

O OPTYMALNYM STEROWANIU TEMPERATURĄ I STĘŻENIEM DWUTLENKU WĘGLA W SZKLARNI

Anna Stankiewicz

Katedra Podstaw Techniki, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Streszczenie. Systemy sterowania klimatem we współczesnych szklarniach to złożone struktury wykorzystujące model matematyczny sterowanego procesu i nowoczesne koncepcje sterowania. W pracy rozważa się zadanie równoczesnej stabilizacji temperatury powietrza i stężenie dwutlenku węgla wewnątrz szklarni przy odcinkami stałych wartościach zadanych. Zaproponowano nowy system sterowania typu *feedback-feedforward*, który pozwala w torze sprzężenia „wprzód” skutecznie i szybko niwelować skutki szybkozmiennych zakłóceń, a w torze sprzężenia zwrotnego od stanu procesu zapewnia szybkie zanikanie błędu sterowania. Macierz regulatora dobrano optymalnie w sensie wskaźnika z mnożnikiem czasowym.

Słowa kluczowe: sterowanie, klimat, szklarnia, model matematyczny, sprzężenie zwrotne, sprzężenie „wprzód”

Wprowadzenie

Rolnictwo szybko przekształca się w znaczącą dziedzinę produkcji, chłonącą nowoczesne techniki informatyczne, komputerowe systemy zintegrowanego zarządzania oraz zaawansowane systemy automatyki i robotyki. Odpowiednia temperatura i odpowiednie stężenie dwutlenku węgla wewnątrz szklarni wpływają obok promieniowania słonecznego na prędkość fotosyntezy, a więc w konsekwencji na prędkość wzrostu uprawy w szklarni [Bakker i in. 1995]. W ciągu ostatnich dwudziestu lat powstało bardzo wiele prac o sterowaniu klimatem w szklarni. Większość poświęcona jest oddzielnemu sterowaniu jedną lub dwoma zmiennymi stanu procesu. Przykładowo, o sterowaniu temperaturą wewnątrz szklarni traktuje praca [Arvanitis i in. 2000]. Sterowanie stężeniem dwutlenku węgla jest rozpatrywane w [Linker i in. 1998]. W pracy [Linker i in. 1997] sterowanie stężeniem CO₂ i temperaturą realizowane jest równocześnie poprzez dozowanie dwutlenku węgla i odpowiednią wentylację.

Celem pracy jest synteza systemu sterowania klimatem szklarni, w którym trzy zmienne sterujące: temperatura systemu ogrzewania, prędkość dozowania dwutlenku węgla oraz prędkość przepływu powietrza przez otwory wentylacyjne wpływają równocześnie na dwie zmienne stanu klimatu: temperaturę powietrza i stężenie dwutlenku węgla wewnątrz szklarni.

System

Opisując klimat w szklarni zakłada się, że wewnątrz szklarni jest traktowane jako zbiornik powietrza o idealnym wymieszaniu. Równania dynamiki procesu wynikają wówczas z bilansu przepływu masy i energii pomiędzy wnętrzem a otoczeniem szklarni oraz z egzogenego dopływu masy i energii w wyniku sterowania. Szczegółowy opis tych procesów bazujący przede wszystkim na pracach [van Henten 1994, 2003] wyprowadzono w pracy [Stankiewicz 2009a]. Tu podano tylko opisujące je równania różniczkowe. Dynamikę klimatu szklarni oraz wzrostu uprawy opisują trzy zmienne stanu:

- X_T – temperatura powietrza wewnątrz szklarni [$^{\circ}C$],
- X_C – stężenie dwutlenku węgla w szklarni [$kg \cdot m^{-3}$],
- X_d – sucha masa uprawy [$kg \cdot m^{-2}$].

Zmienne sterujące to:

- U_T – temperatura systemu ogrzewania [$^{\circ}C$],
- U_C – prędkość dozowania dwutlenku węgla [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$],
- U_v – prędkość przepływu powietrza przez otwory wentylacyjne [$m \cdot s^{-1}$].

Nie sterowalne sygnały wejściowe oraz zakłócenia to:

- V_{rad} – promieniowanie ciepłe na zewnątrz szklarni (nasłonecznienie) [$W \cdot m^{-2}$],
- V_T – temperatura otoczenia [$^{\circ}C$],
- V_C – stężenie dwutlenku węgla w powietrzu na zewnątrz szklarni [$kg \cdot m^{-3}$],

Z bilansu energii dostarczanej przez system ogrzewania, strat energii w wyniku naturalnej wentylacji przez otwory okienne i transmisję poprzez ściany oraz ciepła dostarczanego przez promieniowanie słoneczne wynika równanie różniczkowe opisujące temperaturę X_T :

$$\frac{dX_T}{dt} = \frac{c_{pi,ai}}{c_{cap,q}} (U_T - X_T) - \left(\frac{c_{cap,q,v}}{c_{cap,q}} U_v + \frac{c_{ai,ou}}{c_{cap,q}} \right) (X_T - V_T) + \frac{c_{rad,q}}{c_{cap,q}} V_{rad} \quad (1)$$

Wartości parametrów $c_{cap,q}$, $c_{cap,q,v}$, $c_{ai,ou}$, $c_{rad,q}$ i $c_{pi,ai}$ podano w dodatku B.

Dynamikę zmian stężenia CO_2 w szklarni determinuje bilans prędkości jego dozowania, poboru w procesie fotosyntezy, wymiany przez otwory wentylacyjne oraz produkcji w procesie oddychania roślin. Stężenie dwutlenku węgla opisuje równanie [Stankiewicz 2009a]:

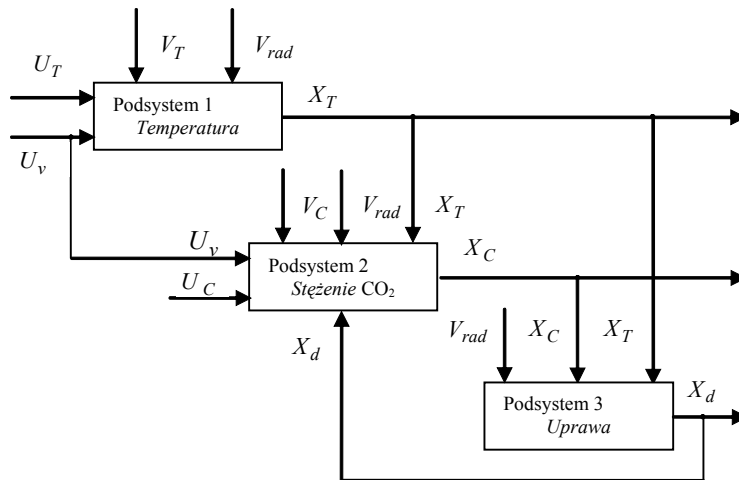
$$\begin{aligned} \frac{dX_C}{dt} = & \frac{1}{c_{cap,c}} \left[c_{resp,c} X_d 2^{(X_T - \alpha)/\beta} + U_C - (U_v + c_{leak}) (X_C - V_C) \right] \\ & + \frac{1}{c_{cap,c}} \left[- \left(1 - e^{-c_{pl,d} X_d} \right) \frac{c_{rad} V_{rad} \left(-c_{co2,1} X_T^2 + c_{co2,2} X_T - c_{co2,3} \right) (X_C - c_r)}{c_{rad} V_{rad} + \left(-c_{co2,1} X_T^2 + c_{co2,2} X_T - c_{co2,3} \right) (X_C - c_r)} \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

Wartości oraz interpretację fizyczną parametrów $c_{cap,c}$, $c_{resp,c}$, c_{rad} , $c_{co2,1}$, $c_{co2,2}$, $c_{co2,3}$, c_r , $c_{pl,d}$, c_{leak} , α i β podobnie jak poprzednio, podano w dodatku B.

O dynamice zmian suchej masy uprawy decyduje bilans prędkości całkowitej produkcji cukrów w wyniku poboru dwutlenku węgla w procesie fotosyntezy oraz prędkość konsumpcji cukrów w procesie oddychania roślin; opisuje ją równanie różniczkowe:

$$\frac{dX_d}{dt} = c_{\alpha\beta} \left(1 - e^{-c_{pl,d} X_d}\right) \frac{c_{rad} V_{rad} \left(-c_{co2,1} X_T^2 + c_{co2,2} X_T - c_{co2,3}\right) (X_C - c_r)}{c_{rad} V_{rad} + \left(-c_{co2,1} X_T^2 + c_{co2,2} X_T - c_{co2,3}\right) (X_C - c_r)} - c_{resp,d} X_d 2^{(X_T - \alpha)/\beta} \quad (3)$$

Schemat strukturalny systemu złożonego z trzech podsystemów ilustrujący przepływy sygnałów i interakcje pomiędzy nimi przedstawia rysunek 1. Oprócz radiacji słonecznej wejściami podsystemu 3 są wyjścia X_T i X_C podsystemów 1 i 2. Sterowanie wzrostem uprawy odbywa się więc poprzez sterowanie klimatem szklarni. Równocześnie wzrost uprawy wpływa na przebieg procesów klimatycznych szklarni poprzez sprzężenie podsystemów 2 i 3.



Rys. 1. Struktura systemu klimat i uprawa w szklarni

Fig. 1. Structural diagram of the greenhouse climate and crop production processes

Model

Zdefiniujemy wektory: stanu procesu, sterowań, zakłóceń mierzalnych i zakłóceń nie mierzonych, odpowiednio, jako

$$x = [X_T \quad X_C]^T, \quad u = [U_T \quad U_C \quad U_v]^T, \quad v = [V_T \quad V_C]^T, \quad z = [V_{rad} \quad X_d]^T. \quad (4)$$

W punkcie pracy są one następujące: x_o , u_o , v_o i z_o . Niech $\Delta x = x - x_o$, $\Delta u = u - u_o$, $\Delta v = v - v_o$ i $\Delta z = z - z_o$ będą przyrostami tych wektorów w otoczeniu punktu pracy.

W pracy [Stankiewicz 2009a] pokazano, że klimat w szklarni można opisać równaniem stanu

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u + C \Delta v + E \Delta z, \quad (7)$$

w którym macierz stanu i macierz wejść są następujące:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{c_{pi,ai}}{c_{cap,q}} & 0 & -\frac{c_{cap,q,v}}{c_{cap,q}}(X_{T,o} - V_{T,o}) \\ 0 & \frac{1}{c_{cap,c}} & -\frac{1}{c_{cap,c}}(X_{C,o} - V_{C,o}) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

a elementy A_{11} , A_{21} , A_{22} zdefiniowane są, odpowiednio, wzorami (A.1)-(A.3) w dodatku A. Macierze zakłóceń mierzalnych i niemierzalnych to:

$$C = \begin{bmatrix} \frac{c_{cap,q,v}}{c_{cap,q}} U_{v,o} + \frac{c_{ai,ou}}{c_{cap,q}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{c_{cap,c}}(U_{v,o} + c_{leak}) \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} c_{rad,q}/c_{cap,q} & 0 \\ E_{21} & E_{22} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

gdzie elementy E_{21} , E_{22} dane są, odpowiednio, wzorami (A.4), (A.5) w dodatku A. W pracy [Stankiewicz 2009a] pokazano, na przykładzie znanego w literaturze procesu klimatycznego, że rzeczywisty nieliniowy opis procesu jest bardzo dobrze aproksymowany przez model liniowy w zakresie typowych zmian sygnałów sterujących i zakłóceń.

Sterowanie

Rozważmy zadanie nadążania zmiennych X_T i X_C za odcinkami stałymi wartościami zadanymi X_T^* i X_C^* . Wartości te są wyznaczone przez nadrzędną warstwę optymalizacji procesu, określającą punkt pracy optymalny dla aktualnego etapu wzrostu uprawy i aktualnego stanu otoczenia szklarni lub ich dobór i zmiany w czasie zależą od doświadczenia i wiedzy specjalistów - ogrodników. Zmieniają się one z reguły kilka, rzadziej kilkanaście razy w czasie doby.

Układ sterowania feedback-feedforward

Niech $x^* = [X_T^* \quad X_C^*]^T$ będzie wektorem wartości zadanych zmiennych stanu procesu. Synteza algorytmu sterowania będzie bazowała na modelu uproszczonym

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u + C \Delta v. \quad (10)$$

Założenie, iż przyrost zakłóceń Δz jest zerowy, oznacza jedynie, że w rozpatrywanym horyzoncie czasu zakłócenia te traktujemy jako stałe. Jeśli wartości zadane są stałe w czasie (w dostatecznie długim horyzoncie czasu), to sterowanie u^* stabilizujące wektor stanu modelu (10) na wartości zadanej x^* dane jest wzorem

$$\Delta u^* = -B^T [BB^T]^{-1} A \Delta x^* - B^T [BB^T]^{-1} C \Delta v. \quad (11)$$

gdzie $\Delta x^* = x^* - x_o$. Podstawiając (11) do równania (7) otrzymujemy $\dot{e} = Ae + E \Delta z$, gdzie $e = x - x^*$ jest wektorem błędu regulacji, drugi składnik algorytmu (10) spełnia więc rolę idealnego kompensatora zakłóceń v . Macierz stanu A jest asymptotycznie stabilna, ponieważ jej wartości własne są ujemne dla dowolnych wartości parametrów fizycznych procesu. Stąd, jeśli zakłócenia Δz są zerowe, to błąd sterowania asymptotycznie dąży do zera. Jednak taki proces stabilizacji błędu sterowania przebiega zazwyczaj bardzo wolno, co oznacza, że oprócz sterowania (11) należy zastosować korygującą składową przejściową sterowania u_p , czyli

$$u = u^* + u_p. \quad (12)$$

Składową przejściową sterowania będziemy dobierać jako

$$u_p = Fe, \quad (13)$$

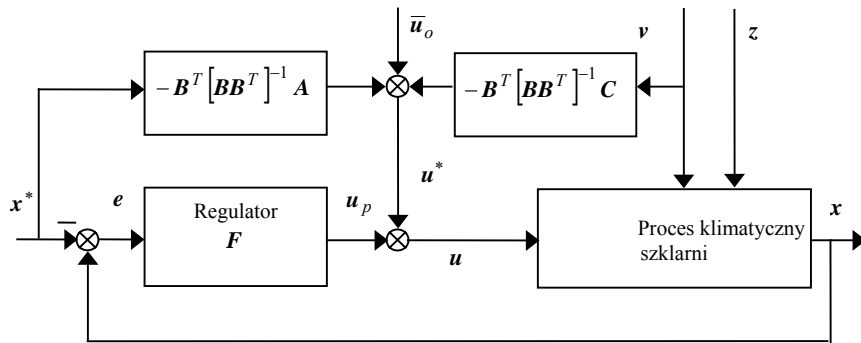
czyli zastosujemy statyczne sprzężenie zwrotne od stanu (błędu) procesu. Na podstawie równań (10)-(12) błąd sterowania dany jest równaniem różniczkowym

$$\dot{e} = Ae + Bu_p. \quad (14)$$

Strukturę systemu sterowania *feedback-feedforward* opisanego równaniami (11)-(13) przedstawia rysunek 2. Ponieważ na podstawie (11) sterowanie u^* można przedstawić w postaci

$$u^* = -B^T [BB^T]^{-1} Ax^* - B^T [BB^T]^{-1} Cv + \bar{u}_o, \quad (15)$$

gdzie składowa $\bar{u}_o = B^T [BB^T]^{-1} Ax_o + B^T [BB^T]^{-1} Cv_o + u_o$, w strukturze układu sterowania rozdzielono składową zależną od wektora x^* od składowej zależnej od zakłóceń v i stałej składowej \bar{u}_o . Dwie pierwsze składowe sterowania (15) generowane są przez statyczne sprzężenie od x^* i zakłóceń v . Aby uzyskać szybkie zanikanie błędu sterowania do zera i równocześnie minimalizować koszty samego sterowania macierz F będziemy dobierać optymalnie w sensie wskaźnika kwadratowego z mnożnikiem czasowym. Wskaźnik ten, znany w teorii sterowania już od kilkudziesięciu lat [Fukata i Tamura 1984; Stankiewicz 1994], jest skutecznie stosowany w wielu dziedzinach techniki, nie był natomiast dotychczas stosowany w sterowaniu klimatem szklarni.



Źródło: opracowanie własne

Rys. 2. Struktura układu sterowania klimatem w szklarni
 Fig. 2. The structure of the greenhouse climat control system

Sterowanie optymalne w sensie wskaźnika całkowego z mnożnikiem czasowym

Niech będzie dany liniowy stacjonarny system dynamiczny (14) i niech $\dot{x} = Ax + Bu; E\{x(0)x(0)^T\} = \Phi$. Przyjmiemy kwadratowy wskaźnik jakości sterowania z mnożnikiem czasowym

$$J = E \int_0^{\infty} (tx^T D^T D x + u^T R u) dt, \quad (16)$$

gdzie Q i R są macierzami 2×2 i 3×3 wymiarowymi. Założymy, że sterowanie u_p jest generowane zgodnie z (13). Problem syntezy optymalnego sterowania polega na wyznaczeniu macierzy F minimalizującej wskaźnik J (16) przy ograniczeniach (13), (14). Macierze wagowe Q i R powinny być dobierane dla każdego systemu indywidualnie. Pierwszy ze składników wskaźnika (16) jest miarą błędu regulacji, zastosowanie mnożnika t wymusza szybkie zanikanie błędu $J = E \int_0^{\infty} (tx^T D^T D x + u^T R u) dt$ do zera.

Drugi składnik, oceniający składową przejściową sterowania, jest pewną miarą kosztów sterowania. Przy łatwych do spełnienia założeniach rozwiązanie postawionego problemu istnieje; rozstrzyga to poniższe twierdzenie. Jego dowód pomijamy, ponieważ jest on analogiczny do dowodów twierzeń 1-3 w pracy Stankiewicz [1994].

Twierdzenie 1. Jeśli $R = R^T > \mathbf{0}$, $\Phi = \Phi^T > \mathbf{0}$ i $Q = Q^T \geq \mathbf{0}$, to macierz sprzężenia zwrotnego F minimalizująca wskaźnik J istnieje i spełnia konieczne warunki optymalności:

$$F = -R^{-1}B^T(\Sigma U + WM)C^T(CUC^T)^{-1}, \quad (17)$$

gdzie symetryczne dodatnio półokreślone macierze Σ i W są jedynymi rozwiązaniami algebraicznych równań Lapunowa (ang. *Algebraic Lapunow Equation ALE*)

$$\Sigma(A + BFC) + (A + BFC)^T \Sigma + C^T F^T R F C + W = 0, \quad (18)$$

$$W(A + BFC) + (A + BFC)^T W + D^T D = 0, \quad (19)$$

a symetryczne dodatnio określone macierze U i M są jednoznacznie dane równaniami ALE

$$(A + BFC)U + U(A + BFC)^T + \Phi = 0, \quad (20)$$

$$(A + BFC)M + M(A + BFC)^T + U = 0. \quad (21)$$

W pracy Stankiewicz [1994] podano globalnie zbieżny algorytm numeryczny wyznaczania optymalnej macierzy sprzężenia zwrotnego spełniającej warunki optymalności (17)-(21).

Podsumowanie

W pracy zaproponowano nowy układ sterowania temperaturą i stężeniem CO₂ w szklarni. Zastosowano strukturę *feedback-feedforward*, w której obok sprzężenia zwrotnego od stanu procesu oraz sprzężenia „wprzód” od pomiarowo dostępnych zakłóceń występuje także sprzężenie od wartości zadanej oraz składowa stała. Statyczne sprzężenie „wprzód” od szybkozmiennych zakłóceń zapewnia ich skuteczną kompensację, jeśli tylko model dobrze przybliży rzeczywisty system. Dzięki statycznemu sprzężeniu „wprzód” od wartości zadanej, w torze sprzężenia zwrotnego nie jest niezbędne ani destabilizujące układ całkowanie, ani zmniejszające odporność układu na szybkozmiennne zakłócenia różniczkowanie. Macierz regulatora dobrano optymalnie w sensie całkowego wskaźnika z mnożnikiem czasowym. Skuteczność zaproponowanego układu sterowania pokazano na znanym w literaturze przykładzie procesu klimatycznego szklarni w kolejnej pracy [Stankiewicz 2009b].

Dodatek A - parametry modelu (7)

$$A_{11} = - \left(\frac{c_{cap,q,v} U_{v,o}}{c_{cap,q}} + \frac{c_{ai,ou} + c_{pi,ai}}{c_{cap,q}} \right) \quad (A.1)$$

$$A_{21} = \frac{1}{c_{cap,c} \beta} \ln(2) c_{resp,c} X_{d,o} 2^{(X_T - \alpha)/\beta} - \frac{(1 - e^{-c_{pl,d} X_{d,o}})}{c_{cap,c}} \frac{c_{rad}^2 V_{rad,o}^2 \Gamma_2 (X_{C,o} - c_r)}{[c_{rad} V_{rad,o} + \Gamma_1 (X_{C,o} - c_r)]^2} \quad (A.2)$$

$$A_{22} = -\frac{1}{c_{cap,c}} (U_{v,o} + c_{leak}) - \frac{(1 - e^{-c_{pl,d} X_{d,o}})}{c_{cap,c}} \frac{c_{rad}^2 V_{rad,o}^2 \Gamma_1}{[c_{rad} V_{rad,o} + \Gamma_1 (X_{C,o} - c_r)]^2} \quad (A.3)$$

$$E_{21} = -\frac{(1 - e^{-c_{pl,d} X_{d,o}})}{c_{cap,c}} \frac{c_{rad} \Gamma_1^2 (X_{C,o} - c_r)^2}{[c_{rad} V_{rad,o} + \Gamma_1 (X_{C,o} - c_r)]^2} \quad (A.4)$$

$$E_{22} = \frac{c_{resp,c}}{c_{cap,c}} 2^{(X_T - \alpha)/\beta} - \frac{c_{pl,d}}{c_{cap,c}} e^{-c_{pl,d} X_{d,o}} \frac{c_{rad} V_{rad,o} \Gamma_1 (X_{C,o} - c_r)}{\Gamma_2} \quad (A.5)$$

gdzie $\Gamma_1 = (-c_{co2,1} X_{T,o}^2 + c_{co2,2} X_{T,o} - c_{co2,3})$ i $\Gamma_2 = (-2c_{co2,1} X_{T,o}^2 + c_{co2,2})$.

Dodatek B - parametry i stałe fizyczne występujące w opisie procesu i jego modelu

Wartości parametrów charakteryzujących własności fizyko-chemiczne procesów klimatycznego i uprawy w szklarni zaczerpnięto z prac van Hentena [1994, 2003]. Są one następujące:

$c_{cap,q} = 30000 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ \text{C}^{-1}$ - pojemność cieplna atmosfery szklarni,

$c_{cap,q,v} = 1290 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ \text{C}^{-1}$ - pojemnością cieplną na jednostkę objętości atmosfery szklarni,

$c_{pl,ai} = 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ \text{C}^{-1}$ - współczynnik przenoszenia ciepła,

$c_{ai,ou} = 6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ \text{C}^{-1}$ - współczynnik przewodnictwa cieplnego przez otwory w szklarni,

$c_{rad,q} = 0.2$ [bezw.] - współczynnik pochłaniania ciepła promieniowania słonecznego,

$c_{cap,c} = 4.1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ - pojemność objętościowa dwutlenku węgla atmosfery w szklarni,

$c_{resp,c} = 4.87 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ - współczynnik prędkości oddychania podczas produkcji CO₂,

$c_{rad} = 3.55 \cdot 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{J}^{-1}$ - współczynnik sprawności świetlnej fotosyntezy,

$c_{co2,1} = 5.11 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ \text{C}^{-2}$, $c_{co2,2} = 2.30 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ \text{C}^{-1}$, $c_{co2,3} = 6.29 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

- współczynniki temperaturowego efektu dyfuzji CO₂ w liściach uprawy,

$\alpha = 25 \text{ } ^\circ \text{C}$, $\beta = 10 \text{ } ^\circ \text{C}$ - temperaturowe współczynniki prędkości oddychania roślin,

$c_r = 5.2 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ - punkt kompensacji CO₂,

$c_{leak} = 0.75 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - prędkość samoistnej wymiany powietrza przez otwory w szklarni,

$c_{pl,d} = 53 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ - współczynnik efektywnej powierzchni dachu na jednostkę suchej masy uprawy,

$c_{\alpha\beta} = 0.544$ [bezw.] - współczynnik wydajności fotosyntezy,

$c_{resp,d} = 2.65 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ - współczynnik prędkości oddychania podczas poboru CO_2 .

Bibliografia

- Arvanitis K.G., Paraskevopoulos P.N., Vernardos A.A.** 2000. Multirate adaptive temperature control of greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*. Vol. 26. s. 303–320.
- Bakker J.C., Bot G.P.A., Challa H., Van de Braak N.J.** (Eds.) 1995. *Greenhouse Climate Control: An Integrated Approach*. Wageningen Pers, Wageningen.
- Fukata S., Tamura H.** 1984. The Evaluation of Time-Weighted Quadratic Performance Indices for Discrete and Sampled-Data Systems. *Int. Journal of Control*, Vol. 39. s. 135–142.
- Henten E.J. van,** 1994. *Greenhouse climate management: an optimal control approach*. Ph. D. Thesis, Institute of Agricultural and Environmental Engineering, Landbouwniversiteit te Wageningen. The Netherlands.
- Henten E.J. van,** 2003. Sensitivity Analysis of an Optimal Control Problem in Greenhouse Climate Management. *Biosystems Engineering*. Vol. 85(3). s. 355–364.
- Linker R., Gutman P.O., Seginer I.** 1997. Simultaneous control of temperature and CO_2 concentration in greenhouses. *Proceedings of IFAC/ISHS 3rd Workshop on Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture*, Hannover. Germany. s. 31–36.
- Linker R., Seginer I., Gutman P.O.** 1998. Optimal CO_2 control in a greenhouse modeled with neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture*. Vol. 19. s. 289–310.
- Stankiewicz A.** 1994. Numerical Algorithm for the Optimal Output Feedback Design using Time-Multiplied Performance Index. *Proceedings of the 2nd Biennial European Joint Conference on Engineering Systems Design and Analysis 1994*, London. Vol. 64-6. s. 85-90.
- Stankiewicz A.** 2009a. O optymalnym sterowaniu klimatem w szklarni. *Acta Scientiarum Polonorum, Seria Technica Agraria* (w druku).
- Stankiewicz A.** 2009b. Optymalne sterowanie temperaturą i stężeniem dwutlenku węgla w wybranym procesie klimatycznym szklarni. *Inżynieria Rolnicza* (w druku).

ON THE OPTIMAL CONTROL OF TEMPERATURE AND CO₂ CONCENTRATION IN GREENHOUSE

Abstract. The optimal control of greenhouse climate has received considerable attention in agricultural engineering research. In this paper a new feedback-feedforward control system is proposed for the state variables stabilization on piecewise constant user-desired or computed by the upper level set-points for temperature and CO₂ concentration. The proposed control structure consists of two main parts: a model based feedforward compensation of external disturbances and the model based optimal feedback simultaneous control of the greenhouse temperature and CO₂ concentration. The applied decomposition is able to deal with rapidly fluctuating deterministic external inputs or disturbances acting on the system by feedforward static compensation and guarantee the fast decay of the control error due to the static state feedback with constant gain matrix optimal in the sense of time-multiplied quadratic index. In a forthcoming paper, the simulation experiments will be conducted for the known in the literature example of the production of a lettuce crop by the use of the Simulink toolbox of Matlab in order to demonstrate the effectiveness of the control system proposed.

Keywords: greenhouse climate control, model based control, feedback control, feedforward control, time-multiplied performance index

Adres do korespondencji:

Anna Stankiewicz; e-mail: anna.stankiewicz@up.lublin.pl
Katedra Podstaw Techniki
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
ul. Doświadczalna 50A
20-280 Lublin