

Ewa Wachowicz
Katedra Systemów Sterowania
Politechnika Koszalińska

LINGWISTYCZNY MODEL PROCESÓW ZACHODZĄCYCH W SZKLARNI

Streszczenie

W pracy omówiono lingwistyczny model procesów wymiany ciepła i masy zachodzących w szklarni. Model ten może być praktycznie wykorzystany podczas predykcyjnego lub adaptacyjnego sterowania mikroklimatem w szklarni. Komputerowe symulacje przebiegu procesów przeprowadzono z wykorzystaniem pakietu programowego MATLAB.

Słowa kluczowe: modelowanie lingwistyczne, szklarnia, wymiana ciepła i masy

Wykaz oznaczeń

Q_{o-e}	– strumień ciepła przepływający pomiędzy otoczeniem i ekranami ciepła, J/h,
Q_{e-p}	– strumień ciepła przepływający pomiędzy powietrzem wewnętrznym i ekranami ciepła, J/h,
Q_{o-p}	– strumień ciepła przepływający z otoczenia do powietrza wewnątrz szklarni w wyniku wentylacji, J/h,
Q_{p-gl}	– strumień ciepła wymieniany pomiędzy glebą i powietrzem, J/h,
Q_{g-p}	– strumień ciepła oddawany przez grzejniki do powietrza, J/h,
Q_{g-gl}	– strumień ciepła oddawany przez grzejniki do gleby, J/h,
Q_{g-r}	– strumień ciepła wymieniany pomiędzy grzejnikami i roślinami, J/h,
Q_{r-p}	– strumień ciepła zużywany podczas procesu transpiracji i ewaporacji, J/h,
K	– chwila czasowa K ,
$K+1$	– chwila czasowa $K+1$,
t	– czas, h,
t_g	– temperatura gleby, °C,
t_{gs}	– pomocniczy model liniowy podzakresu S małych wartości temperatury gleby, °C,

t_{gCE}	– pomocniczy model liniowy podzakresu CE średnich wartości temperatury gleby, °C,
t_{gB}	– pomocniczy model liniowy podzakresu B dużych wartości temperatury gleby, °C,
t_{gr}	– temperatura grzejnika, °C,
t_{pw}	– temperatura powietrza wewnętrznego, °C,
t_{pwS}	– pomocniczy model liniowy podzakresu S małych wartości temperatury powietrza wewnętrznego, °C,
t_{pwCE}	– pomocniczy model liniowy podzakresu CE średnich wartości temperatury powietrza wewnętrznego, °C,
t_{pwB}	– pomocniczy model liniowy podzakresu B dużych wartości temperatury powietrza wewnętrznego, °C,
t_{pz}	– temperatura powietrza zewnętrznego, °C,
W_{gl}	– zawartość wody w glebie, kg/kg,
W_{gS}	– pomocniczy model liniowy podzakresu S małych wartości zawartości wody w glebie, °C,
W_{gCE}	– pomocniczy model liniowy podzakresu CE średnich wartości zawartości wody w glebie, °C,
W_{gB}	– pomocniczy model liniowy podzakresu B dużych wartości zawartości wody w glebie, °C,
W_{pw}	– zawartość wody w powietrzu wewnętrznym, kg/kg,
W_{e-p}	– strumień masy przepływający pomiędzy powietrzem i ekranami ciepła, kg/h,
W_{e-p}	– strumień masy przepływający z otoczenia do powietrza wewnątrz szklarni w wyniku wentylacji, kg/h,
W_{p-gl}	– strumień masy przepływający z gleby do powietrza, kg/h,
W_{r-p}	– strumień masy oddawany przez rośliny do powietrza, kg/h,
φ_{pw}	– wilgotność względna powietrza wewnętrznego, %,
φ_{pwS}	– pomocniczy model liniowy podzakresu S małych wartości wilgotności względnej powietrza wewnętrznego, %,
φ_{pwCE}	– pomocniczy model liniowy podzakresu CE średnich wartości wilgotności względnej powietrza wewnętrznego, %,
φ_{pwB}	– pomocniczy model liniowy podzakresu B dużych wartości wilgotności względnej powietrza wewnętrznego, %,
φ_{pz}	– wilgotność względna powietrza zewnętrznego, %,
μ	– funkcja przynależności.

Wprowadzenie

Model lingwistyczny szklarni można sformułować na podstawie znajomości wyników badań eksperymentalnych procesów zachodzących w szklarni oraz znajomości teorii zbiorów rozmytych. Zaletą tego modelowania jest to, że znacznie krótszy i mniej uciążliwy dla badacza jest proces formułowania modelu, w porównaniu z modelowaniem matematycznym. Jednakże wadą (lub jeśli ktoś woli ograniczeniem) modelu lingwistycznego jest to, iż umożliwia on badaczowi uzyskanie jedynie informacji o tym, jak zmieniają się sygnały wyjściowe modelu w zależności od sygnałów wejściowych. Modelowanie rozmyte nie pozwala badaczowi powiększyć jego wiedzy o procesach zachodzących w szklarni.

Celem niniejszej pracy jest:

- opracowanie lingwistycznego, predykcyjnego modelu procesów wymiany ciepła i masy w szklarni,
- weryfikacja empiryczna modelu.

Analiza procesów termicznych i wilgotnościowych występujących w szklarni

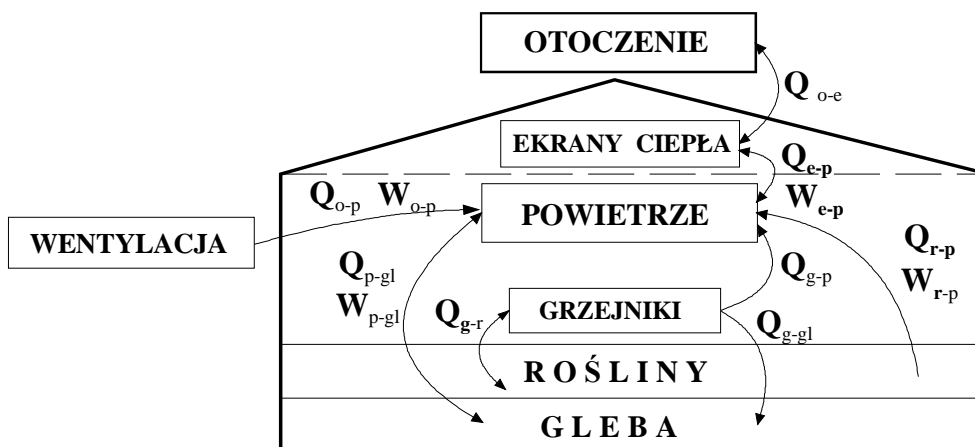
Procesy termiczne i wilgotnościowe występujące w szklarni zilustrowano na rysunku 1. W szklarni mamy do czynienia z procesami wymiany ciepła pomiędzy [Kurpaska 2000], [Zabeltitz 1991]:

- powietrzem wewnątrz szklarni i ekranami ciepła (strumień Q_{e-p}),
- otoczeniem i ekranami ciepła (strumień Q_{o-e}),
- otoczeniem i powietrzem wewnętrznym podczas wentylacji (strumień Q_{o-p}),
- powietrzem i glebą (strumień Q_{p-gl}),
- roślinami i powietrzem wewnętrznym podczas transpiracji i ewaporacji (strumień Q_{p-gl}),
- grzejnikami i powietrzem (strumień Q_{g-p}),
- grzejnikami i glebą (strumień Q_{g-gl}),
- grzejnikami i roślinami (strumień Q_{g-r}).

Ponadto występują tu procesy wymiany masy pomiędzy:

- powietrzem wewnątrz szklarni i otoczeniem (strumień W_{p-o}),
- powietrzem wewnątrz szklarni i ekranami ciepła (strumień W_{e-p}),
- glebą i powietrzem (strumień W_{gl-p}),
- roślinami i powietrzem (strumień W_{r-p}).

Ponadto dokonując bilansu ciepła należy pamiętać, że w szklarniach z osłonami drogą radiacji przenoszone jest ciepło pomiędzy roślinami i osłonami.



Rys. 1. Procesy wymiany ciepła (strumienie Q) i masy (strumienie W), występujące w szklarni

Fig. 1. The processes of heat exchange (streams Q) and mass transfer (streams W), occurring in a greenhouse

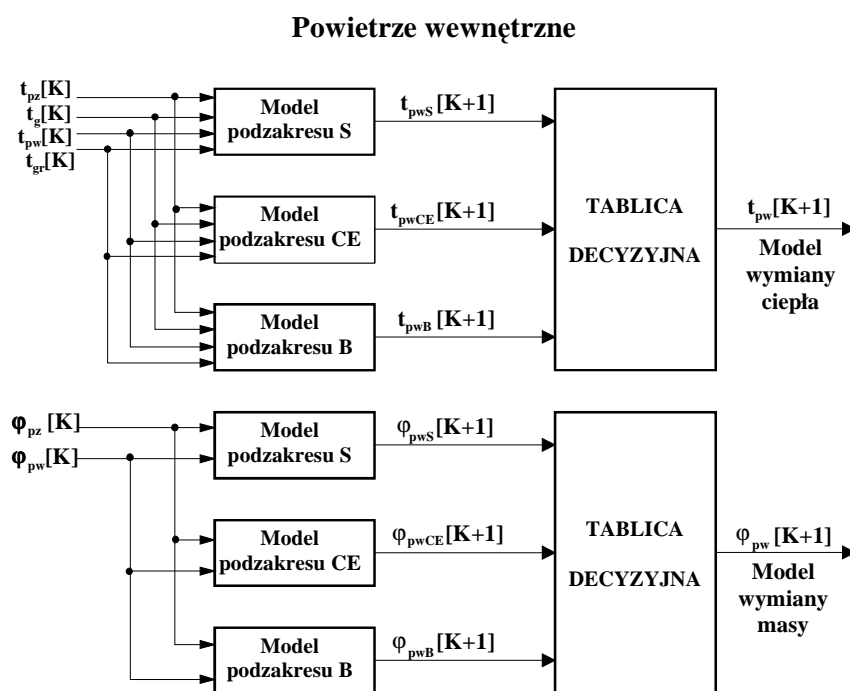
Z przedstawionej wyżej analizy procesów wynika, że procesy zachodzące w szklarni to procesy silnie nieliniowe, powiązane ze sobą. Podczas formułowania matematycznego modelu tych procesów, należy ułożyć równania bilansów ciepła i masy dla powietrza wewnątrz szklarni oraz gleby. W równaniach bilansowych zawarte powinny być prawa wiedzy naukowej i formalizmy matematyczne, opisujące mechanizmy przenoszenia ciepła i masy [Kurpaska 2000], [Kurpaska i inni 2005]. Opis matematyczny niektórych spośród tych mechanizmów nastęrcza trudności. Przykładem takiego, trudnego w opisie, mechanizmu przenoszenia ciepła z otoczenia do wnętrza szklarni może być promieniowanie słoneczne. Jak wiadomo, jego intensywność zależy od: szerokości geograficznej, pory roku, a co się z tym wiąże od kąta padania promieni słonecznych, zamglenia, zanieczyszczenia powietrza, rodzaju szkła, z jakiego zbudowana jest szklarnia itp. Innym przykładowym procesem, który trudno opisać matematycznie jest proces wymiany ciepła i masy, towarzyszący wymianie gazowej pomiędzy roślinami i powietrzem wewnątrz szklarni. Mamy wówczas do czynienia z wydalaniem pary wodnej przez rośliny, pociągającym za sobą zużywanie ciepła. Alternatywą dla modelowania matematycznego może być modelowanie lingwistyczne.

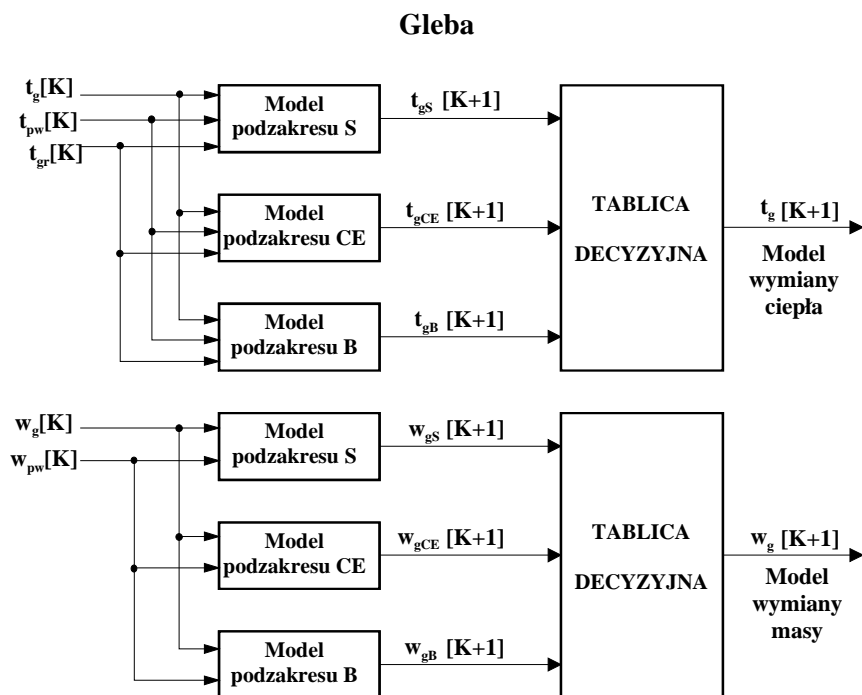
Lingwistyczny model procesów wymiany ciepła i masy w szklarni

Poniżej omówiony zostanie lingwistyczny model szklarni, zbudowany dla potrzeb sterowania mikroklimatem. Do opisu procesów wymiany ciepła i masy zachodzących w powietrzu oraz w glebie w szklarni wykorzystano strukturę predykcyjnego, lingwistycznego modelu zaproponowanego przez Takagi i Sugeno [Yager, Filev 1995]. Modele procesów wymiany ciepła i masy zachodzących w powietrzu oraz w glebie w szklarni sformułowano na podstawie wyników badań eksperymentalnych:

- temperatury t_{pw} i wilgotności względnej ϕ_{pw} powietrza wewnętrznego,
- temperatury t_{pz} i wilgotności względnej ϕ_{pz} powietrza zewnętrznego,
- temperatury t_g i zawartości wody w_g w glebie,
- temperatury grzejników,
- przeprowadzonych w tych samych chwilach czasowych.

Na rysunku 2 przedstawiono budowę lingwistycznego modelu procesów wymiany ciepła i masy, występujących w powietrzu wewnętrznym oraz w glebie w szklarni. W skład modeli wchodzi: pomocnicze modele liniowe oraz tablica decyzyjna.





Rys. 2. Struktura lingwistycznego modelu wymiany ciepła i masy w powietrzu oraz w glebie w szklarni

Fig. 2. The structure of linguistic model for heat exchange and mass transfer in air and soil in greenhouse

Pomocnicze modele liniowe

Zakres zmian sygnałów wejściowych lingwistycznego modelu procesów zachodzących w szklarni podzielono na trzy podzakresy: S – małych, CE – średnich i B – dużych wartości. Dla każdego z tych podzakresów sformułowano model liniowy. Poniżej przykładowo pokazano pomocnicze modele liniowe dla podzakresów S, CE, B:

– modelu wymiany ciepła w powietrzu wewnątrz szklarni.

$$t_{pws}(K+1) = 1.3619 t_{pws}(K) - 0.3481 t_{pws}(K-1) + 1.9257 t_{pz}(K) + 2.1178 t_{pz}(K-1) - 0.9183 t_g(K) + 1.8765 t_g(K-1) + 1.5792 t_{gr}(K-1)$$

$$t_{pwce}(K+1) = 0.2378 t_{pwce}(K) + 0.9040 t_{pwce}(K-1) - 2.1130 t_{pz}(K) + 1.0221 t_{pz}(K-1) + 2.3231 t_g(K) + 0.9769 t_g(K-1) + 1.5792 t_{gr}(K-1)$$

$$t_{pwb}(K+1) = 3.2556 t_{pwb}(K) - 1.9873 t_{pwb}(K-1) + 1.3670 t_{pz}(K) + 0.4678 t_{pz}(K-1) - 2.4786 t_g(K) + 1.0021 t_g(K-1) + 1.5792 t_{gr}(K-1)$$

– modelu wymiany masy w powietrzu wewnątrz szklarni.

$$\varphi_{pwS}(K+1) = 4.5781 \varphi_{pwS}(K) - 3.3762 \varphi_{pwS}(K-1) + 1.3716 \varphi_{pz}(K) + 1.2127 \varphi_{pz}(K-1)$$

$$\varphi_{pwCE}(K+1) = 1.1895 \varphi_{pwCE}(K) - 0.9040 \varphi_{pwCE}(K-1) - 1.9251 \varphi_{pz}(K) + 3.2770 \varphi_{pz}(K-1)$$

$$\varphi_{pwB}(K+1) = 2.6281 \varphi_{pwB}(K) - 0.4321 \varphi_{pwB}(K-1) + 2.1139 \varphi_{pz}(K) - 0.8361 \varphi_{pz}(K-1)$$

Tablice decyzyjne

Wykorzystane w modelu tablice decyzyjne mają postać wzorów. Przykładowo dla modelu wymiany ciepła w powietrzu wewnątrz szklarni tablica decyzyjna opisana jest zależnością:

$$t_{pw}^M(K+1) = \frac{\mu_S}{\mu_S + \mu_{CE} + \mu_B} t_{pwS}(K+1) + \frac{\mu_{CE}}{\mu_S + \mu_{CE} + \mu_B} t_{pwCE}(K+1) + \frac{\mu_B}{\mu_S + \mu_{CE} + \mu_B} t_{pwB}(K+1)$$

przy czym:

$\mu_S = \mu_S[t_{pw}(K)]$, $\mu_{CE} = \mu_{CE}[t_{pw}(K)]$, $\mu_B = \mu_B[t_{pw}(K)]$ – wartości funkcji przynależności pomiaru temperatury powietrza wewnątrz szklarni $t_{pw}(K)$ odpowiednio do podzakresów S, CE i B.

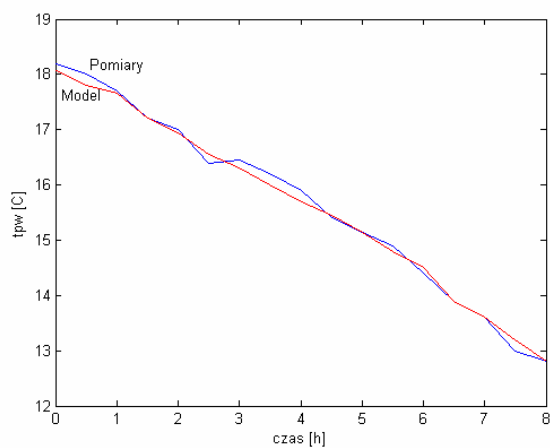
Dla każdego z mierzonych sygnałów wejściowych lingwistycznego modelu procesów zachodzących w szklarni opracowano przebiegi funkcji przynależności elementów zbioru tych sygnałów do trzech podzakresów: S – małych, CE – średnich i B – dużych wartości. Funkcje te mają przebieg trapezoidalny lub trójkątny.

Wyniki badań symulacyjnych i empiryczna weryfikacja modelu

Poniżej pokazano przykładowe, uzyskane w wyniku przeprowadzonych badań symulacyjnych z wykorzystaniem lingwistycznego modelu procesów zachodzących w szklarni, przebiegi w czasie:

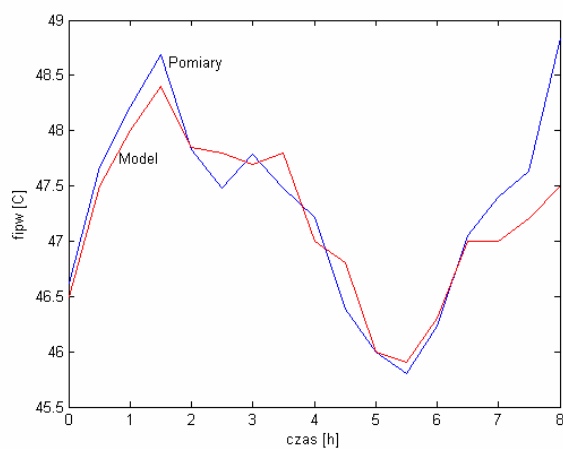
- temperatury powietrza wewnątrz szklarni t_{pw} (rys. 3),
- wilgotności względnej powietrza wewnętrznego φ_{pw} (rys. 4),
- temperatury gleby t_g (rys. 5).

Wyniki obliczeń porównano z rzeczywistymi przebiegami wymienionych wyżej parametrów, dokonując empirycznej weryfikacji modelu.



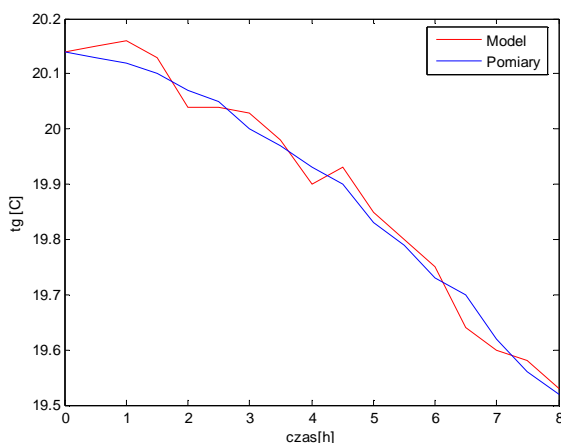
Rys. 3. Przykładowe przebiegi temperatur powietrza wewnątrz szklarni: zmierzonych oraz obliczonych na podstawie lingwistycznego modelu

Fig. 3. Sample characteristics of air temperature inside greenhouse: measured and calculated on the grounds of a linguistic model



Rys. 4. Przykładowe przebiegi wilgotności względnych powietrza wewnątrz szklarni: zmierzonych oraz obliczonych na podstawie lingwistycznego modelu

Fig. 4. Sample characteristics of air relative humidity values inside greenhouse: measured and calculated on the grounds of a linguistic model



Rys. 5. Przykładowe przebiegi temperatur gleby w szklarni: zmierzonych oraz obliczonych na podstawie lingwistycznego modelu

Fig. 5. Sample characteristics of soil temperatures inside greenhouse: measured and calculated on the grounds of a linguistic model

Budowa oraz weryfikacja modelu była możliwa dzięki uprzejmości właścicieli prywatnego gospodarstwa ogrodniczego, którzy udostępniili Autorce wybrane, zarchiwizowane dane o pracy układu sterowania, zainstalowanego w ich szklarni. Weryfikacji nie został poddany model wymiany masy w glebie, gdyż autorka pracy nie dysponowała dostatecznie wieloma wynikami pomiarów wilgotności gleby, które mogłaby wykorzystać podczas modelowania i weryfikacji. Z analizy błędów lingwistycznego modelu procesów wymiany ciepła i masy w szklarni wynika, że maksymalne, lokalne błędy modelu nie przekraczają 5%.

Podsumowanie

Przedstawiony w pracy model jest pierwszą próbą zastosowania zbiorów rozmytych do modelowania procesów wymiany ciepła i masy zachodzących w szklarni. Model ten może zostać wykorzystany podczas:

- badań symulacyjnych procesu technologicznego,
- badań symulacyjnych, mających na celu sprawdzenie,
- poprawności funkcjonowania zaprojektowanego przez automatyka układu do zmiany mikroklimatu w szklarni. Model procesów zachodzących w szklarni musi być wówczas uzupełniony o algorytm sterowania,
- predykcyjnego lub adaptacyjnego sterowania mikroklimatem wewnątrz szklarni.

Bibliografia

Kurpaska S. 2000. System ogrzewania podłoża ogrodniczego ciepłym powietrzem. Analiza teoretyczna i weryfikacja eksperymentalna. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie. Nr 269. Kraków.

Kurpaska S., Ślipek Z., Bożek B., Frączek J. 2005. Simulation of Heat and Moisture Transfer in the Greenhouse Substrate due to a Heating System by Buried Pipes. *Biosystems Engineering*, 90(1), 63-74.

Zabeltitz C. 1991. Szklarnie. Projektowanie i budowa. PWRiL. Warszawa.

Yager R.R. Filev D.P. 1995. Podstawy modelowania i sterowania rozmytego. WNT, Warszawa.

LINGUISTIC MODEL OF PROCESSES TAKING PLACE IN A GREENHOUSE

Summary

The paper presents linguistic model of heat exchange and mass transfer processes taking place in a greenhouse. This model may be used in practice during predictive or adaptive control of greenhouse microclimate. Computer simulations of the processes were performed using the MATLAB software package.

Key words: linguistic modelling, greenhouse, heat and mass exchange