europy Północnej emisję ciepła utajonego można policzyć wg wzoru (Pedersen i Sällvik, 2002):

$$\Phi_j(T_C) = 0{,}8 \cdot \left[1000 + 12 \cdot (20 - T_C)\right] - 0{,}38 \cdot T_C^2 \text{ (W)} \tag{2.29}$$

Jeszcze inny sposób wyznaczenia ilości ciepła jawnego na poziomie budynku w zakresie temperatur od 10°C do 40°C podaje CIGR Handbook of Agricultural Engineering

(1999). W tym wypadku oszacowanie ilości emisji ciepła jawnego podano wykorzystując funkcję wielomianową postaci:

$$\Phi_j(T_C) = 752 - 6{,}294 \cdot T_C - 0{,}0324 \cdot T_C^2 - 0{,}007 \cdot T_C^3 \text{ (W)} \tag{2.30}$$

Ilość ciepła całkowitego wydzielanego przez wszystkie zwierzęta uwzględniając rzeczywistą temperaturę wewnątrz budynku T_{Ci} można wyznaczyć z wyrażenia:

$$\Phi_{zc} = \sum_{j=1}^{n} \Phi_{zc}^{j} \cdot F_{T_{Ci}} \text{ (W)} \tag{2.31}$$

gdzie:

Φ_{zc}^{j} – ciepło całkowite wydzielane przez pojedyncze zwierzę (W),

n – liczba zwierząt w stadzie (szt.).

$F_{T_{Ci}} = 1 + 4 \cdot 10^{-5} \cdot (20 - T_{Ci})^3$ (-) – współczynnik uwzględniający zmiany temperatury wewnątrz budynku (CIGR, 1984). W przypadku bydła bardziej właściwa jest postać $F_{T_{Ci}} = 1 + 4 \cdot 10^{-5} \cdot (20 - T_{Ci})$ wynikająca ze wzoru (2.26).

Ciepło jawne pochodzące od wszystkich zwierząt w budynku wynosi:

$$\Phi_{zj} = \kappa \cdot \Phi_{zc} \text{ (W)} \tag{2.32}$$

a ciepło utajone Φ_{zu} (od wszystkich zwierząt w budynku) jest różnicą ciepła całkowitego i jawnego:

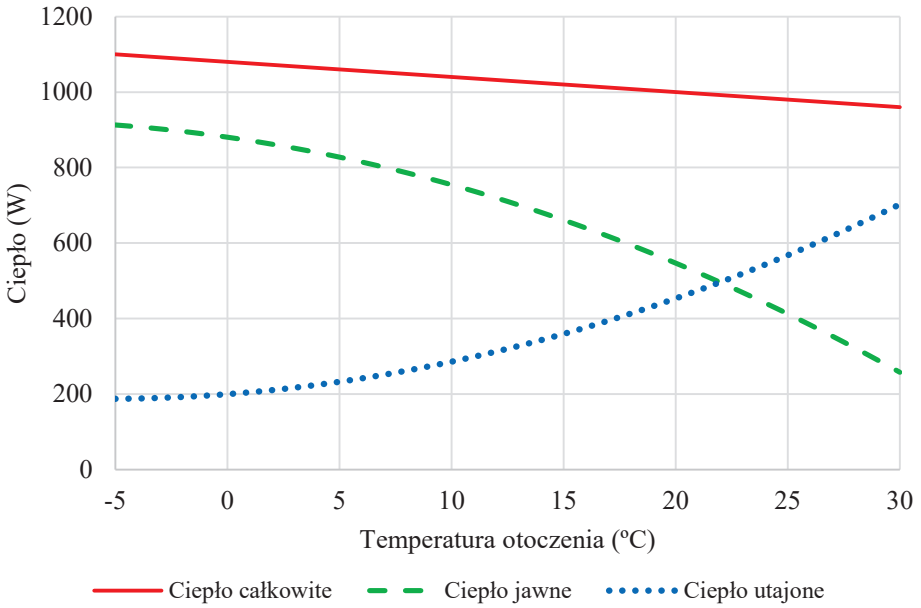
$$\Phi_{zu} = \Phi_{zw} - \Phi_{zj} \text{ (W)} \tag{2.33}$$

Wielkość produkcji ciepła całkowitego wytwarzanego przez zwierzęta oraz udziały ciepła jawnego i utajonego oszacowane na podstawie wzorów (2.26), (2.27) i (2.33) w zależności od temperatury otoczenia w zakresie od -5 do 30°C zostały przedstawione na rysunku (2.2).

Na podstawie ilości ciepła utajonego można oszacować wielkość produkcji pary wodnej przez zwierzęta znajdujące się w pomieszczeniu. Wyznacza się ją za pomocą zależności (Głuski 2005b):

$$W_z = \frac{\Phi_{zu}}{680 \cdot 3600} \text{ (kg·s}^{-1}\text{)} \tag{2.34}$$

Występująca w mianowniku wartość związana jest z ciepłem parowania wody w temperaturze 20ºC wynoszącym 0,680 Wh·kg^{-1}. Wzór (2.34) jest powszechnie wykorzystywany do oszacowania potrzebnej ilości powietrza wentylacyjnego przy wymiarowaniu technicznym budynku, tak aby zagwarantować usunięcie nadmiaru pary wodnej produkowanej przez zwierzęta.



Rys. 2.2. Szacowane udziały ciepła produkowanego przez bydło w odniesieniu do hpu w zależności od temperatury pomieszczenia

Fig. 2.2. Estimated shares of heat produced by cattle with respect to hpu depending on the indoor temperature

Źródło: opracowanie własne

Z produkcją ciepła całkowitego związana została również emisja dwutlenku węgla *C* od zwierząt (CIGR, 1984). Na potrzeby projektowania budynków inwentarskich ustalono, że na jedną jednostkę *hpu* przypada 0,163 $m^3 \cdot h^{-1}$ przy termo-naturalnych warunkach w hali zwierząt. Poziom emisji CO_2, podobnie jak i pary wodnej, zależy od wielu czynników, takich jak rodzaj zwierząt, temperatura otoczenia, aktywność zwierząt, ilość i rodzaj pobieranej paszy oraz współczynnik oddechowy, który określa stosunek ilości wyprodukowanego dwutlenku węgla do ilości zużytego. Współczynnik oddechowy wynosi od 1 do 1,2 (Van Ouwerkerk i Pedersen, 1994), co odpowiada od 0,17 do 0,20 $m^3 \cdot h^{-1}$ na jednostkę *hpu*. Za podstawę do obliczeń potrzeb wentylacyjnych przyjmuje się wartość 0,185 $m^3 \cdot h^{-1}$ co odpowiada średniemu poziomowi karmienia. Taka wielkość oparta jest o badania prowadzone w Holandii, Niemczech, Wielkiej Brytanii i Danii (Pedersen i in., 1998, 2008).

2.4. Aktywność zwierząt

W metodach projektowania budynków inwentarskich oraz w określaniu kształtowania mikroklimatu zakłada się, że wielkość wydzielanego ciepła od zwierząt, wilgoci oraz szkodliwych gazów metabolicznych jest stała w ciągu całej doby. W rzeczywistości przy mode-

lowaniu dynamicznych zmian mikroklimatu należy mieć na względzie, że są one zmienne i w znacznym stopniu zależą od poziomu aktywności zwierząt. Większą aktywność można zaobserwować w ciągu dnia, natomiast w nocy, w trakcie odpoczynku zwierząt, jest ona niższa. Oprócz anatomicznej natury takiego zachowania, wpływ na aktywność zwierząt ma również technologia obsługi zwierząt i pory dnia, w których zwierzęta są karmione oraz dojone. Wyniki badań związane z obserwacją zmian dziennej aktywności zwierząt przedstawili w swoich pracach m.in. Pedersen S. i Pedersen C.B. (1995), Pedersen (1996), Sousa i Pedersen (2004) oraz Jepsson (2002a,b).

Aktywność zwierząt może być opisana za pomocą dwóch modeli w zależności od technologii utrzymywania zwierząt. Są to modele: Dromadera i Baktriana (Pedersen i Sällvik, 2002; Głuski, 2012). Nazewnictwo modeli ma swoje odniesienie do cech budowy ciała, które można zaobserwować w przypadku wielbłądów jedno- i dwugarbnych. W obu przypadkach modelowane krzywe mają charakter sinusoidalny i osiągają swoje maksima w porach największych aktywności zwierząt.

W przypadku modelu Dromadera zakłada się występowania jednego dziennego maksimum aktywności zwierząt. Model ten jest opisywany przez formułę:

$$A_z(h) = 1 - a \cdot \sin[(2\pi / 24) \cdot (h + 6 - h_{\min})] \text{ (-)} \tag{2.35}$$

gdzie:

A_z – względna aktywność zwierząt (-),
a – stała wyrażająca amplitudę zmian aktywności w odniesieniu do średniej dziennej aktywności (wartość 1) (-),
h – godzina w cyklu dziennym, liczba w przedziale (0, 24),
h_{min} – godzina występowania najmniejszej aktywności (ok. godziny 2).

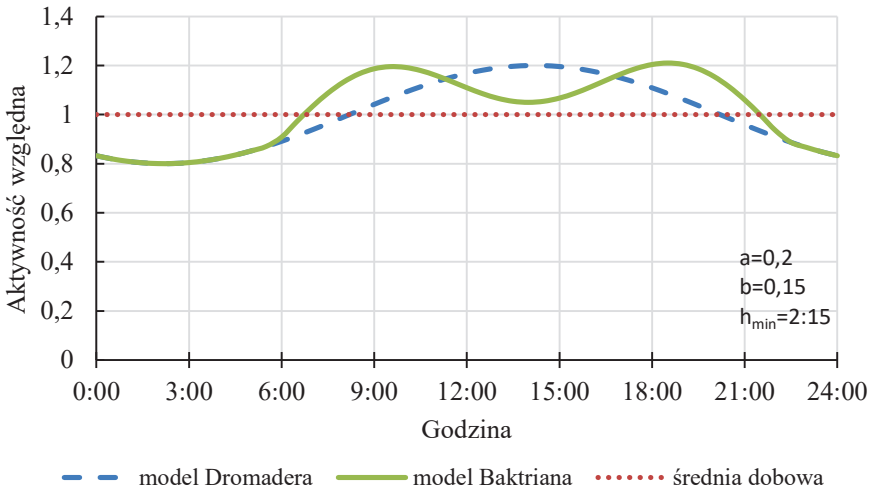
Z kolei model Baktriana stosuje się w przypadku, gdy można zaobserwować dwie godziny wzmożonej aktywności zwierząt w porze porannej i popołudniowej. Model ten jest określany za pomocą dwóch równań określających aktywność zwierząt w ciągu dnia oraz nocy. Dla godzin dziennych względną aktywność należy określać za pomocą równania:

$$A_z(h) = 1 - a \cdot \sin\left[(2\pi / 24) \cdot (h + 6 - h_{\min})\right] - b \cdot \sin\left[(2\pi / 11) \cdot (h - 11{,}3)\right] \text{ (-)} \tag{2.36}$$

Natomiast dla godzin nocnych stosuje się równanie:

$$A_z(h) = 1 - a \cdot \sin\left[(2\pi / 24) \cdot (h + 6 - h_{\min})\right] \text{ (-)} \tag{2.37}$$

W powyższych wzorach stała a wyraża względne zmiany amplitudy aktywności zwierząt w stosunku do średniej dziennej dla godzin dziennych (06:00-22:00), natomiast stała b – dla godzin nocnych (22:00-06:00). Położenie występowania maksimum rannego i popołudniowego jest określana w tym przypadku poprzez h_{min} oraz liczbę 11,3. Liczba ta wskazuje, że maksymalna aktywność zwierząt następuje ok. 11 godzin po szczycie porannej aktywności. Przykładowy przebieg aktywności względnej zwierząt przedstawiono na rysunku 2.3.



Rys. 2.3. Zmiany względnej aktywności zwierząt w cyklu dobowym względem średniej dziennej wg modelu Dromadera i Baktriana

Fig. 2.3. Changes in animal relative activity in the daily cycle in relation to the mean according to the Dromedary and Bactrian model

Źródło: opracowanie własne

Przedstawione modele względnej aktywności zwierząt mogą być uwzględnione przy modelowaniu poziomu czynników wpływających na parametry mikroklimatu w budynkach inwentarskich i pochodzących od zwierząt gospodarskich. Są nimi ciepło pochodzące od obsady zwierząt oraz wydzielane przez nie: para wodna, dwutlenek węgla, amoniak i siarkowodór.

2.5. Wentylacja powietrza

W budynkach inwentarskich jednym z najbardziej istotnych elementów wpływających na bilans cieplno-wilgotnościowy jest zaprojektowanie właściwego poziomu wentylowanego powietrza. Straty ciepła drogą wentylacji w warunkach zimowych stanowią dominującą część wszystkich strat ciepła w budynku. Straty wynikające z wymiany powietrza w halach dla zwierząt dochodzą do 2/3 wszystkich strat (Głuski, 2005b). Określenie ilości powietrza wentylacyjnego jest zatem istotnym elementem analizy mikroklimatu. Celem zaprojektowania właściwego systemu wentylacji dla określonego budynku inwentarskiego jest zagwarantowanie mikroklimatu, który zapewni efektywną produkcję, dobrostan zwierząt, dobre warunki pracy dla obsługi, długowieczność budynku oraz znajdującego się w nim sprzętu (CIGR, 1992). Przy projektowaniu wentylacji należy wziąć pod uwagę zarówno czynniki techniczne, biologiczne, klimatyczne, jak i ekonomiczne. Do czynników technicznych można zaliczyć m.in. typ konstrukcji budynku, wymiary ścian zewnętrznych oraz materiały o odpowiednich właściwościach termicznych, z których są wykonane, systemy odprowadzania odchodów zwierząt, systemy doprowadzania świeżego powietrza eliminujące wy-

stępowanie przeciągów, harmonogram prac przeprowadzanych w oborach związanych z dostarczaniem jedzenia, czy dojeniem krów. Znaczenie ma też tu rodzaj hodowanych zwierząt, ich liczba oraz waga, a także typ utrzymania zwierząt. Projektowane zapotrzebowanie na ciepło w dużym stopniu zależy od środowiska zewnętrznego i w różnych krajach o zróżnicowanym klimacie może być inne (Pedersen i in., 2005).

Głównym zadaniem wentylacji jest usunięcie z hali zwierząt nadmiernej ilości pary wodnej oraz szkodliwych gazów wytworzonych zarówno bezpośrednio przez zwierzęta, jak również wydobywających się z wydzielanych przez nie odchodów, czy ulatniających się z podawanej paszy.

W budowlach, w tym także w budynkach inwentarskich stosuje się różne rozwiązania związane z wymianą powietrza. Mogą one polegać na grawitacji naturalnej, gdzie ruch powietrza wymuszany jest poprzez różnicę parametrów powietrza wewnętrznego i zewnętrznego lub może on być wymuszany mechanicznie poprzez zastosowanie wentylatorów. Niekiedy stosowana jest również kombinacja tych odmian, gdzie wentylacja mechaniczna najczęściej służy do uzupełnienia zbyt małego przepływu powietrza w letnich warunkach pogodowych, kiedy parametry powietrza wewnętrznego i zewnętrznego są zbliżone, co powoduje mniejsze ciśnienie grawitacyjne.

W przypadku wentylacji mechanicznej możemy rozważyć dwa stosowane rodzaje, polegające na wytworzeniu w pomieszczeniu podciśnienia lub nadciśnienia. Wytworzone podciśnienie związane jest z zastosowaniem wentylatorów wywiewnych usuwających powietrze z hali, co wywołuje wymuszenie napływu świeżego powietrza z zewnątrz w celu wyrównania ciśnień. Wentylatory montowane są najczęściej w górnych częściach budynku w otworach wylotowych. Z kolei zastosowanie wentylatorów nawiewnych wytwarza w pomieszczeniu większe ciśnienie, które powoduje usunięcie nadmiaru powietrza z pomieszczenia na zewnątrz. Użycie wentylacji mechanicznej zapewnia lepsze sterowanie ilością wymienianego powietrza i umożliwia utrzymanie w pomieszczeniu bardziej stałych warunków mikroklimatu. W zależności od użytego rodzaju wentylatora możliwe jest utrzymanie tylko ustalonej prędkości wentylacji, gdzie praca wentylatora jest dwustopniowa, tj. jest załączony lub nie, lub prędkość obrotowa wentylatora może być regulowana w szerszym zakresie.

Oprócz korzyści, jakie niesie za sobą wentylacja mechaniczna, zastosowanie tego rozwiązania wpływa na generowanie dodatkowych kosztów związanych ze zużyciem energii elektrycznej oraz utrzymaniem parametrów pracy wentylatorów. W związku z tym należy to uwzględnić w ekonomicznym aspekcie prowadzonej działalności gospodarskiej.

W przypadku budynków dla bydła właściwie zaprojektowana oraz wykonana wentylacja naturalna okazuje się wystarczająca i całkowicie spełnia zadanie, dzięki czemu można uniknąć konieczności stosowania kosztownej wentylacji mechanicznej. Wentylacja naturalna jest dopuszczalna w budynkach dla bydła, ze względu na większą odporność tych zwierząt na niskie temperatury (Głuski, 2005b; Szlachta i Szewczyk, 1983).

Działanie wentylacji grawitacyjnej opiera się na wykorzystaniu zjawisk fizycznych związanych z powstawaniem ciśnienia grawitacyjnego pomiędzy powietrzem wewnętrznym i zewnętrznym charakteryzujących się różną temperaturą i gęstością. Powoduje to wymianę zanieczyszczonego powietrza w hali na świeże powietrze zewnętrzne. Jednak w odróżnieniu od wentylacji mechanicznej większym problemem okazuje się określenie rzeczywistych ilości powietrza wentylacyjnego. Zależy ona od wielu czynników, które w większości są zmienne w czasie. Jako czynniki stałe można zaliczyć geometrię samego

budynku oraz elementów wentylacji. Wymienić należy tu kształt kanałów wywiewnych, wielkość ich przekroju oraz wysokość czynną. Czynnikami zmiennymi w czasie są parametry powietrza wewnętrznego i zewnętrznego, do których zaliczyć można gęstość powietrza, która z kolei zależy od temperatury, wilgotności i ciśnienia atmosferycznego, a także prędkość i kierunek wiatru. Dodatkowo system wentylacji grawitacyjnej może być uzupełniony o elementy regulacyjne umożliwiające zmianę przekroju kanałów nawiewnych i wywiewnych, dzięki czemu można oddziaływać na wielkość strumieni powietrza wywiewanego i nawiewanego do budynku w zależności od panujących warunków pogodowych.

Obliczenia ilości wymienianego powietrza drogą wentylacji naturalnej wykonuje się w dwóch wariantach: w odniesieniu do okresu letniego i zimowego. Oszacowania uzyskane dla okresu zimowego uwzględniają minimalny przepływ powietrza, którego celem jest usunięcie z pomieszczenia nadmiaru szkodliwych gazów. W tym okresie ze względu na znaczne różnice pomiędzy temperaturą powietrza wewnątrz budynku i na jego zewnątrz, w wyniku wentylacji następuje wymiana dużej ilości powietrza, co skutkuje usunięciem dużych ilości ciepła z pomieszczeń dla zwierząt. Straty te muszą być uwzględnione w całkowitym bilansie ciepła. Obliczenia wykonane dla okresu letniego wyznaczają z kolei maksymalny strumień powietrza wentylacyjnego potrzebny do usunięcia gazów, utrzymania optymalnej temperatury w hali dla zwierząt, jak również wpływa na określenie wymiarów elementów wentylacji grawitacyjnej.

Oprócz wymiany powietrza poprzez zaprojektowane do tego celu otwory wentylacyjne w budynkach, występuje również infiltracja powietrza poprzez różnego rodzaju nieszczelności w ścianach budynku, przy oknach i drzwiach. Przepływ tego powietrza jest najczęściej trudna do oszacowania, a jej występowanie w okresie zimowym może mieć znaczący wkład w całkowity strumień zimnego powietrza doprowadzanego do budynku i wynikające z tego straty ciepła w ogólnym bilansie (Wolski, 1988). Swój wpływ na wielkość strumienia powietrza wentylacyjnego ma również okresowe otwieranie drzwi czy wrót wjazdowych w celu wykonania niezbędnych prac związanych z karmieniem zwierząt lub usuwaniem zanieczyszczeń.

Wentylacja naturalna związana jest z pionowym przepływem powietrza wywołanym poprzez różnicę temperatur powietrza wewnątrz i na zewnątrz budynku. Ogólnie ilość powietrza V_p wyprowadzanego z hali zwierząt przez otwory wentylacyjne można opisać zależnością uwzględniającą liniową prędkość przepływu powietrza v_p oraz łączną powierzchnię otworów wywiewnych A_o:

$$V_p = v_p A_o \ (\mathrm{m^3 \cdot s^{-1}}) \tag{2.38}$$

W literaturze dostępne są różne metody szacowania ilości powietrza wentylacyjnego, których porównania można znaleźć w licznych pracach (Blanes i Pedersen, 2005; Bruce, 1978, 1982; Cichoń i Bieda, 1985; Głuski, 2005a, 2008). Część z nich bezpośrednio opiera się o prawo fizyczne opisujące ruch powietrza, wynikający z różnicy ciśnienia grawitacyjnego, związany z odmiennymi temperaturami powietrza wewnątrz i na zewnątrz hali dla zwierząt. Natomiast inne wynikają z porównania zawartości w powietrzu wewnętrznym i zewnętrznym pary wodnej lub innych szkodliwych substancji takich jak: dwutlenek węgla, amoniak czy siarkowodór. Oszacowania tych metod mogą być porównane z wartościami rzeczywistego przepływu pomierzonymi w kanałach wywiewnych w budynkach inwentarskich.

W odniesieniu do pierwszej grupy metod, pionowy przepływ powietrza w kanałach wentylacyjnych można wyprowadzić bazując na różnicy ciśnienia grawitacyjnego:

$$\Delta p_g = H \cdot \left(\rho_e - \rho_i\right) \cdot g \text{ (Pa)} \tag{2.39}$$

Zgodnie z ogólnie znanym z hydrauliki równaniem Bernoulliego ruch powietrza w kanale odbywa się z prędkością wynikającą z wartości oporów Δp (Głuski, 2005b):

$$\Delta p = f \cdot \frac{L}{A} \cdot \frac{v_p^2}{2} \cdot \rho_i + \sum_j \zeta_j \cdot \frac{v_p^2}{2} \cdot \rho_i \text{ (Pa)} \tag{2.40}$$

gdzie:

f – współczynnik tarcia powietrza o ściany kanału (-),
ζ_j – współczynniki oporu (-),
A – powierzchnia przekroju kanału (m^2),
L – długość kanału (m).

Porównując wartości ciśnień otrzymuje się ogólną formułę na prędkość liniową przepływu powietrza w kanale wentylacyjnym:

$$v_p = \sqrt{\frac{2 \cdot H \cdot \left(\rho_e - \rho_i\right) \cdot g}{\rho_i \cdot \left(f \cdot \frac{L}{A} + \sum_j \zeta_j \right)}} \text{ (m·s}^{-1}\text{)} \tag{2.41}$$

Zastosowanie tego wzoru wymaga jednak znajomości współczynników tarcia powietrza o ściany kanału oraz współczynników oporu przepływu powietrza. Wydajność kanałów zależy również od kształtu geometrycznego komina oraz typu wywietrznika zamontowanego na kominie. Dla różnych typów deflektorów dostępne są odpowiednie wzory uwzględniające także prędkość wiatru (Gaziński i Szczechowiak, 1987).

Uproszczony wzór przepływu powietrza uwzględniający różnicę temperatur powietrza wewnętrznego i zewnętrznego, który był proponowany do wymiarowania wentylacji grawitacyjnej podawały wytyczne BISPROL seria n 17/90 (1990):

$$v_p = C_1 \sqrt{\frac{g \cdot H \cdot (T_i - T_o)}{T_e}} \text{ (m·s}^{-1}\text{)} \tag{2.42}$$

gdzie:

C_1 oznacza współczynnik uwzględniający siły tarcia powietrza o ściany kanału.

Wartości współczynnika C_1 zostały oszacowane na podstawie badań i były różne dla różnych typów otworów wywiewnych. W przypadku wentylacji ze szczeliną kalenicową współczynnik ten wynosił 0,80 (lub 0,86 gdy był stosowany otwór wywiewny bez osłony), dla pojedynczych kominów wentylacyjnych – 0,73 (odpowiednio 0,79 bez osłony) i dla szybu zespolonego – 0,68 (0,74).

Analogiczną w postaci formułę na wyznaczanie prędkości powietrza w kominie wentylacyjnym podali Hellickson i Walker (1983):

$$v_p = C_1\sqrt{\frac{2gH(T_i - T_o)}{T_i}} \quad (\mathrm{m\cdot s^{-1}}) \tag{2.43}$$

Wstawiając oszacowanie (2.43) do wzoru (2.38) można otrzymać zależność przedstawiającą strumień powietrza wymienianego drogą wentylacji grawitacyjnej:

$$V_g = C_1\sqrt{\frac{2gH(T_i - T_o)}{T_i}} \cdot A_o \quad (\mathrm{m^3\cdot s^{-1}}) \tag{2.44}$$

Na podstawie wzoru (2.44) przy ustalonej liniowej prędkości przepływu powietrza w kanale wentylacyjnym określa się objętościową przepływ wymienianego powietrza, biorąc pod uwagę tylko powierzchnię otworów wywiewnych A_o i zakładając, że strumień powietrza nawiewanego do pomieszczenia jest równy strumieniowi powietrza wywiewanego. W raporcie CIGR (2014) podano oszacowanie tych ilości, uwzględniające także powierzchnię otworów nawiewnych A_i. W tym wypadku formuła ma postać:

$$V_g = C_d\sqrt{\frac{2g\cdot H\Delta T}{T_i\left(\frac{1}{A_i^2}+\frac{1}{A_o^2}\right)}} = C_d\cdot v_p\cdot\sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1}{A_i^2}+\frac{1}{A_o^2}\right)}} \quad (\mathrm{m^3\cdot s^{-1}}) \tag{2.45}$$

gdzie zalecana wartość współczynnika oporu przepływu powietrza dla budynków inwentarskich mieści się w zakresie 0,5-0,6.

Określeniem wielkości wymiany powietrza w wyniku wentylacji grawitacyjnej zajmowali się również Foster i Down (1987) oraz Zhang i in. (1989). W swoich badaniach rozpatrywali oni położenie płaszczyzny neutralnej ciśnienia grawitacyjnego względem otworów nawiewnych umieszczonych w ścianach bocznych budynku. Na rysunku 2.4 przestawiono uproszczoną sytuację, gdy w budynku znajdują się dwa jednakowe otwory nawiewne umieszczone na tej samej wysokości. Jej położenie zależne jest od wielkości otworów wentylacyjnych oraz wysokości czynnej pomiędzy otworami nawiewnymi i wywiewnymi. W przypadku gdy płaszczyzna neutralna znajduje się nad otworami nawiewnymi, wówczas powietrze zewnętrzne jest przez nie tylko doprowadzane do pomieszczenia, ale również odprowadzane. Jednak w przypadku, gdy powierzchnia ta przebiega przez otwory nawiewne, ich górną częścią powietrze jest odprowadzane na zewnątrz budynku, a dolną częścią doprowadzane do budynku, co wynika ze zmian ciśnienia grawitacyjnego w obrębie otworu nawiewnego. Rozszerzeniem wzoru (2.44) jest wtedy formuła (2.46):

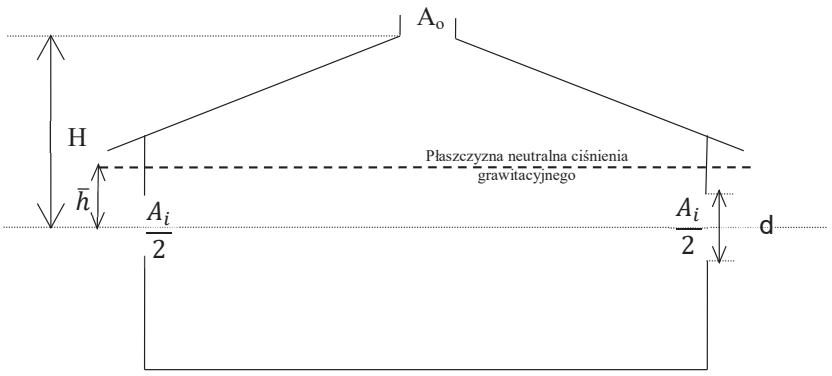
$$V_g = \begin{cases} C_d\left(\dfrac{2g\Delta T}{T_{out}}\right)^{\frac{1}{2}}\cdot A_o\left(H-\overline{h}\right)^{\frac{1}{2}} & \text{dla } \overline{h} \geq \dfrac{d}{2} \\ C_d\left(\dfrac{2g\Delta T}{T_{out}}\right)^{\frac{1}{2}}\left[A_o\left(H-\overline{h}\right)^{\frac{1}{2}} + \dfrac{4}{3}L\cdot\left|d/2-\overline{h}\right|^{\frac{3}{2}}\right] & \text{dla } \overline{h} < \dfrac{d}{2} \end{cases} \quad (\mathrm{m^3\cdot s^{-1}}) \tag{2.46}$$

gdzie:

$\overline{h}$ – wysokość płaszczyzny neutralnej od środka otworów nawiewnych (m) (rysunek 2.4),

L – długość otworów nawiewnych (m),

d – wysokość otworów nawiewnych (m).



Rys. 2.4. Położenie płaszczyzny neutralnej ciśnienia grawitacyjnego i szacowanie ilości powietrza wentylacyjnego

Fig. 2.4. The location of the neutral plane of gravitational pressure and estimation of ventilation air rate

Źródło: opracowanie własne na podstawie Foster i Down (1987)

Ogólny wzór wyznaczania ilości powietrza odprowadzanego przez system wentylacji grawitacyjnej w wyniku działania siły wyporu termicznego podany jest także w opracowaniu CIGR (1999), który również uwzględnia rozkład ciśnienia grawitacyjnego w obrębie każdego otworu:

$$V_g = \sqrt{\frac{2g\Delta T}{T_o}} \sum_{j=1}^{n} \sqrt{f_j \cdot \frac{L_j}{A_j} + \sum_k \zeta_k} \cdot \int_{A_{j(z)}} \frac{|z-h|^{\frac{3}{2}}}{z-h} \left(\mathrm{m^3 \cdot s^{-1}}\right) \tag{2.47}$$

W powyższym wzorze wymagane jest jednak określenie współczynników oporu powietrza w kanałach wentylacyjnych.

Wszystkie powyższe metody szacowania ilości powietrza wentylacyjnego oparte są o zjawisko przemieszczania powietrza, wywołane różnicą ciśnienia grawitacyjnego powstającą ze względu na różną temperaturę i gęstość powietrza wewnątrz pomieszczeń i na zewnątrz obory. W tych metodach największym problemem w określeniu właściwych przepływów powietrza okazuje się określenie współczynników oporu przepływu powietrza przez kanały oraz przy nieszczelnym budynku określenie rzeczywistych wielkości przekrojów otworów nawiewnych.

W niektórych krajach popularne są również budynki, gdzie w miejsce ścian montowane są całkowicie otwieralne kurtyny boczne. Jednak stosowanie ich w polskich warunkach jest

ograniczone ze względu na fakt, że dość często w okresie zimowym występują zbyt niskie temperatury powietrza.

Drugim istotnym czynnikiem w procesie wentylacji budynku, oprócz ciśnienia grawitacyjnego, jest oddziaływanie wiatru. Ciśnienie wywierane przez wiatr na ściany budynku powoduje dodatkowy przepływ powietrza od otworów znajdujących się po stronie nawietrznej w stronę otworów zawietrznych. Wentylacja ta zależy od prędkości wiatru, geometrii otworów pionowych oraz ich ułożenia w odniesieniu do kierunku wiejącego wiatru. Do oszacowania szybkości wentylacji wywołanej działaniem wiatru może posłużyć następująca formuła (CIGR, 2014):

$$V_w = E \cdot A \cdot v_w \,(\mathrm{m^3 \cdot s^{-1}}) \tag{2.48}$$

gdzie:

E – współczynnik określający efektywność otworu (-),
A – powierzchnia otworów od strony wiatru ($\mathrm{m^2}$),
v_w – prędkość wiatru ($\mathrm{m \cdot s^{-1}}$).

Wartość współczynnika E w powyższym wzorze uwzględnia kierunek wiatru w stosunku do umiejscowienia otworów nawiewnych. Jeżeli wiatr wieje prostopadle do powierzchni otworu zalecana wartość współczynnika E wynosi 0,5-0,6. Jeżeli wiatr wieje diagonalnie do powierzchni otworu wartość E przyjmuje się w granicach 0,25-0,35. Ogólnie zalecaną wartością współczynnika E dla budynków rolniczych jest 0,35.

Szybkość wentylacji powietrza będącej wynikiem łącznego działania grawitacji oraz wiatru może być oszacowana również przy użyciu wcześniej przedstawionych formuł (2.46) i (2.47). Wówczas należy uwzględnić zmianę rozkładu ciśnienia działającego w obrębie otworów nawiewnych wywołanego działaniem siły wiatru na ścianę nawiewną.

Odziaływanie wiatru jest bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na przepływ wymienianego powietrza w budynku. Jednakże kontrolowanie wentylacji jest trudne ze względu na dużą zmienność siły i kierunku wiatru. W celu ograniczenia tej zmienności często stosuje się systemy automatycznego przymykania lub zamykania otworów aktywowane przez czujniki temperatury i siły wiatru. Innym sposobem jest stosowanie osłon czy powierzchni perforowanych, których zadaniem jest redukcja prędkości wiatru do wielkości bardziej stabilnych i odpowiednich dla zwierząt.

W większości przypadków wentylacja naturalna jest wynikiem jednoczesnego działania ciśnienia grawitacyjnego oraz wiatru. W zimnych okresach przy braku wiatru dominującym elementem jest wentylacja grawitacyjna, jednak w większości przypadków przeważające jest oddziaływanie wiatru. W przypadkach pośrednich ze względu na wzajemną interakcję pomiędzy różnymi rodzajami wentylacji, ilości szacowane dla wentylacji grawitacyjnej i pod wpływem wiatru nie mogą być do siebie dodane. Jedną z możliwych metod oszacowania poziomu wentylowanego powietrza w wyniku łącznego oddziaływania siły grawitacji oraz wiatru jest zastosowanie formuły (Zhang i in., 1989):

$$V_p = \sqrt{V_g + V_w} \,(\mathrm{m^3 \cdot s^{-1}}) \tag{2.49}$$

Drugą grupę metod określenia prędkości wymiany powietrza stanowią metody odnoszące się do procesów fizjologicznych związanych z przebywającymi w budynku zwierzętami. Te sposoby wynikają z określenia koniecznego poziomu wymiany powietrza potrzeb-

nego do usunięcia z pomieszczeń nadmiaru pary wodnej oraz innych szkodliwych gazów wydzielanych przez zwierzęta (Wrotkowski, 2006). Najprostsza metoda polega na określeniu zalecanych minimalnych i maksymalnych strumieni powietrza w hali produkcyjnej. Pierwsza przydatna jest w okresie zimowym, druga dotyczy okresu letniego. Wymiana powietrza nie może być zbyt mała, ponieważ nie będzie w stanie usunąć nadmiaru szkodliwych substancji, ale z drugiej strony w okresie letnim zwierzęta nie mogą przebywać w dużym przeciągu. Graniczne wielkości poziomu wentylacji podawane są w przeliczeniu wagi zwierząt na jednostkę DJP (500 kg żywca) z uwzględnieniem temperatury powietrza w pomieszczeniu, strefy klimatycznej, w której zlokalizowany jest budynek oraz wydajności udojowej krów. W przypadku krów mlecznych zalecane jednostkowe strumienie powietrza wynoszą: minimalna ok. 50 m^3 na sztukę a maksymalna ok. 220 m^3 na sztukę (Wolski, 2001). Całkowity strumień powietrza dla całego stada wynika z pomnożenia strumienia jednostkowego przez liczbę zwierząt (w jednostkach DJP). Dwie popularne metody, które często są wykorzystywane przy wymiarowaniu budynków inwentarskich związane są z wydzielaniem pary wodnej (tzw. kryterium H_2O) i dwutlenku węgla (kryterium CO_2).

Strumień powietrza konieczny do usunięcia nadmiaru pary wodnej wyznacza się ze wzoru:

$$V_p = V_{H_2O} = \frac{W_z}{(w_i - w_o) \cdot 3600} \ (\mathrm{m^3 \cdot s^{-1}}) \tag{2.50}$$

gdzie: W_z oznacza ilość pary wodnej produkowanej przez zwierzęta (wzór 2.34).

Z kolei strumień powietrza koniecznego do usunięcia nadmiaru wyprodukowanego dwutlenku węgla (kryterium CO_2) otrzymuje się z zależności:

$$V_p = V_{CO_2} = \frac{C}{\Delta C \cdot 10^{-6} \cdot 3600} \ (\mathrm{m^3 \cdot s^{-1}}) \tag{2.51}$$

W powyższym wzorze C oznacza ilość dwutlenku węgla produkowanego przez zwierzęta ($m^3 \cdot h^{-1}$). Określana jest ona na 0,185 $m^3 \cdot h^{-1}$ w przeliczeniu na jednostkę *hpu* (Pedersen i in., 1998, 2008). ΔC wyraża różnicę zawartości dwutlenku węgla w powietrzu wewnętrznym i zewnętrznym (ppm). Dla powietrza świeżego przyjmuje się stężenie CO_2 równe 350 ppm (Jones, 2001).

Metody szacowania prędkości wymiany powietrza w oparciu o te kryteria są powszechnie używane, jednak pewną niedogodnością jest próba oceny ilości potrzebnego powietrza w przypadku, gdy zawartość wilgoci lub dwutlenku węgla w powietrzu wewnątrz budynku oraz na zewnątrz są sobie bliskie. Wówczas występująca w mianowniku liczba jest bardzo mała, co implikuje z kolei bardzo dużą prędkość wentylacji. W tym wypadku należy uwzględnić ograniczenia prędkości wymiany powietrza wynikające np. ze względu na opory przepływu.

Oszacowane strumienia powietrza wymienianego w budynku służą do określenia wielkości strat ciepła drogą wentylacji. Straty ciepła jawnego w wyniku wentylacji można obliczyć w dwojaki sposób, korzystając z zasady zachowania energii cieplnej lub zasady zachowania entalpii (Cichoń i Bieda, 1985). W pierwszym przypadku do obliczenia ilości traconego ciepła korzysta się z wyrażenia:

$$\Phi_w = V_p \cdot \rho_p \cdot c_p \cdot \left(T_e - T_i\right) \text{ (W)} \tag{2.52}$$

natomiast w drugim przypadku z wyrażenia (CIGR, 2002):

$$\Phi_w = V_p \cdot \rho_p \cdot \left[h\left(T_e\right) - h\left(T_i\right)\right] \cdot 1000 \text{ (W)} \tag{2.53}$$

gdzie:

$h(T_e)$ – entalpia właściwa powietrza zewnętrznego (kJ·kg^{-1}),
$h(T_i)$ – entalpia właściwa powietrza wewnętrznego (kJ·kg^{-1}).

Występującą w wyrażeniu (2.53) entalpię właściwą powietrza wilgotnego $h(T)$, można obliczyć z wyrażenia:

$$h(T_C) = c_{pd} \cdot T_C + w \cdot \left(Q + c_{pv} \cdot T_C\right) \text{ (kJ·kg}^{-1}\text{)} \tag{2.54}$$

gdzie:

c_{pd} – ciepło właściwe powietrza suchego (J·(kg·ºC)$^{-1}$),
c_{pv} – ciepło właściwe pary wodnej (J·(kg·ºC)$^{-1}$),
Q – ciepło parowania (kJ·kg^{-1}),
T_C – temperatura w skali Celsjusza (ºC),
w – wilgotność bezwzględna masowa powietrza (kg·(kg powietrza)$^{-1}$).

2.6. Nasłonecznienie

Dodatkowym źródłem ciepła dostarczanego do budynku jest energia pochodząca ze słońca. Jej wielkość jest różna w zależności od pory roku. Co jest naturalne, najmniejsze udziały energii słonecznej w bilansie ogólnym można zaobserwować w zimie, kiedy dni są krótkie, więc okres naświetlania jest też krótki oraz mały jest kąt padania promieni na budynek. Największe znaczenie energia słoneczna ma w okresie letnim, kiedy słońce długo nagrzewa budynek.

Na poziom nasłonecznienia budynku ma wpływ także jego lokalizacja i dostępność promieni słonecznych, które może być ograniczone przez zacienienie drzewami czy innymi budynkami. Duży wpływ na udział energii słonecznej ma orientacja budynku w stosunku do linii północ-południe, co wpływa na kąt padania słońca w najcieplejszym momencie dnia i dostępnością dużej powierzchni ogrzewanej przez słońce (Assem, 2011). Ilość dostarczanej energii słonecznej ograniczana jest przez zastosowaną izolację termiczną przegród zewnętrznych. Izolacja w zimie chroni przed przenikaniem niskiej temperatury do wnętrza budynku, a w okresie letnim stanowi blokadę przed zbędnym ciepłem.

Istotnym czynnikiem wpływającym na ilość dostarczanej energii słonecznej jest lokalizacja oraz wielkość powierzchni przepuszczających promienie słoneczne, takich jak okna czy świetliki umiejscowione w połaciach dachowych. Słońce ogrzewa wtedy dodatkowo podłogę czy inne elementy znajdujące się wewnątrz pomieszczeń. Badania nad oddziaływaniem i wykorzystaniem źródła energii słonecznej prowadzili też. m.in. Axaopoulos i in. (2001), Bieda i in. (2004), Kontoleon i Bikas (2007), Myczko i in. (2005).

2.7. System utrzymania zwierząt i system produkcyjny

Przyjmowana wielkość obsady zwierząt przy obliczaniu bilansu cieplnego budynku zależy od ilości stanowisk w hali dla zwierząt. Zakłada się przy tym, że zasiedlenie hali jest na poziomie 100%. Ze względu na rotację zwierząt w stadzie stosuje się zasadę uwzględniania obsady o najmniejszej emisji ciepła w okresie produkcyjnym. Dodatkowo zaleca się stosowanie współczynnika *e*, którego zadaniem jest korygowanie wielkości emisji ciepła przez zwierzęta. Uwzględnia on trudność jednoczesnego zasiedlania budynków pełną obsadą zwierząt, a także zmiany jej wielkości w czasie eksploatacji przez hodowcę (Wolski, 2001). Wartości tego współczynnika zależą od wielkości stada. W przypadku bydła zaleca się następujące wartości: e=1,0 dla obsady do 50 DJP, w przypadku stada liczącego od 50 do 150 DJP e=0,6 oraz przy liczebności powyżej 150 DJP e=0,8.

Innym aspektem wpływającym na ocenę emisji jest uwzględnienie takich czynników jak: wilgotne powierzchnie, woda wyparowująca z paszy czy odchodów. W prowadzonych badaniach nad emisją ciepłą i wilgoci od zwierząt, wyniki uzyskiwano w warunkach laboratoryjnych wyznaczając ich wartości na poziomie badanych jednostek. W celu określenia wpływu warunków panujących w hali, uwzględniających stosowany system produkcyjny, wprowadzono współczynnik korekcyjny k_j na poprawkę oceny ciepła jawnego.

Wartości tego współczynnika w budynkach dla bydła ustalone zostały na poziomie (CIGR, 1984):

– k_j=0,90: przy suchej podłodze oraz suchej paszy (siano, słoma, ziarno),
– k_j=0,85: przy wilgotnej podłodze oraz suchej paszy,
– k_j=0,80: przy wilgotnej podłodze oraz wilgotnej paszy (kiszonka, płynne pożywienie).

Wzięcie pod uwagę tego współczynnika zwiększa wielkość udziału ciepła utajonego kosztem ciepła jawnego. Wpływa to na oszacowanie ilości pary wodnej emitowanej przez zwierzęta, co z kolei przekłada się na potrzebę zweryfikowania zapotrzebowania na wentylację przy projektowaniu mikroklimatu w budynku inwentarskim.

Szacowanie ilości emisji ciepła, wilgoci oraz dwutlenku węgla jest prosta w przypadku obsady, w skład której wchodzi tylko jedna grupa wzrostowa zwierząt. Sytuacja się komplikuje w budynkach o obsadzie mieszanej, w skład której wchodzą krowy mleczne, cielęta, jałówki, czy bydło opasowe. Struktura stada określająca liczebności poszczególnych kategorii wiekowych zależy od kierunku użytkowania i wpływa na zapotrzebowanie na stanowiska dla różnych grup zwierząt w budynkach (Lenard, 1983; Fiedorowicz, 2001; Wrotkowski 2006). Struktura stada zależy w znacznym stopniu od obrotu stada, opartego o biologiczne przemieszczanie się zwierząt z jednej kategorii do drugiej, kupnie, sprzedaży zwierząt, sezonowość wycieleń oraz brakowanie zwierząt. Istotnym zagadnieniem staje się kwestia optymalizacji wykonywanych procesów technologicznych (Siarkowski, 1997).

Na właściwości mikroklimatu i komfort zwierząt oddziaływać może też system ich hodowli. W polskich warunkach klimatycznych stosowane są dwa systemy utrzymania bydła mlecznego:

– stanowiskowy (uwięziowy), w którym krowy przebywają na stanowiskach, na których odbywa się dój mechaniczny,
– wolnostanowiskowy, w którym krowy swobodnie się poruszają. Wyposażony jest on w boksy, natomiast dój odbywa się w hali udojowej lub za pomocą robota udojowego.

Głównym czynnikiem, który decyduje o wyborze typu systemu jest obsada. Wynika ona najczęściej z posiadanej przez gospodarstwo bazy paszowej. Nakłady inwestycyjne związane z produkcją mleka są stosunkowo wysokie i decydują o opłacalności produkcji. W oborach do 30 sztuk zwierząt korzystniejsze są systemy uwięziowe, natomiast przy obsadzie powyżej 60 krów tańsze w budowie są obory wolnostanowiskowe (Pankowski, 2001).

W związku ze stosowanym sposobem utrzymania zwierząt, inaczej będą zachowywać się i wzajemnie na siebie oddziaływać zwierzęta umieszczone na stanowiskach uwięziowych niż przy zastosowaniu hodowli wolnostanowiskowej, gdzie zwierzęta mogą swobodnie się przemieszczać oraz grupować (Fiedorowicz, 2006). Duże znaczenie, szczególnie jeśli chodzi o wydzielanie szkodliwych gazów i zapotrzebowanie na świeże powietrze, ma również zastosowany rodzaj podłoża, na którym przebywają zwierzęta. Odmienne są poziomy wydzielanego dwutlenku węgla czy amoniaku na podłożu rusztowym, a inaczej przedstawia się sytuacja w przypadku zastosowania podłoża ściółkowego (Jepsson, 2000; Marciniak i in., 2005).

3. CEL PRACY

W metodach wykorzystywanych do wymiarowania budynków inwentarskich oraz kształtowania w nich mikroklimatu optymalnego do hodowli zwierząt wykorzystywane są obliczenia oparte na bilansach zysków i strat ciepła oraz wilgoci. Ogólne równania odzwierciedlają procesy termiczne i wilgotnościowe zachodzące w budynku. Metody wymiarowania można podzielić na dwie grupy (Wolski, 1988; Głuski, 2005b): prognostyczno-założeniowe oraz finalne. Pierwsza grupa dotyczy określenia stanu cieplnego budynku w czasie wykonywania założeń dokumentacji technicznej i pozwalają określić przybliżone dane do projektowania, jak wielkość izolacji termicznej przegród zewnętrznych oraz straty ciepła drogą wentylacji. Metody finalne pozwalają na wykonywanie obliczeń zarówno na etapie projektowania, jak i w czasie eksploatacji budynku. W tych metodach porównuje się strumienie ciepła doprowadzanego i odprowadzanego z budynku. Najbardziej popularna jest metoda klasyczna oraz jej rozwinięcie, czyli metoda oparta o wskaźnik WWT (wskaźnik właściwości termicznych), obliczający nadwyżki ciepła w bilansie ciepła oraz metoda uproszczona wprowadzająca pojęcie ciepła dysponowanego.

Metody stosowane w Polsce przy wymiarowaniu termicznym uwzględniają tak zwane warunki ustalone, w których zakłada się stałe strumienie ciepła, wynikające z przyjętych norm krajowych temperatury powietrza zewnętrznego w okresie zimowym, z uwzględnieniem podziału kraju na strefy klimatyczne (PN-76/B-03420 1976; PN-82/B-02403) lub wykorzystujące statystyczne wartości średnie tych parametrów, na podstawie obserwowanych wartości w poprzednich latach.

W rzeczywistości procesy termiczne i wilgotnościowe zachodzące w budynku inwentarskim są typowo dynamiczne, ze względu na zmieniającą się w ciągu dnia temperaturę i wilgotność powietrza zewnętrznego, nagrzewanie ścian i połaci dachowych pod wpływem promieniowania słonecznego oraz aktywność zwierząt. Dodatkowo, coraz częściej mamy do czynienia z występowaniem w Polsce różnych anomalii pogodowych charakteryzujących się odmiennymi wartościami klimatycznymi, w stosunku do tych wyznaczonych na podstawie danych historycznych. Pojawiają się okresy suszy lub obfitych opadów znacznie odbiegających od wartości obserwowanych dotychczas (Cooper i in., 1998). Występowanie tych anomalii najczęściej jest skutkiem zjawiska globalnego ocieplania klimatu naszej planety.

Jak przedstawiono w poprzednim rozdziale, w literaturze związanej z omawianym tematem podane zostały modele cząstkowe, służące do szacowania wpływu poszczególnych elementów składowych, które mają istotne znaczenie w kształtowaniu mikroklimatu w budynku inwentarskim. Dużym wyzwaniem okazuje się jednak złączenie tych składowych elementów w jedną dużą całość współoddziałujących na siebie składników.

W związku z powyższymi faktami, głównym celem pracy było pokazanie możliwości analizy kształtowania mikroklimatu w budynkach dla bydła mlecznego z wykorzystaniem modelowania matematycznego, przy użyciu narzędzi komputerowych. Mikroklimat w budynku inwentarskim został opisany za pomocą dwóch najważniejszych parametrów, jakimi są temperatura i wilgotność powietrza. W założeniu przyjętych modeli opisujących zmiany mikroklimatu było oddanie dynamicznego charakteru zachodzących procesów wymiany ciepła i wilgoci, wiążących w całość poszczególne elementy składowe wynikające z współoddziaływania na siebie budynku, zwierząt i klimatu zewnętrznego.

Dodatkowo, w celu uwzględnienia występowania losowych zaburzeń, przedstawiony model deterministyczny rozbudowano o modele stochastyczne. Wspomniane zaburzenia mogą wynikać zarówno z niedokładności przeprowadzanych pomiarów parametrów powietrza, przeprowadzanych prac związanych z obsługą zwierząt (nagłe otwarcie wrót) czy zmian klimatu zewnętrznego. Zastosowanie modeli stochastycznych pozwala także ocenić wrażliwość oraz odporność stosowanych modeli. Użyte modele matematyczne z wykorzystaniem symulacji komputerowych umożliwiły zbadanie zachowania całego układu pod względem wymiarowania budynku, charakterystyki termicznej przegród zewnętrznych budynku, wielkości stada zwierząt oraz wpływu klimatu zewnętrznego. Biorąc pod uwagę fakt, że badanie kształtowania mikroklimatu założono z uwzględnieniem warunków niepewności, w tym losowych zaburzeń, w modelach wzięto pod uwagę najważniejsze czynniki, natomiast niektóre, jak akumulacja ciepła przez przegrody i przenikanie przez nie wilgoci, zostały pominięte.

Wykorzystując dane pomiarowe uzyskane w rzeczywistych budynkach inwentarskich, przeprowadzono weryfikację zgodności otrzymanych wyników symulacyjnych z danymi rzeczywistymi. Ze względu na stosowane metody numeryczne zbadano zbieżność i stabilność metod oraz odporność stosowanych modeli na różne wielkości zaburzeń losowych.

Dodatkowym celem pracy było zaprojektowanie aplikacji komputerowej wspomagającej szacowanie parametrów mikroklimatu w budynkach przeznaczonych dla bydła mlecznego. W aplikacji zaimplementowano opisane w pracy modele dynamiczne opisujące zmiany mikroklimatu w oborach oraz uwzględniające losowe zaburzenia. W założeniach programu była możliwość oszacowania dynamicznych zmian parametrów mikroklimatu w pomieszczeniu dla zwierząt poprzez sterowanie:

- wymiarami budynku m.in. takimi jak długość, szerokość, kubatura hali zwierząt, wysokość aktywna, powierzchnie ścian zewnętrznych oraz ich właściwości termoizolacyjne,
- parametrami klimatu zewnętrznego, poprzez takie czynniki jak: temperatura powietrza oraz jego wilgotność względna, prędkość wiatru,
- obsadą zwierząt, poprzez określenie kategorii poszczególnych zwierząt oraz ich liczebności, wagi oraz dziennej wydajności mlecznej,
- strumieniem wentylowanego powietrza, poprzez możliwość określenia stopnia otwarcia poszczególnych otworów nawiewnych i wywiewnych znajdujących się w bryle budynku, dzięki czemu można wiernie oddać rzeczywiste powierzchnie otworów oraz działania obsługi wpływające na chwilowe zwiększenie wentylacji np. przez otwarcie wrót.

Przygotowana aplikacja umożliwia przedstawienie wyników w formie graficznej w postaci wykresów, jak również wyeksportowanie wyników do plików zewnętrznych w celu przeprowadzenia późniejszych dowolnych analiz przedstawiających dopasowanie modeli do danych rzeczywistych, jak również innych analiz statystycznych.

Zaprojektowany program ma budowę modułową, dzięki czemu istnieje łatwa możliwość rozbudowy składowych bilansu cieplnego oraz zmiany poszczególnych modeli cząstkowych. W związku z taką budową można także dokonać jego adaptacji do innych grup zwierząt hodowlanych, niż przedstawione w niniejszej pracy.

4. MODELE MATEMATYCZNE OPISUJĄCE MIKROKLIMAT W BUDYNKACH INWENTARSKICH

Przebieg procesów zachodzących w budynkach inwentarskich można przedstawić z wykorzystaniem trzech sposobów modelowania (Głuski, 2005b):

1. modele statyczne, w których zakłada się, że warunki panujące na zewnątrz budynku inwentarskiego są stałe w ciągu odpowiednio długiego czasu, w tym także w ujęciu dobowym. Także emisja ciepła od zwierząt, jak i wydzielanie wilgoci, czy gazów metabolicznych odbywa się w warunkach ustalonych, a ilość ciepła doprowadzonego do pomieszczenia jest równa ilości ciepła odprowadzonego przez wentylację lub przenikanie przez przegrody zewnętrze budynku.
2. modele dynamiczne, w których przyjmuje się, że warunki otoczenia budynku zmieniają się w sposób ciągły. W tym wypadku zmienne w czasie są zarówno wielkości strumieni ciepła wydzielanego przez zwierzęta gospodarcze, jak i odprowadzanego z budynku drogą wentylacji, czy przenikania przez przegrody. W modelach tego typu rozpatrywane są chwilowe bilanse ciepła w poszczególnych pomieszczeniach, które nie są w stanie równowagi, lecz jedynie do niej dążą. W związku z tym, jeśli różnica między ilością ciepła doprowadzonego i wyprowadzonego w ciągu jednostki czasu jest dodatnia, to temperatura w budynku rośnie, a jeśli ujemna to temperatura ta maleje. Przy analizie szybkości zmian należy wziąć pod uwagę pojemność i bezwładność cieplną elementów budowlanych, jak i samego powietrza.
3. modele mieszane, czyli statyczno-dynamiczne rozpatrują stan warunków otoczenia i wewnątrz budynku w sposób skokowy. W ustalonym przedziale czasowym poszczególne parametry przyjmuje się jako stałe, a ustalony okres jest wystarczająco długi do wyrównania bilansu cieplno-wilgotnościowego.

W przeważającej większości metod projektowania mikroklimatu w budynkach inwentarskich uwzględniany jest model statyczny, w których przyjmuje się, że warunki otoczenia są stałe i zależne od przyjętej strefy klimatycznej, w której zlokalizowany jest budynek (Wolski, 1988). Temperatury powietrza w pomieszczeniach sąsiadujących z halą dla zwierząt szacowane są na podstawie obowiązujących norm, w zależności od liczby ścian zewnętrznych, liczby drzwi czy okien, a także od rodzaju pokrycia dachowego oraz czy projektowany budynek ma mieć poddasze użytkowe.

Głównymi czynnikami klimatu, które w sposób decydujący wpływają na tworzący się mikroklimat w hali zwierząt budynku inwentarskiego są temperatura i wilgotność powietrza. Na potrzeby wymiarowania termicznego wyróżnia się trzy rodzaje klimatu zewnętrznego (Wolski, 2001): klimat doraźny, klimat statystyczny i klimat normowy. Parametry określone dla klimatu normowego przyjmowane są do obliczeń podczas wymiarowaniu termicznego budynków w okresie zimowym. Temperatury obliczeniowe powietrza zewnętrznego określa norma PN-82/B-02403 (1982). Są to wartości stałe, które zostały przypisane dla każdej z pięciu stref klimatycznych, na które została podzielona Polska. Dla pierwszej strefy, który stanowi pas nadmorski, temperatura ta wynosi -16°C, zmienia się o dwa stopnie dla każdej strefy, aby osiągnąć -24ºC w strefie piątej (okolice Suwałk i Zakopanego). Z kolei parametry klimatu normowego odnoszące się do okresu letniego określa norma PN-76/B-03420 (1976), według której Polskę dzieli się na dwie strefy klimatyczne.

Pierwszą stanowi pas nadmorski od Szczecina do Braniewa, a strefę drugą pozostała część kraju. Temperatura powietrza dla tych stref wynosi odpowiednio 24,4ºC i 26,6ºC, dobowa amplituda 10ºC i 14ºC, natomiast wilgotność względna 52% i 45%.

Zewnętrzny klimat statystyczny określony został na podstawie obliczeń statystycznych pochodzących z pomiarów wieloletnich (Basińska i Koczyk, 2001). Dane, które opisują poszczególne parametry tego klimatu zależą od okresów, dla których dokonywane są obliczenia oraz od regionu klimatycznego. Polska została podzielona na siedem regionów klimatycznych przez Romera w 1949 roku, ze względu na znaczne różnice klimatyczne występujące pomiędzy tymi regionami.

W rzeczywistości warunki panujące wewnątrz budynku, jak i w jego otoczeniu są zmienne w czasie, a wymiana ciepła odbywa się według modeli dynamicznych (Zhang i in., 1992). Jednak w takim ujęciu obliczenia bilansu ciepła są bardzo złożone ze względu właśnie na tę zmienność wszystkich czynników oraz nieznaną jej szybkość. Dodatkowo coraz częściej mamy do czynienia z występowaniem różnych anomalii pogodowych, które w znaczący sposób odbiegają od wartości normatywnych czy statystycznych. Możemy zaobserwować lata gorące i suche, ciepłe zimy, jak również okresy obfitujące w opady atmosferyczne oraz okresy suszy. W związku z tym modele matematyczne służące do szacowania mikroklimatu w budynkach inwentarskich oparte o klimat normatywny czy statystyczny mogą w znacznym stopniu odbiegać od warunków rzeczywistych.

W niniejszym opracowaniu w celu określenia zmienności warunków panujących w budynkach inwentarskich przyjęto za punkt wyjścia dynamiczne modele matematyczne, w których uwzględniono wzajemne oddziaływanie poszczególnych składników systemu. Jednakże ze względu na częstotliwość wykonywania pomiarów oraz stosowanie metod numerycznych, w rzeczywistości są to modele statyczno-dynamiczne. W przyjętych modelach uwzględniono wpływ takich czynników jak: produkcja ciepła i wilgoci przez zwierzęta, oddziaływanie środowiska zewnętrznego oraz właściwości termiczne budynku. Do czynników zewnętrznych należy zaliczyć: temperaturę powietrza zewnętrznego, jego wilgotność względną i prędkość wiatru. W modelach pominięto efekt nasłonecznienia budynków jako dodatkowego źródła ciepła dostarczanego do układu. W analizach nie uwzględniono również efektu kumulacji ciepła przez elementy znajdujące się w budynku. W rozważaniach uwzględniono trzy rodzaje modeli: deterministyczny oraz 2 modele stochastyczne, uwzględniające losowe zaburzenia w wartościach parametrów modelu deterministycznego. Model deterministyczny oparty był o równania różniczkowe opisujące chwilowe zmiany temperatury wewnętrznej i wilgotności powietrza wewnętrznego w budynkach. Modele stochastyczne obejmowały szeregi czasowe z uwzględnieniem zmiennych towarzyszących oraz stochastyczne równania różniczkowe.

W przypadku modelowania przebiegu wielu różnych zjawisk, czy procesów przyrodniczych, rozważa się najczęściej modele deterministyczne uwzględniające pomierzone parametry. Model deterministyczny to model matematyczny, który danemu na wejściu zdarzeniu (wartościom parametrów) w sposób jednoznaczny przyporządkowuje konkretny stan końcowy. Opis takiego modelu nie zawiera żadnego elementu losowości. Oznacza to, że ewolucja układu w modelu deterministycznym jest z góry przesądzona i zależy wyłącznie od parametrów początkowych lub ich wartości poprzednich.

Opisowi deterministycznemu można przeciwstawić model probabilistyczny, jak proces stochastyczny, w którym wyniki początkowe opisują wyniki końcowe z pewnym prawdopodobieństwem.

W przypadku modelowania mikroklimatu w pomieszczeniach inwentarskich można spotkać wiele czynników wpływających na jakość modelu:
- błędy pomiarowe (dokładność urządzeń, pomiary podmuchów wiatru),
- uproszczenie lub niedokładność oszacowania składowych modeli (określenie ciepła i wilgoci wydzielanej przez zwierzęta i urządzenia, oszacowanie poziomu wentylacji, itd.),
- zdarzenia losowe (pogoda, otworzenie drzwi, okien),
- pominięcie części składowych układu (zamierzone lub nie).

Uwzględnienie powyższych faktów powoduje, że budowane modele deterministyczne często są zaburzone przez czynniki losowe. Zastosowanie modeli stochastycznych umożliwia dodatkowe analizę wrażliwości poszczególnych modeli oraz ich odporność np. na anomalie pogodowe.

Dobrze opracowane modele matematyczne umożliwiają właściwe odzwierciedlenie zachodzących procesów. W obecnych czasach do szacowania parametrów mikroklimatu na podstawie opracowanych modeli coraz częściej wykorzystuje się rosnące możliwości obliczeniowe komputerów. Powstające oprogramowanie komputerowe umożliwia oddanie dynamicznego charakteru zachodzących zmian (Radoń, 2004).

4.1. Model deterministyczny (D)

W rozważaniach przedstawionych w tej pracy do kształtowania parametrów mikroklimatu w budynku inwentarskim użyto uproszczonego modelu deterministycznego, który pomija mniej istotne składniki bilansu cieplno-wilgotnościowego.

Do szacowania temperatury powietrza wewnętrznego w hali dla zwierząt użyto zależności:

$$c_p \cdot \rho_p \cdot V \cdot \frac{dT_i}{dt} = \Phi_b + \Phi_{zj} + \Phi_v \tag{4.1}$$

Do bilansu wilgotnościowego powietrza w hali zwierząt przyjęto z kolei równanie:

$$V \cdot \rho_p \cdot \frac{dw_i}{dt} = W_z + W_v \tag{4.2}$$

Stosując model deterministyczny przedstawiony za pomocą układu równań (4.1) i (4.2), przy ustalonych warunkach początkowych, otrzymuje się zawsze takie samo rozwiązanie. W rzeczywistości procesy zachodzące w pomieszczeniach inwentarskich, związane z wymianą ciepła, wilgoci, wentylacją powietrza i innymi zjawiskami, podlegają cały czas pewnym zaburzeniom losowym. Skutkuje to tym, że praktycznie niemożliwe jest odtworzenie za każdym razem takich samych wyników, nawet wtedy, gdy warunki początkowe wydają się identyczne. Takie zaburzenia mogą być generowane zarówno przez czynniki zewnętrzne, takie jak zmieniające się prędkość i kierunek wiatru, nasilenie promieni słonecznych padających na bryłę budynku, jak również przez czynniki pochodzące od zwierząt (poziom aktywności, zmiana lokalizacji lub ich grupowanie) oraz od samego procesu użytkowania budynku przez obsługę, jak np. otwarcie drzwi w budynku.

Dodatkowo w modelach deterministycznych często uwzględnia się pewne uproszczenia na etapie formułowania matematycznych zależności oraz pominięcie mniej istotnych składowych zachodzących procesów. Z powodu wyjątkowej złożoności kształtowania mikroklimatu w budynkach inwentarskich ciężko jest uwzględnić wszystkie jego parametry. W takich przypadkach często model deterministyczny stanowi punkt startowy, do którego dodaje się elementy stochastyczne, pozwalające rozszerzyć możliwości analizy skomplikowanych procesów. Takie podejście zaprezentowano w dwóch kolejnych podrozdziałach.

4.2. Model wykorzystujący szeregi czasowe ze zmiennymi towarzyszącymi (TS)

Szereg czasowy jest realizacją procesu stochastycznego, którego dziedziną jest czas (Box i Jenkins, 1970). Za taki należy uznać ciąg kolejnych pomiarów uporządkowanych w czasie, które najczęściej wykonywane są z dokładnym krokiem czasowym. Podstawą działania modeli opartych o szeregi czasowe jest założenie, że obserwacje bliskie w czasie są ze sobą mocno skorelowane, a więc kolejne wartości zależą od wartości wcześniejszych. Szeregi czasowe wykorzystywane są w praktyce do predykcji przebiegu procesu, która służy do wykrycia zależności matematycznej między zaobserwowanymi pomiarami oraz prognozy przyszłych wartości.

Wśród podstawowych składników szeregu czasowego możemy wyróżnić takie elementy jak:

- tendencja rozwojowa (trend) – opisująca główne zależności między rozpatrywanymi wielkościami,
- wahania sezonowe – mówiąca o powtarzalności pomiarów w określonych porach roku,
- wahania cykliczne (koniunkturalne) – uzależniające wartości od innych powtarzających się czynników,
- wahania przypadkowe – określająca losowe czynniki.

Analiza szeregów czasowych polega na określeniu rodzaju zależności opisujących dany ciąg wartości, czyli identyfikacji procesu poprzez określenie typu metody, jej rzędu oraz współczynników regresyjnych, a następnie dokonaniu odpowiedniego wnioskowaniu statystycznemu i predykcji kolejnych wartości. W zależności od rodzaju modelowanego procesu możemy wyróżnić następujące podstawowe typy modeli szeregów czasowych:

1) *AR* (*autoregression model*) – kolejne wartości badanej cechy zależą głównie od poprzednich wartości. Rząd metody oznacza liczbę poprzednich wartości wykorzystywanych do oszacowania aktualnej wartości. Model ten przy rzędzie p, oznaczany jako $AR(p)$, możemy przedstawić w następującej postaci:

$$AR(p):\ y_j = \sum_{k=1}^{p} a_{j-k} \cdot y_{j-k} + \varepsilon_j \tag{4.3}$$

gdzie:

y_j – oznacza wartość parametru w j-tym punkcie czasowym,
a_j – współczynnik regresyjny dla wartości y_j,
ε_j – błąd dla pomiaru j.

Dla najprostszego przypadku, gdy używana jest tylko jedna wcześniejsza wartość, czyli przy rzędzie metody 1, przyjmuje on postać:

$$AR(1):\ y_j = a \cdot y_{j-1} + \varepsilon_j . \tag{4.4}$$

2) *MA* (*moving average model*) – kolejne wartości badanej cechy zależą głównie od zaburzeń dla wcześniejszych pomiarów:

$$MA(q):\ y_j = \sum_{k=1}^{q} \beta_{j-k} \cdot \varepsilon_{j-k} + \varepsilon_j \tag{4.5}$$

3) ARMA jest kombinacją modeli *AR* i *MA* i wyraża się wzorem:

$$ARMA(p,q):\ y_j = \sum_{k=1}^{p} a_{j-k} \cdot y_{j-k} + \sum_{k=1}^{q} \beta_{j-k} \cdot \varepsilon_{j-k} + \varepsilon_j \tag{4.6}$$

4) *ARIMA* to model *ARMA*, ale wyznaczany dla wartości zróżnicowanych (ang. integrated), co służy do wyeliminowania z danych trendu i wyznaczenie szeregu stacjonarnego. Model ten można zapisać w postaci:

$$ARIMA(p,d,q):\ \Delta^d y_j = c + \sum_{k=1}^{p} a_{j-k} \cdot \Delta^d y_{j-k} + \sum_{k=1}^{q} \beta_{j-k} \cdot \varepsilon_{j-k} + \varepsilon_j \tag{4.7}$$

gdzie:
$\Delta^d y_i$ oznacza d-krotnie zróżnicowany ciąg y_i.

W skróconej formie model można zapisać w postaci:

$$ARIMA(p,d,q):\ \alpha(L)(1-L)^d y_j = c + \beta(L)\varepsilon_j \tag{4.8}$$

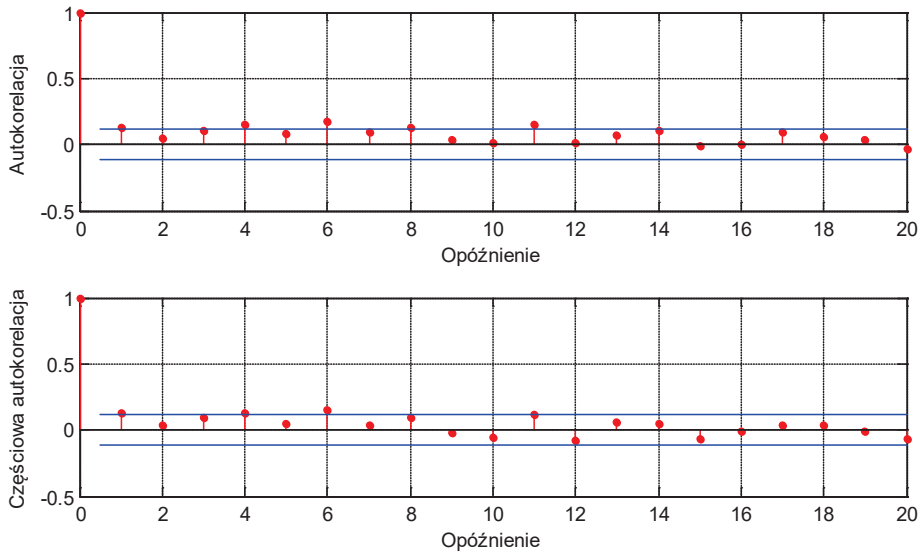
gdzie:
$b(L) = 1 + b_1 L + b_2 L^2 + \cdots + b_m L^m$ jest wielomianem stopnia m
$L^k y_j = y_{j-k}$ jest operatorem opóźnienia

5) ARIMAX – model *ARIMA* uwzględniający wpływ dodatkowych n zmiennych towarzyszących X wpływających na badaną zmienną:

$$\Delta^d y_j = c + \sum_{k=1}^{p} a_{j-k} \cdot \Delta^d y_{j-k} + \sum_{k=1}^{q} \beta_{j-k} \cdot \varepsilon_{j-k} + \sum_{k=1}^{n} \beta_{j-k} \cdot x_{j-k} + \varepsilon_j \tag{4.9}$$

6) SARIMA(X) to model ARIMA(X) uzupełniony o sezonowość danych (ang. *seasonality*).

Jednym z narzędzi, służących do wizualnej oceny poprawności wyboru typu modelu oraz ustalenia jego rzędu związanego z liczbą wyrazów regresyjnych w powyższych modelach, jest sporządzenie wykresów wzajemnej korelacji i częściowej korelacji dla otrzymywanych błędów (rysunek 4.1).



Rys. 4.1. Autokorelacja błędów przy ustalaniu rzędu szeregu czasowego
Fig. 4.1. Autocorrelation of errors in order to determine the rank of time series

Źródło: opracowanie własne

Na przedstawionym wykresie można zaobserwować, że nie występują korelacje między błędami dla różnych punktów pomiarowych, co świadczy o właściwym doborze typu i rzędu metody. Chociaż korelacje błędów między niektórymi punktami czasowymi (np. dla opóźnienia 6) sugerują możliwość wprowadzenia dodatkowych wyrazów regresyjnych, jednak sprowadza się to do zwiększenia liczby współczynników (rzędu metody) i czasu ich oszacowania. Porównania jakości informacyjnej modeli można dokonać korzystając np. z kryterium informacyjnego Akaike, za pomocą którego można ocenić użyteczność rozbudowy modelu poprzez wprowadzanie dodatkowych współczynników regresyjnych.

W przypadku modelowania zmian parametrów mikroklimatu zmiennymi zewnętrznymi (macierz X) mogą być:

– dla temperatury wewnętrznej: zyski lub straty ciepła od zwierząt oraz w wyniku wentylacji i przenikania przez ściany,
– dla wilgotności: zyski lub straty pary wodnej produkowanej przez zwierzęta i usuwanej w wyniku wentylacji.

Kształtowanie mikroklimatu w budynku inwentarskim, przy założeniu, że sezonowość jego zmian wynika ze zmian parametrów klimatu zewnętrznego i nie ma stałego trendu malejącego lub wzrostowego, można opisać w postaci modeli ARMAX:

$$T_j = \sum_{k=1}^{p} a_{j-k} \cdot T_{j-k} + \sum_{k=1}^{q} \beta_{j-k} \cdot \varepsilon_{j-k} + \beta_{z1} \cdot Q_{zj} + \beta_b \cdot Q_{bj} + \beta_v \cdot Q_{vj} + \varepsilon_j \qquad (4.10)$$

$$w_j = \sum_{k=1}^{p} a_{j-k} \cdot w_{j-k} + \sum_{k=1}^{q} \beta_{j-k} \cdot \varepsilon_{j-k} + \beta_{z2} \cdot W_{zj} + \beta_w \cdot W_{wj} + \varepsilon_j \qquad (4.11)$$

4.3. Model matematyczny oparty o stochastyczne równania różnicowe (SDE)

Oprócz teorii szeregów czasowych, kolejnym narzędziem służącym do wprowadzenia czynników losowych do modeli deterministycznych jest wykorzystanie stochastycznych równań różniczkowych (*stochastic differential equations*, SDE). Przykładem takiego równania używanego do opisu układów fizycznych, które podlegają zaburzeniom losowych jest równanie Langevina. Po raz pierwszy zostało ono wykorzystane do opisu zjawiska związanego z ruchami Browna (Van Kampen, 1990).

Matematycznym modelem fizycznego zjawiska ruchów Browna jest proces Wienera, który jest zastosowany do modelowania w różnych dziedzinach nauki (Higham, 2001; Kloeden i Platen, 1992; Øksendal, 2003). Jest najbardziej znanym przykładem procesu gaussowskiego. Jest to model z czasem ciągłym. Proces ten odgrywa kluczową rolę w badaniach bardziej skomplikowanych procesów, jak np. procesów dyfuzji.

Standardowy proces Wienera w przedziale $\langle 0, t_{max} \rangle$ jest zmienną losową Z(t), która zależy w sposób ciągły od czasu $t \in \langle 0, t_{max} \rangle$ i spełnia następujące warunki:

1. $Z(0) = 0$ z prawdopodobieństwem 1,
2. Różnica $Z(t) - Z(s)$ dla $0 \leq s < t \leq t_{max}$ jest zmienną losową z rozkładem normalnym z wartością oczekiwaną 0 i wariancją t-s:
   $Z(t) - Z(s) \sim \sqrt{t-s} \cdot N(0,1)$
3. zmienne $Z(t) - Z(s)$ i $Z(v) - Z(u)$ są niezależne dla dowolnych $0 \leq s < t < u < v \leq t_{max}$.

Korzystając z powyższej definicji stochastyczne równanie różniczkowe w ogólnym przypadku możemy zapisać w postaci:

$$\begin{cases} dX(t) = f\big(X(t)\big)dt + h\big(X(t)\big)dZ \\ X(0) = X_0 \\ 0 \leq t \leq T \end{cases} \tag{4.12}$$

gdzie:

f – funkcja dryftu, związana ze zmianami wynikającymi z modelowanego procesu,

g – funkcja dyfuzji odpowiedzialna za losowe błądzenie procesu.

Równanie (4.12) można przestawić w równoważnej formie z wykorzystaniem definicji całki:

$$\begin{cases} X(t) = X_0 + \int_0^t f\big(X(s)\big)ds + \int_0^t h\big(X(s)\big)dZ \\ 0 \leq t \leq T \end{cases} \tag{4.13}$$

Do celów numerycznych rozważa się zdyskretyzowany proces Wienera, dla którego wartości $Z(t)$ są określone w ustalonych punktach czasowych t_j, $j = 0, \ldots, N$ (Kloeden i Platen, 1992) dla ustalonej dodatniej liczby naturalnej N. Wówczas $\mathrm{d}t = \frac{t_{max}}{N}$ wyznacza krok czasowy, $t_j = jdt$ – kolejne punkty czasowe, $Z_j = Z(t_j)$ – wartości procesu Wienera w punktach t_j, przy czym $Z_0 = 0$ z prawdopodobieństwem 1 oraz $Z_j = Z_{j-1} + \mathrm{d}Z_j$, gdzie $\mathrm{d}Z_j \sim \sqrt{\mathrm{d}t}\, N(0,1)$ są niezależnymi zmiennymi losowymi

Występującą we wzorze (4.13) całkę stochastyczną $\int_0^t h(s)dZ$ przybliża się numerycznie poprzez jedną z poniższych sum (Kloeden i Platen, 1992):

1. w sensie Itô, w której wartość funkcji $f(t)$ dla przedziału $\langle t_j, t_{j+1} \rangle$ przybliżana jest wartością w jego lewym końcu:

$$S_I = \sum_{j=0}^{N-1} f(t_j)\left(Z(t_{j+1}) - Z(t_j)\right) \tag{4.14}$$

2. w sensie Stratonowicha, w której wartość f(t) dla przedziału $\langle t_j, t_{j+1} \rangle$ przybliżana jest wartością środkową:

$$S_S = \sum_{j=0}^{N-1} f\left(\frac{t_j + t_{j+1}}{2}\right)\left(Z(t_{j+1}) - Z(t_j)\right) \tag{4.15}$$

Najprostszą metodą wyznaczania rozwiązania stochastycznego równania różniczkowego jest metoda Eulera-Maruyamy, która jest analogiczna do metody Eulera dla zwykłych równań różniczkowych, wykorzystująca całkę w sensie Itô. Wzór określający wartości poszukiwanej funkcji ma postać:

$$X_j = X_{j-1} + f\left(X_{j-1}\right)\Delta t + h\left(X_{j-1}\right)\left(Z(\tau_j) - Z(\tau_{j-1})\right) \tag{4.16}$$

gdzie:

j=1,2,…,L,

$\Delta t = T / L$, najczęściej $\Delta t = R\mathrm{d}t$,

$\tau_j = j\Delta t$,

L, R – liczby naturalne dodatnie.

Przedstawione metody numerycznego rozwiązywania stochastycznych równań różniczkowych są najprostszymi metodami analogicznymi do metody Eulera w przypadku zwykłych równań różniczkowych. W analogiczny sposób można wprowadzić bardziej zaawansowane metody jak metody Rungego-Kutty rzędu czwartego charakteryzujące się lepszymi właściwościami, jeśli chodzi o dokładność i zbieżność otrzymywanych wyników.

Ostatecznie korzystając z definicji stochastycznych równań różniczkowych, model opisujący zmiany mikroklimatu w budynku inwentarskim można zapisać w postaci układu równań (4.17) i (4.18) odpowiednio dla temperatury wewnętrznej oraz jego wilgotności bezwzględnej:

$$c_p \cdot \rho_i \cdot V \cdot \frac{dT_i}{dt} = \Phi_b + \Phi_{zj} + \Phi_v + h_1(T_i)dZ \tag{4.17}$$

$$V \cdot \rho_i \cdot \frac{dw_i}{dt} = W_z + W_v + h_2(w_i)dZ \tag{4.18}$$

Występujące we wzorach funkcje h_1 i h_2 wprowadzają niewielki stopień zaburzeń wartości temperatury i wilgotności bezwzględnej powietrza wewnątrz hali dla zwierząt wywoływany czynnikami losowymi.

5. OPIS DANYCH SŁUŻĄCYCH DO WALIDACJI MODELI MATEMATYCZNYCH

Do zweryfikowania użyteczności przedstawionych modeli kształtowania mikroklimatu w budynkach dla bydła wykorzystano pomiary wykonane w ramach grantu nr N N313 447939 „System kształtowania mikroklimatu w budynkach dla bydła". Projekt realizowany był w okresie 28.10.2010 do 27.01.2014. W założeniach badań, przeprowadzonych w ramach projektu, była charakterystyka zmian mikroklimatu w budynkach dla bydła w ujęciu dobowym.

Badania mikroklimatu realizowane były w dziesięciu wybranych budynkach dla bydła zlokalizowanych na terenie województwa lubelskiego. Wspomniane budynki można podzielić na dwie grupy ze względu na typ konstrukcji:

1. budynki typu halowego, bez poddasza użytkowego z wolnostanowiskowym utrzymaniem krów mlecznych,
2. budynki z poddaszem użytkowym i stanowiskowym systemem utrzymania zwierząt.

Zakres prowadzonych badań obejmował ciągłe pomiary parametrów mikroklimatu w hali zwierząt oraz klimatu zewnętrznego. Podstawowe parametry uwzględnione w badaniach, mające wpływ na bilanse ciepła i wilgoci w budynku, to temperatura i wilgotność powietrza wewnętrznego i zewnętrznego. Zakres badań w części obiektów został jednak rozszerzony o pomiary poziomu stężenia gazów szkodliwych w hali zwierząt, pomiary prędkości i kierunku wiatru oraz ciśnienia atmosferycznego. W każdym obiekcie wykonano inwentaryzację budynku i stada.

5.1. Charakterystyka budynków inwentarskich

W tym podrozdziale przedstawiono krótką charakterystykę budynków inwentarskich, w których wykonano pomiary, użyte w niniejszym opracowaniu do weryfikacji zastosowanych modeli deterministyczno-stochastycznych. Większość budynków, w których dokonano pomiarów parametrów mikroklimatu stanowią budynki typu halowego, tylko dwa z nich miały poddasze użytkowe. We wszystkich budynkach wentylacja oparta była o ciśnienie grawitacyjne wywołane różną temperaturą powietrza zewnętrznego i wewnętrznego. Jednak w budynkach zastosowano różne konstrukcje odprowadzania powietrza z hali dla zwierząt. Poglądowe schematy budynków umieszczono w załączniku D, w postaci rzutu poprzecznego oraz rzutu przyziemia. Natomiast szczegółowe dane przedstawiono w dalszej części rozdziału (tabele 5.1-5.4). Zaprezentowano w nich zestawienia zbiorcze podstawowych wymiarów budynków, właściwości izolacyjnych jego ścian zewnętrznych, informacji dotyczących wentylacji oraz obsady zwierząt w okresie wykonywania pomiarów.

Budynek 1. Ciemno

Jest to niepodpiwniczony parterowy budynek typu halowego, bez poddasza użytkowego. Stropodach budynku jest niesymetryczny (rys. D.1). Układ pomieszczeń umożliwia przejazd maszyn w celu wykonywania zadań związanych z procesem technologicznym. W hali zwierząt wyodrębniono korytarz paszowy, legowiska dla krów, kojce dla cieląt oraz

kanały gnojowe. W części szczytowej obory od strony północnej wydzielone są: hala udojowa, pomieszczenie na mleko oraz pomieszczenia socjalno-sanitarne. Konstrukcję budynku stanowi szkielet stalowy oparty na słupach z rur stalowych. Ściany zewnętrzne są wielowarstwowe, dach oparty jest na ryglach stalowych oraz belkach drewnianych utrzymujących pokrycie i warstwy ocieplające. Budynek jest nieogrzewany i wyposażony w instalację wodną, kanalizacyjną i energetyczną. W budynku zaprojektowano wentylację grawitacyjną. Wywiew powietrza następuje przez szczeliny kalenicowe, natomiast nawiew przez otwory nawiewne usytuowane w ścianach bocznych pod okapem.

Budynek 2. Glinnik

Budynek jest parterowy, niepodpiwniczony z poddaszem użytkowym (rys. D.2). Hala zwierząt zawiera centralny korytarz paszowy i dwa rzędy stanowisk dla krów. System chowu jest ściółkowy, krowy są wiązane indywidualne, dla cieląt wydzielono kojce pojedyncze i grupowe. Przy jednej ze ścian szczytowych wydzielono pomieszczenie na mleko i pomieszczenie socjalne oraz paszarnię. Wentylacja budynku jest grawitacyjna, poprzez kominy wywiewne o przekroju okrągłym. Budynek jest nieogrzewany, wyposażony w instalację wodną, kanalizacyjną i energetyczną.

Budynek 3. Komarów

Budynek jest wolnostojący, parterowy, z poddaszem użytkowym (rys. D.3). Przy jednej ze ścian szczytowych wydzielone jest pomieszczenie na mleko, pomieszczenie socjalne oraz paszarnia. Hala zwierząt ma centralny korytarz paszowy i dwa rzędy stanowisk dla krów. System chowu jest ściółkowy, stanowiska dla krów są indywidualne uwięziowe, dla cieląt przeznaczono kojce pojedyncze i grupowe. Budynek jest nieogrzewany, wyposażony w instalację wodną, kanalizacyjną i energetyczną. Wentylacja odbywa się grawitacyjnie poprzez kominy wywiewne o przekroju kwadratowym.

Budynek 4. Olszowiec

Budynek jest parterowy, typu halowego, bez poddasza użytkowego, niepodpiwniczony charakteryzujący się symetrycznym stropodachem (rys. D.4). W hali zwierząt wyodrębniono korytarz paszowy, legowiska dla krów oraz kanały gnojowe. W hali wydzielone jest pomieszczenie na mleko, pomieszczenia socjalno-sanitarne, pomieszczenie na pasze oraz miejsce na dwa roboty udojowe. Konstrukcję budynku stanowi szkielet stalowy oparty na słupach z rur stalowych. Ściany osłonowe są wielowarstwowe, dach oparty jest na ryglach stalowych oraz belkach drewnianych, utrzymujących pokrycie i warstwy ocieplające. Budynek jest nieogrzewany, wyposażony w instalację wodną, kanalizacyjną i energetyczną. Wentylacja w budynku jest grawitacyjna, wywiew powietrza odbywa się poprzez szczeliny kalenicowe, a nawiew powietrza przez otwory nawiewne usytuowane w ścianach bocznych pod okapem.

Budynek 5. Ossowa

Budynek jest parterowy, typu halowego, bez poddasza użytkowego (rys. D.5). Jest niepodpiwniczony i przykryty niesymetrycznym stropodachem. W hali zwierząt wyodrębniono korytarz paszowy, legowiska dla krów oraz kanały gnojowe. W hali wydzielona jest część udojowa, pomieszczenie na mleko oraz pomieszczenia socjalno-sanitarne. Konstrukcję budynku stanowi szkielet stalowy oparty na słupach z rur stalowych. Zewnętrzne ściany osłonowe są warstwowe, dach oparty na ryglach stalowych oraz belkach drewnianych

utrzymujących pokrycie i warstwy ocieplające. Budynek jest nieogrzewany, wyposażony w instalację wodną, kanalizacyjną i energetyczną. Wentylacja budynku jest grawitacyjna, powietrze wywiewane jest przez szczeliny kalenicowe, natomiast doprowadzane przez otwory nawiewne usytuowane w ścianach bocznych pod okapem.

Budynek 6. Przegaliny Duże

Budynek jest typu halowego, bez poddasza użytkowego, parterowy, niepodpiwniczony z niesymetrycznym stropodachem (rys. D.6). W hali zwierząt wydzielono korytarz paszowy, legowiska dla krów oraz kanały gnojowe. W północnej części obiektu wydzielona jest hala udojowa, pomieszczenie na mleko oraz pomieszczenia socjalno-sanitarne. Konstrukcję budynku stanowi szkielet stalowy oparty na słupach z rur stalowych. Ściany zewnętrzne są wielowarstwowe, dach oparty jest na ryglach stalowych oraz belkach drewnianych utrzymujących pokrycie i warstwy ocieplające. Budynek jest nieogrzewany, wyposażony w instalację wodną, kanalizacyjną i energetyczną. W budynku przewidziano wentylację grawitacyjną, wywiew powietrza następuje przez szczeliny kalenicowe, zaś nawiew przez otwory usytuowane w ścianach bocznych pod okapem.

Budynek 7. Turów

Budynek jest niepodpiwniczony, parterowy, typu halowego, bez poddasza użytkowego i przykryty jest niesymetrycznym stropodachem (rys. D.7). W hali zwierząt wyodrębniono przejazdowy korytarz paszowy, legowiska dla krów oraz kanały gnojowe. W budynku wydzielona jest hala udojowa, paszarnia, pomieszczenie na mleko oraz pomieszczenia socjalno-sanitarne. Konstrukcja budynku jest murowana z trzema rzędami słupów stalowych w środku. Budynek jest nieogrzewany oraz wyposażony w instalację wodną, kanalizacyjną i energetyczną. Wentylacja budynku jest grawitacyjna, powietrze wywiewane jest przez szczeliny kalenicowe, a świeże powietrze doprowadzane jest przez otwory nawiewne usytuowane w ścianach bocznych pod okapem.

Budynek 8. Żerocin

Budynek jest typu halowego, bez poddasza użytkowego, parterowy, niepodpiwniczony z symetrycznym stropodachem (rys. D.8). W budynku zastosowano stanowiskowy system utrzymania zwierząt, hala zwierząt posiada centralny korytarz paszowy, dwa rzędy stanowisk dla krów oraz kanały gnojowe. Do prostokątnej hali głównej przylega pomieszczenie na mleko oraz pomieszczenia socjalno-sanitarne. Wentylacja budynku jest grawitacyjna, wywiew powietrza odbywa się przez pięć okrągłych kanałów wywiewnych. Powietrze jest nawiewane przez otwory okienne usytuowane w ścianach bocznych budynku. Budynek jest nieogrzewany, wyposażony w instalację wodną, kanalizacyjną i energetyczną.

Budynek 9. Żeszczynka

Budynek jest parterowy, niepodpiwniczony, typu halowego, bez poddasza użytkowego, a w konstrukcji uwzględniono niesymetryczny stropodach (rys. D.9). W prostokątnej hali zwierząt wyodrębniono korytarz paszowy, legowiska dla krów oraz kanały gnojowe. W hali znajdują się dwa roboty udojowe. Pomieszczenie na mleko oraz pomieszczenia socjalno-sanitarne znajdują się w budynku przyległym do hali zwierząt. Konstrukcję budynku stanowi szkielet stalowy oparty na słupach z rur stalowych. Zewnętrzne ściany osłonowe są wielowarstwowe, dach wsparty jest na ryglach stalowych oraz belkach drewnianych utrzy-

mujących pokrycie i warstwy ocieplające. Budynek jest nieogrzewany, wyposażony w instalację wodną, kanalizacyjną i energetyczną. Wentylacja budynku jest grawitacyjna, wywiew powietrza następuje przez szczeliny kalenicowe, natomiast doprowadzane jest przez otwory nawiewne usytuowane w ścianach bocznych pod okapem.

Budynek 10. Żulice

Budynek jest typu halowego, bez poddasza użytkowego, parterowy, niepodpiwniczony z niesymetrycznym stropodachem (rys. D.10). W hali zwierząt wyodrębniono korytarz paszowy, legowiska dla krów oraz kanały gnojowe. W północnej części prostokątnej hali wydzielona jest część udojowa, pomieszczenie na mleko oraz pomieszczenia socjalno-sanitarne. Konstrukcję budynku stanowi szkielet stalowy oparty na słupach z rur stalowych. Ściany budynku są warstwowe, dach oparty jest na ryglach stalowych oraz belkach drewnianych utrzymujących pokrycie i warstwy ocieplające. Budynek jest nieogrzewany, wyposażony w instalację wodną, kanalizacyjną i energetyczną. W budynku zastosowano wentylację grawitacyjną, wywiew powietrza odbywa się przez szczeliny kalenicowe, zaś nawiew powietrza przez otwory usytuowane w ścianach bocznych pod okapem.

W tabelach 5.1-5.4 przedstawiono podstawowe informacje zbiorcze zawierające charakterystyki wykorzystywane do obliczeń komputerowego kształtowania mikroklimatu w opisanych budynkach inwentarskich. W tabeli 5.1 zestawiono wymiary budynków, które wykorzystywane zostały w modelach użytych do szacowania mikroklimatu. W zestawieniu uwzględniono typ budynku (halowy lub z poddaszem użytkowym), wymiary zewnętrzne budynku (długość D_B i szerokość S_B), powierzchnię hali zwierząt F_p oraz jej kubaturę V.

Tabela/Table 5.1.
Zestawienie podstawowych wymiarów budynków inwentarskich
List of basic dimensions of livestock buildings

Budynek	Typ	Długość × szerokość $D_B \times S_B$ (m × m)	Powierzchnia hali zwierząt F_p (m^2)	Kubatura hali zwierząt V (m^3)
Ciemno	halowy	36,30 × 23,50	778,20	3 355,65
Glinnik	z poddaszem użytkowym	32,14 × 12,77	331,50	1 128,30
Komarów	z poddaszem użytkowym	29,32 × 12,38	287,15	775,30
Olszowiec	halowy	40,00 × 32,00	1 168,35	6 688,00
Ossowa	halowy	48,56 × 22,60	1 030,40	4 445,00
Przegaliny	halowy	54,30 × 23,50	1 184,20	4 435,50
Turów	halowy	51,48 × 23,73	1 101,50	4 752,80
Żerocin	halowy	27,82 × 14,02	356,40	1 364,58
Żeszczynka	halowy	49,00 × 23,00	1 070,00	4 109,00
Żulice	halowy	36,30 × 23,50	778,20	3 355,65

Źródło: opracowanie własne

Tabela/Table 5.2.
Właściwości termiczne przegród zewnętrznych budynków
Thermal properties of external building barriers

Budynek	Elementy	Powierzchnia F (m^2)	Uśredniony współczynnik przenikania ciepła U ($W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$)
Ciemno	ściany	267,99	0,68
	okna	2,88	5,10
	drzwi	28,58	5,60
	dach	779,13	0,98
	świetlik	90,00	5,10
Glinnik	ściany	233,02	0,55
	okna	23,48	5,10
	drzwi	12,96	2,50
	strop	331,50	0,16
Komarów	ściany	198,39	0,45
	okna	19,44	5,1
	drzwi	14,58	2,5
	strop	287,15	0,16
Olszowiec	ściany	316,26	0,31
	okna	53,96	5,10
	drzwi	28,58	5,60
	dach	1248,00	0,57
	świetlik	108,00	5,10
Ossowa	ściany	296,72	0,55
	okna	1,68	5,10
	drzwi	55,35	5,60
	dach	960,00	0,42
Przegaliny Duże	ściany	331,08	0,68
	okna	2,88	5,10
	drzwi	28,58	28,58
	dach	1251,20	0,57
	świetlik	138,50	5,10
Turów	ściany	257,70	0,78
	drzwi	28,58	5,60
	dach	1120,08	0,57
	świetlik	115,92	5,10
Żerocin	ściany	173,75	0,52
	okna	7,47	5,10
	drzwi	61,40	2,50
	dach	378,00	0,57
Żeszczynka	ściany	277,10	0,55
	okna	2,38	5,10
	drzwi	57,40	5,60
	dach	1166,30	0,42
	świetlik	80,00	5,10
Żulice	ściany	267,99	0,68
	okna	2,88	5,10
	drzwi	28,58	5,60
	dach	779,13	0,98
	świetlik	90,00	5,10

Źródło: opracowanie własne

Tabela/Table 5.3.
Informacja o otworach wentylacyjnych
Information about ventilation openings

Budynek	Typ	Otwory wywiewne A_o (m^2)	Otwory nawiewne A_i (m^2)	Wysokość czynna H (m)
Ciemno	kalenicowa	16,6 (2 × 0,25 × 32,0)	11,49 (0,20 × 33,9 + 0,20 × 23,53)	3,45
Glinnik	4 kanały okrągłe ϕ=0,57 m	1,02	Okna	6,30
Komarów	4 kanały kwadratowe a=0,7 m	1,96	Okna	5,70
Olszowiec	kalenicowa	22,65 (2 × 0,38 × 29,80)	20,98 (0,30 × 38,24 + 0,30 × 31,70)	6,20
Ossowa	kalenicowa	18,8 (2 × 0,20 × 47,0)	11,7 (0,15 × 42 + 0,15 × 36)	3,20
Przegaliny Duże	kalenicowa	26,65 (2 × 0,25 × 53,30)	22,3 (0,25 × 50,5 + 0,25 × 38,75)	3,45
Turów	kalenicowa	19,84 (2 × 0,20 × 49,6)	24,48 (0,30 × 47,60 + 0,30 × 34,00)	3,50
Żerocin	5 kanałów okrągłych ϕ=0,5 m	0,98	Okna	2,20
Żeszczynka	kalenicowa	23,70 (2 × 0,30 × 39,50)	13,53 (2×0,17×39,80)	3,20
Żulice	kalenicowa	16,6 (2 × 0,25 × 32,0)	11,49 (0,20 × 33,9 + 0,20 × 23,53)	3,45

Źródło: opracowanie własne

W tabeli 5.4 przedstawiono obsadę zwierząt w budynkach w czasie wykonywania pomiarów mikroklimatu. Zestawienie zawiera informacje w podziale na kategorię produkcyjną zwierząt. Dla każdej grupy zaprezentowano średnią liczbę zwierząt oraz średnią wagę z okresów prowadzonych badań. Najdokładniejsze informacje odnośnie każdego zwierzęcia (jak bieżąca waga, dzień laktacji, dzień ciąży, dobowa wydajność mleczna) były dostępne w przypadku obory umiejscowionej w Olszowcu, dzięki automatycznemu systemowi udoju zwierząt.

Tabela/Table 5.4.
Obsada zwierząt w okresie pomiarów
Herd structure during the measurement period

Budynek	Kategoria zwierząt	Liczba zwierząt	Średnia waga (kg)	Wydajność (kg na dzień)
Ciemno	krowy	42	620	17
	jałówki	17	479	-
	cielęta	16	176	-
Glinnik	krowy	21-22	634-638	24
	jałówki	5-9	417-430	-
	cielęta	6-8	98-108	-
	bukaty	0-3	533	-
Komarów	krowy	36	620	28
	cielęta	8	120	-
Olszowiec	krowy	128	580	22,4
Ossowa	krowy	123-126	620	22,8-23
Przegaliny Duże	krowy	70	600	28
	jałówki	24	480	-
	cielęta	15	150	-
	bukaty	1	650	-
Turów	krowy	85	600	24
	jałówki	32	475	-
	cielęta	24	91	-
Żerocin	krowy	26	604	26
	jałówki	5	500	-
Żeszczynka	krowy	128	620	22
Żulice	krowy	43	550	24
	jałówki	18	433	-

Źródło: opracowanie własne

5.2. Metodyka badań i opis pomiarów mikroklimatu

W wykonanych badaniach przyjęto założenie, że przedziałem czasowym, w którym wykonywane były pomiary jest jedna doba, ale w większości przypadków pomiary wykonywane były w dłuższym czasie. Podstawową jednostką czasu, w której następował odczyt i automatyczna rejestracja wyników, był okres 300 sekund. Wynikało to z różnych możliwości programowania wszystkich urządzeń rejestrujących. Badania koncentrowały się na obserwacji temperatury i wilgotności powietrza, ale wykonano również pomiary prędkości przepływu powietrza w kanałach wywiewnych, ciśnienia atmosferycznego oraz prędkości i siły wiatru, a dla niektórych budynków zmierzono koncentrację dwutlenku węgla, amoniaku i siarkowodoru.

Tabela/Table 5.5.
Zakresy wartości parametrów mikroklimatu i warunków pogodowych w okresie pomiarów
The ranges of values of microclimate parameters and weather conditions during the measurement period

Budynek	Data	Miara	Temperatura (°C) wewnętrzna T_{Ci}	Temperatura (°C) zewnętrzna T_{Ci}	Wilgotność względna (%) wewnętrzna φ_i	Wilgotność względna (%) zewnętrzna φ_e
Ciemno	20-23. 12.2013	średnia	8,7	2,0	82,8	85,9
		zakres	5,6 – 10,9	-0,7 – 5,35	63,0 – 97,5	73,7 – 98,3
	27-30. 12.2013	średnia	10,9	4,7	86,4	86,6
		zakres	8,6 – 12,3	0,3 – 11,4	62,5 – 100	58 – 100
	3-6. 01.2014	średnia	10,4	4,7	93,2	93,6
		zakres	8,6 – 13,0	1,0 – 7,9	76,0 – 100	83,9 – 99,0
Glinnik	28.01-1.02.2014	średnia	5,2	-13,3	99,1	78,0
		zakres	2,6 – 7,7	-18,9 – -6,1	79,5 – 100	44,5 – 100
	25-30. 01.2013	średnia	8,0	-6,9	81,3	93,3
		zakres	4 - 12,4	-20,3 - 4,9	56,8 - 100	54,5 - 100
Komarów	26.04-28.04.2013	średnia	22,4	18,1	60,3	55,8
		zakres	18,8 - 26,3	8,3 - 29,5	30,0 - 86,3	17,5 – 98,0
Olszowiec	25.01.2014	średnia	1,9	-15,9	85,4	92,4
		zakres	-1 - 4,3	-19,8 - -13,0	74,5 - 99,5	82,5 - 99,5
Ossowa	08-15. 04.2011	średnia	12,8	6,8	68,5	72,6
		zakres	6,8 - 19,8	-0,6 - 13,5	36,8 - 100	35,5 - 100
	20-26. 01.2012	średnia	7,7	-0,3	92,6	88,3
		zakres	1,6 - 10,6	-5,6 - 2,8	64,2 - 100	53,5 - 100
Przegaliny	14.01.2014	średnia	8,9	-1,0	84,5	72,2
		zakres	5,4 – 11,0	-3,2 - 0,9	72,3 - 98,3	62,5 - 99,5
Turów	10-12. 12.2013	średnia	12,6	-0,1	87,7	87,1
		zakres	8,5 - 15,6	-3,6 - 2,2	61,0 – 96,0	65,0 – 99,0
Żerocin	20.11.2013	średnia	11,9	6,1	85,5	91,0
		zakres	10,0 - 13,8	1,7 - 11,7	77,0 – 95,0	74,0 – 99,0
Żeszczynka	05-08. 02.2012	średnia	9,5	-13,1	79,8	79,7
		zakres	7,2 - 11,8	-18 - -6,9	60,5 - 99,5	52,8 - 100
Żulice	13-16. 06.2013	średnia	23,4	21,9	78,1	64,8
		zakres	17,3 - 28,8	12,9 - 30,9	28,0 - 100	29,0 - 100

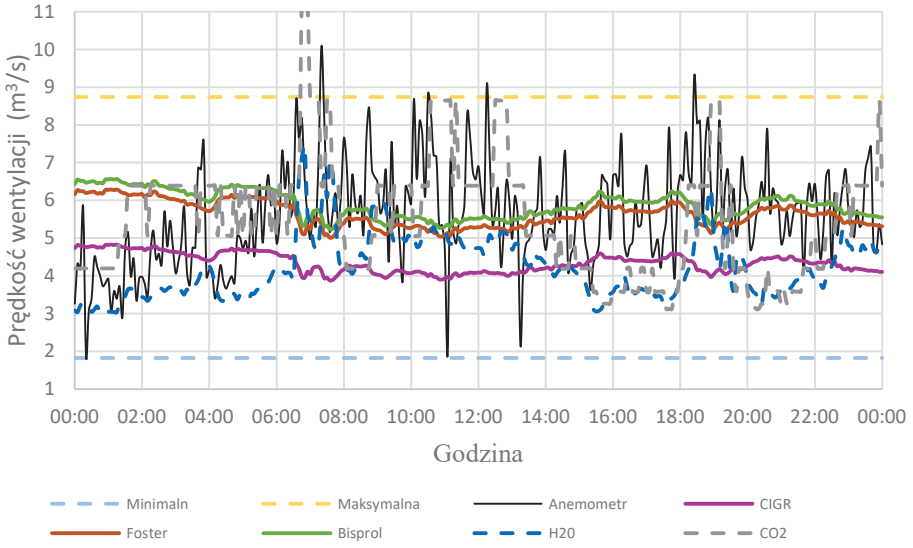
Źródło: opracowanie własne

Pomiary temperatury powietrza i wilgotności względnej w halach dla zwierząt i na zewnątrz wykonano przy pomocy czujników COMARK o zakresie operacyjnym od -40,0 do +70,0°C oraz dokładności dla temperatury 0,1ºC, a dla wilgotności względnej 0,5%. Prędkość powietrza w systemach wentylacyjnych mierzono przy użyciu anemometrów AVM-07 (zakres roboczy 0,0-45,0 $m \cdot s^{-1}$, dokładność 3%), natomiast wartości ciśnienia atmosferycznego i prędkości wiatru rejestrowano przy pomocy stacji pogodowej Viking AB 02049 (zakres mierzonego ciśnienia atmosferycznego 300÷1100 hPa). Pomiary prędkości przepływu powietrza w kanałach wentylacyjnych rejestrowane były przez urządzenia z częstotliwością 150 s. W celu zachowania założonej częstotliwości wszystkich pomiarów

oraz minimalizację przypadkowych podmuchów powietrza, do analiz przyjmowana była średnia z dwóch pomiarów w każdym przedziale czasowym, równym 300 s. Czujniki rejestrujące temperaturę i wilgotność powietrza w hali zwierząt i na zewnątrz rozmieszczane były w kilku różnych punktach umieszczonych na poziomie przebywania zwierząt (na wysokości ok. 1,5 m od podłogi), a do analiz przyjmowana była średnia z pomiarów.

Uzyskane w pomiarach uśrednione wartości temperatury powietrza i wilgotności zarówno wewnątrz hali dla zwierząt, jak i na zewnątrz budynku przedstawiono w tabeli 5.5. Dla każdego budynku i terminu badań podano wartości średnie z całego okresu oraz zakres uzyskanych wskazań.

Jednym z większych problemów podczas modelowania mikroklimatu było ustalenie właściwego poziomu wentylowanego powietrza. Podane przez różnych autorów metody oceny szybkości wentylacji powietrza w budynkach inwentarskich (rozdział 2.5) zostały użyte do porównania oszacowanych wyników na przykładzie pomiarów uzyskanych dla budynku położonego w miejscowości Przegaliny Duże (badania wykonane w okresie zimowym 14 stycznia 2014r.). W tym przypadku w badaniach uwzględniono pomiar różnych parametrów fizyczno-chemicznych, dzięki czemu otrzymano większą liczbę możliwych metod szacowania ilości wentylowanego powietrza. Otrzymane wielkości zostały przedstawione na wykresie 5.1. Serie oznaczone liniami ciągłymi wskazują na metody oparte o ciśnienie grawitacyjne, natomiast liniami kreskowanymi naniesiono oszacowania wynikające z metabolizmu zwierząt i konieczności odprowadzenia nadmiaru szkodliwych gazów.



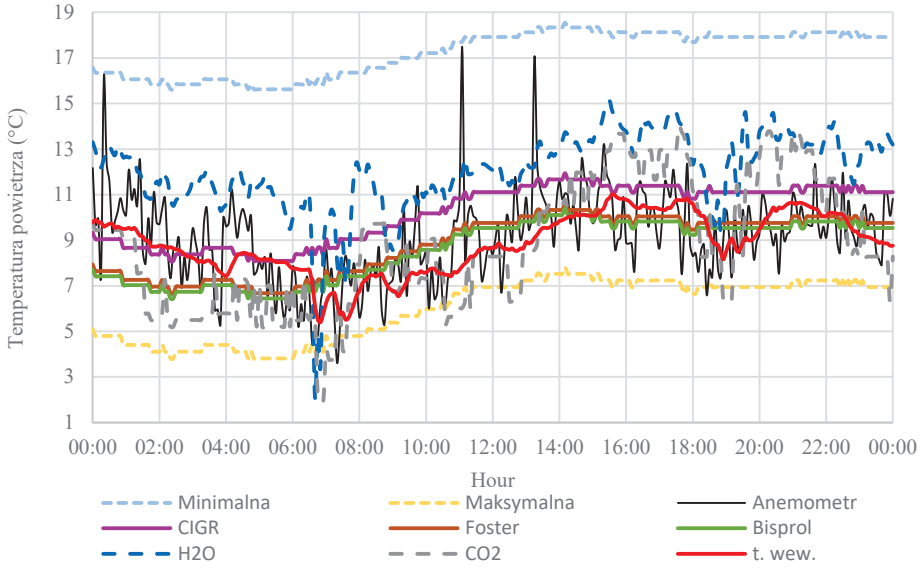
Rys. 5.1. Oszacowania szybkości wentylacji grawitacyjnej ($m^3 \cdot s^{-1}$) wg różnych metod obliczania w miejscowości Przegaliny Duże

Fig. 5.1. Estimation of gravity ventilation rates ($m^3 \cdot s^{-1}$) according to different calculation methods in Przegaliny Duże

Źródło: opracowanie własne

Wyznaczone według poszczególnych wzorów wartości generalnie mieszczą się w zakresie zalecanych szybkości wentylacji. Występują jednak różnice pomiędzy oszacowanymi wartościami. Analizując wykres można odczytać, że najniższe wartości uzyskano dla metody opartej o kryterium H_2O (4,24 $m^3 \cdot s^{-1}$), a najwyższą dla metody proponowanej przez BISPROL (5,89 $m^3 \cdot s^{-1}$).

Następnie, omówione metody szacowania szybkości wentylacji grawitacyjnej zostały użyte do wyznaczenia start ciepła za pomocą modelu matematycznego, używanego do wyznaczenia dynamicznych zmian temperatury wewnętrznej w pomieszczeniach dla zwierząt. Oszacowane wartości zostały porównane z rzeczywistymi wskazaniami (rysunek 5.2).



Rys. 5.2. Oszacowania temperatury (℃) w hali zwierząt wg różnych metod określania szybkości wentylacji grawitacyjnej w miejscowości Przegaliny

Fig. 5.2. Estimation of temperature (℃) in the animal hall according to different methods of determining the gravitational ventilation rate in Przegaliny

Źródło: opracowanie własne

Niewłaściwe oszacowanie wentylacji wpływa na kształtowanie temperatury w hali dla zwierząt. Dobre dopasowania dają metody związane z kryterium wymiany pary wodnej i dwutlenku węgla. W tym przypadku w modelach trzeba uwzględniać ograniczenia uzyskanych wartości, w celu osiągnięcia zbieżności rozwiązania oraz uwzględniać modele dynamicznych zmian wydzielania tych składników przez zwierzęta. Dlatego do szacowania wentylacji grawitacyjnej użyto metody opartej o wymiary otworów wentylacyjnych CIGR (wzór 2.45), która umożliwia uwzględnienie wpływu otwarcia otworów nawiewnych. Wentylacja grawitacyjna uzupełniona została także o oddziaływanie wiatru wg wzoru (2.49).

5.3. Opis aplikacji komputerowej

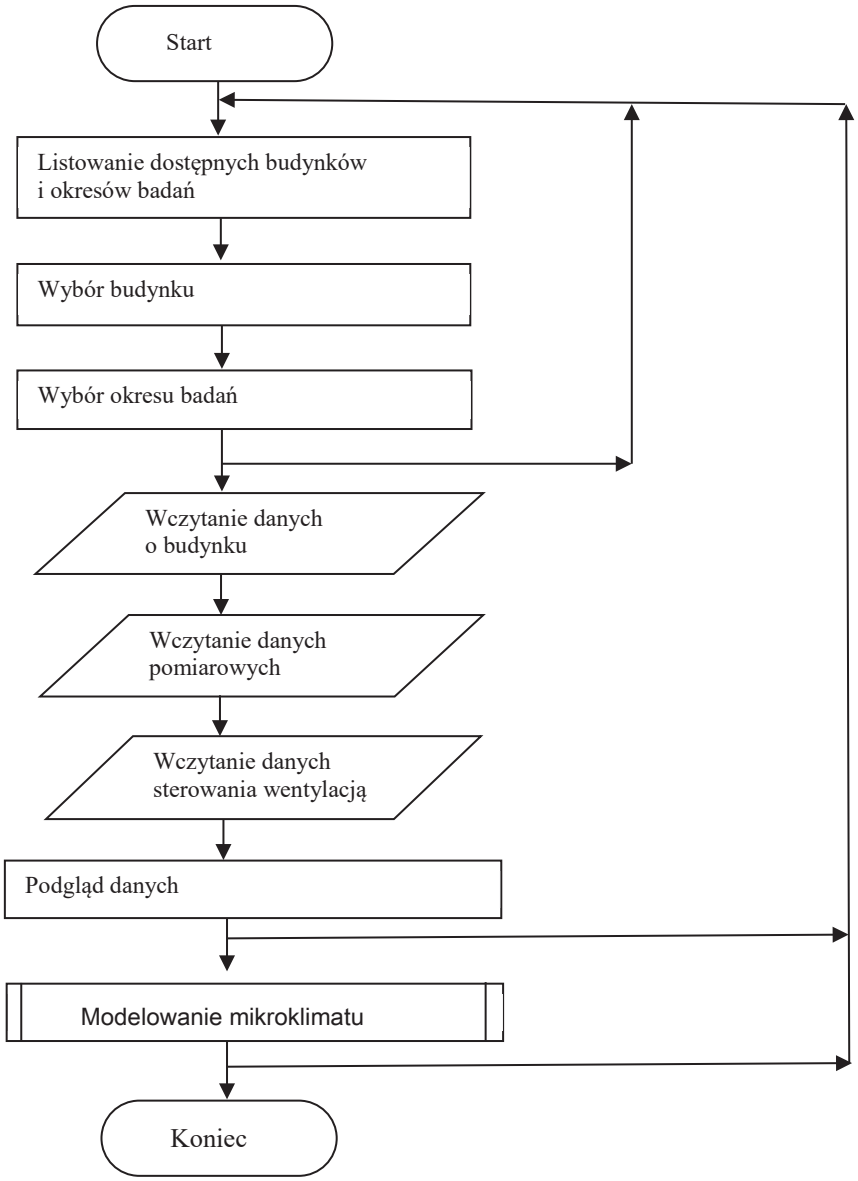
W celu weryfikacji zaproponowanych rozwiązań kształtowania mikroklimatu w budynkach dla krów stworzono aplikację komputerową, ułatwiającą oszacowanie temperatury oraz wilgotności wewnątrz pomieszczeń dla zadanych danych wejściowych. Danymi wymaganymi są: parametry klimatu zewnętrznego, struktura obsady zwierząt, wymiary budynku oraz wielkości otworów nawiewnych i wywiewnych. Aplikacja została opracowana z wykorzystaniem oprogramowania naukowo-inżynierskiego MathWorks MatLab w wersji 2014a (Brzóska i Dorobczyński, 2005; Martinez i Martinez, 2015). Aplikacja zaprojektowana jest w technologii GUI (ang. *Graphical User Interface*) umożliwiającej budowanie graficznych formularzy, poprzez które użytkownik korzystający z systemu może dokonać wyboru budynku do analizy, wskazać swoje wybory oraz wykonać odpowiednie akcje, poprzez zaznaczanie czy wciśnięcie obiektów na formularzu takich jak: listy, pola wyboru, przyciski.

Uproszczony schemat blokowy działania aplikacji został przedstawiony na rysunku 5.3. Na kolejnych dwóch schematach przedstawiono kolejne instrukcje związane z wyborem preferowanego modelu matematycznego i ustaleniem parametrów symulacji (rysunek 5.4) oraz głównego algorytmu obliczeń zmian parametrów mikroklimatu w budynku inwentarskim (rysunek 5.5).

Jak przedstawiono na schemacie w pierwszej kolejności aplikacja do modelowania mikroklimatu w budynku inwentarskim pobiera od użytkownika informacje o potrzebnych danych wejściowych. Dane te muszą być przygotowane w odpowiedniej strukturze katalogów i plików. Do wprowadzenia danych można użyć formatu tekstowego CSV lub formatu programu Microsoft Excel XLSX.

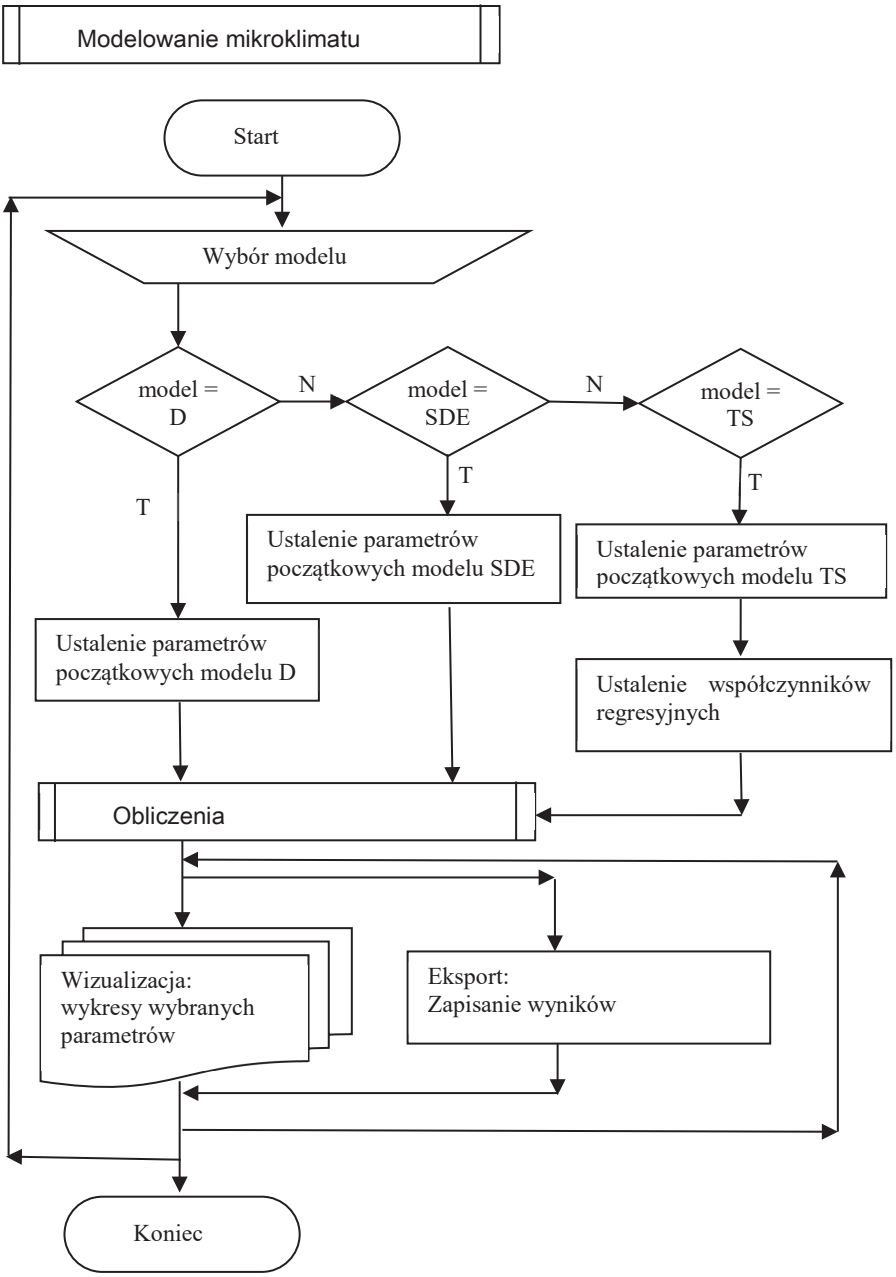
Dane wejściowe obejmują następujące zbiory informacji:

– BUDYNEK: służący do opisu struktury budynku, obejmuje on informacje o: typie budynku, jego wymiarach, kubaturze, wysokości aktywnej, wielkości otworów wlotowych i wylotowych, powierzchni ścian, okien i drzwi oraz współczynników przenikania ciepła,
– OBSADA: definiujący strukturę stada, zawiera informacje o poszczególnych zwierzętach: kategoria produkcyjna, masa, produkcja mleka. Dane te mogą być podane indywidualnie do każdego zwierzęcia lub zbiorczo poprzez określenie liczby krów z każdej kategorii,
– POMIARY: zawierający uśrednione pomiary temperatury i wilgotności powietrza zewnętrznego otaczającego budynek inwentarski oraz prędkość wiatru. Ten zbiór danych umożliwia także wprowadzenie zmierzonych uśrednionych wartości parametrów mikroklimatu w hali dla zwierząt. Umożliwia to weryfikację modeli z danymi rzeczywistymi. Te dane są wymagane w przypadku wykorzystania modelu opartego o teorię szeregów czasowych,
– WENTYLACJA: służący do sterowania wielkością otwarcia poszczególnych otworów wlotowych i wylotowych, takich jak kominy wentylacyjne, stopień otwarcia kalenicy, drzwi oraz okien. Wielkości te podawane są jako procent odsłonięcia otworu w stosunku do jego wielkości fizycznej. Zbiór umożliwia odzwierciedlenie rzeczywistych warunków, w których dokonywano pomiarów.



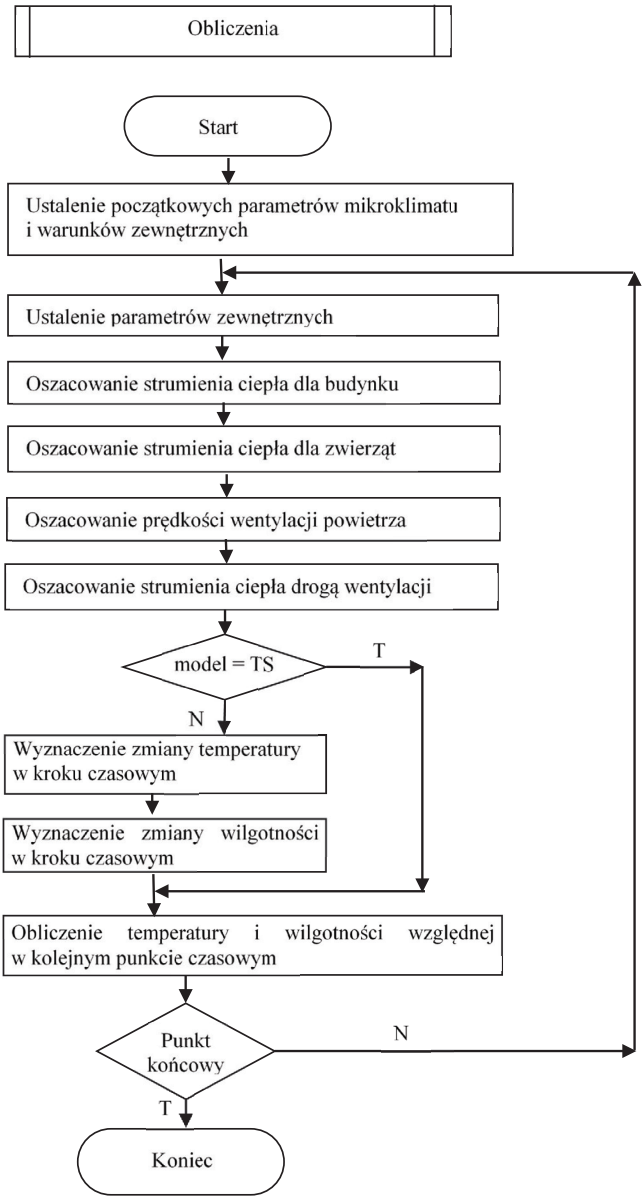
Rys. 5.3. Schemat blokowy aplikacji wspomagającej analizę parametrów mikroklimatu
Fig. 5.3. Block diagram of the application supporting the analysis of microclimate parameters

Źródło: opracowanie własne



Rys. 5.4. Schemat blokowy etapu modelowania mikroklimatu
Fig. 5.4. Block diagram of the microclimate modeling stage

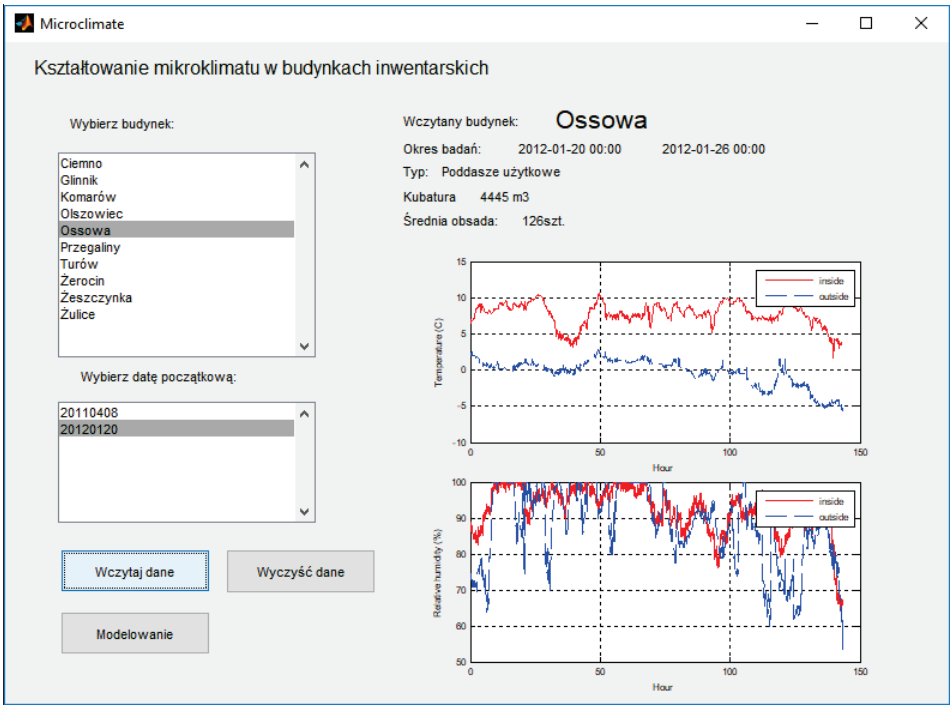
Źródło: opracowanie własne



Rys. 5.5. Schemat blokowy głównych obliczeń parametrów mikroklimatu
Fig. 5.5. Block diagram of the main calculations of the microclimate parameters

Źródło: opracowanie własne

Opracowany system komputerowy oparty jest o formularze umożliwiające użytkownikowi wybór preferowanego zbioru danych oraz modelu oraz parametrów symulacji. Na rysunku 5.6 zaprezentowano wygląd głównego okna aplikacji. Na formularzu umieszczone są m.in. dwie listy, które generowane są automatycznie na podstawie struktury plików w katalogu danych. Pomiary z każdego budynku umieszczone są w oddzielnych katalogach. W każdym z tych katalogów w podkatalogach zapisane są dane z poszczególnych terminów przeprowadzonych pomiarów. Z dostępnych list użytkownik ma możliwość wybrania do symulacji obory oraz daty terminu. Po wczytaniu danych w prawej części okna można zapoznać się z podglądem najważniejszych danych o budynku i pomiarach.



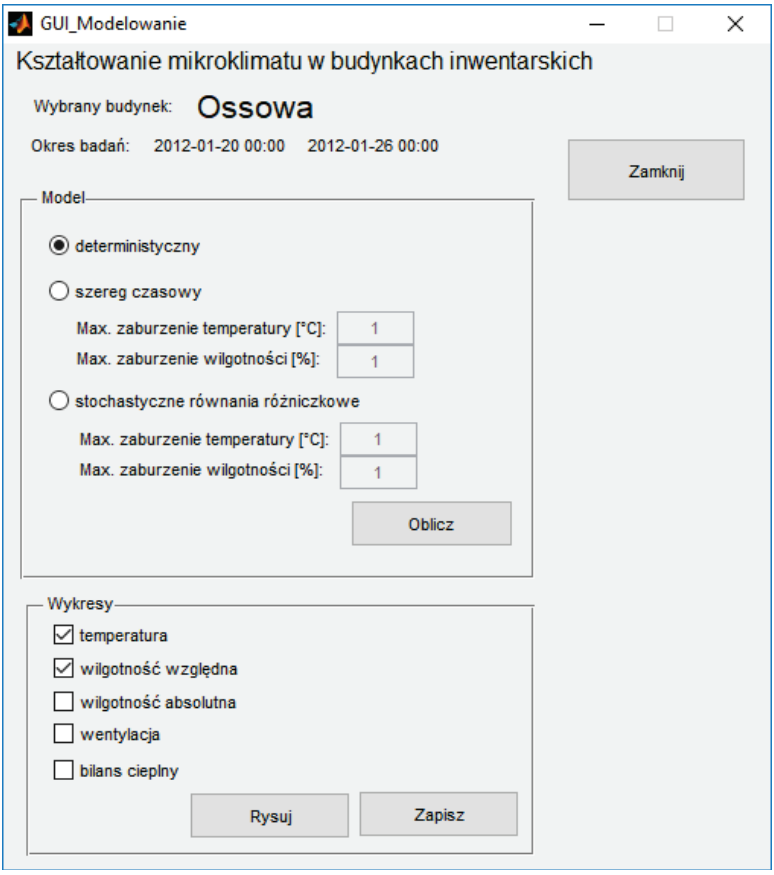
Rys. 5.6. Główne okno aplikacji kształtowania mikroklimatu
Fig. 5.6. The main window of the application for developing microclimate

Źródło: opracowanie własne

Po wczytaniu danych o budynku oraz informacji o zakładanych czynnikach klimatu zewnętrznego kolejnym etapem jest przejście do okna z wyborem modelu do symulacji mikroklimatu w budynku dla zwierząt (rysunek 5.7). Przy pomocy pól opcji można wskazać model matematyczny, który zostanie użyty do symulacji. W przypadku modelu opartego o szeregi czasowe, prognoza wyznaczana jest dla ostatniego dnia obserwacji. Na podstawie początkowych danych (co najmniej 1 doba) wyznaczane są współczynniki szeregu do prognozowania parametrów mikroklimatu dla ostatniego dnia obserwacji. Dodatkowo w przy-

padku wyboru jednego z modeli stochastycznych użytkownik może wskazać zakładaną wielkość zaburzeń losowych w odniesieniu do przyjętego kroku czasowego.

W dolnej części tego formularza znajduje się panel służący do wskazania preferencji w stosunku do prezentacji wyników w postaci graficznej lub eksportu do pliku zewnętrznego. Przed wykonaniem symulacji kształtowania mikroklimatu w hali dla zwierząt, według wskazanego modelu, dolny panel formularza jest nieaktywny. Po wykonanych obliczeniach uaktywnia się on i umożliwia wizualizację wybranych wyników w postaci wykresów. Możliwy jest również zapis oszacowanych parametrów mikroklimatu do zewnętrznego pliku wynikowego, który może być użyty do dalszych analiz porównawczych między różnymi modelami, jak również wykonania testów dobroci dopasowania modelu.

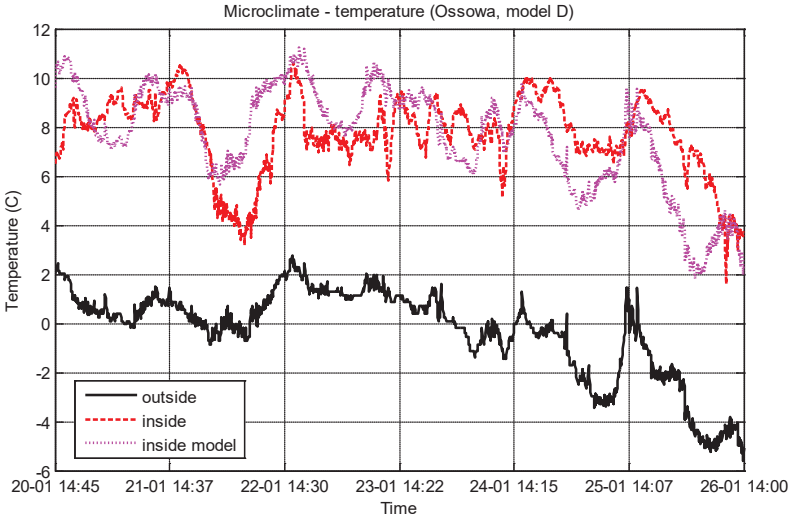


Rys. 5.7. Formularz wyboru modeli wyznaczania parametrów mikroklimatu
Fig. 5.7. The form of selecting models for determining microclimate parameters

Źródło: opracowanie własne

Na rysunkach 5.8-5.12 przedstawiono przykładowe wykresy generowane przez aplikację po wykonaniu symulacji parametrów mikroklimatów, według wybranego modelu dla jednego z analizowanych budynków (w miejscowości Ossowa dla badań przeprowadzonych w okresie zimowym 20.01.2012–28.01.2012). Umożliwiają one podgląd wyznaczonych parametrów według wybranego modelu, jak również odniesienie ich do wartości otrzymanych na podstawie przeprowadzonych w budynkach inwentarskich pomiarów parametrów mikroklimatu. W zależności od wybranego typu modelu oraz dostępnych danych pomiarowych wprowadzonych do plików z danymi wejściowymi, możliwe jest odniesienie do rzeczywistych wartości. W przypadku, gdy niedostępne są dane pomiarowe dla powietrza wewnętrznego w budynku, otrzymane wyniki mogą posłużyć jedynie jako prognoza przyszłych warunków, bez możliwości weryfikacji ze stanem faktycznym.

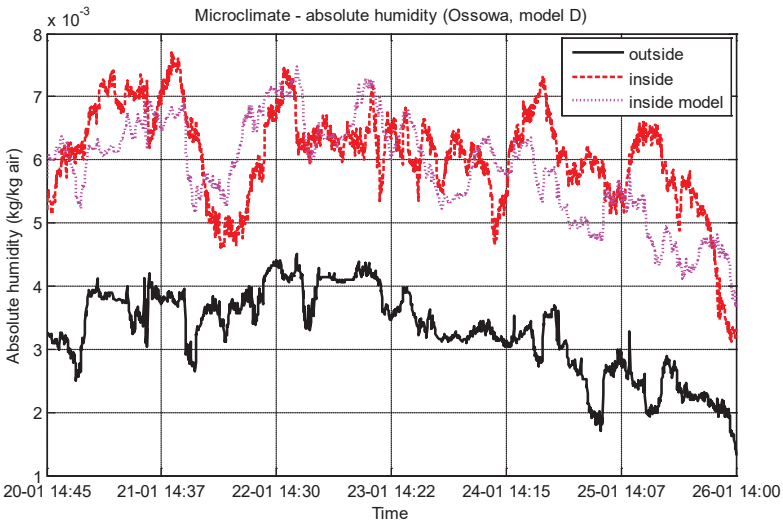
Na rysunku 5.8 przedstawiono oszacowany przebieg zmian temperatury powietrza w pomieszczeniu dla zwierząt. W celu odniesienia otrzymanych wartości do rzeczywistych lub zakładanych warunków zewnętrznych, na wykresie kreślony jest także przebieg temperatury powietrza na zewnątrz budynku oraz w celach walidacyjnych – rzeczywisty przebieg temperatury w rozpatrywanym pomieszczeniu, jeżeli takie dane są dostępne w pliku danych.



Rys. 5.8. Przykładowy wykres zmian temperatury
Fig. 5.8. An example graph of temperature changes

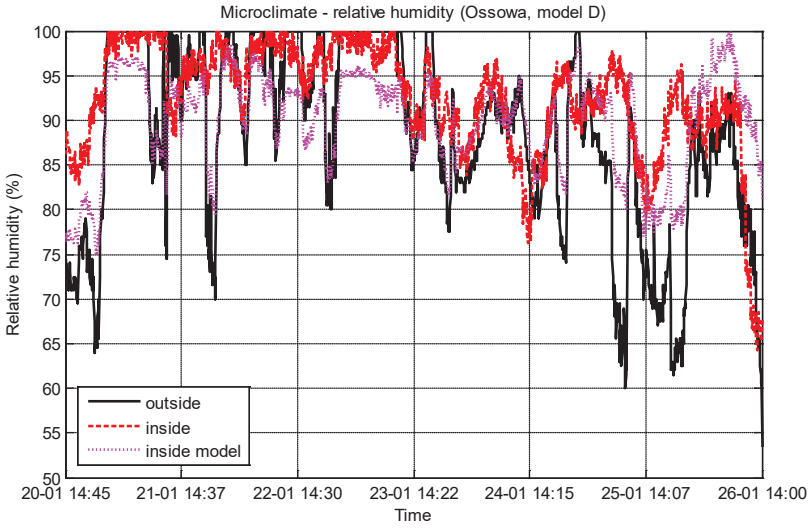
Źródło: opracowanie własne

Kolejne wykresy dostępne z poziomu aplikacji (rysunki 5.9 i 5.10) przedstawiają przewidywany przebieg wilgotności powietrza w hali zwierząt. Wykresy te odnoszą się odpowiednio do wartości wilgotności absolutnej masowej oraz wilgotności względnej odniesionej do maksymalnego nasycenia powietrza, przy danej temperaturze. Podobnie jak w przypadku temperatury, na generowanym wykresie prezentowane są dodatkowo rzeczywiste zmiany wilgotności powietrza, otrzymane w przeprowadzonych pomiarach, zarówno dla powietrza wewnątrz hali, jak i na zewnątrz budynku.



Rys. 5.9. Przykładowy wykres zmian wilgotności absolutnej
Fig. 5.9. An example graph of absolute humidity changes

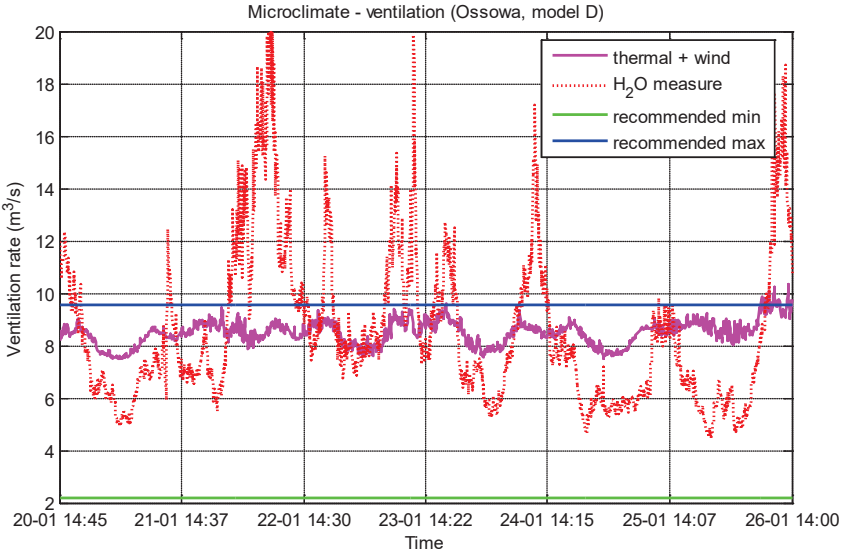
Źródło: opracowanie własne



Rys. 5.10. Przykładowy wykres zmian wilgotności względnej
Fig. 5.10. An example graph of relative humidity changes

Źródło: opracowanie własne

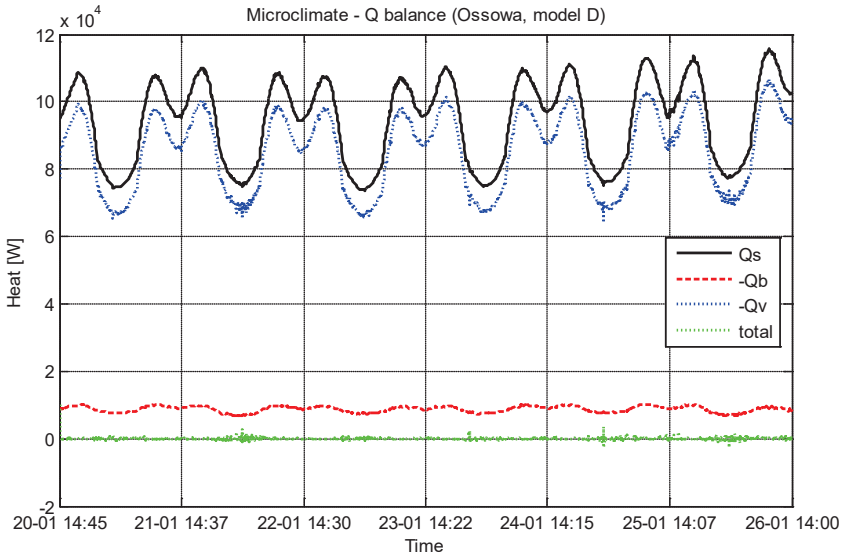
Oprócz przedstawienia najbardziej istotnych parametrów mikroklimatu w budynku, jakimi są temperatura powietrza oraz jego wilgotność względna, aplikacja umożliwia również wygenerowanie wykresów umożliwiających dodatkową analizę istotnych elementów składowych bilansu cieplnego i wilgotnościowego, przy określaniu warunków w hali dla zwierząt. Pierwszy z nich umożliwia wizualizację szybkości wymiany powietrza w hali (rysunek 5.11). Oszacowanie jej poziomu wydaje się być bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na stan mikroklimatu. Nieodpowiednie oszacowanie ilości wymienianego powietrza znacząco wpływa na oszacowanie zarówno temperatury panującej w hali dla zwierząt, jak również ilości wilgoci w powietrzu. Oprócz używanego w aplikacji sposobu wyznaczania strumienia wymienianego powietrza (metoda CIGR), na wykresie są prezentowane dodatkowo oszacowania wynikające z innych metod. Przede wszystkim są to: rekomendowany strumień minimalny w okresie zimowym, rekomendowany maksymalny w okresie letnim w przeliczeniu na obsadę zwierząt przebywających w budynku oraz oszacowany na podstawie pomiarów temperatury i wilgotności powietrza wewnętrznego i zewnętrznego, strumień potrzebnego powietrza wentylowanego wyznaczony na podstawie kryterium pary wodnej.



Rys. 5.11. Przykładowy wykres oszacowanych zmian szybkości wentylacji
Fig. 5.11. An example graph of estimated air ventilation rates

Źródło: opracowanie własne

Aplikacja oferuje również możliwość graficznej oceny udziału poszczególnych składowych w ogólnym bilansie ciepła. Na rysunku 5.12 zaprezentowano przykładowy wykres, na którym można zaobserwować ilość ciepła wydzielanego przez zwierzęta (Q_{zj}) oraz ilości strat ciepła, poprzez przenikanie przez przegrody zewnętrzne (Q_b) i drogą wentylacji (Q_v).



Rys. 5.12. Przykładowy wykres przedstawiający elementy składowe bilansu cieplnego
Fig. 5.12. An example chart showing the components of a heat balance

Źródło: opracowanie własne

6. OMÓWIENIE WYNIKÓW SYMULACJI KOMPUTEROWYCH

Uzyskane wyniki oszacowania parametrów mikroklimatu wewnątrz badanych budynków dla bydła mlecznego, z wykorzystaniem zaprojekowanej aplikacji komputerowej, zostały poddane ocenie, poprzez weryfikację z danymi rzeczywistymi pomierzonymi w budynkach. Ocena modeli koncentrowała się w trzech aspektach: badaniu zbieżności metod (szczególnie dla modeli bazujących na równaniach różniczkowych), analizie porównawczej pomiędzy trzema przedstawionymi sposobami modelowania (model deterministyczny, szeregi czasowe i stochastyczne równania różniczkowe) oraz badaniu wpływu wielkości zaburzania modelu deterministycznego poprzez zmienne losowe w modelach stochastycznych.

6.1. Metodyka analizy statystycznej otrzymanych wyników

Weryfikacja stosowanego modelu matematycznego polega na ocenie jego zdolności opisu danego procesu lub zjawiska. Ocena ta musi być oparta o pewne kryterium weryfikacji jakości zaproponowanego modelu. Dostępnych jest wiele kryteriów, które można zastosować w praktyce, jednakże wybór odpowiedniego kryterium wymaga zrozumienia jego natury, uświadomienia wrażliwości na niepoprawne wyniki oraz kwestii interpretacji osiąganych wartości.

W niniejszej pracy do oceny poprawności modeli użyto takich miar błędu jak: maksymalny błąd absolutny (AE_m), średni błąd absolutny (*MAE*), średni błąd kwadratowy (*MSE*), błąd średni (*RMSE*), obciążenie (*BIAS*), współczynnik korelacji (*r*) oraz współczynnik determinacji (R^2). Definicje wymienionych współczynników przedstawiono w załączniku A. Podano tam również ich interpretację oraz problemy z wykorzystaniem do oceny modelu.

Do porównania znaczenia poszczególnych miar oceny dokładności dopasowania modeli do danych pomiarowych wykonano wielowymiarową analizę składowych głównych PCA (ang. *Principal Component Analysis*), mającą na celu wybranie najbardziej informacyjnych kryteriów. Metoda ta zastosowana została także do określenia zależności miar dopasowania modeli od takich parametrów jak: kubatura pomieszczenia, wysokość aktywna, liczba dużych jednostek produkcyjnych (DJP) oraz średniej temperatury (T_o) i wilgotności powietrza (φ_o) zewnętrznego otaczającego budynek. Ze względu na różne skale badanych zmiennych do wyznaczenia składowych głównych użyto macierzy korelacji, która obrazuje zależności między poszczególnymi cechami. Analizę wykonano w programie statystycznym Dell Statistica (wersja 13.1).

6.2. Analiza zbieżności i stabilności rozwiązań numerycznych dla zastosowanych modeli matematycznych

Jak przedstawiono w rozdziale 4.3 stochastyczne równania różniczkowe pozwalają na rozszerzenie modelu deterministycznego, opisującego przebieg zmian parametrów mikroklimatu w budynku inwentarskim o elementy związane z występowaniem losowych zaburzeń zachodzących procesów. Nietrudno sobie jednak uzmysłowić, że wprowadzona

losowość zaburzeń nie może przewyższyć głównych czynników opisujących zależności fizyko-chemiczne, które odpowiadają za trend zmian wartości parametrów.

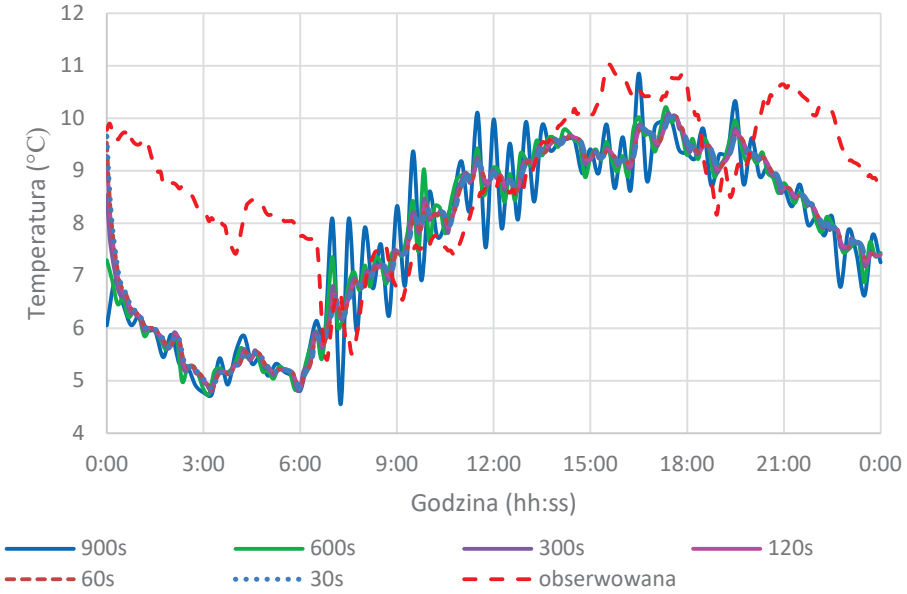
W tym podrozdziale przedstawiono wyniki symulacji mających na celu zbadanie numerycznej zbieżności modelu deterministycznego i stochastycznych użytych do oszacowania wartości parametrów mikroklimatu. Szczególnie dla modeli opartych o równania różniczkowe, zwykłe i stochastyczne, duże znaczenie dla zbieżności ma przyjęty krok pomiędzy kolejnymi punktami czasowymi. Zbyt duże odstępy czasowe pomiędzy kolejnymi pomiarami mogą wpłynąć na brak zbieżności rozwiązania numerycznego do rozwiązania dokładnego. Z kolei przyjęcie zbyt małego kroku czasowego prowadzi do znacznego wydłużenia obliczeń, a nie gwarantuje większej dokładności. Drogą kompromisu należy określić optymalny krok, gwarantujący zarówno zbieżność metody numerycznej i relatywnie krótki czas obliczeń. Kolejnym istotnym problemem w teorii równań różniczkowych, oprócz zbieżności rozwiązania, jest stabilność metody, czyli dążenie do sytuacji, że otrzymane rozwiązanie jest bliskie dokładnemu, także dla długiego okresu obliczeń.

W prowadzonych badaniach podstawowa częstotliwość przeprowadzonych pomiarów parametrów mikroklimatu w budynkach i klimatu zewnętrznego wynosiła 300 s (5 minut). Otrzymane wyniki dla tego okresu porównano z rezultatami otrzymanymi dla krótszych i dłuższych okresów, a mianowicie wynoszących 30, 60, 120, 600 i 900s. W przypadku krótszych okresów wartości parametrów interpolowano na podstawie rzeczywistych wielkości stosując interpolację funkcjami sklejanymi.

W modelach stochastycznych ze względu na występowanie losowych czynników, otrzymane rozwiązanie za każdym razem jest inne. W związku z tym do oceny jakości dopasowania modelu dla każdej ustalonej wielkości zaburzenia symulację powtarzano 10-krotnie, otrzymując różne oszacowania przebiegu zmian parametrów mikroklimatu, a co za tym idzie zakresy poszczególnych miar dopasowania modelu.

Na wykresie 6.1 przedstawiono przykładowy wpływ długości kroku czasowego na poprawność oszacowania przebiegu zmian temperatury powietrza według modelu deterministycznego. Analiza wykonana została na podstawie danych z pomiarów zmierzonych 14 stycznia 2014 dla budynku w miejscowości Przegaliny Duże. W przypadku dwóch najdłuższych kroków czasowych 600 s i 900 s wyraźnie można zauważyć pojawiające oscylacje dookoła głównego trendu, wyznaczonego przy zastosowaniu krótszych odstępów czasowych, co świadczy o problemach z uzyskaniem zbieżności rozwiązania. Potwierdzają to dane liczbowe otrzymane dla współczynników opisujących dopasowanie modelu (tabela 6.1). Dla dłuższych kroków czasowych większe są wartości błędów i mniejsze współczynniki korelacji. Biorąc pod uwagę wyniki otrzymane dla wszystkich budynków, zarówno w przypadku szacowania zmian temperatury jak i wilgotności powietrza, generalnie można stwierdzić, że najczęściej wystarczającym krokiem czasowym, gwarantującym stabilność modelu deterministycznego, było 300 s, co pokrywa się z częstotliwością zarejestrowanych pomiarów. Jedynie w przypadku pomiarów przeprowadzonych w miejscowości Komarów, przy takim kroku czasowym, zaobserwowano charakterystyczne oscylacje świadczące o niedokładności oszacowania. W przypadku niektórych budynków (Glinnik, Olszowiec, Żeszczynka) dopuszczalnym krokiem było nawet 900 s, ale w większości przypadków taki krok czasowy prowadził do całkowitej niestabilności modelu (o czym świadczą uzyskiwane wartości temperatury powyżej 100ºC, czy ujemna wilgotność powietrza). Dlatego aby zagwarantować stabilność obliczeń, a jednocześnie niepotrzebnie nie wydłużać czasu obli-

czeń, dla wszystkich budynków i okresów badań za podstawowy krok w analizach przyjęto 120 s.



Rys. 6.1. Porównanie stabilności obliczania temperatury powietrza według modelu deterministycznego dla różnych kroków czasowych (wyniki dla budynku w Przegalinach Dużych)

Fig. 6.1. Comparison of the estimation stability of air temperature by the deterministic model for different time steps (results for the building in Przegaliny Duże)

Źródło: opracowanie własne

Tabela/Table 6.1.

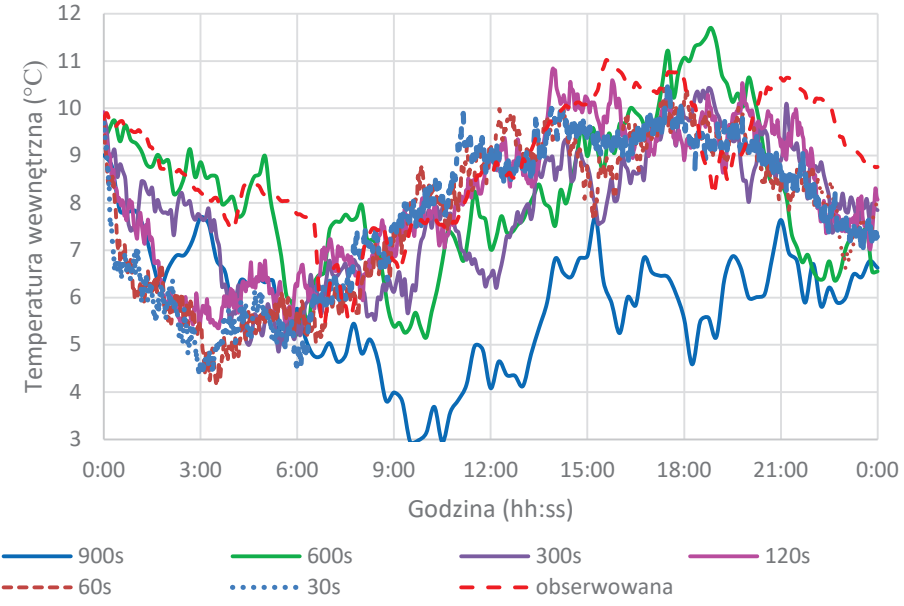
Porównanie wartości współczynników dopasowania modelu deterministycznego dla temperatury powietrza przy różnych krokach czasowych (Przegaliny Duże)

A comparison of the values of goodness-of-fit coefficients of the deterministic model for air temperature at various time steps (Przegaliny Duże)

Parametr	30s	60s	120s	300s	600s	900s
AE_m (°C)	3,53	3,53	3,54	3,55	3,71	3,85
MAE (°C)	1,38	1,39	1,39	1,42	1,46	1,61
MSE (°C^2)	3,05	3,06	3,07	3,17	3,29	3,69
RMSE (°C)	1,75	1,75	1,75	1,78	1,81	1,92
Bias (°C)	-1,10	-1,10	-1,10	-1,11	-1,11	-1,16
r (-)	0,58	0,58	0,58	0,56	0,54	0,51
R^2 (-)	0,20	0,20	0,19	0,17	0,16	0,13

Źródło: opracowanie własne

Podobna analiza stabilności stosowania metody stochastycznych równań różniczkowych również pokazuje, że dla dwóch najdłuższych kroków czasowych uzyskano najbardziej odbiegające przebiegi zmian temperatur od głównego trendu (rysunek 6.2 i tabela 6.2). Na wykresie przedstawiono jeden, przykładowy przebieg zmian temperatury. W tabeli zestawiono zakresy wskaźników dopasowania uzyskane dla 10 powtórzeń szacowania mikroklimatu za pomocą modelu SDE. Przedstawione w tym wypadku wyniki zakładają występowanie maksymalnego zaburzenia zmiany temperatury powietrza rzędu 1°C i maksymalnej zmiany wilgotności względnej rzędu 1p.p. na pomiar. Dla kroku czasowego 900s można zaobserwować większą rozpiętość zakresów uzyskiwanych współczynników dopasowania. Jednak przy stosowaniu modelu SDE w żadnym przypadku nie zaobserwowano tak drastycznych niestabilności jak w przypadku modelu deterministycznego, objawiających się bardzo wysokimi lub niskimi temperaturami czy wilgotnościami.



Rys. 6.2. Porównanie stabilności obliczania temperatury powietrza według modelu SDE dla różnych kroków czasowych (wyniki dla budynku w Przegalinach Dużych)

Fig. 6.2. Comparison of the estimation stability of air temperature by the SDE model for different time steps (results for the building in Przegaliny Duże)

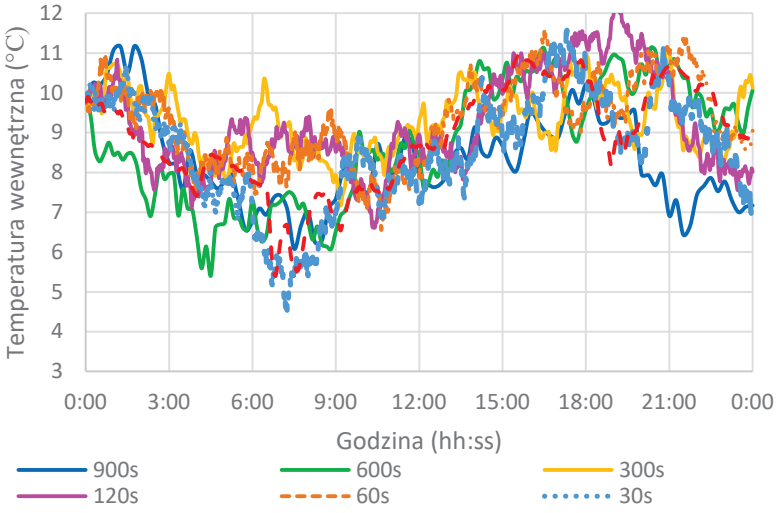
Źródło: opracowanie własne

Tabela/Table 6.2.
Porównanie wartości współczynników dopasowania modelu SDE dla temperatury powietrza przy różnych krokach czasowych (Przegaliny Duże)
A comparison of the values of goodness-of-fit coefficients of the SDE model for air temperature at various time steps (Przegaliny Duże)

Parametr	30s	60s	120s	300s	600s	900s
AE_m (°C)	3,5–4	3,4–4,2	3,1–4,8	2,6–4,6	2,4–5	2,2–6,6
MAE (°C)	1,4–1,4	1,3–1,4	1,1–1,5	1–1,5	0,8–2	0,8–3
MSE (°C^2)	3,1–3,3	2,7–3,1	1,9–3,8	1,3–2,8	0,9–5,7	1–10,8
RMSE (°C)	1,7–1,8	1,6–1,8	1,4–1,9	1,1–1,7	1–2,4	1–3,3
Bias (°C)	-1,1 – -1,1	-1,2 – -1	-1,2 – -0,8	-1,4 – 0,3	-1,9 – 0,1	-3 – 0,9
r (-)	0,55–0,6	0,58–0,66	0,61–0,71	0,63–0,9	0,52–0,85	-0,46–0,8
R^2 (-)	0,18–0,23	0,18–0,3	0,22–0,38	0,21–0,64	0,15–0,59	-3,0–0,54

Źródło: opracowanie własne

W przypadku stosowania modelu szeregów czasowych, krok czasowy pomiędzy kolejnym punktami, nie ma takiego dużego znaczenia jak w przypadku równań różniczkowych. W tym wypadku przebiegi zmian temperatury (rysunek 6.3) dla różnych kroków czasowych są najbardziej zbliżone do siebie kształtem. Wynika to z faktu, że długość kroku nie jest wykorzystywana przy szacowaniu kolejnej wartości parametru, a zależą tylko od wcześniejszych wartości. Podobne wnioski można wysunąć korzystając z wartości współczynników dopasowania (tabela 6.3).



Rys. 6.3. Porównanie stabilności obliczania temperatury powietrza według modelu TS dla różnych kroków czasowych (wyniki dla budynku w Przegalinach Dużych)
Fig. 6.3. Comparison of the estimation stability of air temperature by the TS model for different time steps (results for the building in Przegaliny Duże)

Źródło: opracowanie własne

Tabela/Table 6.3.
Porównanie wartości współczynników dopasowania modelu TS dla temperatury powietrza przy różnych krokach czasowych (Przegaliny Duże)
A comparison of the values of goodness-of-fit coefficients of the TS model for air temperature at various time steps (Przegaliny Duże)

Parametr	30s	60s	120s	300s	600s	900s
AE_m (°C)	2,3–3,3	2,4–4	1,7–3	2,1–3	2,6–4,5	2,8–6,4
MAE (°C)	0,6–1,1	0,9–1,6	0,5–0,9	0,5–1	0,7–1,4	0,9–2,6
MSE (°C^2)	0,6–1,8	1,3–3,2	0,4–1,2	0,5–1,4	0,8–3,2	1,4–8,9
RMSE (°C)	0,8–1,4	1,1–1,8	0,6–1,1	0,7–1,2	0,9–1,8	1,2–3
Bias (°C)	-0,1–0,5	-1,1–0,3	-0,4–0,3	-0,3–0,6	-0,2–1	-0,1–2,5
r (-)	0,56–0,85	-0,21–0,67	0,53–0,91	0,53–0,87	-0,14–0,77	-0,19–0,43
R^2 (-)	0,15–0,55	-2,17–0,18	-0,79–0,72	-0,41–0,7	-4,87–0,0	-4,53– -0,11

Źródło: opracowanie własne

Problem zbieżności rozwiązań otrzymywanych różnymi modelami zaprezentowano na przykładzie zmian temperatury powietrza, jednak podobne wnioski można wyciągnąć na przykładzie analizy zmian wilgotności absolutnej powietrza. Jednak ze względu na objętość opracowania opisano jedynie przypadek jednego z parametrów mikroklimatu.

6.3. Ocena dopasowania omawianych modeli

Dobór właściwego modelu służącego do opisu zachodzącego procesu wiąże się z koniecznością oceny dobroci dopasowania oszacowanych wartości do rzeczywistych danych. Jak wspomniano wcześniej do tego celu używanych jest wiele wskaźników. Każdy z nich niesie w sobie pewne informacje, natomiast najczęściej nie można wskazać tylko jednego najlepszego.

W przypadku modelu deterministycznego wykorzystującego równania różniczkowe (4.1) i (4.2) średnie błędy między oszacowanymi i pomierzonymi wynikami otrzymywane dla temperatury, wahały się w granicach od 1,1°C do 5,23°C (dla błędu *MAE*) i od 1,45°C do 5,81°C (dla błędu *RMSE*). Średnie wartości tych błędów dla wszystkich budynków wyniosły odpowiednio 2,38°C i 2,89°C. Najlepsze dopasowania uzyskano dla budynków zlokalizowanych w miejscowościach: Ciemno (*MAE* od 1,1°C do 1,96°C; *RMSE* od 1,45°C do 2,26°C), Przegaliny Duże (*MAE* 1,39°C; *RMSE* 1,75°C), Ossowa (*MAE* od 1,41°C do 1,48°C; *RMSE* od 1,83°C do 1,88°C), Żerocin (*MAE* 1,65°C; *RMSE* 2,08°C) i Żulice (*MAE* 1,81°C; *RMSE* 2,19°C). Najgorsze wartości tych błędów uzyskano dla budynku w Glinniku (*MAE* od 3,05°C do 5,23°C; *RMSE* od 3,57°C do 5,81°C). Błąd dla pojedynczego punktu pomiarowego AE_m wahał się w zakresie 3,54°C do 10,41°C (średnio 6,09°C). Najmniejszy uzyskano dla budynku w Przegalinach Dużych, a najgorszy w Żeszczynce. Otrzymane wartości obciążenia *Bias,* badającego systematyczność zaniżania lub zawyżania błędu, wahały się w granicach od -3,2°C do 1,52°C, średnio -0,71°C dla wszystkich budynków. Najlepsze dopasowanie osiągnięto w tym przypadku dla budynków w Ossowie (2 termin badań; -0,05°C), Glinniku (termin 1; -0,23°C) oraz Ciemnie (termin 3 i 2; odpo-

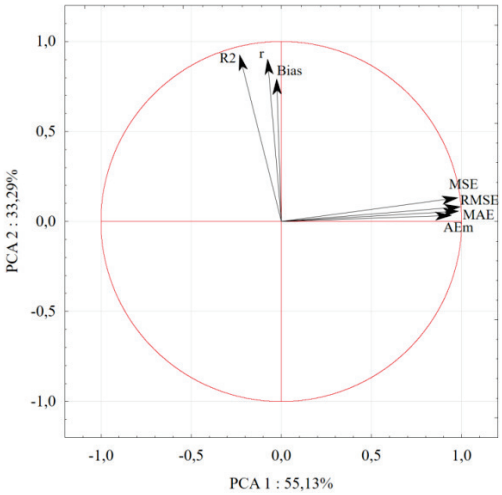
wiednio -0,34°C i -0,41°C), a najgorsze w Olszowcu (-3,2°C), Turowie (-2,99°C) i Żeszczynce (-2,6°C). Wartości współczynnika korelacji *r* znajdowały się w granicach od 0,27 do 0,97 (średnio 0,67). Najlepsze dopasowanie uzyskano dla budynków w Żulicach (0,97), Komarowie (0,9), Ossowie (termin 1; 0,87) i Glinniku (termin 2; 0,88), a najgorsze w Żeszczynce (0,27). Wartości współczynnika determinacji R^2 były w zakresie od 0,05 do 0,79. Najlepsze dopasowanie według tej miary uzyskano dla budynków w Żulicach (0,79) i Ossowie (termin 1; 0,66), a najgorsze dla Żeszczynki (0,05) i Olszowca (0,09).

Średnie błędu uzyskane przy pomocy modelu deterministycznego dla wilgotności względnej powietrza wahały się w granicach od 2,46 p.p. do 16,4 p.p. (dla błędu *MAE*) i od 5 p.p. do 18,54 p.p. (dla błędu *RMSE*). Należy tu mieć na uwadze, że podane miary *MAE* i *RMSE* nie są wyrażone w jednostkach wilgotności względnej (%), lecz w odniesieniu do maksymalnej wilgotności powietrza w warunkach nasyconych, czyli w punktach procentowych (p.p.). Średnie wartości tych błędów wynosiły 8,74 p.p. (dla *MAE*) i 10,30 p.p. (dla *RMSE*). Najlepsze dopasowanie uzyskano przy modelowaniu mikroklimatu w Glinniku (termin 1; *MAE* 2,48 p.p.; *RMSE* 5,02 p.p.), Turowie (MAE 4,08 p.p.; *RMSE* 5,04 p.p.) i Żerocinie (*MAE* 4,77 p.p.; *RMSE* 5,89 p.p.), a najgorsze w Żeszczynce (*MAE* 16,4 p.p.; *RMSE* 17,7 p.p.), Glinniku (termin 2; *MAE* 15,62 p.p., *RMSE* 18,54) i Olszowcu (*MAE* 14,64 p.p.; *RMSE* 16,14 p.p.). Maksymalny błąd absolutny AE_m dla pojedynczego pomiaru wahał się w granicach od 13,7 p.p. do 38 p.p.. Najmniejszy błąd uzyskano dla budynku w Żerocinie, a największy w Glinniku (termin 2). Wartości współczynnika obciążenia *Bias* mieściły się w zakresie od -11,71 p.p. do 16,4 p.p., co dla wszystkich budynków daje średnią 4,17 p.p.. Najlepsze dopasowanie uzyskano dla budynków w miejscowościach: Komarów (0,06 p.p.), Ciemno (termin 3; 1,47 p.p.) oraz Glinnik (termin 1; -1,84 p.p.). Najbardziej systematycznie zawyżane wartości wilgotności względnej były w przypadku danych z Żeszczynki (16,4 p.p.) i Olszowca (14,64 p.p.), a zaniżane dla Żulic (-11,71 p.p.). Wartości współczynnika korelacji *r* dla wilgotności względnej mieściły się w granicach od -0,63 do 0,93 (średnia dla wszystkich budynków wyniosła 0,46). Najlepsze dopasowanie uzyskano dla budynków w miejscowościach: Żulice (0,93), Ossowa (termin 1; 0,92), Komarów (0,88), Ciemno (termin 1; 0,77) i Turów (0,76), natomiast najgorzej w Glinniku (termin 2; -0,63). Wartości współczynnika determinacji R^2 były z zakresu od -2,36 do 0,79. Najlepsze dopasowanie według tego wskaźnika otrzymano dla budynków w Ossowie (termin 1; 0,79) i Komarowie (0,88), natomiast najgorsze dla Ciemna (termin 3; -2,36) i Glinnika (termin 2; -1,1).

W przypadku oceny dopasowania oszacowanych wartości wilgotności względnej powietrza, należy uwzględnić fakt, że jest ona zależna nie tylko od szacowanej, według modelu, wilgotności absolutnej, ale również od oszacowanej temperatury powietrza w hali dla zwierząt. Maksymalna wilgotność powietrza w warunkach nasycenia wzrasta wraz ze wzrostem temperatury (zgodnie ze wzorami 2.7-2.9). Z tego powodu w przypadku słabego dopasowania temperatury powietrza, nawet gdy oszacowane wartości wilgotności absolutnej masowej są bliskie rzeczywistym, to wynikowa wilgotność względna także może być źle dopasowana, o czym świadczą np. ujemne wartości współczynnika dopasowania dla niektórych budynków. Jeżeli temperatura jest systematycznie zaniżona o kilka stopni, więc jest prawdopodobne, że średnia z pomiarów może okazać się lepszym estymatorem, niż wyznaczona z obliczeń.

Zestawienie wszystkich uzyskanych wartości wybranych współczynników służących do oceny jakości dopasowania modelu deterministycznego zastosowanego odpowiednio do wyznaczenia zmian temperatury oraz wilgotności względnej powietrza, przedstawiono w załączniku C w tabelach C.1 - C.2. Z podanych wartości trudno jest jednoznacznie wskazać, która z miar dopasowania najlepiej ocenia dopasowanie modelu do rzeczywistych pomiarów. Dla części wskaźników lepsze odwzorowanie jest wskazywane dla jednych budynków, a inne niż przy pozostałych. W celu wskazania i pogrupowania wskaźników noszących podobne informacje wykonano, analizę składowych głównych, służącą do redukcji wymiaru zmiennych objaśniających, w rozważanym wypadku liczby wskaźników jakości dopasowania. Na rysunkach 6.4 i 6.5 przedstawiono wyznaczone składowe główne i korelacje z poszczególnymi wskaźnikami. Dla obu parametrów mikroklimatu, tj. temperatury i wilgotności względnej, dwie pierwsze składowe główne wyjaśniają w dużym stopniu zmienność występującą w danych (odpowiednio 88,4% i 83,9% całkowitej zmienności zbioru danych). Biorąc pod uwagę analizę wykresów uzyskanych dla parametrów mikroklimatu można wyróżnić 3 grupy wskaźników o podobnym charakterze. Pierwszą grupę stanowią: maksymalny błąd absolutny AE_m, średni błąd absolutny *MAE*, średni błąd kwadratowy *MSE* oraz średni błąd *RMSE*, które informują o średniej odległości oszacowania od wartości zaobserwowanej. W skład drugiej grupy wchodzą współczynniki korelacji r i determinacji R^2 opisujące wzajemne zachowanie obserwowanej i oszacowanej wartości. Do trzeciej grupy należy zaliczyć obciążenie *Bias* mówiące o tendencji w zaniżaniu lub zawyżaniu oszacowania. Wskaźnik charakteryzuje się różnym podobieństwem w stosunku do dwóch pierwszych grup. W odniesieniu do temperatury powietrza jego zastosowanie podobne jest do grupy drugiej, a w przypadku wilgotności – do grupy pierwszej. Ponieważ wykresy przestawiają bardzo dużą korelację wskaźników w poszczególnych grupach, do dalszych analiz można wybrać po jednym reprezentatywnym wskaźniku. Z tego powodu do dalszych analiz związanych z oceną jakości dopasowania modeli wybrano więc wskaźniki: *RMSE*, r i *Bias*.

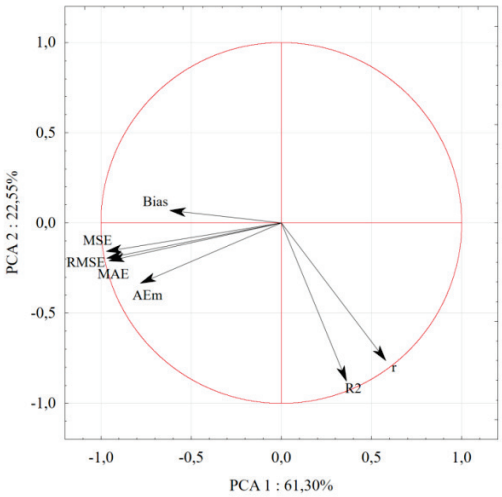
Wskazane wskaźniki użyte zostały do kolejnej analizy PCA, której zadaniem była ocena wpływu parametrów budynku (kubatura pomieszczenia dla zwierząt V, wysokość aktywna H), wielkości obsady zwierząt (*DJP*) oraz parametrów klimatu zewnętrznego (temperatura T_o i wilgotność względna RH_o). Na rysunkach 6.6 i 6.7 pokazano korelację dwóch najważniejszych składowych głównych z wymienionymi wielkościami charakteryzującymi najważniejsze informacje o budynkach czy o klimacie zewnętrznym uzyskanych z analizy PCA, odpowiednio dla temperatury i wilgotności względnej powietrza w hali zwierząt. Dla obu parametrów mikroklimatu współczynnik korelacji r dla modelu jest powiązany z temperaturą zewnętrzną. Im wyższa jest temperatura zewnętrzna tym model deterministyczny jest lepiej dopasowany według współczynnika korelacji. W przypadku temperatury, współczynnik *Bias* mówi o tendencji do zawyżania jej wartości, a wielkość średniego błędu *RMSE* jest mocno uzależniona od wysokości aktywnej. W przypadku wilgotności względnej powietrza wewnętrznego średni błąd i obciążenie bardziej skorelowane są z wilgotnością powietrza zewnętrznego. Dodatkowo dokonano projekcji wartości wskaźników uzyskanych dla poszczególnych budynków na płaszczyznę wyznaczoną przez składowe główne. Z wykresów widać, że budynki o konstrukcji kalenicowej miały większą obsadę, gorsze oszacowanie temperatury, ale lepsze wilgotności powietrza. Należy jednak mieć na uwadze fakt, że wilgotność względna zależna jest także od temperatury powietrza.



Rys. 6.4. Korelacje współczynników dopasowania modelu deterministycznego dla temperatury powietrza (analiza PCA)

Fig. 6.4. A correlations of the goodness-of-fit coefficients of the deterministic model for air temperature (PCA analysis)

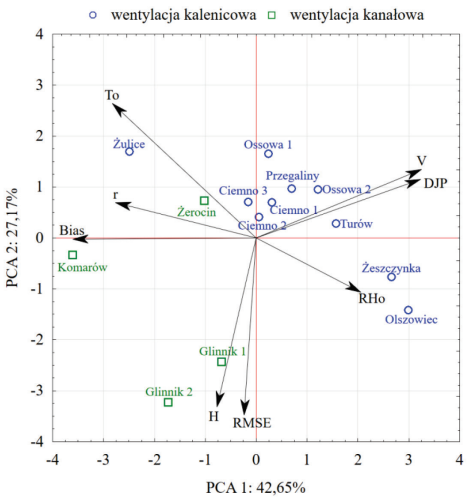
Źródło: opracowanie własne



Rys. 6.5. Korelacje współczynników dopasowania modelu deterministycznego dla wilgotności względnej powietrza (analiza PCA)

Fig. 6.5. A correlations of the goodness-of-fit coefficients of the deterministic model for relative humidity (PCA analysis)

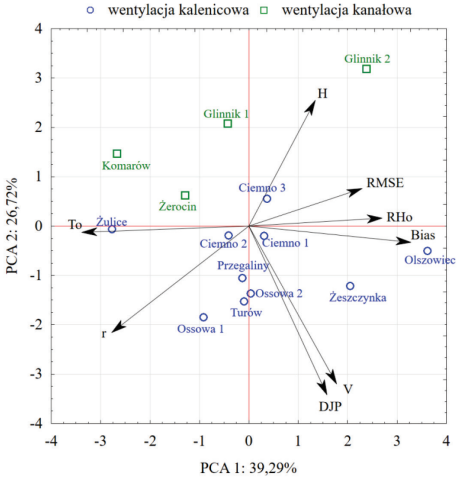
Źródło: opracowanie własne



Rys. 6.6. Wpływ parametrów budynku na dopasowania modelu deterministycznego dla temperatury powietrza (analiza PCA)

Fig. 6.6. Impact of buildings parameters on the goodness-of-fit of the deterministic model for air temperature (PCA analysis)

Źródło: opracowanie własne

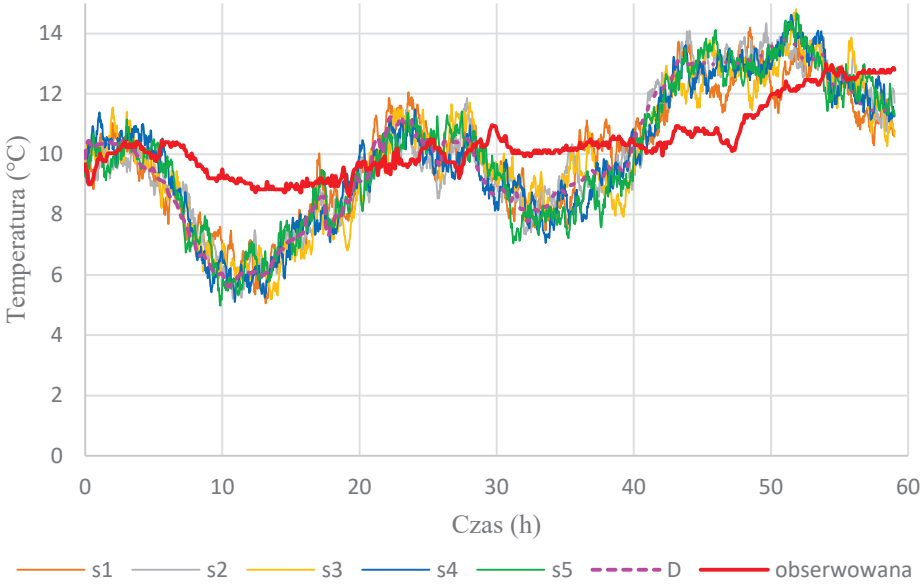


Rys. 6.7. Wpływ parametrów budynku na dopasowania modelu deterministycznego dla wilgotności względnej powietrza (analiza PCA)

Fig. 6.7. Impact of buildings parameters on the goodness-of-fit of the deterministic model for air relative humidity (PCA analysis)

Źródło: opracowanie własne

W przypadku modelu deterministycznego za każdym razem otrzymywane są takie same wyniki jak opisane powyżej. W przypadku modeli stochastycznych za każdym razem otrzymywane są inne przebiegi temperatury i wilgotności powietrza. Wynika to z faktu, że dodawane są w nich elementy losowe. Są one różne za każdym razem, chociaż zmienność ta ze względu na przyjęte zakresy zaburzeń nie jest duża. Na wykresie 6.8 pokazano 5 pierwszych przykładowych przebiegów zmian temperatury powietrza wewnętrznego oszacowane według modelu, opartego o stochastyczne równania różniczkowe. Powtórzenia otrzymano przy zastosowaniu maksymalnego zaburzenia temperatury powietrza rzędu 1ºC i maksymalnej zmiany wilgotności względnej rzędu 1 p.p. na pomiar. Zaprezentowane przebiegi odnoszą się do pomiarów przeprowadzonych dla budynku w miejscowości Ciemno, w okresie 20-23.12.2013. Na podstawie przedstawionego wykresu, jak również analiz przeprowadzonych dla pozostałych budynków inwentarskich, można stwierdzić, że otrzymane przebiegi oscylują wokół przebiegu zmian otrzymanego z modelu deterministycznego.



Rys. 6.8. Porównanie różnych przebiegów temperatury wewnętrznej oszacowanych modelem SDE w odniesieniu do modelu deterministycznego i rzeczywistych pomiarów (przy zaburzeniu 1°C i 1 p.p. φ, Ciemno 3)

Fig. 6.8. A comparison of different internal temperature courses estimated by the SDE model in relation to the deterministic model and actual measurements (at random disturbance 1°C and 1 p.p. φ, Ciemno 3)

Źródło: opracowanie własne

W przypadku analizy zmian mikroklimatu z wykorzystaniem modelu SDE, dla każdego budynku oraz terminów przeprowadzonych badań, symulacje powtórzono 10-krotnie, uzyskując różne przebiegi zmian. Zakresy uzyskanych wartości wybranych współczynników służących do oceny jakości dopasowania dla modelu SDE, podobnie jak dla modelu deterministycznego, przedstawiono w załączniku C w tabelach C.1–C.2. Na podstawie wyników przedstawionych w tabelach można stwierdzić, że wartości miar dopasowania dla modelu SDE oscylują wokół wartości uzyskanych dla modelu deterministycznego. Rozpiętość zakresu tych oscylacji dla błędu *RMSE* dla temperatury wewnątrz budynku waha się w granicach od 0,067°C do 0,68°C (średnia dla wszystkich budynków wyniosła 0,27°C). Najmniejsza rozpiętość występuje w przypadku budynku w Ossowie (0,067°C i 0,073°C odpowiednio dla pierwszego i drugiego terminu badań), a największa w Ciemnie (termin 1; 0,68°C) i Olszowcu (0,57°C). Dla współczynnika obciążenia *Bias* uzyskano podobną długość zakresu uzyskiwanych wartości tj. od 0,07°C do 0,72°C (średnio 0,26°C). Najmniejsze różnice uzyskano także dla budynków w Ossowie (odpowiednio dla terminów badań 0,070°C i 0,079°C) i Komarowie (0,082°C), a największe wahania wystąpiły w przypadku danych w Olszowcu (0,72°C) i Ciemna (termin 1; 0,49°C). Dla współczynnika korelacji *r* długości uzyskanych przedziałów mieszczą się w zakresie od 0,007 do 0,163 (średnio 0,064). Najmniejszą zmienność wartości uzyskano dla budynków w Glinniku (termin 2; 0,007) i Komarowie (0,008), natomiast największą dla budynków w Ciemnie (termin 1; 0,163) i Olszowcu (0,159). Podobna sytuacja występuje w przypadku wilgotności względnej powietrza. Wartości współczynników dopasowania uzyskiwane z modelu SDE w poszczególnych powtórzeniach wahały się dookoła wartości otrzymanych z modelu deterministycznego. Dla błędu *RMSE* uzyskane wartości mieściły się w przedziale o długości od 0,33 p.p. do 2,5 p.p. (względem wilgotności w stanie nasycenia). Średnio dla wszystkich budynków dało to 1 p.p.. Najmniejsze różnice w uzyskiwanych wartościach otrzymano dla budynków w Ossowie (termin 1; 0,328 p.p.), Komarowie (0,36 p.p.) i Olszowcu (0,36 p.p.), a największe dla budynków w Przegalinach Dużych (2,50 p.p.) i Turowie (1,74 p.p.). Dla wskaźnika obciążenia *Bias* zmienność uzyskiwanych wartości również mieściła się w podobnych zakresach od 0,34 p.p. do 2,45 p.p. (średnio 1,01 p.p.). Najmniejsze różnice w uzyskiwanych wartościach otrzymano dla budynków w Olszowcu (0,34 p.p.), Komarowie (0,37 p.p.) i Ossowie (termin 1; 0,38 p.p.), a największe dla budynków w Przegalinach Dużych (2,45 p.p.) i Turowie (1,7 p.p.). Rozpiętość wahań wartości współczynnika korelacji wahała się w zakresie od 0,008 do 0,29 (średnio 0,16). Najmniejsza zmienność była w przypadku budynków w Ossowie (termin 1; 0,008) i Komarowie (0,011), a największa w Olszowcu (0,291), Ciemnie (termin 1 i 3; 0,28 i 0,27) i Żerocinie (0,28).

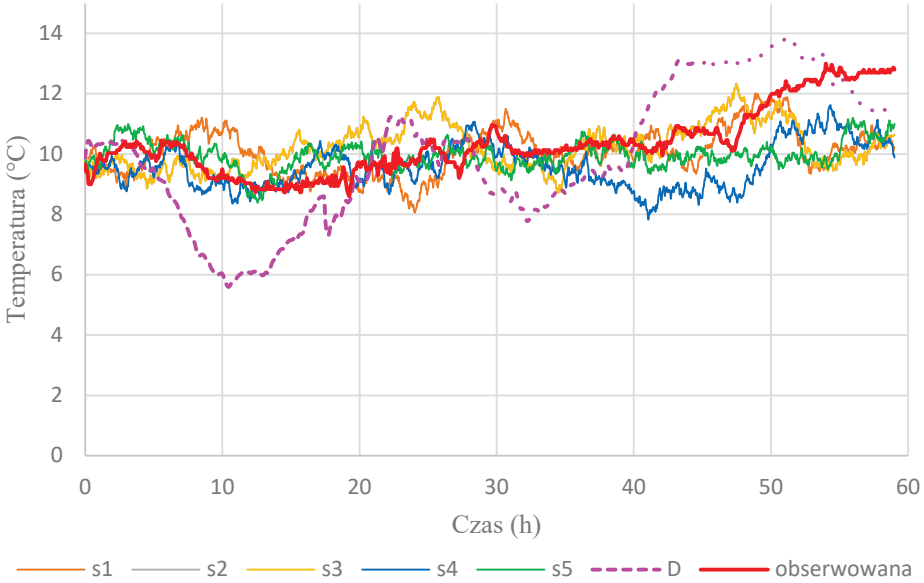
Ze względu na naturę konstrukcji modeli opartych o szeregi czasowe można w nich wyróżnić dwie fazy obliczeń. Pierwsza faza obejmuje okres, z którego pomiary zostały użyte do ustalenia współczynników występujących w modelu (takich jak średnia, wariancja oraz współczynniki regresyjne), natomiast druga stanowi etap prognozowania wartości parametrów i służy do weryfikacji tych współczynników. Niestety ze względu na zbyt krótkie okresy pomiarów dla niektórych budynków i przy założeniu co najmniej 1-dobowego cyklu pomiarów, dla tego modelu odtworzenie stanu mikroklimatu w pomieszczeniu dla zwierząt obejmowało obydwie fazy obliczeń.

Dla modelu TS również zastosowano 10-krotne powtórzenie symulacji, aby ocenić zmienność szacowanych przebiegów. Na wykresie 6.9 pokazano, tak jak w poprzednim

przypadku, 5 pierwszych przykładowych przebiegów zmian temperatury powietrza wewnętrznego, oszacowane według modelu opartego o szeregi czasowe, uzyskane dla tych samych danych i zakładając taki sam poziom losowości. Z przedstawionego wykresu, jak i wyników liczbowych przedstawionych w tabelach C.1–C.2, można stwierdzić, że przebiegi nie oscylują wokół wyników z modelu deterministycznego. W niektórych przypadkach uzyskano dużo lepsze wartości współczynników dopasowania, niż dla modelu deterministycznego i SDE. Przykładem są tutaj wartości otrzymane dla błędu *RMSE* przy szacowaniu temperatury powietrza dla budynków zlokalizowanych w miejscowościach: Ciemno (termin 2; uzyskany zakres zmienności od 0,9°C do 1,3°C w porównaniu z przedziałem od 2,2°C do 2,4°C dla modelu SDE), Glinnik (termin 2; od 0,8°C do 1,6°C, a dla SDE 5,6°C do 5,8°C) czy Żeszczynce (od 1,7°C do 2,8°C, a dla SDE 4,1°C do 4,3°C), a także w innych przypadkach. Niestety nie zawsze zmniejszenie wartości błędu *RMSE* wiązało się z poprawą pozostałych współczynników dopasowania, np. dla budynku w Turowie współczynnik korelacji *r* wahał się w granicach od -0,67°C do 0,82°C w porównaniu z przedziałem 0,71°C do 0,77°C dla modelu SDE. W przypadku budynku w Ossowie (termin 1) zaobserwowano także znaczne wahania obciążenia *Bias* od -22°C do 20°C, co świadczy o problemach z ustaleniem odpowiednich współczynników regresyjnych i złym oszacowaniu wartości temperatury wewnętrznej. Biorąc pod uwagę wszystkie 3 wskaźniki dopasowania (*RMSE*, *Bias* i *r*) w przypadku temperatury powietrza, poprawę jakości dopasowania dla wyników z modelu TS zaobserwowano dla budynków w: Glinniku (termin 2), Komarowie, Olszowcu, Przegalinach, Żerocinie, Żeszczynce i Żulicach. Rozpatrując drugi parametr mikroklimatu, a mianowicie wilgotność względną, stwierdzono, że stosowanie modeli wykorzystujących szeregi czasowe powoduje spadek jakości dopasowania oszacowanych wyników do danych pomiarowych. W niektórych przypadkach, jak np. dla Ossowy (termin1) wartość błędu *RMSE* wahała się nawet w zakresie od 35,2 p.p. do 50,7 p.p. (w porównaniu, dla SDE otrzymano przedział od 6,6 p.p. do 6,9 p.p.), *Bias* od -49 p.p. do 17,4 p.p. (dla SDE 3,3 p.p. do 3,7 p.p.), a współczynnik *r* od -0,08 do 0,62 (dla SDE 0,9 do 0,91). W przypadku innych budynków różnice nie były już tak drastyczne, ale także pojawiały się sporadyczne przypadki, gdy otrzymywano przebiegi znacząco odbiegające od rzeczywistych. Jedynie w przypadku budynków w Glinniku (termin 2) i Żeszczynce, biorąc pod uwagę wszystkie współczynniki dopasowania, można mówić o stabilności rozwiązania metodą TS. Otrzymane wyniki świadczą o dużych problemach z jednoczesnym modelowaniem temperatury i wilgotności względnej powietrza z wykorzystaniem modeli TS.

Porównawcze przebiegi zmian zarówno dla temperatury, jak i wilgotności względnej powietrza wewnętrznego, wyznaczone wszystkimi trzema modelami matematycznymi, dla wszystkich rozważanych budynków i okresów przeprowadzonych pomiarów w warunkach rzeczywistych, przedstawiono w załączniku B na rysunkach B.1-B.14. Dla modeli stochastycznych zastosowano niewielkie zaburzenia (rzędu 1°C i 1 p.p. φ na pomiar). Na wykresach przedstawiono też, dla porównania, rzeczywiste pomierzone wartości parametrów mikroklimatu, zarówno dla powietrza wewnątrz hali zwierząt i na zewnątrz budynku. Dla modeli uwzględniających losowe zaburzenia, dla lepszej czytelności wykresów, zaprezentowano po jednym przykładowym przebiegu zmian parametrów mikroklimatu. Natomiast liczbowe miary dopasowania oszacowanych wartości parametrów do rzeczywistych wartości, pomierzonych w poszczególnych budynkach przedstawiono w tabelach C.1

i C.2 w załączniku C. W zestawieniu podano zakresy uzyskanych wartości wskaźników, uzyskane z 10 powtórzeń symulacji komputerowych dla modeli stochastycznych.



Rys. 6.9. Porównanie różnych przebiegów temperatury wewnętrznej oszacowanych modelem TS w odniesieniu do modelu deterministycznego i rzeczywistych pomiarów (przy zaburzeniu 1°C i 1 p.p. φ, Ciemno 3)

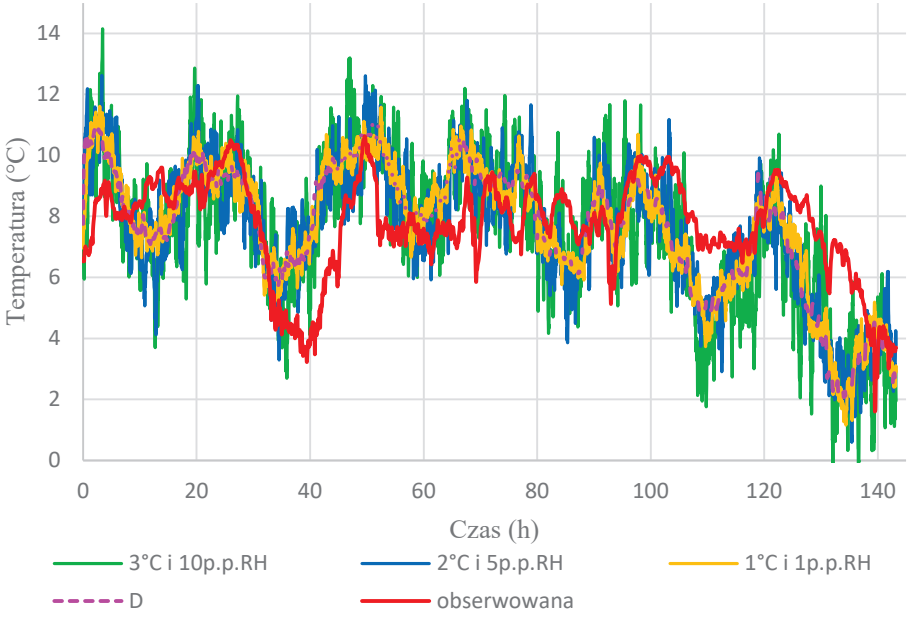
Fig. 6.9. A comparison of different internal temperature courses estimated by the TS model in relation to the deterministic model and actual measurements (at random disturbance 1°C and 1 p.p. φ, Ciemno 3)

Źródło: opracowanie własne

6.4. Wpływ wielkości zaburzeń losowych

W przypadku wykorzystywania stochastycznych równań różniczkowych zakłada się, że wielkość losowego błądzenia procesu jest mała w stosunku do głównego trendu wynikającego z zależności deterministycznych. Dlatego w przeprowadzonych symulacjach mających na celu zbadanie wpływu wielkości losowych zaburzeń na jakość otrzymywanych oszacowań parametrów mikroklimatu przyjęto, że chwilowe zaburzenie pomiaru temperatury wahało się w zakresie od 1°C do 3°C, natomiast dla wilgotności względnej powietrza przyjęto zaburzenie na poziomie 1 p.p., 5 p.p. i 10 p.p., w odniesieniu do stanu całkowitego nasycenia powietrza, przy ustalonej temperaturze pomieszczenia. Ze względu na to, że w bilansie wilgotnościowym rozważana jest wilgotność absolutna masowa, zaburzenie było odpowiednio przeliczane. Do prezentacji wyników przyjęto trzy poziomy zaburzeń: niski

(1°C i 1 p.p. wilgotności względnej), średni (2°C i 5 p.p.) oraz wysoki (3°C i 10 p.p.). Na wykresie 6.10 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji, otrzymane dla temperatury powietrza wewnętrznego, przy różnych poziomach zaburzeń dla jednego przykładowego budynku w okresie zimowym (Ossowa, 20-26.01.2012). Szczegółowe zestawienie otrzymanych wyników symulacji zmian temperatury wewnątrz hali zwierząt, dla wszystkich rozpatrywanych budynków inwentarskich, z uwzględnieniem wykonanych powtórzeń, zebrano w tabeli C.3. W tabeli przedstawiono zakresy otrzymanych miar dopasowania modelu, przy ustalonych trzech poziomach losowego zaburzenia.



Rys. 6.10. Porównanie zmian temperatury w hali zwierząt otrzymanych za pomocą modelu SDE przy różnym poziomie zaburzeń losowych (przykład dla Ossowy 2)

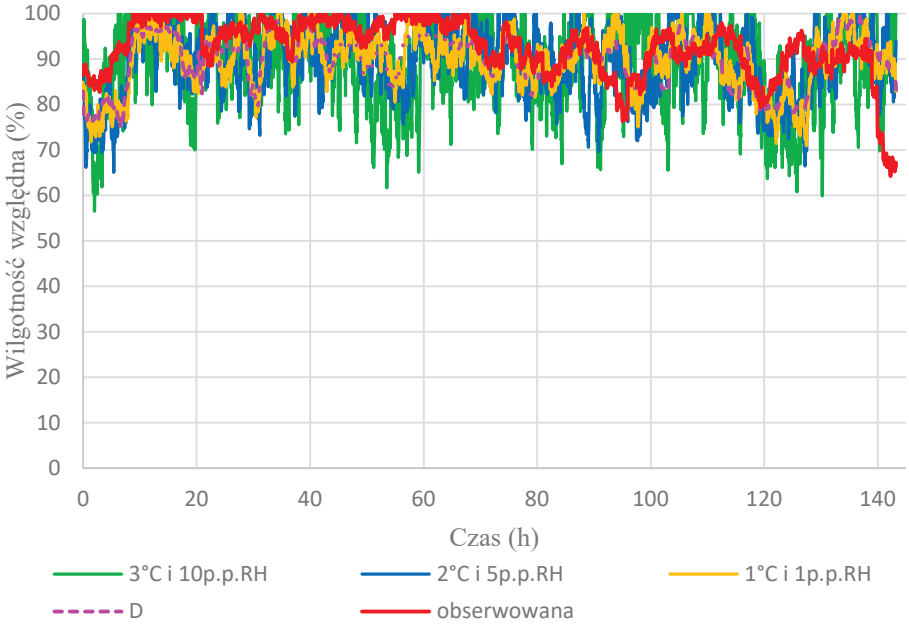
Fig. 6.10. Comparison of the temperature changes in the animal hall obtained using the SDE model at various levels of random disturbances (example for Ossowa 2)

Źródło: opracowanie własne

Analogiczną ocenę wpływu wielkości losowych zaburzeń dla wilgotności względnej powietrza przedstawiono na rysunku 6.11. Wyniki pochodzą z tych samych symulacji, co dla temperatury powietrza. Natomiast w tabeli C.4 przedstawiono zbiorcze podsumowanie otrzymanych zakresów miar dopasowania wilgotności względnej powietrza wewnętrznego dla każdego z budynków w okresie przeprowadzanych pomiarów.

Z przedstawionych wykresów oraz liczbowych wartości miar dopasowania dla temperatury i wilgotności powietrza można stwierdzić, że większy poziom zaburzeń powoduje coraz większe odchylenia od oszacowań modelu deterministycznego. Jednak otrzymane wyniki świadczą o dużej odporności zastosowanego modelu na losowe zaburzenia, bowiem

szybko następuje dążenie otrzymywanych wartości do stanu równowagi wyznaczonego przez model deterministyczny. Otrzymane wartości współczynników dopasowania również w niewielkim stopniu odbiegają od tych uzyskanych dla modelu deterministycznego. Zastosowanie modelu SDE nie powoduje znacznego poprawienia jakości otrzymywanych wyników, z czego wynika, że składowe modelu deterministycznego muszą być w miarę dobrze odzwierciedlone w modelach bilansów cieplnego i wilgotnościowego.



Rys. 6.11. Porównanie zmian wilgotności względnej w hali otrzymanych za pomocą modelu SDE przy różnym poziomie zaburzeń losowych (przykład dla Ossowy 2)

Fig. 6.11. Comparison of the temperature changes in the animal hall obtained by the SDE model at various levels of random disturbances (example for Ossowa 2)

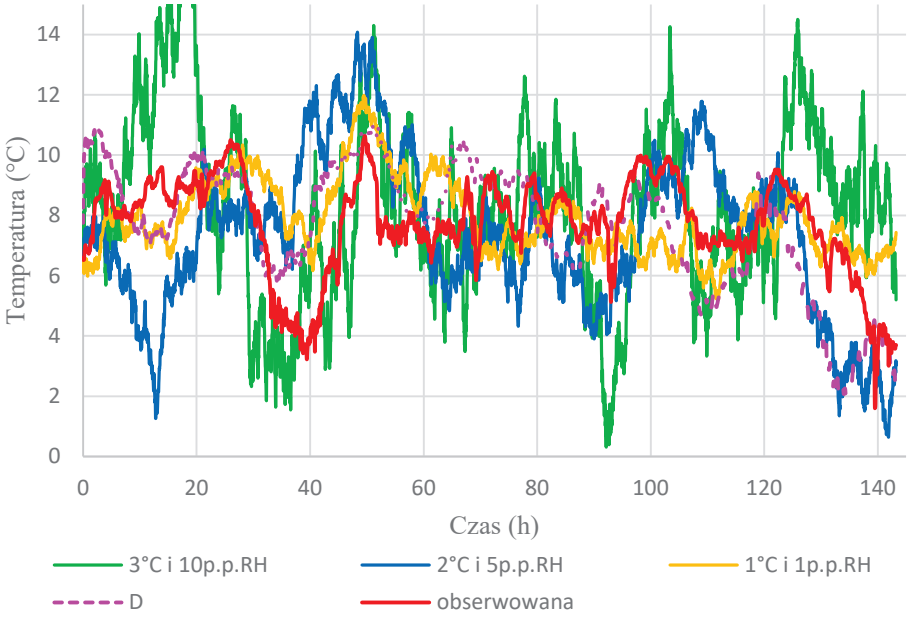
Źródło: opracowanie własne

Analiza wpływu wielkości losowych zaburzeń parametrów mikroklimatu wykonana została również dla modelu opartego o szeregi czasowe. W tym wypadku przyjęto takie same poziomy zaburzeń, a przedstawione wykresy temperatury (rysunek 6.12) i wilgotności względnej (rysunek 6.13) dotyczą tego samego budynku i okresu przeprowadzonych pomiarów, co przedstawione dla modelu SDE. Szczegółowe zestawienie otrzymanych z symulacji wartości wskaźników dopasowania umieszone zostały także w zbiorczych tabelach C.3 i C.4.

W przypadku modelu TS przy większych wartościach losowych zaburzeń coraz bardziej uwypukla się znaczenie dobrego oszacowania współczynników regresyjnych występujących w modelu. Więcej wtedy jest sytuacji, gdy oszacowane wartości znacząco odbiegają od rzeczywistych wartości pomiarowych. Dotyczy to szczególnie budynków zlokalizowa-

nych w miejscowościach Ciemno (okres 1), Ossowa (okres 1) i Turów. Dla najwyższego przyjętego poziomu zaburzeń (3°C i 10 p.p. wilgotności względnej) wskaźniki oszacowania wskazują na znaczące wahania w porównaniu z tymi, otrzymanymi dla modelu wykorzystującego stochastyczne równania różniczkowe. Wśród otrzymanych przebiegów zmian parametrów mikroklimatu można znaleźć takie, które lepiej przybliżające pomiary rzeczywiste, jak również takie, które całkowicie są od nich odmienne.

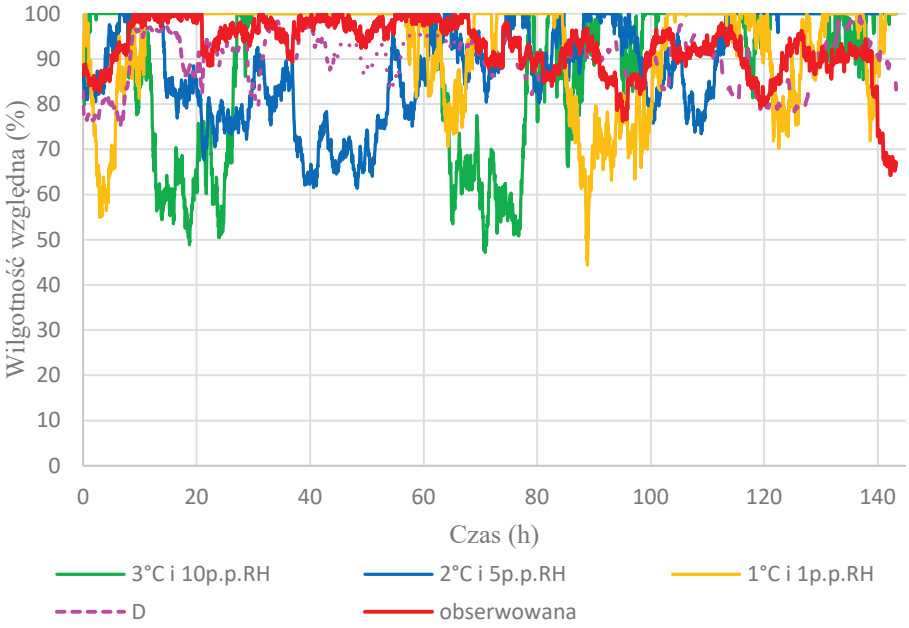
Biorąc pod uwagę modelowanie temperatury oraz wilgotności względnej powietrza, lepsze wyniki uzyskano dla temperatury, jednak przypomnieć należy, że za pomocą modelu (wzór 4.11) opisywana jest wilgotność absolutna masowa, a nie względna. W przypadku temperatury, biorąc pod uwagę błąd *RMSE* i obciążenie *Bias*, model TS zachowuje się stabilnie w przypadku budynków w miejscowościach: Ciemno (termin 2), Glinnik (termin 1 i 2), Komarów, Olszowiec, Przegaliny Duże, Żerocin i Żulice. Dla wilgotności względnej, o zachowaniu stabilności można powiedzieć w przypadku danych z Glinnika (termin 1 i 2), Przegalin i Żulic. Niestety współczynnik korelacji *r* nie zawsze odzwierciedla podobny kształt krzywych opisujących rzeczywiste pomiary.



Rys. 6.12. Porównanie zmian temperatury w hali zwierząt otrzymanych za pomocą modelu TS przy różnym poziomie zaburzeń losowych (przykład dla Ossowy 2)

Fig. 6.12. Comparison of the temperature course in the animal hall obtained by the TS model at various levels of random disturbances (example for Ossowa 2)

Źródło: opracowanie własne



Rys. 6.13. Porównanie zmian wilgotności względnej w hali zwierząt otrzymanych za pomocą modelu TS przy różnym poziomie zaburzeń losowych (przykład dla Ossowy 2)
Fig. 6.13. Comparison of the temperature course in the animal hall obtained using the TS model at various levels of random disturbances (example for Ossowa 2)

Źródło: opracowanie własne

7. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy przedstawiono problematykę związaną z kształtowaniem mikroklimatu w budynkach dla krów mlecznych. Do tego celu użyto narzędzi, jakimi są modele matematyczne wspomagające szacowanie głównych parametrów mikroklimatu, określających warunki, w których przebywają hodowane zwierzęta. Istotą zaprezentowanego w pracy podejścia było oddanie dynamicznego charakteru zachodzących zmian mikroklimatu w pomieszczeniach dla zwierząt.

Obecnie stosowane w praktyce metody projektowania mikroklimatu w budynkach inwentarskich opierają się o wzory opisujące bilans ciepła i wilgoci w warunkach ustalonych. W metodach stosowanych powszechnie w Polsce, takich jak metoda klasyczna, czy WWT, w obliczeniach uwzględnia się obliczeniowe lub statystyczne wartości mikroklimatu zewnętrznego. Zakłada się w nich model statyczny, który opiera się na stałych temperaturach zewnętrznych oraz stałej strukturze stada. Takie podejście nie oddaje rzeczywistego zmiennego charakteru zachodzących zmian.

Podstawą kształtowania mikroklimatu w budynku inwentarskim są modele deterministyczne opisujące fizyczne zależności występujące pomiędzy poszczególnymi elementami wchodzącymi w skład systemu. Złe oszacowania podstawowych elementów składowych całego systemu wpływają na złe oceny wartości parametrów mikroklimatu. Widać to na przykładzie uzyskanych danych pomiarowych, dla niektórych przypadków łatwo zauważyć np. stałe zaniżanie temperatury powietrza w hali dla zwierząt. Dodatkowo na sporządzonych wykresach można zauważyć duże oddziaływania klimatu zewnętrznego na mikroklimat w pomieszczeniu. Jak wskazują pomiary, zmiany te nie są aż tak bardzo powiązane ze sobą. Wskazuje to na nie uwzględnienie pewnych składowych bilansu cieplnego w budynku.

Oprócz modelu deterministycznego, uwzględniającego zależności oparte na ogólnie znanych prawach fizycznych, zaprezentowano także podejście stochastyczne, które umożliwia wprowadzenie do analizy dodatkowych czynników, które wynikają z losowego charakteru danych, modelowanego procesu, jak również oddają pewien poziom niepewności pomiarów oraz zaburzeń losowych.

Rozpatrzono dwa modele uwzględniające stochastyczność zachodzących procesów. Pierwszy z tych modeli uwzględnia teorię szeregów czasowych często wykorzystywanych jako narzędzie do automatycznego sterowania urządzeń na podstawie danych historycznych. Oprócz modelowania za pomocą szeregów czasowych, prezentowanego m.in. przez Daskalova (1997), w niniejszej pracy przedstawiono nowatorskie podejście do analizy mikroklimatu w pomieszczeniach dla zwierząt, za pomocą stochastycznych równań różniczkowych, pozwalających wprowadzić elementy losowe do zwykłych równań różniczkowych.

Zastosowanie modeli stochastycznych przy modelowaniu mikroklimatu w budynkach inwentarskich pozwala na uwzględnienie czynników losowych, związanych z nieprecyzyjnością pomiarów, czy niedokładnością modeli opisujących poszczególne składowe modelu, dzięki czemu można ocenić wrażliwość modelu na takie losowe zaburzenie. Modele stochastyczne nie umożliwią znaczącej poprawy wyników, jeśli jest on niepoprawny. Przedstawione w opracowaniu modele są z założenia uproszczone, pomijają wpływ niektórych

czynników, jak chociażby właściwości związane z akumulacją ciepła przez przegrody i inne elementy znajdujące się w hali dla zwierząt.

Na podstawie przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że stosowane modele wykorzystujące równania różniczkowe są stabilne numerycznie. Wprowadzenie zaburzeń losowych za pomocą stochastycznych równań różniczkowych nie powodowało odbiegania wyników od modelu deterministycznego. Zwiększanie poziomu zaburzeń powodowało jedynie większe wahania otrzymanych wartości mikroklimatu dookoła głównego trendu. Z tego powodu zaburzenia nie mogą być zbyt duże, bo wprowadzają zbyt drastyczne zmiany parametrów, niż jest w rzeczywistości.

Na proces szacowania parametrów mikroklimatu w budynku inwentarskim znaczenie ma również krok czasowy pomiędzy kolejnymi szacowaniami. Zbyt długi przedział czasowy zmniejsza jakość szacowanych parametrów. Optymalnym czasem pomiędzy kolejnymi punktami, w których wyznaczane są wartości parametrów okazuje się 120s. Większe odstępy dla niektórych budynków powodowały problemy ze zbieżnością rozwiązania numerycznego. W przypadku modelu SDE, nawet przy dłuższych krokach czasowych (900s), otrzymywane wartości nie prowadziły do całkowitej rozbieżności, jak to miało miejsce w przypadku modelu deterministycznego (kiedy otrzymywano wartości temperatury powyżej 100°C, czy ujemne wilgotności powietrza). Istnieje możliwość dalszej modyfikacji modelu opartego o stochastyczne równania różniczkowe, uzależniając wielkość zaburzeń losowych w zależności od poszczególnych składowych bilansu cieplnego lub wilgotnościowego, co umożliwi wierniejsze oddanie istotności ich wpływu na kształtowanie mikroklimatu, jak również stopień ich niepewności i nagłych zmian.

Zastosowanie modelu opisującego kształtowanie mikroklimatu w budynkach inwentarskich opartego o teorię szeregów czasowych TS również pozwoliło na przewidywanie zachowania mikroklimatu oraz określenie zależności między jego parametrami a warunkami zewnętrznymi. Jednak na podstawie przeprowadzonych analiz symulacyjnych można stwierdzić, że model TS nie do końca się sprawdził. Dla niektórych budynków oszacowane współczynniki na podstawie danych pomiarowych często nie pozwoliły na poprawne odtworzenie zmian parametrów mikroklimatu i wtedy użyteczność prognozy była jedynie na krótkim odcinku czasowym. Szczególnie można to zaobserwować w przypadku, gdy model deterministyczny wskazywał na większe zaniżenie estymowanych wartości parametrów mikroklimatu. Wynika z tego, że stosowanie modelu TS jest użyteczne głównie w przypadku właściwego odzwierciedlenia zachodzących procesów przez model deterministyczny. Dodatkowo zaobserwowano, że model TS lepiej sprawdzał się w przypadku modelowania temperatury, niż w przypadku wilgotności powietrza wewnątrz budynku. Najlepsze dopasowanie uzyskiwano dla modeli ARIMAX(1,0,0) lub ARIMAX(2,0,0). Zwiększanie rzędu modelu przez dodanie liczby współczynników regresyjnych nie powodowało różnic w dopasowaniu modelu do danych rzeczywistych, a powodowało znaczne wydłużenie obliczeń. W odniesieniu do wyników zaprezentowanych przez Daskalova (1997), zaprezentowane w opracowaniu badania dotyczyły dłuższych okresów, w których czasami następowały drastyczne zmiany niektórych parametrów.

Generalnie, uzyskane wyniki świadczą, że przedstawione modele mogą być bardzo przydatne przy weryfikacji kształtowania mikroklimatu w budynkach inwentarskich, zarówno ze względu na wymiarowanie budynków, jak również prognozowanie zmian mikroklimatu. Zastosowane modele pozwoliły powiązać w całość modele cząstkowe opisujące

zjawiska wymiany ciepła i wilgoci w przypadku poszczególnych elementów składowych. Dodatkowo umożliwiły one wierniejsze oddanie dynamicznych zmian mikroklimatu w odróżnieniu od modeli projektowych opartych o warunki ustalone. Jednak wskazana jest rozbudowa modeli o dodatkowe składniki, jakimi mogą być np. wierniejsze oddanie zjawiska akumulacji ciepła przez przegrody, czy ogrzewanie budynku i pomieszczeń promieniami słonecznymi oraz przenikanie wilgoci przez ściany budynku. Dla lepszego oszacowania współczynników potrzebne są dłuższe okresy obserwacji i w różnych warunkach pogodowych dla tego samego budynku (Fiedorowicz i Łochowski, 2008; Fiedorowicz i Mazur, 2011a,b), zarówno w okresie zimowym, letnim lub najbardziej zmiennym wiosenno-jesiennym.

Modułowa konstrukcja przygotowanej aplikacji komputerowej, wspomagającej szacowanie parametrów mikroklimatu w budynkach dla bydła, powala na dostosowanie jej do innych gatunków zwierząt oraz budynków. Możliwe jest to poprzez wprowadzenie odpowiednich formuł matematycznych odzwierciedlających wielkość produkcji ciepła przez poszczególne gatunki i kategorie wiekowe zwierząt.

Struktura programu umożliwia także późniejszą rozbudowę funkcjonalności samej aplikacji, poprzez dodanie kolejnych narzędzi związanych zarówno z wizualizacją otrzymanych wyników, jak również ich analizy porównawczej. Oprócz analizy prognozowanych zmian parametrów mikroklimatu w budynku, praktyczne wydaje się zastosowanie podejścia związanego z wymiarowaniem budynku, jak również dostosowaniem obsady zwierząt, poprzez zastosowanie odpowiednich narzędzi optymalizacyjnych. Wymaga to jednak przeprowadzenia bardziej obszernych badań, które umożliwią weryfikację otrzymywanych wyników.

Niniejsze opracowanie niestety nie uwzględnia wszystkich problemów związanych z kształtowaniem mikroklimatu w budynkach inwentarskich. System, na który składają się i wzajemnie na siebie oddziałują budynek, przebywające w nim zwierzęta oraz środowisko zewnętrzne jest bardzo złożony. Zachodzą w nim skomplikowane procesy biologiczne, fizyczne i chemiczne. Wszystko to sprawia, że rozpatrzenie wszystkich aspektów jest bardzo trudne. W pracy skoncentrowano się jedynie na dwóch głównych parametrach mikroklimatu, jakimi są temperatura powietrza oraz jego wilgotność względna. Pominięto kwestię modelowania procesów wydzielania szkodliwych gazów przez zwierzęta i ich odchody oraz zanieczyszczenia powietrza pyłami. Założono, że przyjęte metody szacowania poziomu wymiany powietrza w budynku oparte, na przykład, o kryterium wymiany pary wodnej, dwutlenku węgla czy zalecanej minimalnej ilości wentylowanego powietrza jednocześnie gwarantują usunięcie z hali dla zwierząt nadmiaru szkodliwych substancji, jakimi są także amoniak, siarkowodór.

W pracy ze względu na przeprowadzone pomiary doświadczalne skoncentrowano się na kształtowaniu mikroklimatu w budynkach dla bydła. Jednak poruszana tu problematyka dotyczy też innych budynków, w których prowadzona jest działalność gospodarcza, związana z hodowlą zwierząt czy roślin. Podobne badania związane z określeniem optymalnych warunków w budynkach prowadzone są przez innych badaczy w związku z hodowlą drobiu, świń, czy w szklarniach. Coraz częściej temat hodowli zwierząt gospodarskich rozważany jest jako istotny czynnik związany z produkcją gazów cieplarnianych. Postrzega się jej niekorzystne oddziaływanie na globalne ocieplanie powietrza i zauważalne zmiany otaczającego nas klimatu. W związku z tymi zmianami coraz częściej mamy do czynienia z ano-

maliami pogodowymi, które w losowy sposób zaburzają przyjęte warunki funkcjonowania budynku i zalecane normy przy modelowaniu poszczególnych składników zachodzących procesów. Z tego powodu logiczne wydaje się rozważanie dynamicznych modeli kształtowania mikroklimatu, gdzie wymiana ciepła i wilgoci nie zachodzi w warunkach ustabilizowanych. Dodatkowo rozważenie losowych zaburzeń przy szacowaniu parametrów mikroklimatu pozwala rozbudować deterministyczne modele o analizę ich wrażliwości na niespodziewane warunki pogodowe. Opisane zagadnienia mogą być użyteczne przy projektowaniu budynku, ustalaniu obsady zwierząt, jak również stanowić podstawę prognozowania zachodzących zmian mikroklimatu pod wpływem oddziaływania czynników zewnętrznych. Dzięki takim narzędziom możliwe jest wcześniejsze reagowanie na zapowiadane nagłe zmiany warunków pogodowych. Wykorzystując ręczne lub automatyczne sterowanie wielkością strumienia wymienianego powietrza, poprzez zmianę przekrojów otworów wywiewnych i nawiewnych w budynku, możliwe jest uniknięcie wystąpienia niekorzystnych warunków bytowych dla zwierząt.

W zaprojektowanym systemie kształtowania mikroklimatu zastosowano uproszczone modele matematyczne nie uwzględniające niektórych czynników, które mogą mieć wpływ na kształtowanie mikroklimatu w budynku inwentarskim. Przede wszystkim pominięto oddziaływanie słońca i nagrzewanie ścian budynku w wyniku jego promieniowania, jak również nagrzewanie powietrza i elementów wewnątrz budynku przez otwory przezroczyste, takie jak okna czy świetliki w połaciach dachowych. W obecnej formie aplikacji pominięto również zagadnienie modelowania akumulacji ciepła przez przegrody pomieszczeń i oddawanie ciepła do powietrza w warunkach zimowych. Widać to między innymi na dużym podobieństwie zmian temperatury na zewnętrz budynku i oszacowanymi przebiegami temperatury powietrza wewnętrznego. W rzeczywistości amplitudy zmian temperatury wewnętrznej są mniejsze, niż te modelowane.

W celu dokładniejszej weryfikacji opracowanych modeli konieczne jest przeprowadzenie dalszych badań uwzględniających dłuższe okresy czasowe, pokazujące wzajemne oddziaływanie na siebie poszczególnych składników systemu. Szczególnie istotne jest to w przypadku modelu opartego o szeregi czasowe, w których wartości współczynników regresyjnych wyznaczane są na podstawie wcześniejszych wskazań. Również wskazane jest dokonanie pomiarów dla tych samych budynków w różnych warunkach pogodowych, uwzględniających okresy zimowe, letnie, ale także wiosenne czy jesienne, w których często zachodzą duże zmiany w odniesieniu dobowym. Niestety często oszacowane współczynniki obowiązują jedynie dla konkretnego budynku i nie mogą być uwzględnione dla innego.

Główną motywacją przygotowania opracowania było zbadanie możliwości stosowania stochastycznych modeli matematycznych do analizy kształtowania mikroklimatu w budynkach inwentarskich. W dobie coraz wydajniejszych komputerów, narzędzia matematyczne i informatyczne komputerowe zyskują coraz większe zastosowanie w różnych dziedzinach nauki, w tym w dziedzinie inżynierii rolniczej. Projektowane systemy informatyczne pozwalają na opisanie poszczególnych elementów systemu i rozwiązywania coraz to bardziej złożonych zagadnień i zjawisk przyrodniczych. Pozwalają one na lepsze poznanie natury zjawiska oraz wizualizacji uzyskanych wyników symulacji. W przygotowanej aplikacji komputerowej rozważono jedynie uśrednione wartości dwóch parametrów mikroklimatu obowiązujące w strefie przebywania zwierząt. Wraz ze wzrostem mocy obliczeniowych komputerów możliwe jest także projektowanie rozbudowanych modeli przestrzennych

szacujących zmiany parametrów mikroklimatu w odniesieniu do różnych miejsc w budynku oraz poziomym i pionowym przepływem strumieni ciepła. Jednak ze względu na duże rozbudowanie poszczególnych funkcji, te systemy wymagają wprowadzenia wielu dodatkowych informacji.

Stosowane przy wymiarowaniu budynku i otworów wywiewnych metody oparte są o uproszczone modele bilansu cieplnego, w których zakłada się stałe warunki wymiany ciepła oraz przyjęte statystyczne wartości parametrów klimatu zewnętrznego. Dzięki stosowaniu systemów komputerowego wspomagania podejmowania decyzji możliwe jest rozwiązywanie coraz bardziej złożonych problemów, niż było to jeszcze niedawno. Umożliwia to na przykład analizę dynamicznych zmian mikroklimatu i badanie oddziaływania poszczególnych czynników zewnętrznych.

W zależności od badanych składników systemu muszą być w nich uwzględnione mniej lub bardziej szczegółowe zjawiska zachodzące w obrębie samego budynku lub w bezpośrednim otoczeniu zwierząt. W przypadku modelowania mikroklimatu w budynkach inwentarskich ważne jest szczególnie uzyskanie średnich wartości w pomieszczeniach w strefie przebywania zwierząt, dlatego w pracy zaprezentowano uproszczony sposób szacowania warunków w hali dla zwierząt.

Obecnie coraz większe znaczenie zyskują metody i algorytmy wzorujące się na regułach zachodzących w przyrodzie, w której obiekty na wskutek ewolucji dążą do uzyskania optymalnych decyzji. Do takich metod zaliczyć można metody modelowania wykorzystujące sztuczną inteligencję, algorytmy genetyczne czy mrówkowe. Jednak wymagane są dla nich większe zbiory obserwacji, na podstawie których szukane są wzorce zależności pomiędzy badanymi wielkościami. Jeszcze innym narzędziem wykorzystywanym w automatyce i sterowaniu jest także teoria zbiorów rozmytych. Opracowane modele mogą stanowić podstawę opracowania układów sterowania i regulacji mikroklimatu w budynkach inwentarskich w czasie rzeczywistym.

LITERATURA

Albińska, E. (2014). Przemysłowy chów zwierząt ma znaczący wpływ na klimat, *Chrońmy klimat*, Online: http://www.chronmyklimat.pl/wideo/zielona-gospodarka/przemyslowy-chow-zwierzat-ma-znaczacy-wplyw-na-klimat. Dostęp 10.10.2018.

Asan, H. (1998). Effects of wall's insulation thickness and position on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*, *28*, 299-305.

Asan, H. (2000). Investigation of wall's optimum insulation position on from maximum time lag and minimum decrement factor point of view. *Energy and Buildings*, *32*, 197-203.

Asan, H. (2006). Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials. *Energy and Environment*, *41*, 615-620.

ASHRAE Handbook Fundamentals (2013). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Ashrae.

Assem, E.O. (2011). Correlating thermal transmittance limits of walls and roofs to orientation and solar absorption. *Energy and Buildings*, *43*, 3173-3180.

Axaopoulos, P., Panagakis, P., Kyritsis S. (1992). Computer simulation assessment of the thermal microenvironment of growing pigs under summer conditions. *Transactions of the ASAE*, *35*(3), 1005-1009.

Axaopoulos, P., Panagakis, P., Pitsilis, G., Kyritsis S. (1994). AGRISM: A PC user-friendly transient simulation program for growing-finishing swine buildings. *Applied Engineering in Agriculture*, *10*(5), 735-738.

Axaopoulos, P., Panagakis, P., Tsavdaris, A., Georgakakis D. (2001). Simulation and experimental performance of solar-heated anaerobic digester. *Solar Energy*, *70*(2), 155-164.

Basińska, M., Koczyk, H. (2001). *Rok reprezentatywny jako odwzorowanie godzinowej zmienności podstawowych elementów i procesów klimatycznych*. Mat. konf. Fizyka budowli w teorii i praktyce. Łódź.

BISPROL (1990), seria n 17/90. *Podstawowe zasady projektowania wentylacji naturalnej w budynkach inwentarskich dla bydła i trzody chlewnej*, Warszawa.

Bieda, W., Radoń, J., Herbut, E. (2004). Tubular recuperator with a solar collector for recovery of heat from poultry house exhaust air*, Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, *Agricultural Engineering*, *7*(2).

Blanes, V., Pedersen, S. (2005). Ventilation flow in pig houses measured and calculated by carbon dioxide, moisture and heat balance equations. *Biosystems Engineering*, *92*(4), 483-493.

Bogosłowski, W. N. (1985). *Procesy cieplne i wilgotnościowe w budynkach*. Arkady, Warszawa.

Box, G. E. P., Jenkins, G. (1970). *Time Series Analysis, Forecasting and Control*, Holden-Day, San Francisco, CA.

Bruce, J. M. (1978). Natural convection through openings and its application to cattle building ventilation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *23*, 151-167.

Bruce, J. M. (1982). Ventilation of a model livestock building by thermal buoyancy. *Transactions of the ASAE*, *25*(6), 1724-1726.

Brzóska, J., Dorobczyński, L. (2005). *MATLAB środowisko obliczeń naukowo-technicznych*. MIKOM. Warszawa.

Burda K. (2018). Mięso jest dla Ziemi gorsze niż samochody i dymiące fabryki. *Newsweek*. Online: https://www.newsweek.pl/wiedza/nauka/mieso-jest-dla-ziemi-gorsze-niz-samochody-i-dymiace-fabryki/g5mqxlj. Dostęp 10.10.2018.

Cichoń, T., Bieda, W. (1985). Przegląd i analiza sposobów obliczania zapotrzebowania ciepła na wentylację pomieszczeń inwentarskich. *Zesz. Nauk. AR w Krakowie*, ser. *Melioracja*, *187*(11), 77-91.

CIGR (1984). *Climatization of animal houses*. Commission Internationale du Génie Rural. Report of Working Group. Scottaspress Publishers Limited, Aberdeen.

CIGR (1992). *Climatization of animal houses*. Commission Internationale du Génie Rural. 2nd Report of Working Group. Centre for Climatization of Animal Houses, State Univeristy of Ghent.

CIGR (1999). *Handbook of Agricultural Engineering. Animal Production & Aquacultural Engineering*. Edited by CIGR – The International Commission of Agricultural Engineering.

CIGR (2002). *Climatization of animal houses. Heat and moisture production at animal and house levels*. Commission Internationale du Génie Rural. 4th Report of Working Group. Research Centre Bygholm, Horsens (Denmark).

CIGR (2014). *The design of dairy cow and replacement heifer housing*. Report of the CIGR Section II Working Group No. 14. Cattle Housing.

Chepete, J., Xin, H. (2002). Heat and Moisture Production of Poultry and Their Housing Systems - A Literature Review. *ASHRAE Transactions,* 108.

Cooper, K., Parsons, D. J., Demmers, T. (1998). A thermal balance for livestock buildings for use in climate change studies. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *69*(1), 43-52.

Daskalov, P. I. (1997). Prediction of Temperature and Humidity in a Naturally Ventilated Pig Building, *J. agric. Engng Res*, *68*, 329-339.

Dobkowski, A., Staśkiewicz, K. (2002). *Obory dla krów. Podstawowe wymagania technologiczne i techniczne*. BISPROL, Warszawa.

Dumont, E. (2016). Impact of the treatment of NH3 emissions from pig farms on greenhouse gas emissions. Quantitative assessment from the literature data. *New Biotechnology*, 46: 31-37.

Fiedorowicz, G. (2001). *Struktura stanowisk dla bydła przy produkcji w cyklu zamkniętym*. Mat. konf. „Problemy intensyfikacji produkcji zwierzęcej z uwzględnieniem ograniczeń ochrony środowiska i przepisów UE, IBMER, Warszawa.

Fiedorowicz, G. (2006). Kształtowanie warunków środowiskowych w oborach wolnostanowiskowych. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, *4*(14), 45-50.

Fiedorowicz, G., Łochowski, B. (2008). Mikroklimat pomieszczeń w oborach wolnostanowiskowych w okresie letnim. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, *4*(16), 111-125.

Fiedorowicz, G., Mazur, K. (2011a). Mikroklimat pomieszczeń w oborach wolnostanowiskowych w okresie wiosenno-letnim. Cz. I. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, *1*(19), 123-134.

Fiedorowicz, G., Mazur, K. (2011b). Mikroklimat pomieszczeń w oborach wolnostanowiskowych w okresie jesienno-zimowym. Cz. II. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, *3*(19), 111-120.

Foster, M. P., Down, M. J. (1987). Ventilation of livestock buildings by natural convection. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *37*(1), 1-13.

Gaziński, B., Szczechowiak, B. (1987). *Kształtowanie klimatu pomieszczeń inwentarskich trzody chlewnej*, PWRiL, Poznań.

Gdula, S. (1984). *Przewodzenie ciepła*. PWN, Warszawa.

Głuski, T. (2005a). Porównanie temperatur w hali zwierząt wyznaczonych na podstawie bilansu ciepła obliczonego różnymi metodami. *Inżynieria Rolnicza*, *6*(66), 181-187.

Głuski, T. (2005b). *System kształtowania mikroklimatu w budynkach dla bydła*. Rozprawy Naukowe. Wydawnictwo AR w Lublinie.

Głuski, T. (2008). Metody określania temperatury wewnętrznej w budynkach dla bydła. *Inżynieria Rolnicza*, *2*(100), 31-36.

Głuski, T. (2012). Method for determining the ventilation air quantity in buildings for cattle on a base of CO_2 concentration. *Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa*, PAN Oddział Lublin, T. 12 nr 2, s. 63-66.

Głuski, T. (2013). Kierunki rozwoju nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjno-funkcjonalnych budynków inwentarskich na przykładzie budynków dla bydła mlecznego. (w) Halicka A. (red.) *Budownictwo na obszarach wiejskich: nauka, praktyka, perspektywy*, Lublin, Politechnika Lubelska, 161-172, 978-83-63569-30-3.

Gürdil, G. A. K. (2009). Numerical simulation of natural ventilation rates in laying hen houses. *Journal of Animal and Veterinary Advances 8*(4), 624-629.

Hahn, G. L., Sällvik, K. (1979). Livestock compensatory performance influences on shelter criteria; a discussion of concepts. *ASAE-paper* 79-4016, St Joseph, Michigan.

Hahn, G. L., Nygaard, A., Simensen, E. (1983). Towards establishing rational criteria for selection and design of livestock environments, *ASAE-paper* 83 - 4517.

Hellickson, M. A., Walker, J. N. (1983). *Ventilation of agricultural structures*. ASAE. ISBN 0-916150-56-9.

Higham, D. J. (2001). An algorithmic introduction to numerical simulation of Stochastic Differential Equations, *SIAM Review*, *43*(3): 525-546.

Holm, A., Radon, J., Künzel, H., Sedlbauer, K. (2004). *Description of the IBP holistic hygrothermal model*. Fraunhofer-Institut für Bauphysik.

Instytut Zootechniki w Krakowie (1977). *Karty informacyjne do założeń technicznych produkcji zwierzęcej*. Nr karty 1.01.04.

Jepsson, K. H. (2000). Carbon dioxide emission and water evaporation from deep litter systems. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 77(4), 429-440.

Jepsson, K. H. (2002a). Aerial environment in uninsulated livestock buildings. *Agraria, 245*. Swedish University of Agricultural Sciences.

Jepsson, K. H. (2002b). Diurnal variation in ammonia, carbon dioxide and water vapour emission from an uninsulated, deep litter building for growing/finishing pigs. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *81*(2), 213-223.

Jones, W. P. (2001). *Klimatyzacja*. Arkady. Warszawa.

Kavolelis, B., Bleizgys, R., Cesna, J. (2010). Emission of water vapour in uninsulated cowshed. *Ann. Anim. Sci.*, *10*(1), 57-65.

Klemm, P. (red.) (2005) *Budownictwo ogólne*. *Tom 2.* Fizyka budowli, Arkady, Warszawa.

Kloeden, P. E., Platen, E. (1992). *Numerical Solution of Stochastic Differential Equations*, Springer.

Kontoleon, K. J., Bikas, D. K. (2007). The effect of south wall's outdoor absorption coefficient on time lag, decrement factor and temperature variations. *Energy and Buildings*, *39*, 1011-1018.

Kurpaska, S., Latała, H., Rutkowski, K. (2003). Sterowanie parametrami mikroklimatu wewnątrz tunelu foliowego. *Inżynieria Rolnicza*, *11*(53), 115-122.

Lashof, D.A., Ahuja, D. R. (1990). Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming, *Nature*, 344, 529-531.

Leip, A. (2010). Quantitative quality assessment of the greenhouse gas inventory for agriculture in Europe, *Climate Change, 103*, 245–261.

Leip, A., Billen, G., Garnier, J., Grizzetti, B., Lassaletta, L., Reis, S., Simpson, S., Sutton, M. A., de Vries, W., Weiss, F., Westhoek, H. (2015). Impacts of European livestock production: Nitrogen, sulphur, phosphorus and greenhouse gas emissions, land-use, water eutrophication and biodiversity. *Environmental Research Letters*, 10, 115004.

Lenard, J. (1983). *Podstawy budownictwa rolniczego*, PWRiL, Warszawa.

Lewandowski, J. (1997). *Mikroklimat w obiektach inwentarskich dla trzody chlewnej i bydła*, IBMER, Warszawa.

Liberati, P., Zappavigna, P. (2007). A dynamic computer model for optimization of the internal climate in swine housing design. *Transactions of the ASBE*, *50*(6), 2179-2188.

Liu, Z., Liu, Y. (2018). Mitigation of greenhouse gas emissions from animal production, *Greenhouse Gases-Science And Technology*, *8*(4): 627-638

Marciniak, A. M., Romaniuk, W., Tomza, A. (2005). Wpływ systemu chowu na koncentrację zanieczyszczeń gazowych (NH_3, CO_2, H_2S) w oborach wolnostanowiskowych. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, *4*(13), 71-77.

Mazur, K. (2011). Badanie mikroklimatu w oborach wolnostanowiskowych w okresie wiosennym. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, *1*(19), 111-122.

Martinez, W. L., Martinez, A. R. (2015). Computational Statistics Handbook with MATLAB, Third edition. Computer Science and Data Analysis Series. Chapman & Hall/CRC Press.

Modongo, O., Kulshreshtha, S. N. (2018). Economics of mitigating greenhouse gas emissions from beef production in western Canada, *Agricultural Systems*, 162: 229-238.

Myczko, A., Kreis-Tomczak, K., Pawlak, S., Rzeźnik, W. (2005). Farm building with a positve energy balance. *Inżynieria Rolnicza*, *1*(61), 109-116.

Nowakowski, N., Radoń, J. (1990). Koncepcja modelu obliczeniowego niestacjonarnych, trójwymiarowych przepływów ciepła w gruncie pod budynkiem inwentarskim. *Zesz. Nauk. AR w Krakowi*e, ser. *Melioracja*, *240*(14), 91-107.

Øksendal, B. (2003). *Stochastic Differential Equations. An Introduction with Applications*. Fifth Edition, Corrected Printing, Springer-Verlag Heidelberg New York.

Panagakis, P., Axaopoulos, P. (2004). Comparison of two modeling methods for the prediction of degree-hours and heat-stress likelihood in swine building. *Transactions of the ASAE*, *47*(2), 585-590.

Panagakis P., Axaopoulos, P. (2008). Comparing fogging strategies for pig rearing using simulations to determine apparent heat-stress indices. *Biosystems Engineering*, *99*, 112-118.

Pankowski, Z. (2001). *Obora wolnowybiegowa czy uwięziowa*. Top agrar extra. Polskie Wydawnictwo Rolnicze, Poznań.

Pedersen, S. (1996). *Diurnal variations in animal activity in buildings for cattle, pigs and poultry*. Subresults from EU-project PL 900703. National Institute of Animal Science, Internal report No. 66 Denmark.

Pedersen, S., Blanes-Vidal, V., Joergensen, H., Chwalibog, A., Haeussermann, A., Heetkamp, M. J. W., Aarnink, A. J. A. (2008). *Carbon Dioxide Production in Animal Houses: A literature Review*. Agricultural Engineering International: CIGR Ejournal. Manuscript BC 08 008, Vol. X. December.

Pedersen, S., Morsing, S., Strom, J. (2005). *Simulation of Heat Requirement and Air Quality in Weaner Houses for Three Climate Regions Using CIGR 2002 Heat Production Equations*. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Vol. VII. Manuscript BC 05 001. June, 2005.

Pedersen, S., Pedersen, C. B. (1995). Animal Activity Measured by Infrared Detectors, *Journal of Agricultural Engineering Research 61*(4):239-246.

Pedersen, S., Sällvik, K. (2002). *Heat and moisture production at animal and house levels*. 4th Report of Working Group on Climatization ofAnimal Houses. CIGR. Horsens.

Pedersen, S., Takai, H., Johnsen, J. O., Metz, J. H. M., Groot Koerkamp, P. W. G., Uenk, G. H., Phillips, V. R., Holden, M. R., Sneath, R. W., Short, J. L., White, R. P., Hartung, J., Seedorf, J., Schröder, M., Linkert, K. H. H., Wathes, C. M. (1998). A comparison of three balance methods for calculating ventilation rates in livestock buildings. *Journal of Agricultural Engineering Research, 70*(1), 25-37.

Płoński, W., Pogorzelski, J. A. (1979). *Fizyka budowli*, Arkady. Warszawa.

PN-76/B-03420 (1976). *Wentylacja i klimatyzacja. Parametry obliczeniowe powietrza zewnętrznego*.

PN-82/B-02403 (1982). *Temperatury obliczeniowe zewnętrzne*.

PN-EN ISO 6946 (1999). *Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.*

PN-EN ISO 13370 (2001). *Właściwości cieplne budynków. Wymiana ciepła przez grunt. Metody obliczania*.

PN-EN ISO 13786 (2001). *Właściwości cieplne komponentów budowlanych. Dynamiczne charakterystyki cieplne. Metody obliczania*.

Pogorzelski, J. A. (1976). *Fizyka cieplna*, PWN, Warszawa.

Raczek, A., Wachowicz, E. (2014). Model procesu wymiany ciepła i masy w powietrz wewnątrz szklarni, *Inżynieria Rolnicza*, *1*(149): 185-195.

Radoń, J. (1986). Wpływ konstrukcji ściany na dobowe przebiegi strumienia cieplnego. *Zesz. Nauk. AR w Krakowie*, ser. *Melioracja*, *201*(12), 3-16.

Radoń, J. (2004). Model obliczeniowy i analiza dynamicznego kształtowania się mikroklimatu budynków rolniczych na przykładzie brojlerni. *Zesz. Nauk. AR w Krakowie*, ser. *Monografie*, *410* (299), 150.

Radoń, J. (2005). Prognozowanie kształtowania się mikroklimatu budynków inwentarskich – możliwości i ograniczenia. *Inżynieria Rolnicza*, *7*(67) 245-253.

Recknagel, H., Sprenger, E. (1976). *Ogrzewanie i klimatyzacja – poradnik Arkady*, Warszawa.

Romaniuk, W., Karbowy, A. (2008). *Kształtowanie warunków środowiskowych w nowoczesnych obiektach inwentarskich*. Problemy Inżynierii Rolniczej, 4, 93-108.

Romer, E. (1949). *Regiony klimatyczne Polski*. Prace Wrocławskiego Towarzystwa Naukowego. Seria B. Nr 16.

Rutkowski, K. (2008). Analiza energetyczna wybranych typów szklarni. *Inżynieria Rolnicza*, 9(107), 249-255.

Sällvik, K., Wallberg, K. (1984). The effects of air velocity and temperature on the behaviour and growth of pigs. J*ournal of Agricultural Engineering Res*., *30*, 305 – 312.

Samer, M., Loebsin, C., Fiedler, M., Ammon, C., Berg, W., Sanftleben, P., Brunsch, R. (2011). Heat balance and tracer gas technique for air flow rates measurement and gaseous emissions quantification in naturally ventilated livestock buildings. *Energy and Buildings*, *43*, 3711-3728.

Schauberger, G., Piringer, M., Petz, E. (1999). Diurnal and annual variation of odour emission from animal houses: a model calculation for fattening pigs. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *74*(3), 251-259.

Schauberger, G., Piringer, M., Petz, E. (2000). *Steady-state balance model to calculate the indoor climate of livestock buildings, demonstrated for finishing pigs*. International Journal of Biometeorology, 43(4), 154-162.

Siarkowski, Z. (1997). *Metoda optymalizacji procesów technologicznych w chowie bydła*. Rozprawy naukowe Akademii Rolniczej w Lublinie (207).

Sousa, P., Pedersen, S. (2004). *Ammonia Emission from Fattening Pig Houses in Relation to Animal Activity and Carbon Dioxide Production*. Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development. Manuscript BC04 003. Vol.VI. December.

Stankiewicz, A. (2009a). Optymalne sterowanie temperaturą i stężeniem dwutlenku węgla w wybranym procesie klimatycznym szklarni. *Inżynieria Rolnicza*, *9* (118), s. 273-281.

Stankiewicz, A. (2009b). O optymalnym sterowaniu temperaturą i stężeniem dwutlenku węgla w szklarni. *Inżynieria Rolnicza*, *8*(117), s. 189-198.

Strøm, J. S. (1978). *Heat loss from cattle, swine and poultry as basis for design of environmental control systems in livestock building*. SBI-Landbrugsbyggeri 55, Danish Building Research Institute, Denmark.

Szlachta, J., Szewczyk, B. (1983). *Mechanizacja produkcji zwierzęcej*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu.

Taler, J., Duda, P. (2003). *Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła*. WNT. Warszawa.

Teye, F. K., Hautala, M., Pastell, M., Praks, J., Veermäe, I., Poikalainen, V., Pajumägi, A., Kivinen, T., Ahokas, J. (2008). Microclimate and ventilation in Estonia and Finnish dairy buildings. *Energy and Buildings*, 40, 1194-1201.

Van Kampen, N. G. (1990). *Procesy stochastyczne w fizyce i chemii*. PWN. Warszawa.

Van Ouwerkerk, E. N. J., Pedersen, S. (1994). *Application of the carbon dioxide mass balance method to evaluate ventilation rates in livestock buildings*. XII CIGR World Congress on Agricultural Engineering. Milan. Proceedings. Vol. 1.

Wachowicz, E. (2013). Automatyka w sterowaniu mikroklimatem w wybranych obiektach rolniczych (w) Hołownicki R., Kuboń M.(red), *Współczesna inżynieria rolnicza – osiągnięcia i nowe wyzwania*, Tom III. Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków.

Winnicki, S., Pleskot, K., Woyke, W. (2003). *Kodeks zaleceń i praktyk do utrzymania dobrostanu bydła*. IBMER s.46, Warszawa.

Wolski, L. (1988). *Mikroklimat w budynkach inwentarskich*. PWN. Warszawa.

Wolski, L. (2001). *Wymiarowanie termiczne obiektów w zabudowie rozproszonej*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa, ISBN 83-7207-252-3.

Wrotkowski, K. (2006). *Bilans cieplny organizmu zwierzęcia jako podstawowe kryterium wyboru systemu utrzymania trzody chlewnej*. Rozprawy naukowe Akademii Rolniczej w Lublinie.

Zhang, G., Strøm, J.S., Li, B., Rom, H.B., Morsing, S., Dahl, P., Wang, C. (2005). Emission of ammonia and other contaminant gases from naturally ventilated dairy cattle buildings. *Biosystems Engineering*, *92*(3), 355-364.

Zhang, J. S., Barber, E. M., Sokhansanj, S. (1992). A model of the dynamic thermal environment in livestock buildings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *53*, 103-122.

Zhang, J. S., Janni, K. A., Jacobson, L. D. (1989). Modeling natural ventilation induced by combined thermal buoyancy and wind. *Transactions of the ASAE*, *32*(6), 2165-2174.

Żelazny, H. (2004). Kształtowanie się temperatury wewnętrznych powierzchni ścian a straty biociepła z pomieszczenia dla zwierząt. *Zesz. Nauk. AR we Wrocławiu*, ser. *Zootechnika*, LII, *505*, 327-332.

Spis tabel

Tabela 2.1. Zalecane parametry powietrza w budynku inwentarskim do optymalnej produkcji dla bydła mlecznego ... 11
Tabela 5.1. Zestawienie podstawowych wymiarów budynków inwentarskich ... 48
Tabela 5.2. Właściwości termiczne przegród zewnętrznych budynków ... 49
Tabela 5.3. Informacja o otworach wentylacyjnych ... 50
Tabela 5.4. Obsada zwierząt w okresie pomiarów ... 51
Tabela 5.5. Zakresy wartości parametrów mikroklimatu i warunków pogodowych w okresie pomiarów ... 52
Tabela 6.1. Porównanie wartości współczynników dopasowania modelu deterministycznego dla temperatury powietrza przy różnych krokach czasowych (Przegaliny Duże) ... 67
Tabela 6.2. Porównanie wartości współczynników dopasowania modelu SDE dla temperatury powietrza przy różnych krokach czasowych (Przegaliny Duże) ... 69
Tabela 6.3. Porównanie wartości współczynników dopasowania modelu TS dla temperatury powietrza przy różnych krokach czasowych (Przegaliny Duże) ... 70
Tabela C.1. Porównanie dopasowania modeli do danych rzeczywistych dla temperatury wewnętrznej ... 114
Tabela C.2. Porównanie dopasowania modeli do danych rzeczywistych dla wilgotności względnej powietrza wewnętrznego ... 115
Tabela C.3. Ocena wpływu poziomu zaburzeń w modelach TS i SDE na szacowanie temperatury wewnętrznej w hali zwierząt ... 116
Tabela C.4. Ocena wpływu poziomu zaburzeń w modelach TS i SDE na szacowanie wilgotności względnej powietrza w hali zwierząt ... 117

Spis ilustracji

Rys. 2.1. Elementy składowe mające wpływ na mikroklimat panujący w budynku inwentarskim ... 9
Rys. 2.2. Szacowane udziały ciepła produkowanego przez bydło w odniesieniu do *hpu* w zależności od temperatury pomieszczenia ... 21
Rys. 2.3. Zmiany względnej aktywności zwierząt w cyklu dobowym względem średniej dziennej wg modelu Dromadera i Baktriana ... 23
Rys. 2.4. Położenie płaszczyzny neutralnej ciśnienia grawitacyjnego i szacowanie ilości powietrza wentylacyjnego ... 28
Rys. 4.1. Autokorelacja błędów przy ustalaniu rzędu szeregu czasowego ... 41
Rys. 5.1. Oszacowania szybkości wentylacji grawitacyjnej ($m^3 \cdot s^{-1}$) wg różnych metod obliczania w miejscowości Przegaliny Duże ... 53
Rys. 5.2. Oszacowania temperatury (°C) w hali zwierząt wg różnych metod określania szybkości wentylacji grawitacyjnej w miejscowości Przegaliny ... 54
Rys. 5.3. Schemat blokowy aplikacji wspomagającej analizę parametrów mikroklimatu ... 56
Rys. 5.4. Schemat blokowy etapu modelowania mikroklimatu ... 57
Rys. 5.5. Schemat blokowy głównych obliczeń parametrów mikroklimatu ... 58
Rys. 5.6. Główne okno aplikacji kształtowania mikroklimatu ... 59
Rys. 5.7. Formularz wyboru modeli wyznaczania parametrów mikroklimatu ... 60
Rys. 5.8. Przykładowy wykres zmian temperatury ... 61
Rys. 5.9. Przykładowy wykres zmian wilgotności absolutnej ... 62

Rys. 5.10. Przykładowy wykres zmian wilgotności względnej 62
Rys. 5.11. Przykładowy wykres oszacowanych zmian szybkości wentylacji 63
Rys. 5.12. Przykładowy wykres przedstawiający elementy składowe bilansu cieplnego 64
Rys. 6.1. Porównanie stabilności obliczania temperatury powietrza według modelu deterministycznego dla różnych kroków czasowych (wyniki dla budynku w Przegalinach Dużych) 67
Rys. 6.2. Porównanie stabilności obliczania temperatury powietrza według modelu SDE dla różnych kroków czasowych (wyniki dla budynku w Przegalinach Dużych) 68
Rys. 6.3. Porównanie stabilności obliczania temperatury powietrza według modelu TS dla różnych kroków czasowych (wyniki dla budynku w Przegalinach Dużych) 69
Rys. 6.4. Korelacje współczynników dopasowania modelu deterministycznego dla temperatury powietrza (analiza PCA) 73
Rys. 6.5. Korelacje współczynników dopasowania modelu deterministycznego dla wilgotności względnej powietrza (analiza PCA) 73
Rys. 6.6. Wpływ parametrów budynku na dopasowania modelu deterministycznego dla temperatury powietrza (analiza PCA) 74
Rys. 6.7. Wpływ parametrów budynku na dopasowania modelu deterministycznego dla wilgotności względnej powietrza (analiza PCA) 74
Rys. 6.8. Porównanie różnych przebiegów temperatury wewnętrznej oszacowanych modelem SDE w odniesieniu do modelu deterministycznego i rzeczywistych pomiarów (przy zaburzeniu 1°C i 1 p.p. RH, Ciemno 3) 75
Rys. 6.9. Porównanie różnych przebiegów temperatury wewnętrznej oszacowanych modelem TS w odniesieniu do modelu deterministycznego i rzeczywistych pomiarów (przy zaburzeniu 1°C i 1 p.p. RH, Ciemno 3) 78
Rys. 6.10. Porównanie zmian temperatury w hali zwierząt otrzymanych za pomocą modelu SDE przy różnym poziomie zaburzeń losowych (przykład dla Ossowy 2) 79
Rys. 6.11. Porównanie zmian wilgotności względnej w hali otrzymanych za pomocą modelu SDE przy różnym poziomie zaburzeń losowych (przykład dla Ossowy 2) 80
Rys. 6.12. Porównanie zmian temperatury w hali zwierząt otrzymanych za pomocą modelu TS przy różnym poziomie zaburzeń losowych (przykład dla Ossowy 2) 81
Rys. 6.13. Porównanie zmian wilgotności względnej w hali zwierząt otrzymanych za pomocą modelu TS przy różnym poziomie zaburzeń losowych (przykład dla Ossowy 2) 82
Rys. B.1. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Ciemno (1) 100
Rys. B.2. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Ciemno (2) 101
Rys. B.3. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Ciemno (3) 102
Rys. B.4. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Glinnik (1) 103
Rys. B.5. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Glinnik (2) 104
Rys. B.6. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Komarów 105
Rys. B.7. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Olszowiec 106
Rys. B.8. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Ossowa (1) 107
Rys. B.9. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Ossowa (2) 108

Rys. B.10. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Przegaliny Duże 109
Rys. B.11. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Turów 110
Rys. B.12. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Żerocin 111
Rys. B.13. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Żeszczynka 112
Rys. B.14. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Żulice 113
Rys. D.1. Schemat budynku w miejscowości Ciemno 118
Rys. D.2. Schemat budynku w miejscowości Glinnik 119
Rys. D.3. Schemat budynku w miejscowości Komarów 120
Rys. D.4. Schemat budynku w miejscowości Olszowiec 121
Rys. D.5. Schemat budynku w miejscowości Ossowa 122
Rys. D.6. Schemat budynku w miejscowości Przegaliny Duże 123
Rys. D.7. Schemat budynku w miejscowości Turów 124
Rys. D.8. Schemat budynku w miejscowości Żerocin 125
Rys. D.9. Schemat budynku w miejscowości Żeszczynka 126
Rys. D.10. Schemat budynku w miejscowości Żulice 127

ZAŁĄCZNIK A. MIARY DOPASOWANIA MODELI

Każdy model matematyczny wymaga oceny jego jakości w odniesieniu do poprawności odtwarzania rzeczywistego przebiegu procesu. W literaturze dostępnych jest wiele kryteriów pomagających ocenić zgodność symulowanych wartości i tych pomierzonych. Każde z kryteriów cechuje się swoimi właściwościami określającymi czułość na niezgodne wartości. W przypadku każdego z kryteriów należy dobrze zrozumieć jego istotę, dzięki czemu wyciągnięte na podstawie niego wnioski będą pozbawione niewłaściwej interpretacji.

W przedstawionych poniższej wzorach, prezentujących zastosowane w pracy wskaźniki dopasowania modelu do danych rzeczywistych, przyjęto następujące oznaczenia:

y_j – wartość parametru zaobserwowana w punkcie czasowym j, $j = 1, \ldots, N$,

$\overline{y}$ – średnia z zaobserwowanych wartości,

f_j – wartość parametru oszacowana wg modelu w punkcie czasowym j,

$\overline{f}$ – średnia z oszacowanych wartości.

Najprostszą miarą stosowaną do badania rozbieżności między obliczonymi a obserwowanymi wartościami jest maksymalny błąd absolutny (ang. *maximal absolute error*):

$$AE_m = \max_j \left| f_j - y_j \right| \tag{A.1}$$

Wartości współczynnika AE_{max} są nieujemne i są wyrażane w jednostkach badanego parametru. Jego stosowanie jest bardzo istotne w sytuacji, gdy trzeba zagwarantować, że dla wszystkich wartości obliczonych na podstawie modelu otrzymany absolutny błąd mieści się w przyjętym z góry przedziale. Inną miarą opartą o błąd absolutny pomiędzy wartościami obliczonymi a pomierzonymi jest średni błąd absolutny *MAE* (ang. *mean absolute error*), który również można wyrazić w jednostkach analizowanej wielkości fizycznej:

$$MAE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^{N} \left| f_j - y_j \right| \tag{A.2}$$

Kolejnym najczęściej stosowanym kryterium oceny modelu jest średni błąd kwadratowy *MSE* (ang. *mean square error*):

$$MSE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^{N} \left(f_j - y_j \right)^2 \tag{A.3}$$

Pewną niedogodnością przy interpretacji błędu *MSE* jest fakt, że nie jest on wyrażony w jednostkach mierzonej wielkości, tylko w ich kwadracie. Jednak w zamian uwypukla on znaczenie występowania większych błędów. W celu wyrażenia wartości *MSE* w podstawowych jednostkach wprowadzono błąd średni *RMSE* (ang. *root mean square error*), będący pierwiastkiem ze średniego błędu kwadratowego. Wyraża się go wzorem:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^{N} \left(f_j - y_j \right)^2} \tag{A.4}$$

Miarą przydatną do oceny tendencji modelu do stałego zaniżania lub zawyżania szacowanych wartości jest obciążenie (ang. *bias*):

$$Bias = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^{N} \left(f_j - y_j \right) \tag{A.5}$$

Oszacowania parametru uzyskane według modelu są nieobciążone jeżeli wartości współczynnika *Bias* oscylują wokół zera. Duże wartości dodatnie wskaźnika *Bias* wskazują na tendencję do zawyżania oceny, a ujemne do systematycznego zaniżania szacowanych wartości parametru. Miara *Bias* jest również wyrażana w jednostkach analizowanego parametru.

Pewną wadą powyższych miar jakości dopasowania modelu do danych rzeczywistych jest to, że wskazują one jedynie, że otrzymywane wartości są bliskie sobie. Nie pokazują natomiast wzajemnego zachowania, czyli czy porównywane wartości jednocześnie rosną czy maleją. Taką możliwość daje kolejny popularny wskaźnik, używany do oceny jakości dopasowania oszacowanych wartości do wartości rzeczywistych, czyli współczynnik korelacji *r* (ang. *correlation coefficient*):

$$r = \frac{\sum_{j=1}^{N} \left(f_j - \bar{f} \right) \left(y_j - \bar{y} \right)}{\sqrt{\sum_{j=1}^{N} \left(f_j - \bar{f} \right)^2} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^{N} \left(y_j - \bar{y} \right)^2}} \tag{A.6}$$

Wartości współczynnika korelacji *r* mieszczą się w przedziale ⟨-1,1⟩ i są niemianowane. Wartości dodatnie informują o podobnym zachowaniu wartości szacowanych i pomierzonych. Wzrost pierwszych odpowiada wzrostowi drugich. Wartość 1 wskazuje na idealną zgodność. Wartości ujemne świadczą o przeciwnej korelacji, czyli wzrost pomierzonych wartości powiązany jest ze spadkiem wartości szacowanych. Pewną wadą współczynnika korelacji *r* jest fakt, że wskazuje on podobieństwo zmian porównywanych zmiennych. Wartość 1, wskazująca idealne dopasowanie, otrzymywana jest także w przypadku, gdy porównywane są dwie krzywe o takim samym kształcie, ale przesunięte względem siebie wzdłuż osi wartości (pionowej) nawet o duży wektor.

Ostatnią miarą oceny jakości modelu użytą w pracy jest współczynnik determinacji R^2 (ang. *coefficient of determination*) pozwalający ocenić, jaką część zmienności zmiennej zależnej można wyjaśnić w oparciu o zmienną niezależną. W przypadku modeli liniowych współczynnik determinacji jest kwadratem współczynnika korelacji. W przypadku modeli nieliniowych najbardziej ogólny zapis współczynnika determinacji dany jest wzorem:

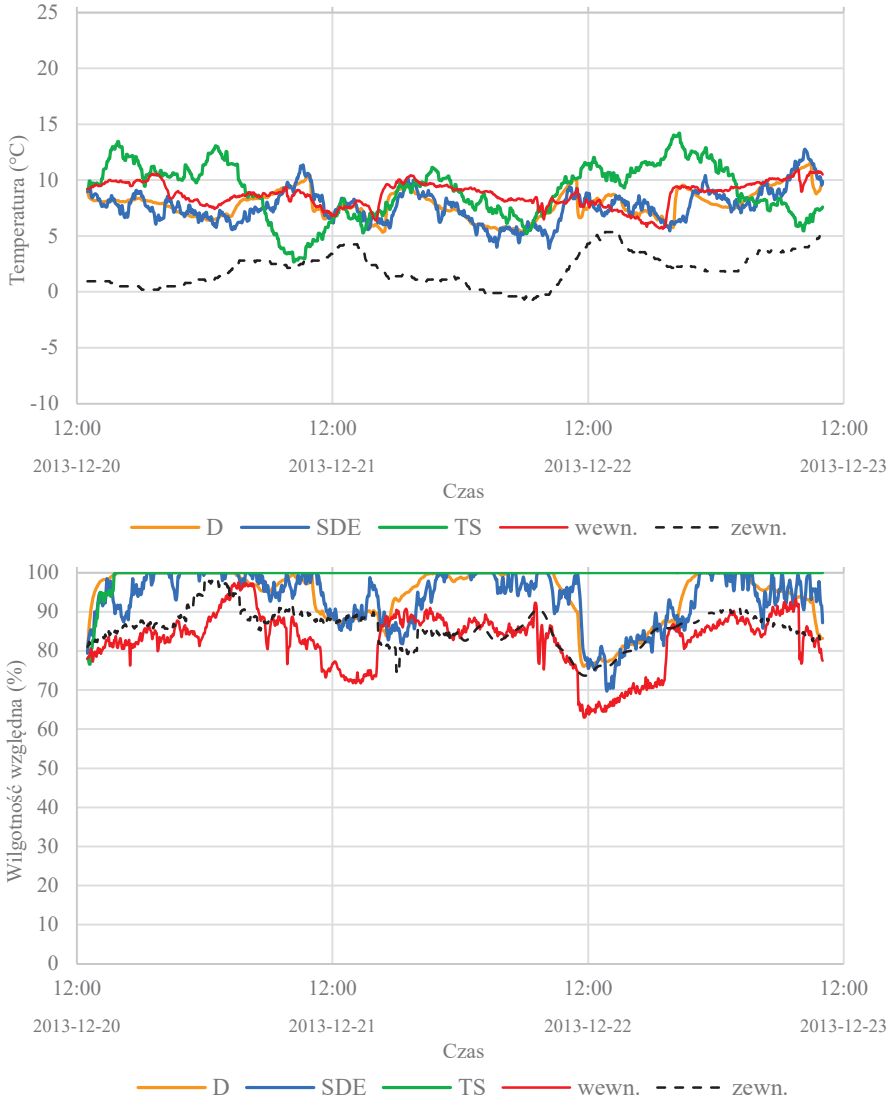
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{N} \left(f_j - y_j \right)^2}{\sum_{j=1}^{N} \left(\hat{y}_j - \bar{y} \right)^2} \tag{A.7}$$

Wartości współczynnika determinacji R^2 w przypadku zagadnień nieliniowych mieszczą się w przedziale ⟨-∞,1⟩ i jest wielkością niemianowaną. Wartość 1 współczynnika R^2 świadczy o idealnym dopasowaniu modelu do danych rzeczywistych. Wartość 0 świadczy

o tym, że model nie opisuje lepiej procesu, niż wartość średnia z zaobserwowanych wartości. Natomiast ujemne wartości wskazują, że średnia z zaobserwowanych wartości jest lepszym oszacowaniem dla wszystkich punktów pomiarowych niż te, które otrzymywane są z ocenianego modelu. Taka sytuacja często występuje, gdy model charakteryzuje się występowaniem dużego obciążenia *Bias*, tj. systematycznie zaniża lub zawyża szacowane wartości. W takim przypadku, nawet gdy krzywe obrazujące przebieg zmian wartości mają bardzo podobny kształt, ale są znacznie przesunięte względem osi wartości, współczynnik determinacji wskazuje na zupełny brak dopasowania.

Jak widać chociażby z powyżej zaprezentowanego przeglądu wskaźników oceny jakości dopasowania i użyteczności modelu jest wiele. Każdy z nich ma swoje zalety i wady, ale istotne jest zrozumienie ich istoty. Nie zawsze można wskazać najlepszy z nich i często trzeba rozpatrywać jednocześnie kilka wskaźników, aby wyciągnięte wnioski były właściwe.

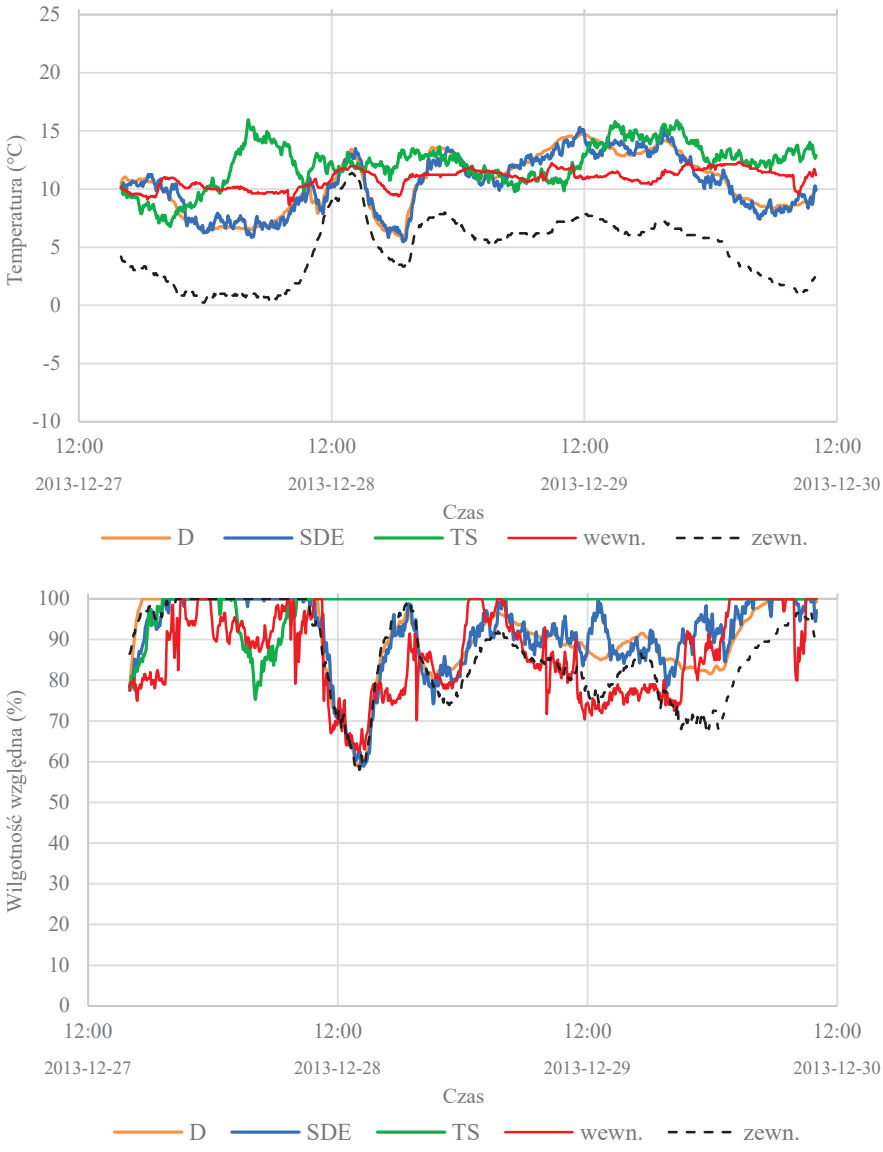
ZAŁĄCZNIK B. WYKRESY RZECZYWISTYCH I OSZACOWANYCH WARTOŚCI PARAMETRÓW MIKROKLIMATU



Rys. B.1. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Ciemno (1)

Fig. B.1. Measured and estimated values of microclimate parameters for a building in Ciemno (1)

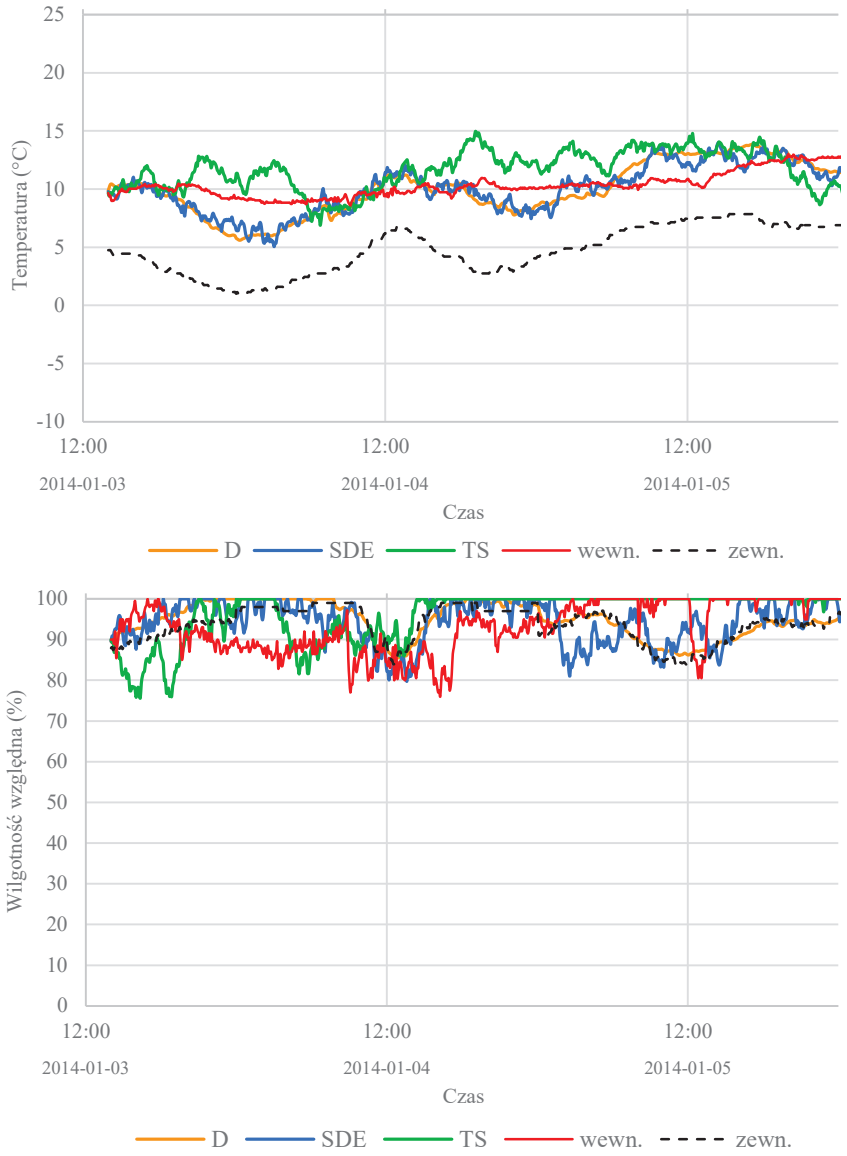
Źródło: opracowanie własne



Rys. B.2. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Ciemno (2)

Fig. B.2. Measured and estimated values of microclimate parameters for a building in Ciemno (2)

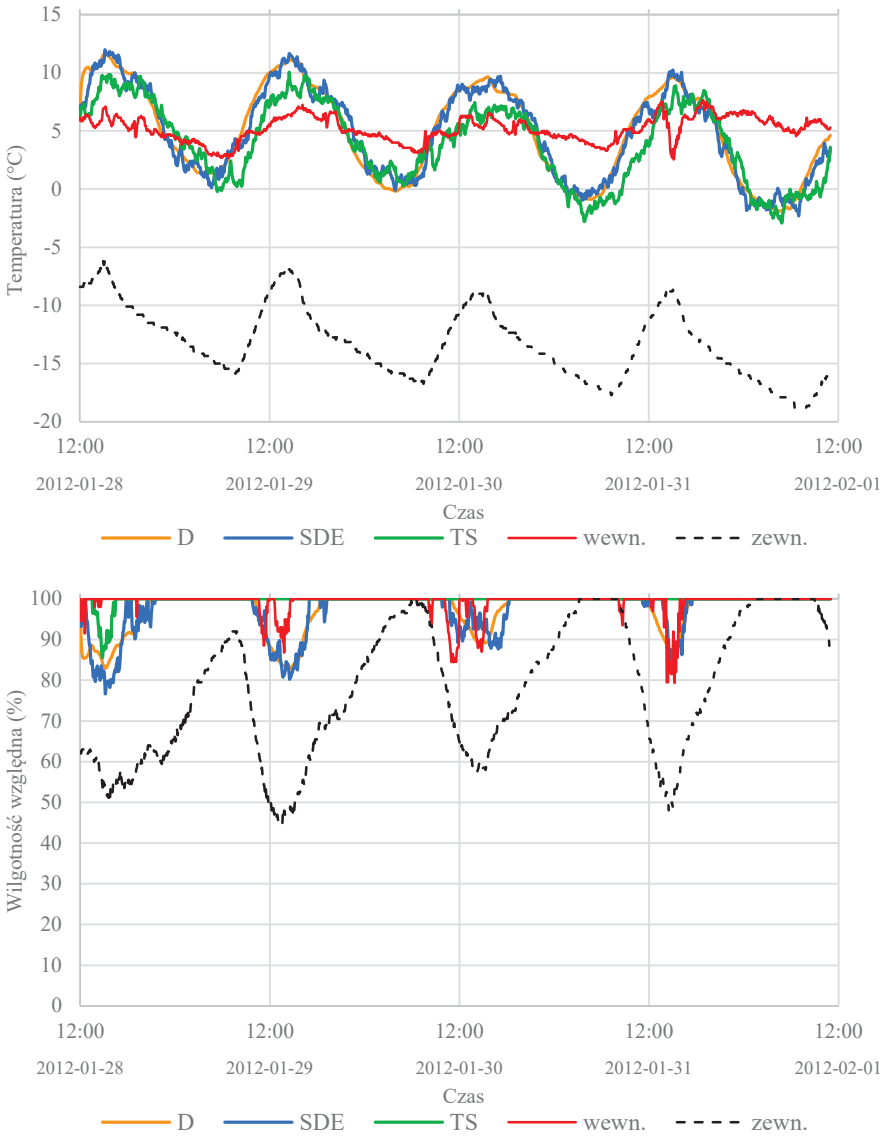
Źródło: opracowanie własne



Rys. B.3. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Ciemno (3)

Fig. B.3. Measured and estimated values of microclimate parameters for a building in Ciemno (3)

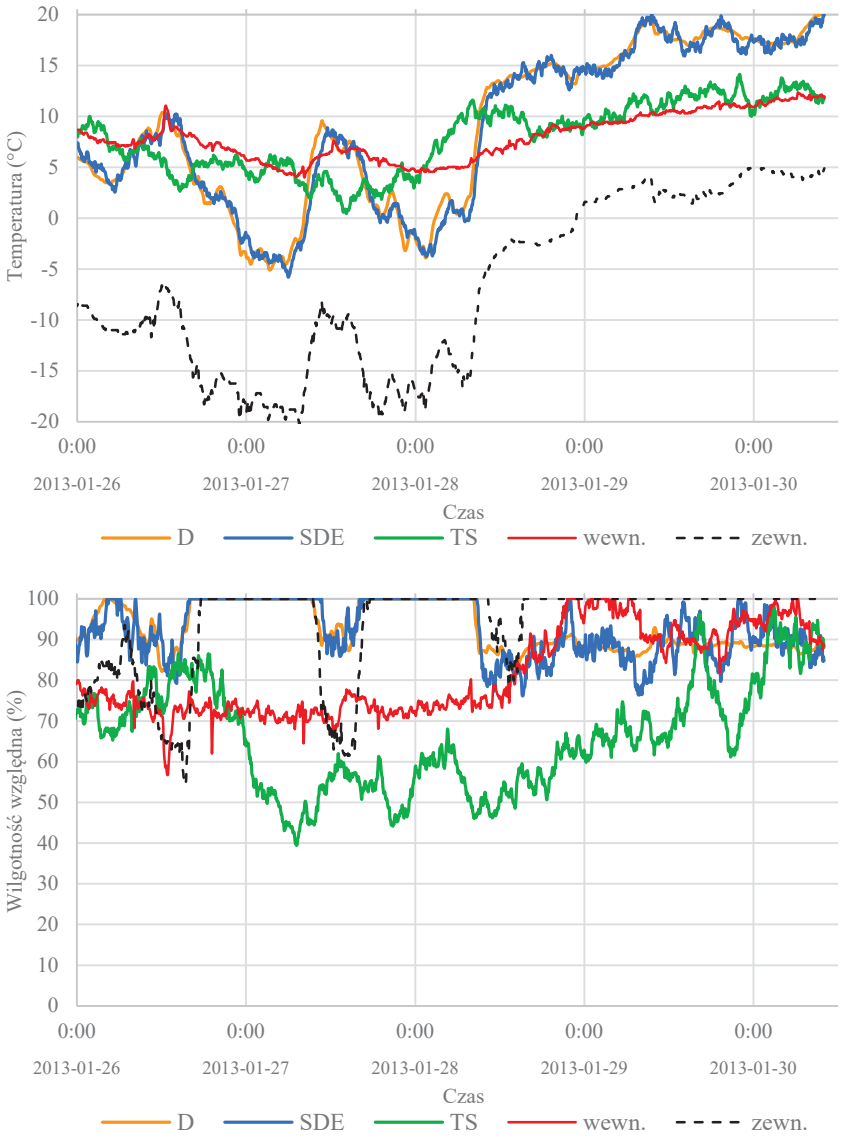
Źródło: opracowanie własne



Rys. B.4. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Glinnik (1)

Fig. B.4. Measured and estimated values of microclimate parameters for a building in Glinnik (1)

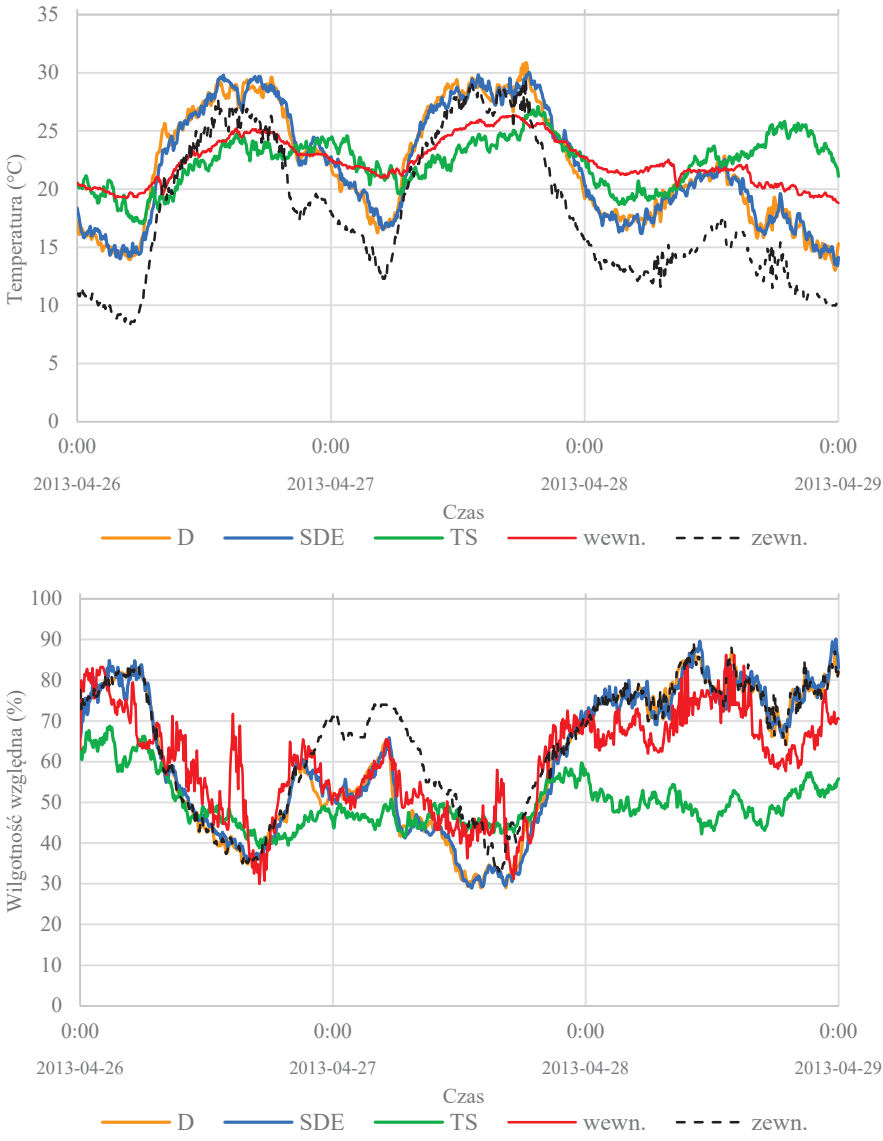
Źródło: opracowanie własne



Rys. B.5. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Glinnik (2)

Fig. B.5. Measured and estimated values of microclimate parameters for a building in Glinnik (2)

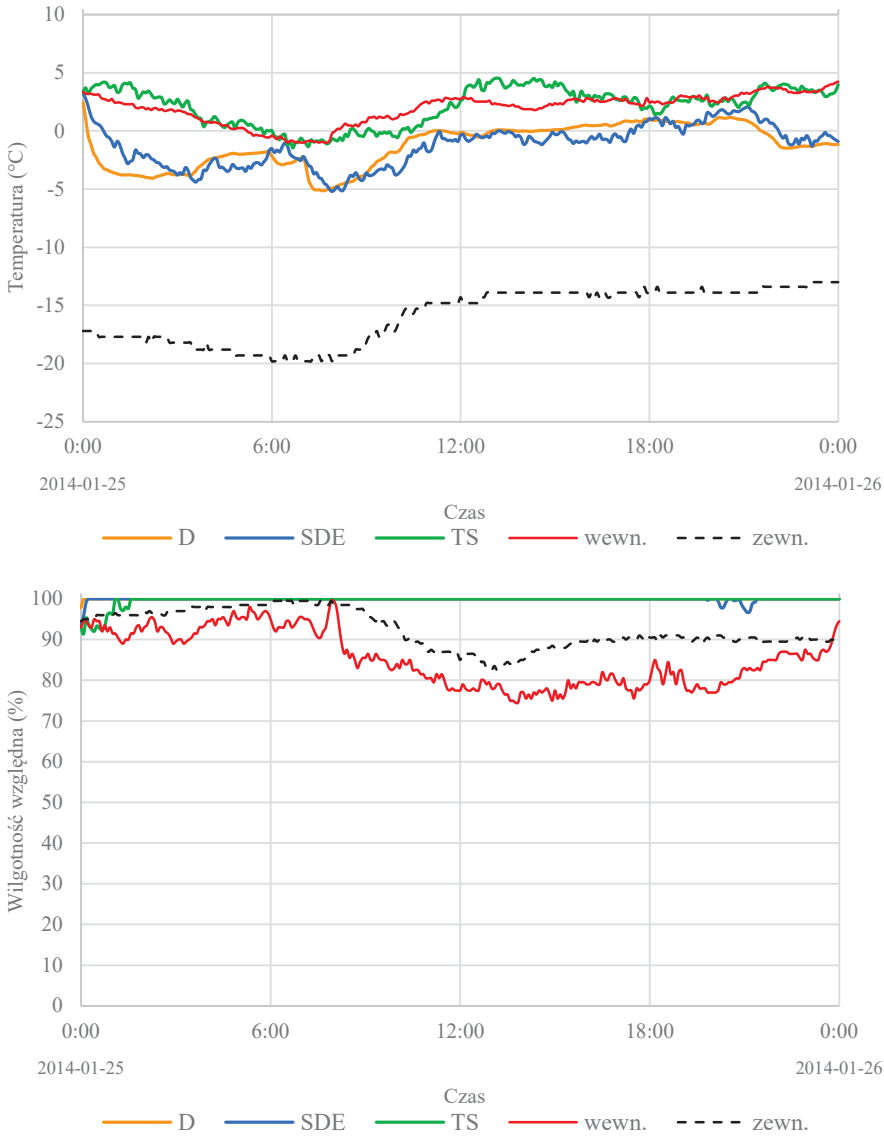
Źródło: opracowanie własne



Rys. B.6. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Komarów

Fig. B.6. Measured and estimated values of microclimate parameters for a building in Komarów

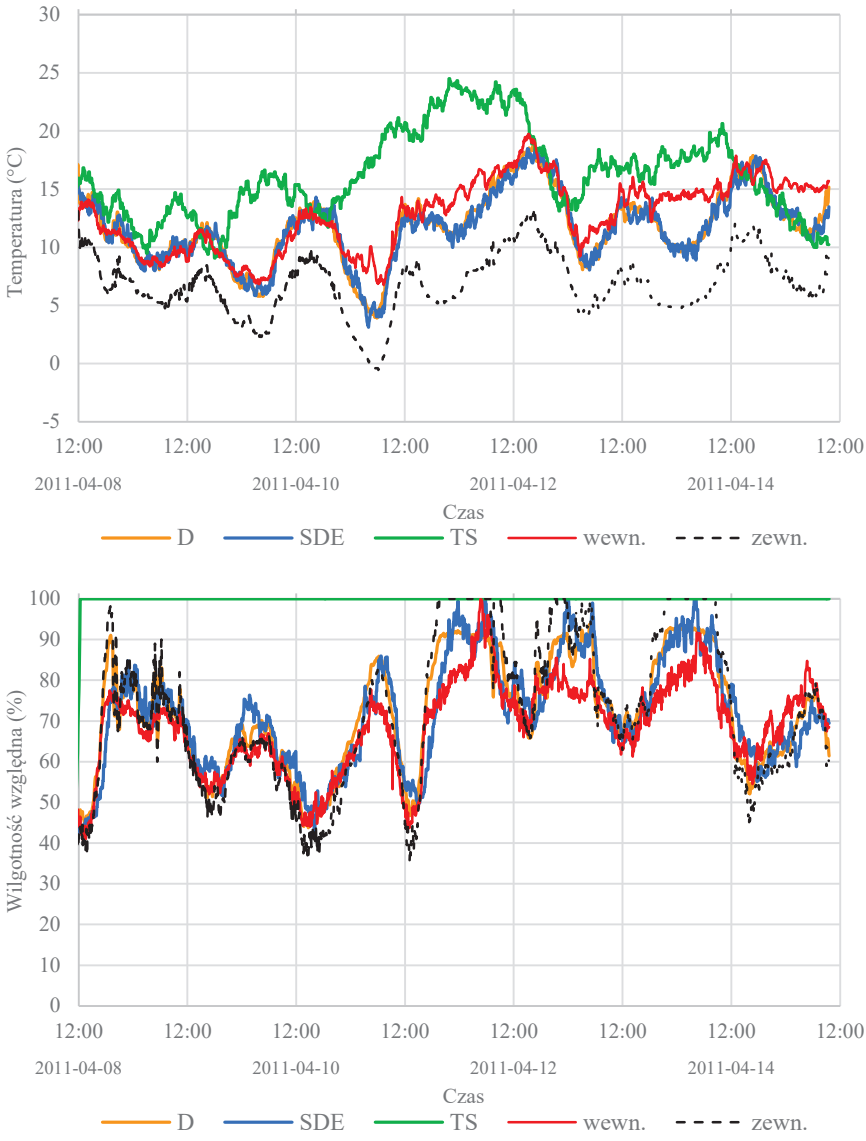
Źródło: opracowanie własne



Rys. B.7. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Olszowiec

Fig. B.7. Measured and estimated values of microclimate parameters for a building in Olszowiec

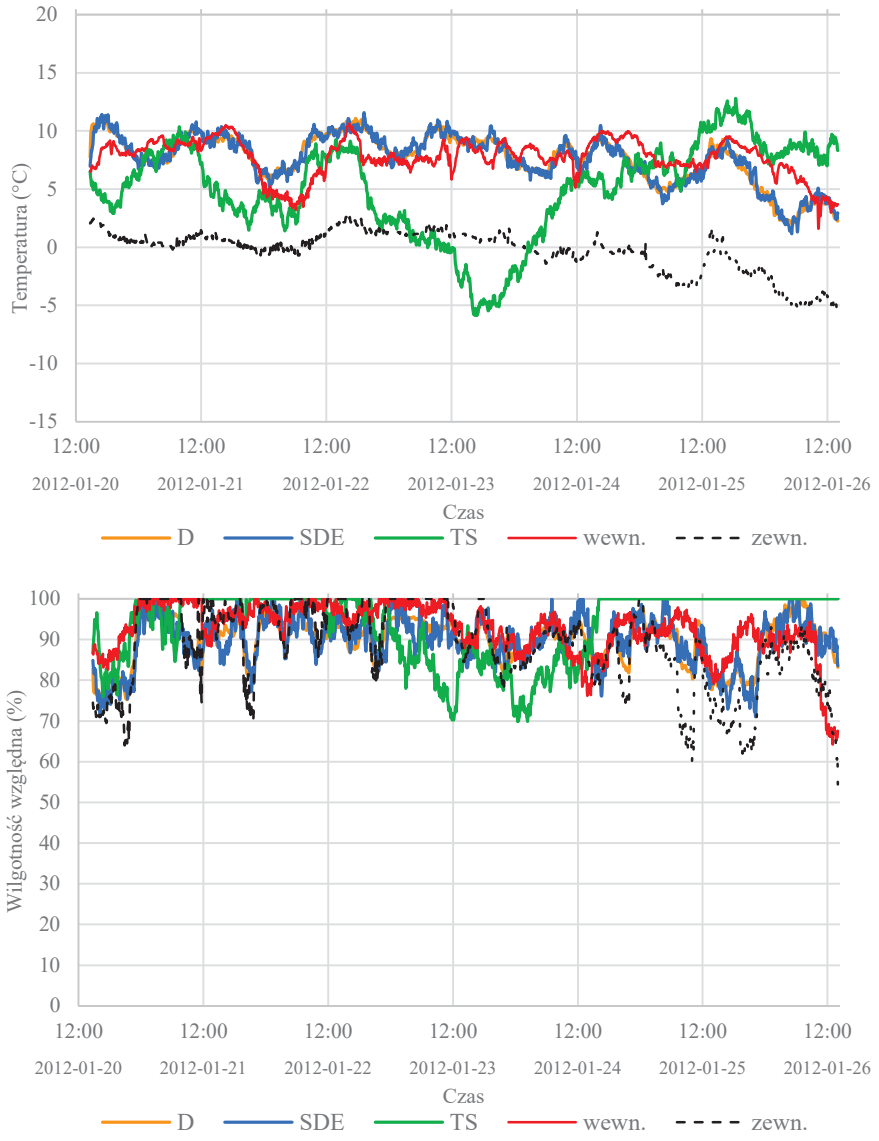
Źródło: opracowanie własne



Rys. B.8. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Ossowa (1)

Fig. B.8. Measured and estimated values of microclimate parameters for a building in Ossowa (1)

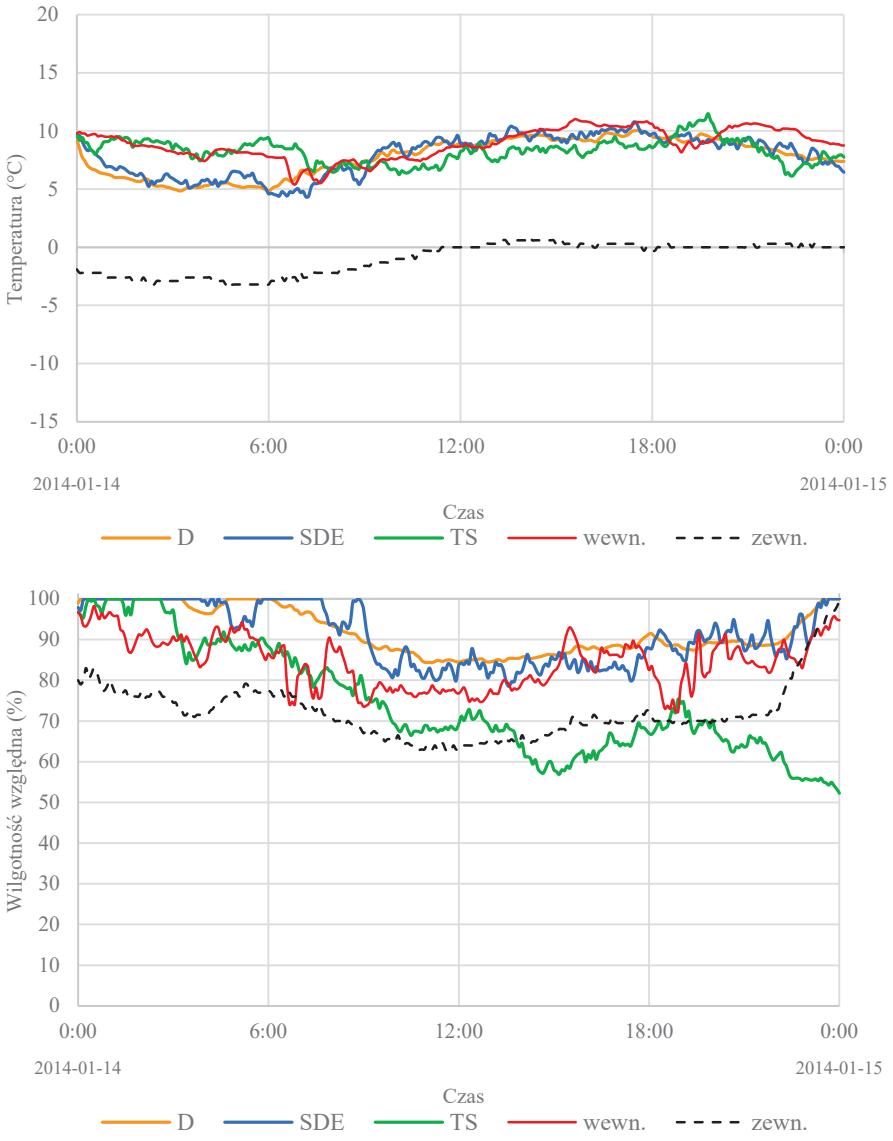
Źródło: opracowanie własne



Rys. B.9. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Ossowa (2)

Fig. B.9. Measured and estimated values of microclimate parameters for a building in Ossowa (2)

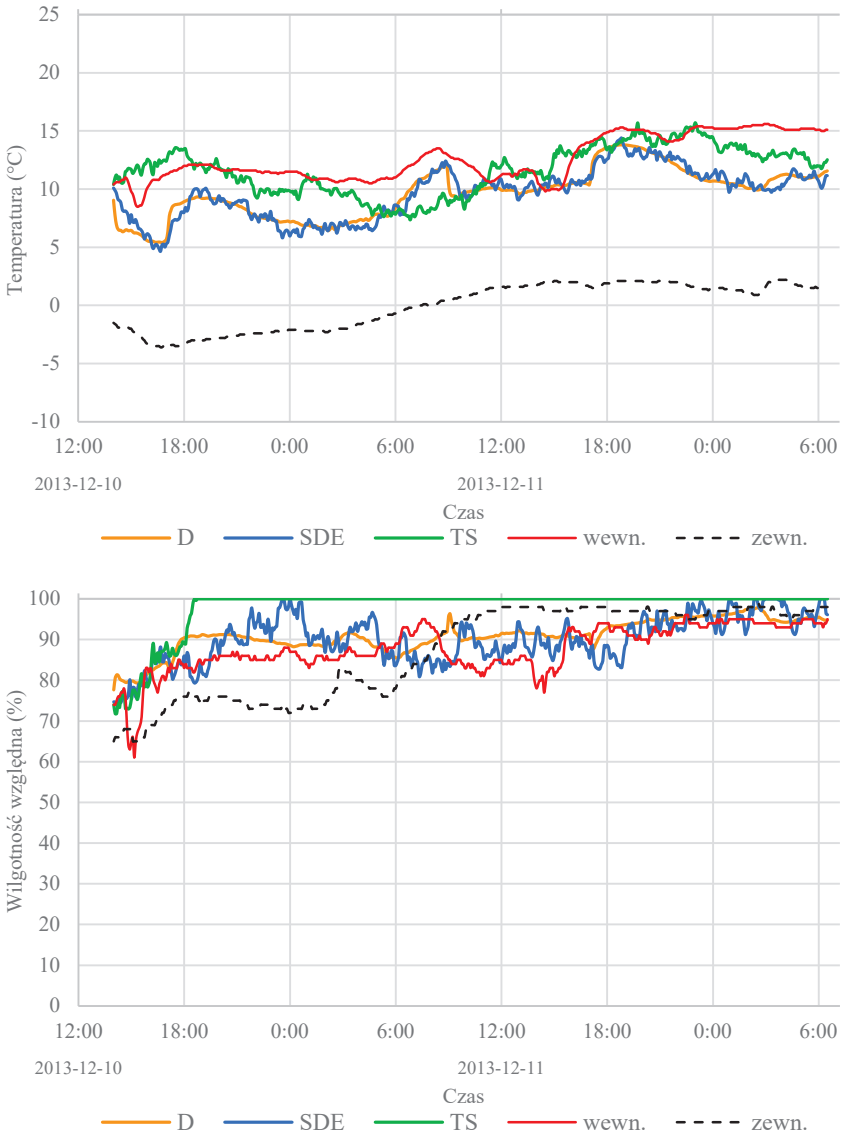
Źródło: opracowanie własne



Rys. B.10. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Przegaliny Duże

Fig. B.10. Measured and estimated values of microclimate parameters for a building in Przegaliny Duże

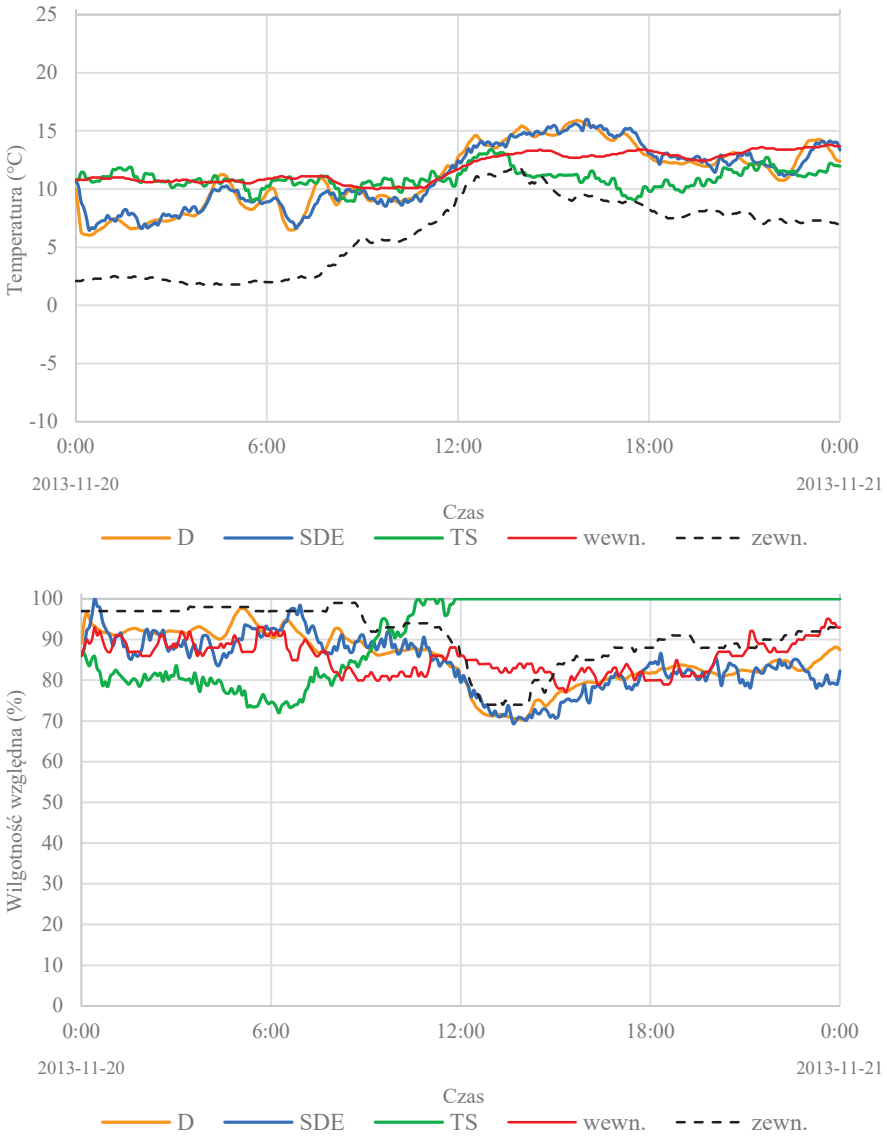
Źródło: opracowanie własne



Rys. B.11. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Turów

Fig. B.11. Measured and estimated values of microclimate parameters for a building in Turów

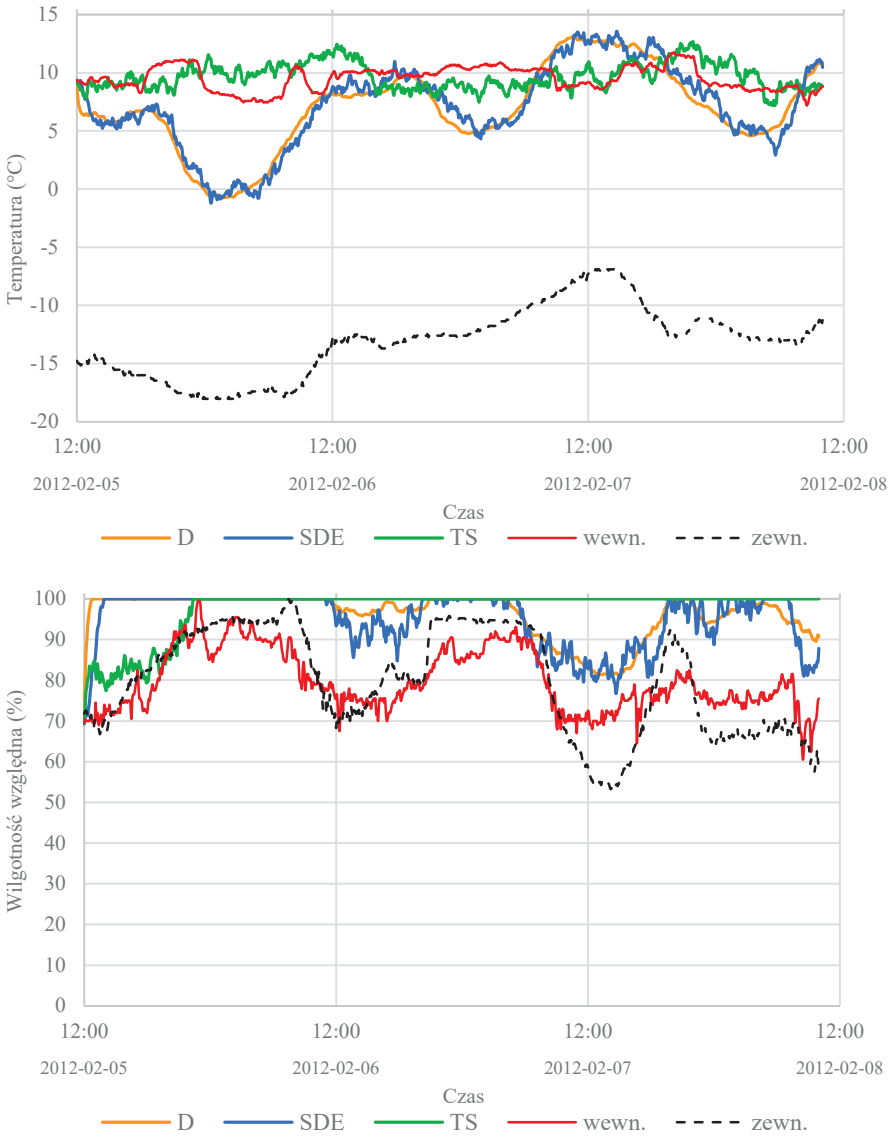
Źródło: opracowanie własne



Rys. B.12. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Żerocin

Fig. B.12. Measured and estimated values of microclimate parameters for a building in Żerocin

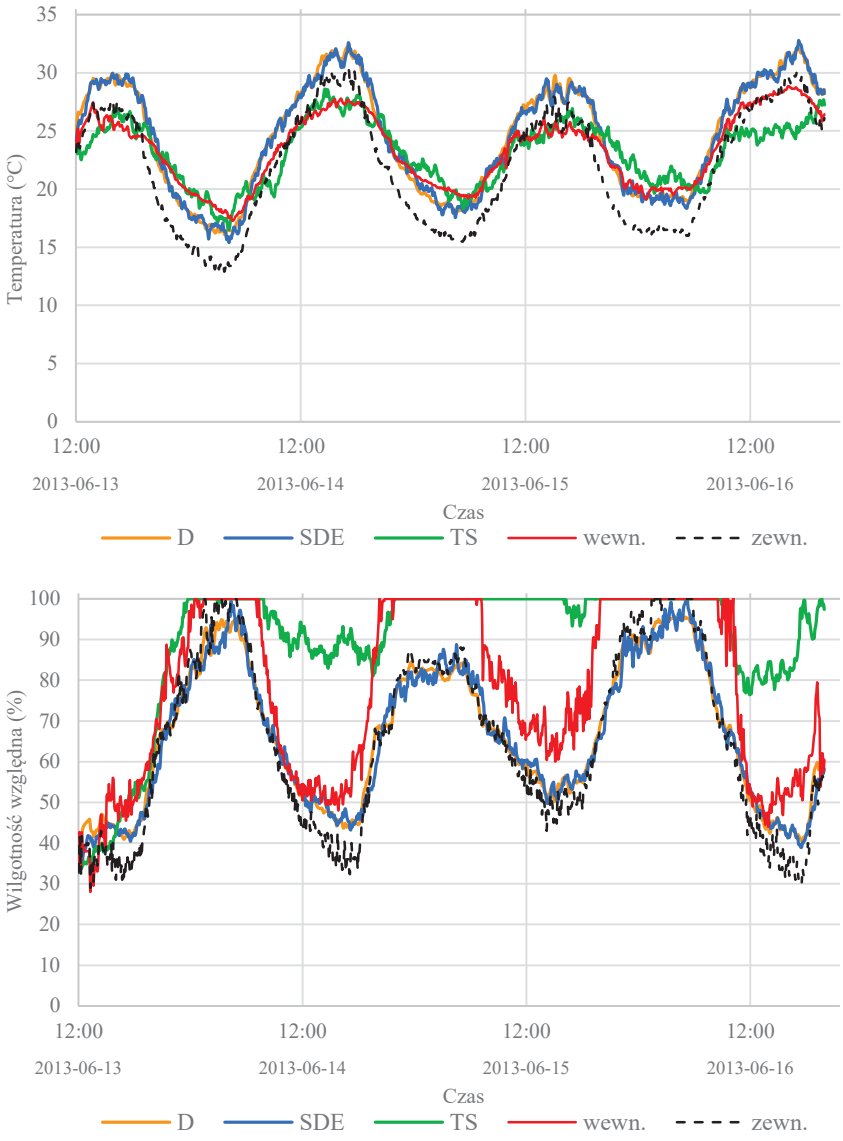
Źródło: opracowanie własne



Rys. B.13. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Żeszczynka

Fig. B.13. Measured and estimated values of microclimate parameters for a building in Żeszczynka

Źródło: opracowanie własne



Rys. B.14. Pomierzone i oszacowane wartości parametrów mikroklimatu dla budynku w miejscowości Żulice

Fig. B.14. Measured and estimated values of microclimate parameters for a building in Żulice

Źródło: opracowanie własne

ZAŁĄCZNIK C. ZESTAWIENIE OCEN DOPASOWANIA MODELI

Tabela/Table C.1.
Porównanie dopasowania modeli do danych rzeczywistych dla temperatury wewnętrznej
A comparison of models' goodness of fit to real data for internal temperature

Budynek	Model	AE_m (°C)	*MAE* (°C)	*MSE* (°C^2)	*RMSE* (°C)	*Bias* (°C)	*r* (-)	R^2 (-)
	D	3,92	1,1	2,10	1,45	-0,86	0,53	0,12
Ciemno 1	SDE	3,8-5,1	1,1-1,8	2-4,3	1,4-2,1	-1--0,5	0,44-0,6	-0,01-0,28
	TS	5,2-10,3	1,3-2,6	2,8-12	1,7-3,5	-1,1-1,7	-0,19-0,01	-1,08--0,22
	D	4,83	1,96	5,12	2,26	-0,41	0,53	0,23
Ciemno 2	SDE	4,9-5,6	1,9-2	4,9-5,7	2,2-2,4	-0,5--0,3	0,5-0,59	0,21-0,26
	TS	2,2-3,1	0,7-1,1	0,8-1,7	0,9-1,3	-0,4-0,6	-0,3-0,55	-1,99-0,29
	D	3,65	1,41	2,73	1,65	-0,34	0,73	0,47
Ciemno 3	SDE	3,5-4,4	1,2-1,5	2,3-3,1	1,5-1,8	-0,4--0,3	0,71-0,77	0,45-0,51
	TS	1,8-4,2	0,6-1,5	0,6-4	0,8-2	-1,4-0,6	0-0,78	-3,26-0,55
	D	7,79	3,05	12,75	3,57	-0,23	0,49	0,19
Glinnik 1	SDE	7,5-8,8	2,8-3	10,9-12,2	3,3-3,5	-0,3-0,0	0,47-0,55	0,18-0,22
	TS	3,2-6,6	0,9-2	1,4-6	1,2-2,5	-1,1--0,2	-0,19-0,58	-3,53-0,27
	D	10,31	5,23	33,80	5,81	1,02	0,88	0,43
Glinnik 2	SDE	10-11,5	5-5,2	31,7-33,9	5,6-5,8	0,8-1,1	0,9-0,9	0,44-0,44
	TS	2,7-5,7	0,6-1,3	0,7-2,7	0,8-1,6	-0,6-0,3	0,85-0,95	0,16-0,9
	D	7,77	3,00	12,75	3,57	1,52	0,90	0,52
Komarów	SDE	7,2-7,8	2,9-3	12-12,7	3,5-3,6	1,5-1,6	0,9-0,91	0,52-0,53
	TS	1,9-5,4	0,5-1,3	0,4-2,7	0,6-1,6	-0,3-0,7	0,67-0,95	0,18-0,91
	D	6,28	3,20	12,35	3,51	-3,20	0,61	0,09
Olszowiec	SDE	5,4-6,4	2,6-3,3	8,5-12,1	2,9-3,5	-3,3--2,6	0,63-0,79	0,09-0,14
	TS	1,7-5,2	0,6-2,3	0,5-7,2	0,7-2,7	-1,9-2,3	0,56-0,92	0,01-0,75
	D	5,79	1,41	3,53	1,88	-1,03	0,87	0,66
Ossowa 1	SDE	5,3-6,2	1,4-1,5	3,5-3,7	1,9-1,9	-1,1--1	0,86-0,87	0,64-0,67
	TS	5,4-39,7	1,7-22,7	4,8-705,4	2,2-26,6	-22-20	-0,71-0,74	-1,03-0,52
	D	5,39	1,48	3,36	1,83	-0,05	0,52	0,21
Ossowa 2	SDE	5,2-6	1,4-1,5	3,3-3,5	1,8-1,9	-0,1-0	0,51-0,55	0,2-0,27
	TS	5,5-7,1	1,4-1,9	3,2-5,1	1,8-2,3	-0,4-0,2	0,02-0,22	-2,1--0,78
	D	3,54	1,39	3,07	1,75	-1,10	0,58	0,19
Przegaliny	SDE	3,1-4,8	1,1-1,5	1,9-3,8	1,4-1,9	-1,2--0,8	0,61-0,71	0,22-0,38
	TS	2,1-3	0,5-1	0,5-1,4	0,7-1,2	-0,3-0,6	0,53-0,87	-0,41-0,7
	D	5,75	3,01	10,89	3,30	-2,99	0,76	0,19
Turów	SDE	5,6-7	3-3,1	10,7-12,2	3,3-3,5	-3,1--3	0,71-0,77	0,14-0,18
	TS	3,6-10,3	1,4-4,4	2,9-24,7	1,7-5	-3,8-4,3	-0,67-0,82	-8,58-0,43
	D	4,93	1,65	4,34	2,08	-0,76	0,80	0,48
Żerocin	SDE	4-5,3	1,5-1,7	3,6-4,4	1,9-2,1	-0,9--0,6	0,79-0,84	0,48-0,52
	TS	1,7-3	0,5-1	0,5-1,5	0,7-1,2	-1-0,5	0,7-0,95	-0,13-0,84
	D	10,41	3,55	18,33	4,28	-2,60	0,27	0,05
Żeszczynka	SDE	9,2-10,4	3,4-3,6	16,5-18,8	4,1-4,3	-2,7--2,4	0,29-0,34	0,06-0,08
	TS	4-6,3	1,4-2,4	2,8-7,8	1,7-2,8	-0,9-2,1	-0,15-0,35	-0,4--0,03
	D	4,86	1,81	4,80	2,19	1,10	0,97	0,79
Żulice	SDE	5-5,8	1,7-1,8	4,2-4,9	2,1-2,2	1-1,1	0,96-0,97	0,79-0,81
	TS	2,8-4,1	0,8-1,1	1-2	1-1,4	-0,5--0,3	0,9-0,97	0,7-0,82

Dla modeli stochastycznych SDE i TS przyjęto zaburzenie 1°C i 1 p.p. φ na pomiar (5 minut)
For the stochastic model SDE and TS, 1°C and 1 p.p. φ disturbances were assumed on measurement (5 minutes)

Źródło: opracowanie własne

Tabela/Table C.2.
Porównanie dopasowania modeli do danych rzeczywistych dla wilgotności względnej powietrza wewnętrznego
A comparison of models' goodness of fit to real data for relative humidity of internal air

Budynek	Model	AE_m (p.p.)	*MAE* (p.p.)	*MSE* (p.p.^{2})	*RMSE* (p.p.)	*Bias* (p.p.)	*r* (-)	R^2 (-)
	D	24,75	11,92	163,41	12,78	11,87	0,77	0,12
Ciemno 1	SDE	24,8-31,5	9,1-11,4	128,2-158,6	11,3-12,6	9,9-11,2	0,43-0,7	-0,11-0,11
	TS	37-37	15,4-16,8	307,4-355,8	17,5-18,9	8,2-14,3	-0,28-0,06	-0,44--0,17
	D	22,00	7,17	80,93	9,00	4,65	0,69	0,24
Ciemno 2	SDE	21,3-28	6,9-7,9	73,2-89,3	8,6-9,4	3,3-5	0,59-0,73	0,12-0,29
	TS	29,5-41,4	11,5-15,2	221,4-337,3	14,9-18,4	5,1-9,9	-0,29-0,06	-1,03--0,66
	D	21,19	7,34	72,06	8,49	1,47	-0,23	-2,36
Ciemno 3	SDE	19,1-24	6,7-7,7	66,8-80,6	8,2-9	0,7-1,6	-0,29--0,02	-2,23--1,4
	TS	24-32,3	6,6-10,3	83-174,6	9,1-13,2	1,6-6,4	-0,42-0,02	-1,12--0,82
	D	17,01	2,46	25,18	5,02	-1,84	0,39	0,08
Glinnik 1	SDE	21-26,7	2,5-3,3	29,8-44,7	5,5-6,7	-2,6--1,7	0,13-0,35	-0,16-0,07
	TS	26,1-36	5,2-7,2	82,1-125,3	9,1-11,2	-5,7--3,7	-0,17--0,04	-0,25--0,13
	D	38,00	15,62	343,90	18,54	11,47	-0,63	-1,10
Glinnik 2	SDE	38-38	15,3-16,1	338,6-357,1	18,4-18,9	10,3-11,2	-0,6--0,43	-1,16--0,99
	TS	29,8-41,5	8-12,3	103,3-216,3	10,2-14,7	-2,9-7	-0,13-0,66	-1,45-0,41
	D	32,28	7,14	76,50	8,75	0,06	0,88	0,74
Komarów	SDE	30,8-33	7-7,4	74,1-80,5	8,6-9	-0,3-0,1	0,87-0,88	0,73-0,74
	TS	45,4-68,8	14,4-19	314,5-578,8	17,7-24,1	-9,9--1	-0,27-0,06	-1,46--0,53
	D	25,50	14,64	260,62	16,14	14,64	-0,07	-0,22
Olszowiec	SDE	25,5-25,5	14,3-14,6	249-260,6	15,8-16,1	14,3-14,6	-0,12-0,17	-0,22--0,21
	TS	23,8-52,8	8,8-15,3	113,1-331,4	10,6-18,2	-5,6-13,4	-0,71-0,45	-0,98-0,01
	D	18,15	5,25	42,55	6,52	3,54	0,92	0,79
Ossowa 1	SDE	19,5-24,1	5,2-5,5	43,3-47,7	6,6-6,9	3,3-3,7	0,9-0,91	0,76-0,78
	TS	65,5-89	32,8-49,4	1240-2568	35,2-50,7	-49-17,4	-0,08-0,62	-0,06-0,26
	D	23,50	5,58	50,73	7,12	-2,71	0,39	-0,34
Ossowa 2	SDE	23,7-32,2	6-6,3	55-65,5	7,4-8,1	-3,1--2,5	0,25-0,4	-0,47--0,23
	TS	35,8-77,3	7,5-20	96-619,7	9,8-24,9	-13,5-6,6	-0,39-0,26	-0,89--0,03
	D	24,38	7,75	79,32	8,91	7,52	0,69	0,11
Przegaliny	SDE	19,1-26,5	6,9-9,1	67,4-114,7	8,2-10,7	6,1-8,5	0,48-0,61	-0,02-0,13
	TS	26-27,8	11,1-14,2	188,8-253,8	13,7-15,9	7,3-12,9	-0,41-0,29	-0,44--0,13
	D	18,60	4,08	25,45	5,04	3,26	0,76	0,05
Turów	SDE	17,2-23,4	4-5,6	25,5-46	5-6,8	2-3,6	0,51-0,67	-0,23-0,25
	TS	23-51,6	8,4-14	94-266,3	9,7-16,3	5,8-10,8	-0,21-0,65	-0,32-0,23
	D	13,70	4,77	34,64	5,89	-0,24	0,48	0,21
Żerocin	SDE	14,5-20	4,5-5,9	31-49,6	5,6-7	-1,7--0,5	0,28-0,55	-0,01-0,3
	TS	21,1-23	9-14,2	111,1-222,5	10,5-14,9	0,6-14,2	-0,48-0,12	-0,72--0,07
	D	31,49	16,40	313,36	17,70	16,40	0,51	-0,05
Żeszczynka	SDE	28,5-32,5	15-15,9	268,3-303,1	16,4-17,4	15-15,9	0,5-0,59	-0,03-0,01
	TS	27,6-43,8	10,1-20,5	133,2-512,1	11,5-22,6	-7-6,2	0,3-0,71	0,09-0,42
	D	33,72	12,19	203,74	14,27	-11,71	0,93	0,53
Żulice	SDE	32,9-37,6	11,7-12,5	192,7-215,5	13,9-14,7	-12--11,3	0,91-0,93	0,51-0,56
	TS	56-56	16,6-17,1	612,5-636,4	24,7-25,2	16,1-16,9	0,51-0,51	-0,26--0,18

Dla modeli stochastycznych SDE i TS przyjęto zaburzenie 1°C i 1 p.p. φ na pomiar (5 minut)
For the stochastic model SDE and TS, 1°C and 1 p.p. φ disturbances were assumed on measurement (5 minutes)

Źródło: opracowanie własne

Tabela/Table C.3.
Ocena wpływu poziomu zaburzeń w modelach TS i SDE na szacowanie temperatury wewnętrznej w hali zwierząt
Evaluation of the influence of the disturbance level in the TS and SDE models on the estimation of the indoor temperature in the animal hall

Budynek	Zaburzenie (°C i p.p.RH)	Model SDE			Model TS		
		RMSE (°C)	*Bias* (°C)	*r* (-)	*RMSE* (°C)	*Bias* (°C)	*r* (-)
Ciemno 1	1,0 i 1	1,4-2,1	-1--0,5	0,44-0,6	1,7-3,5	-1,1-1,7	-0,19-0,01
	2,0 i 5	1,6-2	-1,2--0,8	0,23-0,47	3,5-18,5	-6,1-14,1	0,15-0,35
	3,0 i 10	2-2,3	-1,1--0,6	0,22-0,43	4,6-27,4	-18,3-25,9	-0,29-0,21
Ciemno 2	1,0 i 1	2,2-2,4	-0,5--0,3	0,5-0,59	0,9-1,3	-0,4-0,6	-0,3-0,55
	2,0 i 5	2,2-2,6	-0,7--0,2	0,45-0,59	1,6-2,5	-1,5-1,2	-0,46-0,42
	3,0 i 10	2,5-3,2	-1--0,2	0,39-0,65	3,3-8,3	-4,6-7,6	-0,47-0,66
Ciemno 3	1,0 i 1	1,5-1,8	-0,4--0,3	0,71-0,77	0,8-2	-1,4-0,6	0-0,78
	2,0 i 5	1,8-2,2	-0,7--0,1	0,61-0,73	1,9-2,7	-1,7-1	-0,55-0,65
	3,0 i 10	1,9-2,6	-0,7-0,1	0,53-0,68	2,3-5,3	-3,5-1,5	-0,67-0,65
Glinnik 1	1,0 i 1	3,3-3,5	-0,3-0,0	0,47-0,55	1,2-2,5	-1,1--0,2	-0,19-0,58
	2,0 i 5	3,5-3,9	-0,6-0,1	0,47-0,54	1,2-1,8	-0,5-0,2	-0,03-0,62
	3,0 i 10	3,5-4,4	-0,4-0,1	0,42-0,58	2,1-2,9	-0,7-0,8	-0,03-0,43
Glinnik 2	1,0 i 1	5,6-5,8	0,8-1,1	0,9-0,9	0,8-1,6	-0,6-0,3	0,85-0,95
	2,0 i 5	5,6-5,9	0,8-1	0,88-0,9	1,2-2,6	-1,5-1,5	0,51-0,89
	3,0 i 10	5,7-6,6	0,6-1,4	0,86-0,89	2,9-5,4	-2,9-3,4	-0,16-0,78
Komarów	1,0 i 1	3,5-3,6	1,5-1,6	0,9-0,91	0,6-1,6	-0,3-0,7	0,67-0,95
	2,0 i 5	3,5-3,7	1,5-1,6	0,89-0,91	1,4-2,1	-0,1-1	0,42-0,74
	3,0 i 10	3,6-3,7	1,3-1,7	0,89-0,9	2,3-3,8	-1,5-1,8	0,15-0,58
Olszowiec	1,0 i 1	2,9-3,5	-3,3--2,6	0,63-0,79	0,7-2,7	-1,9-2,3	0,56-0,92
	2,0 i 5	2,6-4,7	-3,9--1,9	0,35-0,77	1,3-2,4	-1,4-1,9	0,45-0,87
	3,0 i 10	2,7-4,3	-3,7--2	0,21-0,69	2,1-5,2	-2,9-2,6	-0,55-0,79
Ossowa 1	1,0 i 1	1,9-1,9	-1,1--1	0,86-0,87	2,2-26,6	-22,7-20,6	-0,71-0,74
	2,0 i 5	2-2,1	-1,1--1	0,83-0,85	3,7-18,4	-3,9-17,8	-0,41-0,8
	3,0 i 10	2,1-2,3	-1,2--0,9	0,8-0,83	9-25,7	-24,1-12,3	-0,69-0,29
Ossowa 2	1,0 i 1	1,8-1,9	-0,1-0	0,51-0,55	1,8-2,3	-0,4-0,2	0,02-0,22
	2,0 i 5	1,9-2	-0,1-0,1	0,46-0,51	2,1-3,2	-0,6-0,7	-0,22-0,32
	3,0 i 10	2,1-2,3	-0,2-0,0	0,42-0,5	2,8-6,8	-3,9-0,6	-0,27-0,42
Przegaliny	1,0 i 1	1,4-1,9	-1,2--0,8	0,61-0,71	0,7-1,2	-0,3-0,6	0,53-0,87
	2,0 i 5	1,6-2,6	-1,9--0,8	0,57-0,71	1,2-1,7	-1,2-0,7	0,37-0,76
	3,0 i 10	2,1-2,9	-1,7--0,6	0,17-0,6	1,8-2,3	-0,9-1,2	0,14-0,56
Turów	1,0 i 1	3,3-3,5	-3,1--3	0,71-0,77	1,7-5	-3,8-4,3	-0,67-0,82
	2,0 i 5	3,4-3,6	-3,2--2,8	0,58-0,77	1,8-10,7	-8,4-9,2	-0,86-0,84
	3,0 i 10	3,4-4,2	-3,5--2,8	0,55-0,69	6,6-22,4	-18,8-15,1	-0,87-0,86
Żerocin	1,0 i 1	1,9-2,1	-0,9--0,6	0,79-0,84	0,7-1,2	-1-0,5	0,7-0,95
	2,0 i 5	1,8-2,4	-1,2--0,7	0,75-0,82	0,8-3,5	-3-1,4	0,62-0,92
	3,0 i 10	2-2,8	-1,2--0,3	0,66-0,81	1,8-5,1	-4,1-2,1	-0,51-0,82
Żeszczynka	1,0 i 1	4,1-4,3	-2,7--2,4	0,29-0,34	1,7-2,8	-0,9-2,1	-0,15-0,35
	2,0 i 5	4,1-4,6	-2,8--2,4	0,18-0,35	1,6-3,4	-1,8-1,9	-0,25-0,3
	3,0 i 10	4,1-4,9	-3--2,2	0,16-0,4	3,2-5,8	-1,3-4,7	-0,37-0,5
Żulice	1,0 i 1	2,1-2,2	1-1,1	0,96-0,97	1-1,4	-0,5--0,3	0,9-0,97
	2,0 i 5	2,1-2,4	0,9-1,2	0,95-0,96	1,3-1,6	-0,6-0,1	0,86-0,92
	3,0 i 10	2,3-2,7	0,7-1,2	0,93-0,94	2,1-2,8	-1,2--0,1	0,7-0,87

Źródło: opracowanie własne

Tabela/Table C.4.

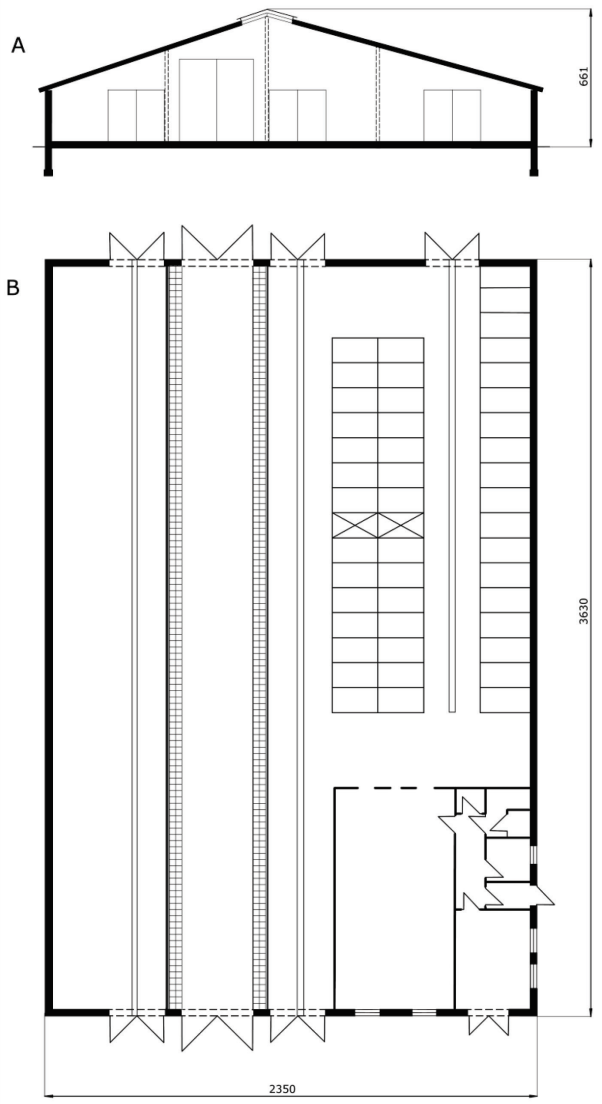
Ocena wpływu poziomu zaburzeń w modelach TS i SDE na szacowanie wilgotności względnej powietrza w hali zwierząt

Evaluation of the influence of the disturbance level in the TS and SDE models on the estimation of the indoor relative humidity in the animal hall

		Model SDE			Model TS		
Budynek	Zaburzenie (°C i p.p.RH)	*RMSE* (p.p.)	*Bias* (p.p.)	*r* (-)	*RMSE* (p.p.)	*Bias* (p.p.)	*r* (-)
Ciemno 1	1,0 i 1	11,3-12,6	9,9-11,2	0,43-0,7	17,5-18,9	8,2-14,3	-0,28-0,06
	2,0 i 5	11-12,8	8-10,9	0,38-0,67	17,2-22,9	6,7-16,5	-0,35-0,15
	3,0 i 10	12-14,3	7,9-10,3	0,09-0,47	18-57	-51,1-16,3	-0,31-0,39
Ciemno 2	1,0 i 1	8,6-9,4	3,3-5	0,59-0,73	14,9-18,4	5,1-9,9	-0,29-0,06
	2,0 i 5	9,3-11,5	1-4,6	0,4-0,66	15,2-20,6	-19-6,6	-0,39-0,06
	3,0 i 10	10,2-15,5	-2,7-4,8	0,23-0,6	15,5-44,5	-34,1-6,9	-0,33-0,61
Ciemno 3	1,0 i 1	8,2-9	0,7-1,6	-0,29--0,02	9,1-13,2	1,6-6,4	-0,42-0,02
	2,0 i 5	8,7-11,3	-1,7-1,5	-0,36-0,12	9,1-31,4	-19-6,6	-0,39-0,06
	3,0 i 10	9,9-13,1	-4-0,1	-0,19-0,24	8,9-47,9	-39,4-5,2	-0,57-0,76
Glinnik 1	1,0 i 1	5,5-6,7	-2,6--1,7	0,13-0,35	9,1-11,2	-5,7--3,7	-0,17--0,04
	2,0 i 5	5,9-8,8	-4,1--1,9	0,04-0,41	8,8-14,6	-7,8--3,4	-0,12-0,5
	3,0 i 10	8,3-14,2	-6,9--2,9	0,08-0,35	9,4-15,4	-9,4--4,2	-0,08-0,24
Glinnik 2	1,0 i 1	18,4-18,9	10,3-11,2	-0,6--0,43	10,2-14,7	-2,9-7	-0,13-0,66
	2,0 i 5	17,9-19,5	10-11,9	-0,55--0,13	16,9-22,4	-3,4-13,4	-0,59-0,41
	3,0 i 10	18,5-21	5-10,2	-0,51--0,15	12,6-25,6	-12,8-9,4	-0,14-0,75
Komarów	1,0 i 1	8,6-9	-0,3-0,1	0,87-0,88	17,7-24,1	-9,9—1	-0,27-0,06
	2,0 i 5	9,1-10	-0,5-0,6	0,83-0,87	24,2-30,4	-24-14,8	-0,27-0,32
	3,0 i 10	10-11,4	-1,2-0,9	0,8-0,83	20,1-38,4	-11,7-26,9	-0,34-0,15
Olszowiec	1,0 i 1	15,8-16,1	14,3-14,6	-0,12-0,17	10,6-18,2	-5,6-13,4	-0,71-0,45
	2,0 i 5	14,1-16	12,5-14,5	0,07-0,45	13,5-16,1	7,2-14,6	-0,72-0,31
	3,0 i 10	13,6-16	10,8-14,4	0,02-0,44	15,6-46	-32,6-13,9	-0,59-0,86
Ossowa 1	1,0 i 1	6,6-6,9	3,3-3,7	0,9-0,91	35,2-50,7	-49,4-17,4	-0,08-0,62
	2,0 i 5	7,3-8,4	3-4,2	0,86-0,89	32,2-53,2	-51,6-30,5	-0,37-0,36
	3,0 i 10	9,2-10,5	2,9-4,2	0,79-0,84	32,5-53,2	-13,5-6,6	-0,39-0,26
Ossowa 2	1,0 i 1	7,4-8,1	-3,1--2,5	0,25-0,4	9,8-24,9	-13,5-6,6	-0,39-0,26
	2,0 i 5	8,3-9,4	-3,9--2,2	0,19-0,3	15-19,4	-10,3--3,8	-0,42--0,23
	3,0 i 10	10,7-11,4	-4--3	0,07-0,24	10,5-29,9	-19,1-3,8	-0,36-0,04
Przegaliny	1,0 i 1	8,2-10,7	6,1-8,5	0,48-0,61	13,7-15,9	7,3-12,9	-0,41-0,29
	2,0 i 5	10-13,5	6,5-10,3	0,17-0,47	14,9-16,8	-6,8-15,4	-0,47-0,15
	3,0 i 10	11-13,4	0,4-10	0,07-0,54	12,5-21,7	-13,7-13,8	-0,45-0,36
Turów	1,0 i 1	5-6,8	2-3,6	0,51-0,67	9,7-16,3	5,8-10,8	-0,21-0,65
	2,0 i 5	7,2-9,9	0,5-3,6	0,04-0,48	11,7-28,9	-13-11,8	0,03-0,58
	3,0 i 10	9,1-11,2	-0,5-3,2	0,11-0,42	11,6-43,7	-29,3-8,9	-0,61-0,57
Żerocin	1,0 i 1	5,6-7	-1,7--0,5	0,28-0,55	10,5-14,9	0,6-14,2	-0,48-0,12
	2,0 i 5	6,8-8,8	-1,4-1,3	0,21-0,58	10,2-19	-7,7-14,3	-0,45-0,13
	3,0 i 10	8,6-11,1	-2,4-0,4	0,15-0,57	13,4-17,9	-0,5-13,6	-0,39-0,35
Żeszczynka	1,0 i 1	16,4-17,4	15-15,9	0,5-0,59	11,5-22,6	-7-6,2	0,3-0,71
	2,0 i 5	15,8-18,6	13,8-17	0,3-0,54	14,5-22	-6,1-10,8	-0,09-0,53
	3,0 i 10	14,3-18,4	11,4-16	0,02-0,59	14-30,3	-14,6-12,9	0,33-0,6
Żulice	1,0 i 1	13,9-14,7	-12--11,3	0,91-0,93	24,7-25,2	16,1-16,9	0,51-0,51
	2,0 i 5	14,2-16,5	-12,8--10,7	0,87-0,9	21,2-27	9,5-19,4	0,44-0,62
	3,0 i 10	14,1-17,8	-13--8,9	0,78-0,86	21,4-25	2,2-15,3	0,52-0,65

Źródło: opracowanie własne

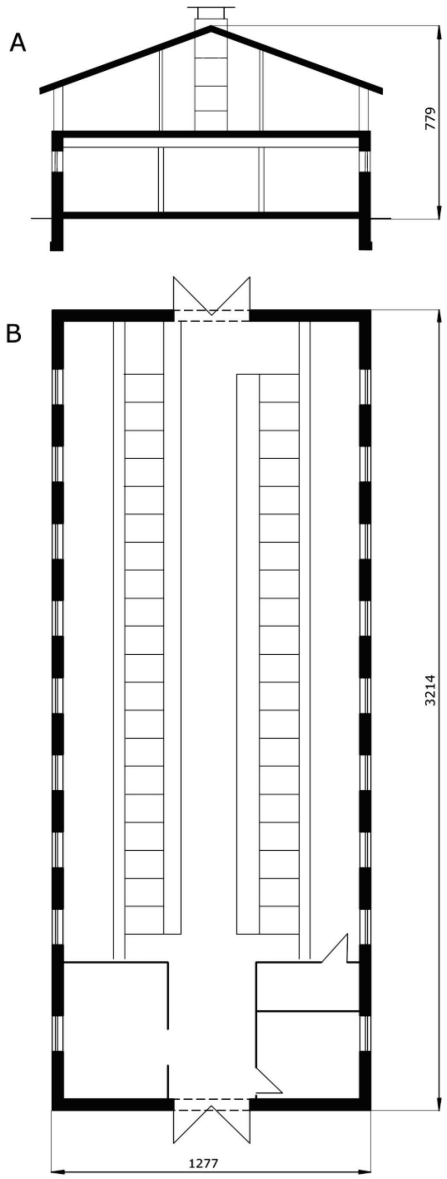
ZAŁĄCZNIK D. SCHEMATY BUDYNKÓW INWENTARSKICH



Rys. D.1. Schemat budynku w miejscowości Ciemno: A – rzut poprzeczny, B – rzut przyziemia

Fig. D.1. Diagram of building in Ciemno: A – lateral projection, B – ground floor projection

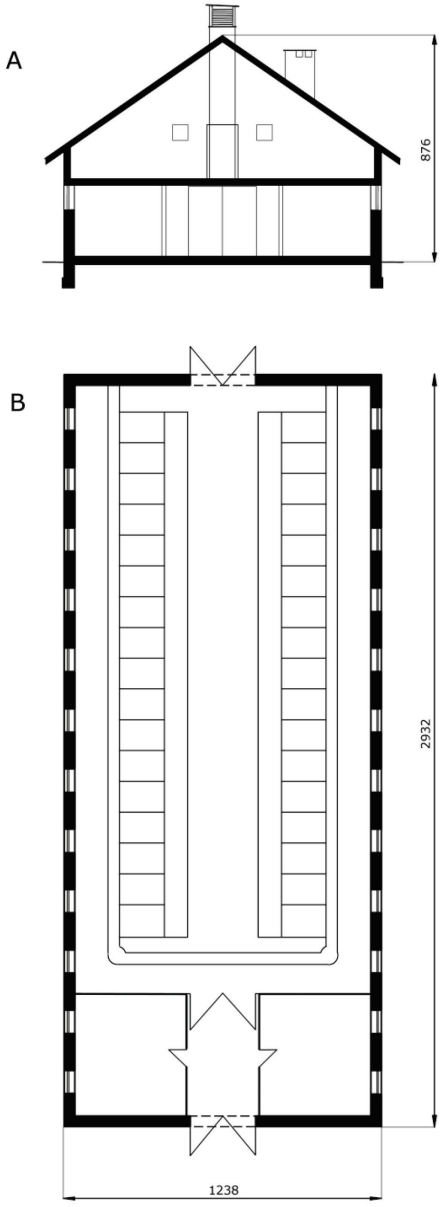
Źródło: opracowanie własne



Rys. D.2. Schemat budynku w miejscowości Glinnik: A – rzut poprzeczny, B – rzut przyziemia

Fig. D.2. Diagram of building in Glinnik: A – lateral projection, B – ground floor projection

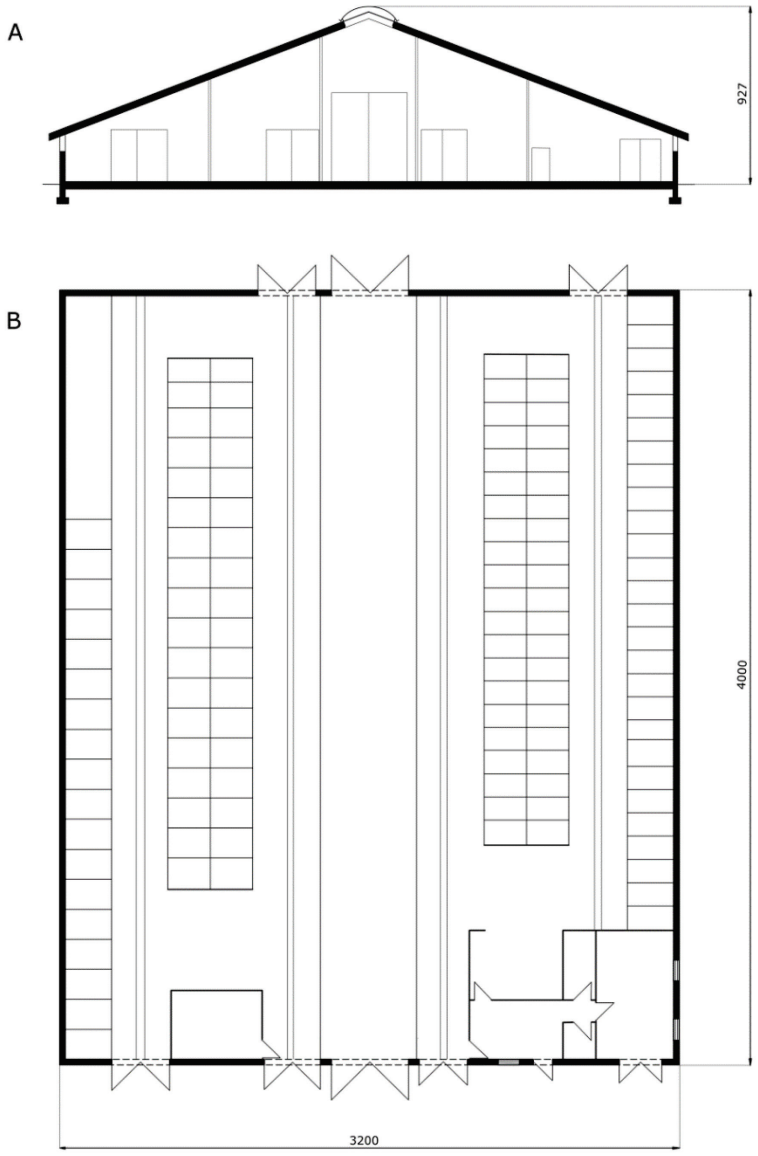
Źródło: opracowanie własne



Rys. D.3. Schemat budynku w miejscowości Komarów: A – rzut poprzeczny, B – rzut przyziemia

Fig. D.3. Diagram of building in Komarów: A – lateral projection, B – ground floor projection

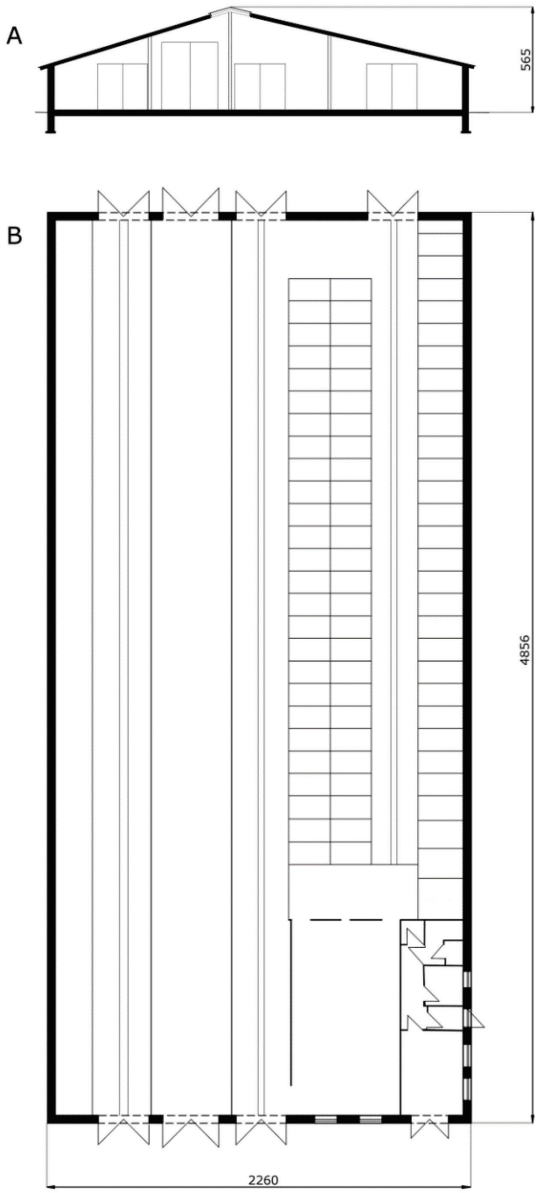
Źródło: opracowanie własne



Rys. D.4. Schemat budynku w miejscowości Olszowiec: A – rzut poprzeczny, B – rzut przyziemia

Fig. D.4. Diagram of building in Olszowiec: A – lateral projection, B – ground floor projection

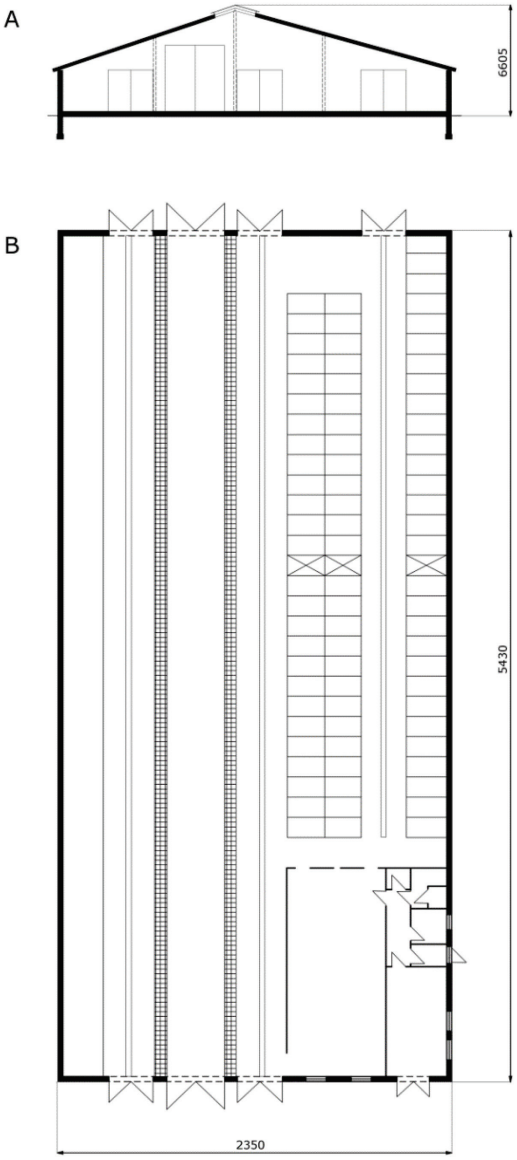
Źródło: opracowanie własne



Rys. D.5. Schemat budynku w miejscowości Ossowa: A – rzut poprzeczny, B – rzut przyziemia

Fig. D.5. Diagram of building in Ossowa: A – lateral projection, B – ground floor projection

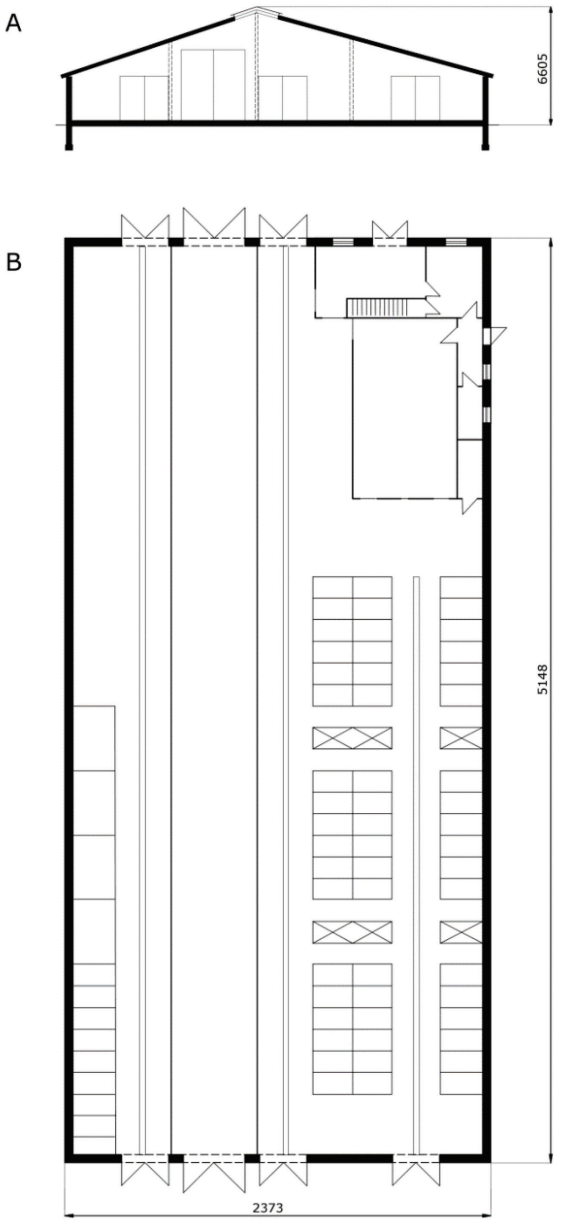
Źródło: opracowanie własne



Rys. D.6. Schemat budynku w miejscowości Przegaliny Duże: A – rzut poprzeczny, B – rzut przyziemia

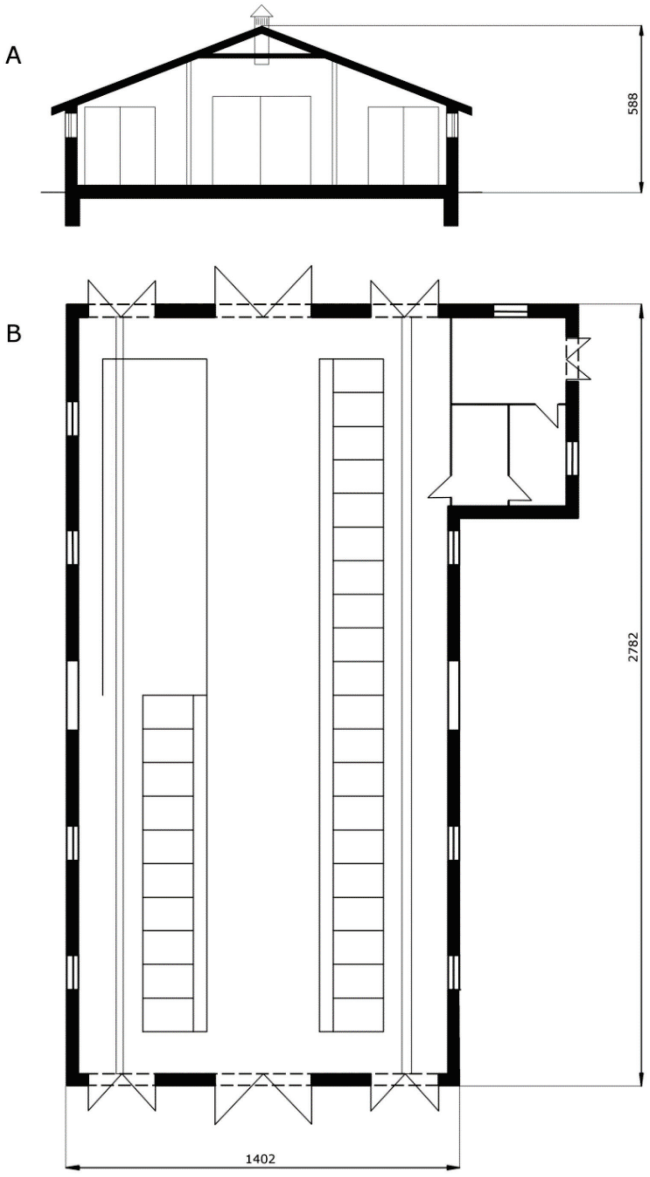
Fig. D.6. Diagram of building in Przegaliny Duże: A – lateral projection, B – ground floor projection

Źródło: opracowanie własne



Rys. D.7. Schemat budynku w miejscowości Turów: A – rzut poprzeczny, B – rzut przyziemia
Fig. D.7. Diagram of building in Turów: A – lateral projection, B – ground floor projection

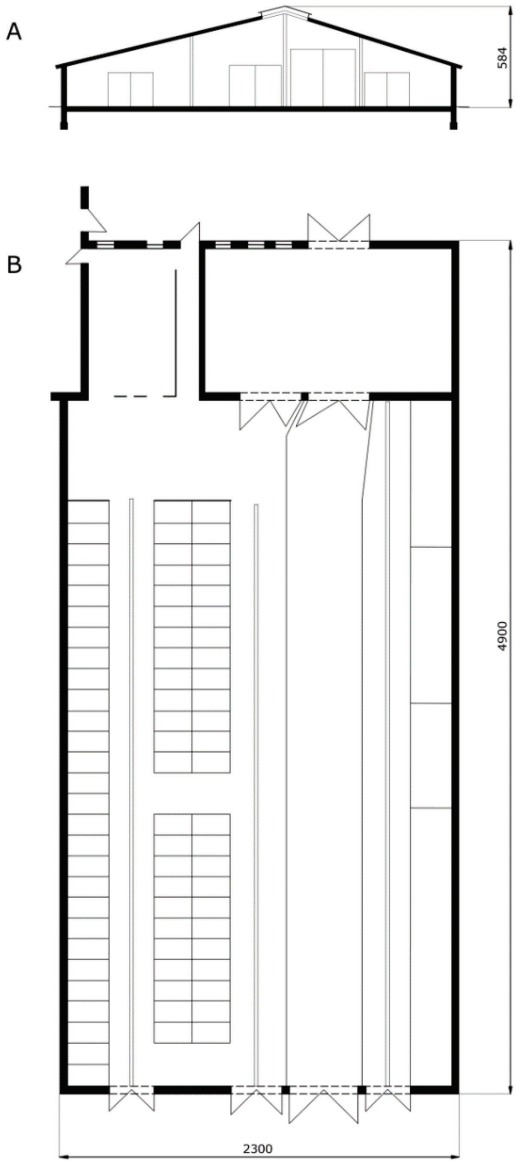
Źródło: opracowanie własne



Rys. D.8. Schemat budynku w miejscowości Żerocin: A – rzut poprzeczny, B – rzut przyziemia

Fig. D.8. Diagram of building in Żerocin: A – lateral projection, B – ground floor projection

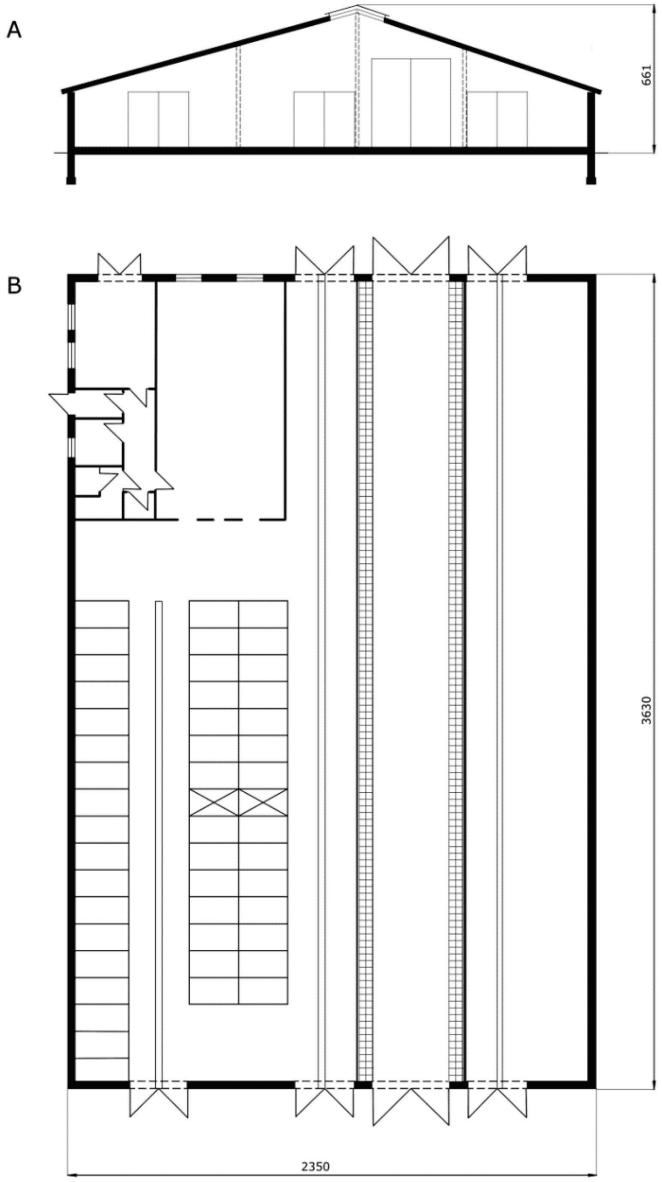
Źródło: opracowanie własne



Rys. D.9. Schemat budynku w miejscowości Żeszczynka: A – rzut poprzeczny, B – rzut przyziemia

Fig. D.9. Diagram of building in Żeszczynka: A – lateral projection, B – ground floor projection

Źródło: opracowanie własne



Rys. D.10. Schemat budynku w miejscowości Żulice: A – rzut poprzeczny, B – rzut przyziemia

Fig. D.10. Diagram of building in Żulice: A – lateral projection, B – ground floor projection

Źródło: opracowanie własne

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono problematykę związaną z kształtowaniem mikroklimatu w budynkach dla bydła mlecznego. Utrzymanie optymalnych warunku chowu zwierząt jest czynnikiem gwarantującym dobrostan przebywających w budynku zwierząt oraz zapewnia uzyskanie właściwych wskaźników ekonomicznych z ich hodowli. Ze względu na duże uwikłanie zachodzących zjawisk spośród wszystkich możliwych parametrów opisujących mikroklimat wybrano dwa najważniejsze, jakimi są temperatura i wilgotność względna powietrza. W rozważaniach jako bazowe przyjęto uśrednione wartości parametrów, mierzone na poziomie przebywania zwierząt.
Celem pracy była rozbudowa klasycznych modeli deterministycznych, używanych przy opisie dynamicznych zmian mikroklimatu, poprzez wykorzystanie modeli stochastycznych, pozwalających wprowadzić losowość czynników zaburzających główny trend zachodzących zmian. Zaburzenia te mogą wynikać zarówno z niepewności pomiarów, niedokładności modeli cząstkowych, jak również być wynikiem anomalii pogodowych, coraz częściej pojawiających się w naszej strefie klimatycznej. W rozważaniach uwzględniono modele szeregów czasowych oraz stochastycznych równań różniczkowych. Jako narzędzie wspomagające analizę zmian mikroklimatu wykorzystano stworzoną aplikację komputerową, która utwierdza w przekonaniu, że narzędzia komputerowe w dzisiejszych czasach mają duże znaczenie przy modelowaniu złożonych procesów.
Na potrzeby pracy opracowano uproszczony model deterministyczny opisujący bilans cieplny i wilgotnościowy, scalający w całość poszczególne składowe systemu. Należy do nich zaliczyć m.in.: oddziaływanie klimatu zewnętrznego, wymiary i właściwości termiczne budynku oraz strukturę stada zwierząt. W systemie uwzględniono modele cząstkowe, dostępne w literaturze krajowej i światowej, związanej z poruszaną w pracy tematyką, opisujące procesy przepływu ciepła i wilgoci dla budynku, zwierząt oraz pod wpływem wymiany powietrza.
Model deterministyczny opisujący przebieg zmian mikroklimatu w budynkach inwentarskich rozszerzono o modele stochastyczne uwzględniające występowanie zaburzeń losowych wynikających z niepewności pomiarów, nagłych zmian wywołanych np. otwarciem wrót wynikających z konieczności przeprowadzenia zabiegów technologicznych w budynku. W wyniku przeprowadzonej analizy zbadano wpływ wielkości zaburzeń na otrzymane oszacowania parametrów mikroklimatu, a także określono zbieżność i stabilność użytych modeli matematycznych: deterministycznego i stochastycznych.
Dodatkowo zaprojektowano oraz zaprogramowano aplikację komputerową wspomagającą przeprowadzanie analizy mikroklimatu w oparciu o przedstawione modele matematyczne. Aplikacja działa w oparciu o oprogramowanie naukowo-inżynierskie MatLab. Dzięki niej użytkownik ma dostęp do narzędzia umożliwiającego podanie parametrów budynku, obsady zwierząt oraz zadać parametry klimatu zewnętrznego. Może także uwzględnić zmienne w czasie sterowanie otworami wentylacyjnymi i otwieranie np. wrót, wynikające z wykonywanych prac obsługi zwierząt przez personel.

Otrzymane oszacowania wartości parametrów mikroklimatu zweryfikowano z pomiarami uzyskanymi w ramach badań przeprowadzonych w rzeczywistych budynkach inwentarskich dla bydła mlecznego. Badania prowadzono zarówno w okresie zimowym, jak i wiosenno-letnim. Pomiary wykonane zostały w 10 różnych budynkach dla bydła mlecznego zlokalizowanych na terenie województwa lubelskiego.
Wyniki badań eksperymentalnych oraz symulacyjnych przedstawiono w postaci graficznej oraz tabelarycznej. Przeprowadzona weryfikacja wykazała dużą zgodność uzyskanych wyników symulacyjnych z wartościami pomierzonymi w warunkach rzeczywistych w budynkach inwentarskich dla bydła. Badania statystyczne obejmowały analizę jakości dopasowania przyjętych modeli matematycznych.
Na podstawie analizy wyników można potwierdzić, że modelowanie mikroklimatu w budynkach inwentarskich jest procesem bardzo skomplikowanym, na który wpływ mają poszczególne elementy składowe. Zachodzące procesy są mocno nieliniowe, co dodatkowo utrudnia kwestię modelowania.
Wyniki pracy wnoszą nowe wartości poznawcze z zakresu modelowania matematycznego mikroklimatu w budynkach inwentarskich dla bydła mlecznego, poprzez niespotykane dotychczas w literaturze zastosowanie stochastycznych równań różniczkowych i uwzględnianie naturalnej istoty występowania losowych zaburzeń w tym zakresie.
Uzyskane wyniki oraz zaproponowane narzędzia mogą posłużyć do symulacji zmian mikroklimatu w hali zwierząt na etapie wymiarowania budynku, ustalania właściwości termoizolacyjnych przegród zewnętrznych budynku oraz liczebności obsady zwierząt. Innym aspektem jest wykorzystanie wskazanych modeli matematycznych do prognozowania warunków w hali dla zwierząt przy zapowiadanych zmianach parametrów klimatu zewnętrznego oraz przy ustalonej obsadzie zwierząt. Dzięki określeniu kierunku prognozowanych zmian możliwe jest wcześniejsze zapobieganie wystąpienia niekorzystnych dla zwierząt warunków poprzez sterowanie ilością powietrza wentylacyjnego.

Słowa kluczowe: mikroklimat, budynek inwentarski, modelowanie komputerowe

DEVELOPER OF MICROCLIMATE IN BUILDINGS FOR DAIRY CATTLE USING COMPUTER MODELLING

Summary

In the work, the problems associated with developing the microclimate in buildings for dairy cattle are presented. The maintenance of optimal conditions in livestock building is an important factor that guarantees the welfare of the animals staying in the building and ensures obtaining appropriate economic indicators from their breeding. Due to the large entanglement of the occurring phenomena, from all possible parameters describing the microclimate, the two most important were selected, which are the temperature and relative humidity of the air. In the considerations, the averaged values of parameters measured at the animal level were taken as the basis.

The aim of the work was to expand the classic deterministic models used in describing dynamic changes in the microclimate by use of stochastic models allowing to introduce randomness of factors, which disturbe the main trend of changes in microclimate parameters. These disturbances may result from uncertainty of measurements, inaccuracies of partial models, as well as being the result of weather anomalies, which are more and more frequently appearing in our climate zone. The considerations include time series and stochastic differential equations models. As a tool supporting the analysis of microclimate changes, a computer application was created that confirms the belief that in nowadays computing tools are important in modelling complex processes.

For the needs of the work, the simplified deterministic model describing the heat and moisture balance was developed, integrating the individual components of the system, including the impact of the external climate, dimensions and thermal properties of the building and structure of herd. The system consists of partial models, available in the Polish and worldwide literature related to the subject discussed in the paper. They describe the processes of heat and moisture flow for a building, animals and under the influence of air exchange.

The deterministic model describing the course of microclimate changes in livestock buildings has been extended by stochastic models taking into account the occurrence of random disturbances resulting from the uncertainty of measurements, sudden changes caused by, for example, the opening of gates resulting from the need to carry out technological operations in the building. As a result of the analysis, the effect of the size of the disturbances on the estimated microclimate parameters was examined. As well, the convergence and stability of the mathematical models, deterministic and stochastic, were determined.

Additionally, a computer application supporting the microclimate analysis was designed and programmed based on the presented mathematical models. The application works on the basis of MatLab's engineering software. Thanks to it, the user has access to a tool enabling the specification of building parameters, animal housing and setting parameters of the external climate as well as taking into account the variable in time control of ventilation openings. Opening gates can result from the animal handling work performed by the staff.

The obtained estimates of microclimate parameters were verified with measurements obtained as a result of study carried out in real livestock buildings for dairy cattle both in winter and in spring and summer periods. Measurements were made in 10 different buildings for dairy cattle located in the province of Lublin in Eastern Poland.

The obtained results of measurements and simulation were presented in graphical and tabular form. Carried out verification showed a high compliance of the obtained simulation results with the values measured in real conditions in livestock buildings for cattle. Statistical surveys included analysis of the matching quality of the adopted mathematical models.

Based on the analysis of the results, it can be confirmed that the modelling microclimate in livestock buildings is a very complicated process, influenced by individual components. The ongoing processes are highly non-linear which further complicates the issue of microclimate modelling.

The results of the work introduce new cognitive values in the field of mathematical modelling of the microclimate in buildings for dairy cows through the use of stochastic differential equations. It is so far not found in the literature, but takes into account the nature of the occurrence of random disturbances.

Obtained results and proposed tools can be used to simulate changes in the microclimate in the animal hall at the stage of dimensioning the building, determine the thermal insulation properties of the building envelope and the number of animals. Another aspect is the use of the indicated mathematical models for predicting conditions in the animal hall with expected external climate parameters and with a intended stocking density. By determining the direction of the forecasted changes, it is possible to prevent the adverse conditions for animals earlier by controlling the amount of ventilation air.

Key words: microclimate, livestock building, computer modelling

WYDAWNICTWO