

Jacek GRAJNERT
Stanisław KWAŚNIEWSKI

DYNAMIKA WYMIANY CIEPŁA W WAGONIE PASAŻERSKIM

Streszczenie. Omówiono istotę dynamiki wymiany ciepła w wagonach pasażerskich, z ogrzewaniem nawiewnym. Do symulacji wykorzystano system MATLAB - SIMULINK. Przykład obliczeniowy dotyczy wagonu bezprzedziałowego z automatyczną regulacją temperatury wnętrza.

DYNAMICS OF HEAT TRANSFER IN RAIL - COACH

Summary. Dynamics of heat transfer in rail - coach equipped with blow - heating was presented. MATLAB - SIMULINK - computer software was employed to make simulation. An example of calculation was dealing with compartmentless rail - coach with automatic control of temperature.

1. WSTĘP

Konstrukcja układu ogrzewania, wentylacji, a ogólniej rzecz ujmując - klimatyzacji powinna zapewniać we wnętrzach pojazdów możliwie wysoki komfort cieplny i atmosferyczny [1]. Cel ten jest osiągnięty poprzez właściwy dobór mocy urządzeń grzewczych i chłodzących, właściwe rozwiązania układów rozprowadzania powietrza, dobór układu regulacji. Wymagania klimatyczne we wnętrzu precyzują przepisy UIC [2]; dotyczą one:

- rozkładu temperatury w przestrzeni wagonu,
- temperatur lokalnych (ściany, klamek, okien),
- wilgotności względnej powietrza,
- prędkości ruchów powietrza we wnętrzu,

oraz

- wymiany powietrza między wnętrzem i otoczeniem,
- czystości powietrza.

Oprócz wymagań właściwego poziomu i rozkładu temperatury powietrza we wnętrzu w ustalonych warunkach pracy, przepisy określają również wymagania w stanach nieustalonych. Między innymi Karta UIC 553 [2] określa, aby:

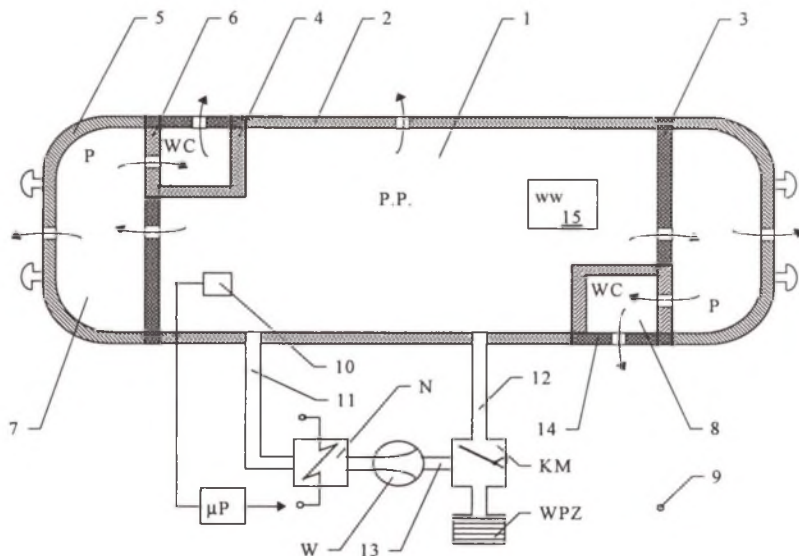
- czas rozgrzewania wnętrza wagonu od temperatury początkowej 0°C do temperatury 18°C był nie dłuższy niż 60 min,

- dopuszcza się we wnętrzu wahania temperatury ± 1 K,
- zmiana temperatury we wnętrzu w wyniku działań regulacyjnych o 1K powinna zachodzić w czasie nie dłuższym niż 15 min.

Realizacja tego wymaga od układu zapasu mocy. Niewłaściwie dobrana moc grzejna może wywołać w ogrzewanym lub klimatyzowanym wnętrzu wahania temperatury o niedopuszczalnej amplitudzie. Stąd wskazana jest analiza pracy tego rodzaju obiektów już w fazie ich projektowania. Szczególnie przydatne są w takich przypadkach modele symulacyjne. W dalszej części pracy zostanie zaprezentowana metoda modelowania dynamiki wymiany ciepła w zastosowaniu do bezprzedziałowego wagonu pasażerskiego z jednokanałowym ogrzewaniem nawiewnym.

2. STRUKTURA BADANEGO WAGONU

Schemat ideowy wagonu przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat ideowy wnętrza wagonu pasażerskiego bezprzedziałowego z ogrzewaniem nawiewnym jednokanałowym

Fig. 1. Lau-out of compartmentles rail - coach equipped with blow - heating

- | | |
|---|--|
| 1 - powietrze we wnętrzu przedziału, | 9 - otoczenie, |
| 2 - ściany nadwozia wagonu, | 10 - czujnik temperatury wnętrza, |
| 3 - ściana działowa do przedziału, | 11 - kanał nawiewny powietrza, |
| 4 - ściana działowa ubikacji, | 12 - kanał powietrza obiegowego, |
| 5 - ściana nadwozia w obrębie przedziału, | 13 - kanał powietrza za komorę mieszania, |
| 6 - ściana pomiędzy przedziałem a WC, | 14 - zewnętrzne ściany WC, |
| 7 - powietrze w przedziału, | 15 - masa elementów wyposażenia wnętrza (fotele, półki, itp.). |
| 8 - powietrze w przestrzeni WC, | |

N - nagrzewnica powietrza, KM - komora mieszania, W - wentylator, WPZ - wlot powietrza zewnętrznego, PP - przedział pasażerski, P - przedsionek, WC - ubikacja, WW - wyposażenie wnętrza, μP - mikroprocesor.

Przedstawiony na rys. 1 wagon posiada nadwozie typu X w układzie bezprzedziałowym. Powietrze tłoczone przez kanał I1 do wnętrza przedziału pasażerskiego wydostaje się na zewnątrz przez wywietrzniki dachowe oraz przepływa do przedsionków wagonu, a stamtąd do kabin WC i dalej na zewnątrz. W rozważaniach przyjęto, że wagon jest wyposażony w dwupołożeniowy układ regulacji temperatury. Założono stałe warunki brzegowe pracy układu. W modelu symulacyjnym uwzględniono charakterystykę czujnika temperatury wnętrza (10) jako inercyjną II rzędu. Przyjęto również, że układ ogrzewania może pracować w układzie recyrkulacyjnym - co ma najczęściej miejsce podczas rozgrzewania wyziębionego wnętrza wagonu.

3. MODEL OBLICZENIOWY WAGONU

Strukturę modelowanego wagonu podzielono na 15 elementów. Bilans cieplny nadwozia opisuje następujący układ równań:

$$\left. \begin{aligned}
 Q_1 &= Q_{11,1} - 2 \cdot Q_{1,7p} - Q_{1,9p} - Q_{1,12p} - Q_{1,2} - 2 \cdot Q_{1,3} - 2 \cdot Q_{1,4} - Q_{1,10}, \\
 Q_2 &= Q_{1,2} - Q_{2,9}, \\
 Q_3 &= Q_{1,3} - Q_{3,7}, \\
 Q_4 &= Q_{1,4} - Q_{4,8}, \\
 Q_5 &= Q_{7,5} - Q_{5,9}, \\
 Q_6 &= Q_{7,6} - Q_{6,8}, \\
 Q_7 &= Q_{1,7} + Q_{1,7p} - Q_{7,5} - Q_{7,9p} - Q_{7,8} - Q_{7,8p}, \\
 Q_8 &= Q_{4,8} + Q_{6,8} + Q_{7,8p} - Q_{8,14} - Q_{8,9p}, \\
 Q_{10} &= Q_{1,10}, \\
 T_{11} &= T_{13} + \frac{Q_{el}}{W \cdot c_p}, \\
 T_{12} &= T_1, \\
 T_{13} &= T_{12}(1 - R) + T_9R, \\
 Q_{14} &= Q_{8,14} - Q_{14,9}, \\
 Q_{15} &= Q_{1,15} - Q_{15,2}
 \end{aligned} \right\} (1)$$

gdzie:

- Q_i - strumień ciepła akumulowany w wyróżnionym „i - tym” elemencie,
- Q_{ij} - strumień ciepła wymieniany pomiędzy wyróżnionymi elementami i oraz j,
- T_i - temperatura w wyróżnionym punkcie instalacji nawiewnej,
- R - stopień recyrkulacji powietrza (0,1),
- Q_{el} - moc elektryczna nagrzewnicy,
- W - wydatek wentylatora powietrza,
- c_p - ciepło właściwe powietrza,
- indeks p - oznacza strumień ciepła wymieniany poprzez konwekcję powietrza.

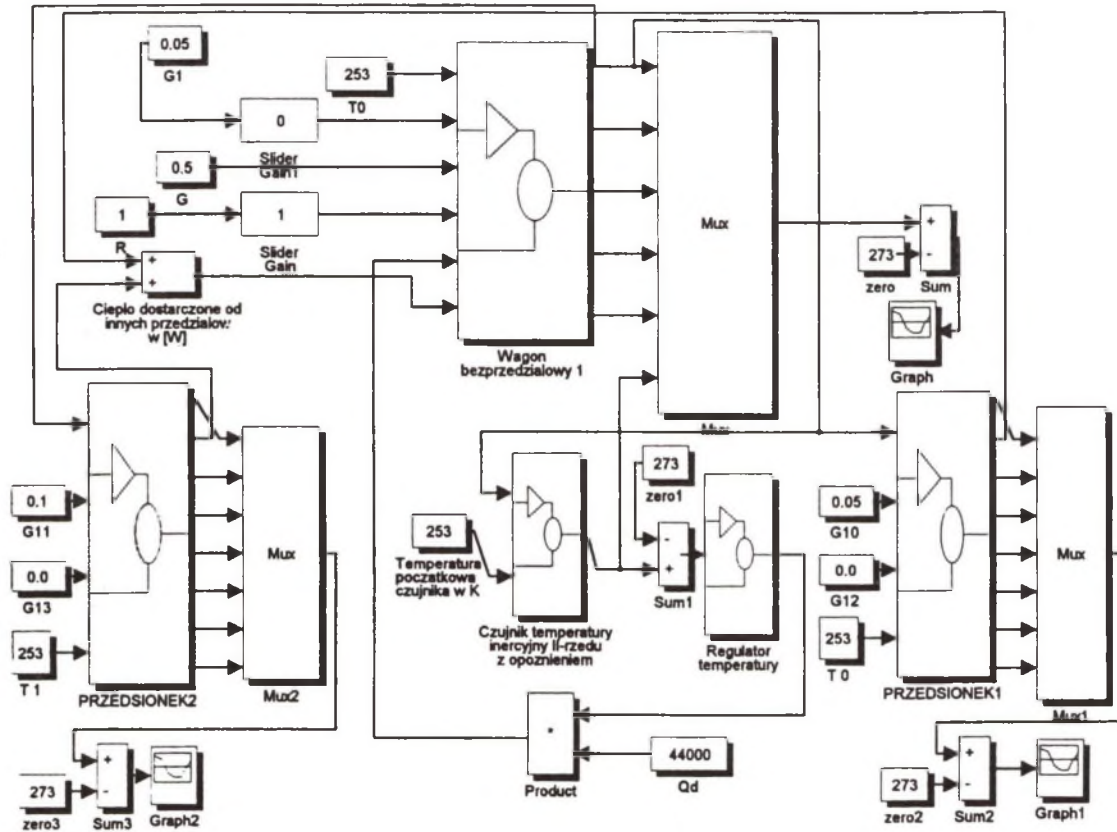
Przedstawiony bilans cieplny wagonu (1) dotyczy dyskretnego modelu wagonu, którego strukturę podzielono na 12 wyróżnionych elementów oraz 5 wydzielonych przestrzeni powietrznych.

Po przekształceniu w układ równań różniczkowych przyjmuje on postać:

$$\begin{aligned}
 c_1 T_1 &= c_{11,1p}(T_{11} - T_1) - 2 \cdot c_{1,7p}(T_1 - T_7) - c_{1,9p}(T_1 - T_9) - c_{1,12p}(T_1 - T_{12}) + \\
 &\quad - c_{1,2}(T_1 - T_2) - 2 \cdot c_{1,3}(T_1 - T_3) - 2 \cdot c_{1,4}(T_1 - T_8) - c_{1,10}(T_1 - T_{10}) \\
 c_2 T_2 &= c_{1,2}(T_1 - T_2) - c_{2,9}(T_2 - T_9) \\
 c_3 T_3 &= c_{1,3}(T_1 - T_3) - c_{3,7}(T_3 - T_7) \\
 c_4 T_4 &= c_{1,4}(T_1 - T_4) - c_{4,8}(T_4 - T_8) \\
 c_5 T_5 &= c_{7,5}(T_7 - T_5) - c_{5,9}(T_5 - T_9) \\
 c_6 T_6 &= c_{7,6}(T_7 - T_6) - c_{6,8}(T_6 - T_8) \\
 c_7 T_7 &= c_{3,7}(T_1 - T_7) + c_{1,7p}(T_1 - T_7) - c_{7,5}(T_7 - T_5) - c_{7,9p}(T_7 - T_9) + \\
 &\quad - c_{7,6}(T_7 - T_8) - c_{7,8p}(T_7 - T_8) \\
 c_8 T_8 &= c_{4,8}(T_4 - T_8) + c_{6,8}(T_6 - T_8) - c_{7,8p}(T_7 - T_8) - c_{8,14}(T_8 - T_{14}) + \\
 &\quad - c_{8,9p}(T_8 - T_9) \\
 c_{10} T_{10} &= c_{1,10}(T_1 - T_{10}) \\
 T_{11} &= T_{13} + \frac{Q_{cl}}{W \cdot c_p} \\
 T_{12} &= T_1 \\
 T_{13} &= T_{12}(1 - R) + T_9(R) \\
 c_{14} T_{14} &= c_{8,14}(T_8 - T_{14}) - c_{14,9}(T_{14} - T_9) \\
 c_{15} T_{15} &= c_{1,15}(T_1 - T_{15}) - c_{15,2}(T_{15} - T_2)
 \end{aligned} \tag{2}$$

W modelu obliczeniowym przyjęto następujące wartości współczynników c_i oraz $c_{i,j}$. Wartości te oszacowano na podstawie danych konstrukcyjnych wagonu typu Y.

| | |
|--|----------------------------------|
| $c_1 = 165\ 000\ \text{J/K},$ | $c_6 = 39\ 000\ \text{J/K},$ |
| $c_2 = 2\ 800\ 000\ \text{J/K},$ | $c_7 = 13\ 000\ \text{J/K},$ |
| $c_3 = 58\ 500\ \text{J/K},$ | $c_8 = 5\ 230\ \text{J/K},$ |
| $c_4 = 93\ 750\ \text{J/K},$ | $c_{10} = 0,06\ \text{J/K},$ |
| $c_5 = 320\ 000\ \text{J/K},$ | $c_{14} = 102\ 700\ \text{J/K},$ |
| $c_{15} = 800\ 000\ \text{J/K}$ | $c_{3,7} = 15,25\ \text{W/K},$ |
| $c_{1,11p} = 670\ \text{W/K},$ | $c_{1,4} = 24\ \text{W/K},$ |
| $c_{1,9p} = 0,7c_{1,11p} \cdot (1 - R),$ | $c_{4,8} = 24\ \text{W/K},$ |
| $c_{1,7p} = 0,15c_{1,9p} \cdot (1 - R),$ | $c_{7,5} = 82\ \text{W/K},$ |
| $c_{7,9p} = 0,05c_{1,9p} \cdot (1 - R),$ | $c_{5,9} = 94\ \text{W/K},$ |
| $c_{7,8p} = 0,1c_{1,9p} \cdot (1 - R),$ | $c_{7,6} = 9,7\ \text{W/K},$ |
| $c_{1,12p} = c_{1,11p} \cdot R,$ | $c_{6,8} = 9,7\ \text{W/K},$ |
| $c_{8,9p} = c_{7,8p},$ | $c_{8,14} = 25,7\ \text{W/K},$ |
| $c_{1,2} = 707\ \text{W/K},$ | $c_{14,9} = 30\ \text{W/K}.$ |



Rys. 2. Schemat blokowy układu równań (2) w systemie MATLAB - SIMULINK
 Fig. 2. Lay-out of formules - set in MATLAB-SIMULINK software systems

$$\begin{aligned} c_{1,3} &= 15,25 \text{ W/K,} \\ c_{1,10} &= 0,001 \text{ W/K,} \\ c_{2,9} &= 820 \text{ W/K.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_{1,15} &= 300 \text{ W/K} \\ c_{15,2} &= 3 \text{ W/K} \end{aligned}$$

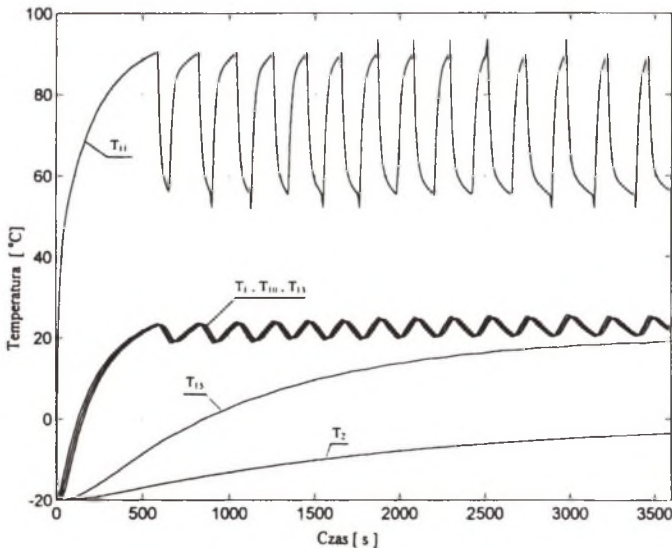
4. MODEL NUMERYCZNY WAGONU

Układ równań (2) zamodelowano w systemie MATLAB - SIMULINK [3,4]. Schemat badanego układu przedstawia rys. 2.

W schemacie tym występuje 5 bloków grupowych, które zawierają ukryte substruktury opisujące: przedział pasażerski, dwa przedsionki wagonu z kabinami WC oraz czujnik temperatury i regulator temperatury. Schemat ten wykorzystano do symulacji rozgrzewania wnętrza wagonu.

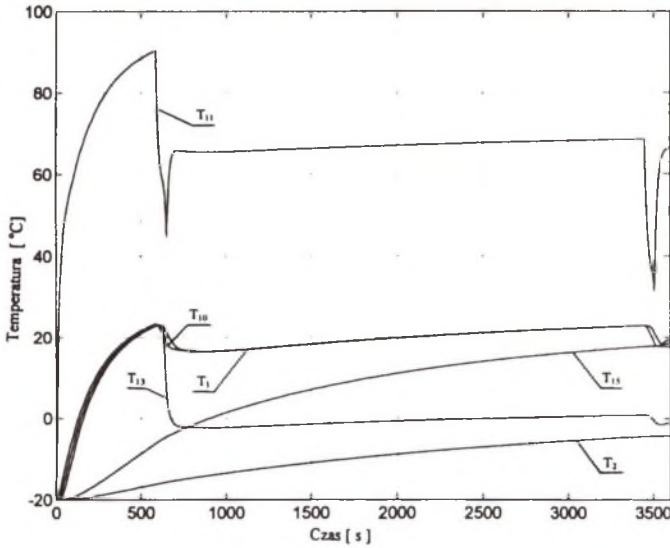
5. WYNIKI SYMULACJI

Na bazie opisanego modelu symulacyjnego badano przebiegi rozgrzewania wagonu od temperatury początkowej $T = -20^\circ\text{C}$. W rozważaniach założono, że cały wagon jest wychłodzony. Niżej przedstawiono wyniki symulacji dla dwóch przypadków. Pierwszy z nich (rys.3) dotyczy rozgrzewania i pracy układu z pełną recyrkulacją powietrza. Wahania temperatury wnętrza są dość znaczne $\Delta T_1 \cong 5\text{K}$. W drugim przypadku po okresie rozgrzania wstępnego



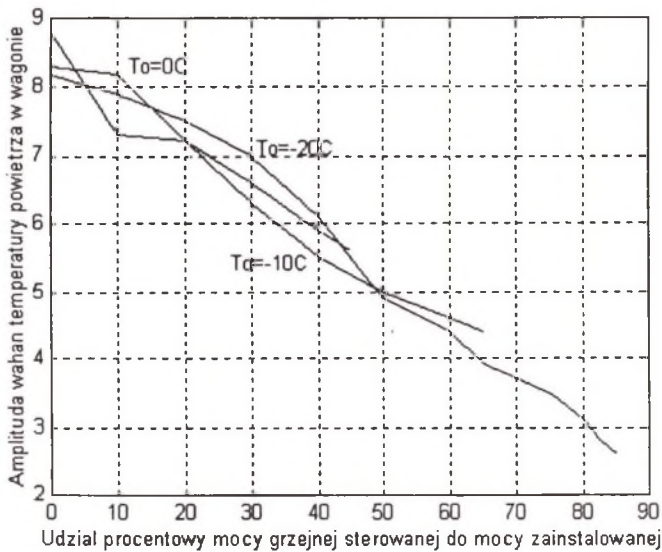
Rys. 3. Wyniki symulacji temperatury w wagonie podczas pracy układu ogrzewania przy pełnej recyrkulacji $R = 100\%$

Fig. 3. Results of simulation of temperature on rail - coach while heating system work at full circumsamcs $R = 100\%$



Rys. 4. Wyniki symulacji temperatury w wagonie podczas pracy układu ogrzewania po wstępnym rozgrzaniu przy $R = 50\%$

Fig. 4. Results of simulation of temperature on rail - coach while heating system work after preliminary heatat at $R = 50\%$



Rys. 5. Wyniki analizy wpływu mocy nagrzewnicy sterowanej impulsowo na wahania temperatury we wnętrzu dla $T_{01} = -20, -10, 0\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 5. Analysis of effect of power of heater controled by pulses temperature fluctuation instale of coach at $T_{01} = -20, -10, 0\text{ }^{\circ}\text{C}$

zastosowano recyrkulację powietrza $R = 50\%$, co zwykle ma miejsce w układach ogrzewania wagonów. W tym przypadku (rys.4) nastąpiła wyraźna stabilizacja temperatury powietrza we wnętrzu.

Przedstawione wyniki obliczeń w tej fazie rozważań ilustrują możliwości obliczeniowe modelu. Model ten nie został zweryfikowany doświadczalnie.

Na rys. 5 przedstawiono wyniki analizy wpływu mocy nagrzewnicy sterowanej impulsowo na wahania temperatury we wnętrzu wagonu przy trzech temperaturach otoczenia $T_{ot} = -20, -10, 0^{\circ}\text{C}$.

6. PODSUMOWANIE

Celem referatu była prezentacja metody modelowania i możliwości zastosowania systemu MATLAB - SIMULINK do badań dynamiki wymiany ciepła w wagonach pasażerskich. System ma również możliwość estymacji parametrów modelu na bazie danych doświadczalnych. Funkcja ta jest bardzo przydatna przy weryfikacji modelu.

LITERATURA

1. Kwaśniewski S.: Komfort klimatyczny w pojazdach szynowych. Technika Transportu Szyнового nr 7 / 94.
2. Kodex UIC - Karta nr 553; Ogrzewanie, wentylacja i klimatyzacja wagonów pasażerskich wyd. 5 01.01.1990.
3. MATLAB - User's Guide for Microsoft Windows The Math Works Inc.
4. SIMULINK - User's Guide, Dynamik System Simulation Software. The Math Works Inc.

Recenzent: Prof dr hab.inż. Jan Gronowicz

Abstract

The essence of dynamics of heat transfer in rail - coach equipped with blow - heating was presented. A mathematical of it was described too. Computer system MATLAB - SIMULINK was used to solve this model. Some results of modeling of work of heating system in compartmentless rail - coach with automatic control of temperature.