

STANISŁAW KOPEĆ

Katedra Miernictwa i Automatyki  
Urządzeń Energetycznych

## SALE WIDOWISKOWE Z LUDŹMI JAKO OBIEKTY W PROCESIE REGULACJI TEMPERATURY

**Streszczenie.** Poddano analizie dynamiczne własności sal widowiskowych i audytoryjnych z ludźmi, przyjmując że rozpatrywany element automatyki (sala widowiskowa) posiada dwa sygnały wejściowe (zakłócenie - widzowie wchodzący do sali, wielkość nastawcza - temperatura świeżego powietrza tłoczonego do sali) oraz jeden sygnał wyjściowy (wielkość regulowana - temperatura powietrza w sali). Podano układy równań opisujących stany nieustalone i wynikające z tych równań transmitancje operatorowe. Dla jednoznaczego określenia warunków temperaturowych sal widowiskowych wprowadzono pojęcie współczynnika komfortu temperaturowego. W zakończeniu podano wyniki obliczeniowe i doświadczone dla sali DMIT w Zabrze oraz wynikające z obliczeń i doświadczeń wnioski.

### 1. Wstęp

Dynamiczne własności sal widowiskowych z ludźmi różnią się od dynamicznych własności sal widowiskowych bez ludzi. Widz znajdujący się na sali odprowadza pewną ilość ciepła do otoczenia i wpływa na proces wymiany ciepła w sali. Celem określenia wpływu widzów na dynamiczne własności sali rozpatrzone procesy nieustalonej wymiany ciepła dwóch szczególnych przypadków:

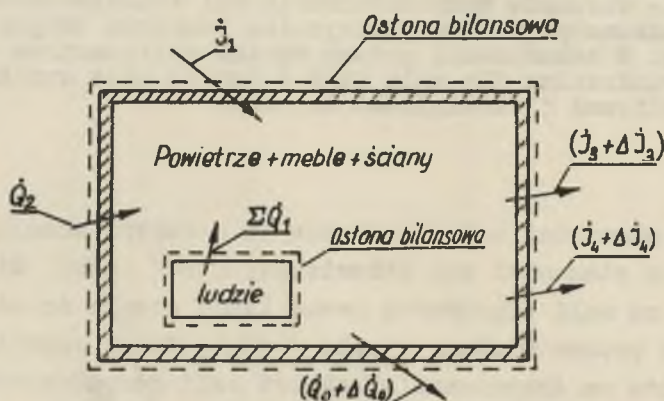
- a) sala bez ludzi - stan ustalony zakłócony pojawieniem się widzów,
- b) sala z ludźmi - stan ustalony zakłócony skokową zmianą temperatury powietrza nawiewanego do sali.

## 2. Sala widowiskowa bez ludzi - stan ustalony zakłócony pojawieniem się widzów

Celem umożliwienia teoretycznej analizy rozpatrywanych zjawisk przyjęto niżej podane upraszczające założenia:

- w nieskończenie krótkim czasie następuje dokładne wymieszanie powietrza świeżego z powietrzem znajdującym się w sali,
- temperatura i wilgotność powietrza doprowadzonego do sali są w czasie stałe,
- sala znajduje się w stanie równowagi cieplnej,
- sala zapełniła się kompletem widzów w nieskończenie krótkim czasie.

Schemat bilansowanego układu oraz sposób prowadzenia osłony bilansowej podano na rys. 1.



Rys. 1. Osłona bilansowa sali z ludźmi (zakłócenie spowodowane pojawieniem się ludzi w sali)

Równanie bilansu dla stanu nieustalonego ma postać:

$$\dot{i}_1 + \dot{Q}_2 + \Sigma \dot{Q}_1 = \dot{i}_3 + \Delta \dot{i}_3 + \dot{i}_4 + \Delta \dot{i}_4 + \dot{Q}_0 + \Delta \dot{Q}_0 + \Delta \dot{U}_p + \Delta \dot{E}_m + \Delta \dot{E}_s \quad (1)$$

gdzie:

- $\dot{I}_1$  - entalpia powietrza doprowadzonego do pomieszczenia [W],  
 $\dot{Q}_2$  - ciepło doprowadzane do pomieszczenia przez urządzenia grzejne, [W],  
 $\dot{I}_3, \Delta \dot{I}_3$  - entalpia i przyrost entalpii powietrza odciąganego przez wentylator, [W],  
 $\dot{I}_4, \Delta \dot{I}_4$  - entalpia i przyrost entalpii powietrza odprowadzanego przez nieszczelności (okna, drzwi), [W],  
 $\Sigma \dot{Q}_1$  - ciepło oddawane przez ludzi, [W],  
 $\dot{Q}_0, \Delta \dot{Q}_0$  - ciepło i przyrost ciepła oddane do otoczenia, [W],  
 $\Delta \dot{U}_p$  - przyrost energii wewnętrznej powietrza, [W],  
 $\Delta \dot{E}_m, \Delta \dot{E}_s$  - przyrost energii mebli i ścian, [W].

Dzięki przyjęciu osłony bilansowej jak na rys. 1 w rozpatrywanym układzie nie występuje zmiana stanu skupienia wody i dlatego entalpię powietrza wilgotnego można obliczać bez uwzględnienia utajonego ciepła parowania. W bilansie pominięto również zwiększenie zawartości pary wodnej w powietrzu spowodowane obecnością ludzi. Odejmując od równania (1) równanie stanu ustalonego otrzymuje się równanie bilansowe opisujące stan nieustalony sali spowodowany pojawieniem się na sali ludzi:

$$\Sigma \dot{Q}_1 = \Delta \dot{I}_3 + \Delta \dot{I}_4 + \Delta \dot{Q}_0 + \Delta \dot{U}_p + \Delta \dot{E}_m + \Delta \dot{E}_s \quad (2)$$

Ciepło oddane przez ludzi wyrazi się równaniem wyprowadzonym w pracy [6]:

$$\begin{aligned}
 \Sigma \dot{Q}_1 = n \left\{ A_a [k_{as}(t_a - t_s) + k_{am}(t_a - t_m)] + A_b [k_{bs}(t_b - t_s) + \right. \\
 + k_{bm}(t_b - t_m)] + A_a \alpha_a (t_a - t_p) + A_b \alpha_b (t_b - t_p) + \\
 \left. + 3,29 - 0,161 \cdot t_p \right\} \quad (3)
 \end{aligned}$$

gdzie:

$n$  - ilość ludzi na sali,

$A_a, A_b$  - powierzchnia nieokrytej i powierzchnia okrytej skóry ludzkiej,  $[m^2]$ ,

$k_{as}, k_{am}$  - współczynnik przechodzenia ciepła przez promieniowanie od powierzchni  $A_a$  do powierzchni otaczających ścian i do powierzchni otaczających mebli  $\left[\frac{W}{m^2 \text{ grad}}\right]$ ,

$k_{bs}, k_{bm}$  - współczynnik przechodzenia ciepła przez promieniowanie od powierzchni  $A_b$  do powierzchni otaczających mebli,  $\left[\frac{W}{m^2 \text{ grad}}\right]$ ,

$\alpha_a, \alpha_b$  - współczynnik wnikania ciepła od powierzchni  $A_a$  i powierzchni  $A_b$  do powietrza,  $\left[\frac{W}{m^2 \text{ grad}}\right]$ ,

$t_a, t_b$  - temperatura powierzchni  $A_a$  i powierzchni  $A_b$ ,  $[^{\circ}C]$ ,

$t_s, t_m$  - temperatura powierzchni ścian i powierzchni mebli  $[^{\circ}C]$ ,

$t_p$  - temperatura powietrza,  $[^{\circ}C]$ ,

$(5,29 - 0,161 t_p)$  - ciepło oddane na podgrzewanie powietrza wydychanego z płuc,  $[W]$ .

Przyjmując temperaturę  $0^{\circ}K$  za poziom odniesienia dla określania entalpii i energii wewnętrznej dochodzi się do wniosku, że przyrost energii wewnętrznej powietrza w sali jest równy zeru (energia wewnętrzna jest proporcjonalna do iloczynu  $p \cdot V$ ) i uwzględniając ponadto zwiększoną ilość powietrza odpływającego z sali otrzymuje się po pominięciu iloczynu małych wielkości:

$$\Delta \dot{U}_p = 0$$

$$(\Delta \dot{I}_3 + \Delta \dot{I}_4) = G_1 \cdot c_{pp} \cdot \Delta t_p + G'_p \cdot c_{pp} \frac{d(\Delta t_p)}{d\tau} \quad (4)$$

gdzie:

$\dot{G}_1$  - natężenie przepływu powietrza suchego doprowadzanego do sali,  $[\frac{kg}{s}]$ ,

$G'_p$  - ilość substancji powietrza suchego znajdującego się w sali w stanie ustalonym, [kg].

Przyrost ilości ciepła doprowadzanego do ścian otaczających salę i przyrost energii wewnętrznej mebli określone są równaniami:

$$(\Delta\dot{Q}_o + \Delta\dot{E}_s) = \bar{f}_s \cdot G_s \cdot c_{ps} \frac{d(\Delta t_s)}{d\tau} \quad (5)$$

[5], [7]

$$\Delta\dot{E}_m = \bar{f}_m \cdot G_m \cdot c_{pm} \frac{d(\Delta t_m)}{d\tau} \quad (6)$$

gdzie:

$\bar{f}_s$  - średnia wartość wyrażenia  $\frac{\Delta\dot{t}_s(\tau)}{\Delta t_s(\tau)}$  w przedziale czasowym od 0 do  $\tau$  [5], [7],

$$\bar{\Delta t}_s(\tau) = \frac{A_s \alpha_s \int_0^\tau (\Delta t_p - \Delta t_s) d\tau}{G_s c_{ps}}$$

$\Delta t_p$  - przyrost temperatury powietrza w rozpatrywanym pomieszczeniu, [°C],

$\Delta t_s(\tau)$  - przyrost temperatury powierzchni ściany wymieniającej ciepło, [°C],

$\bar{f}_m$  - średnia wartość wyrażenia  $\frac{\Delta\dot{t}_m(\tau)}{\Delta t_m(\tau)}$  w przedziale czasowym od 0 do  $\tau$ .

Podstawiając wyrażenia (3), (4), (5), (6) do równania (2) otrzymuje się po wykonaniu działań równanie operatorowe przedstawiające bilans sali z ludźmi w stanie nieustalonym

$$\begin{aligned} & (n A_a k_{as} + n A_a k_{am} + n A_a \alpha_a) \Delta t_a + (n A_b k_{bs} + n A_b k_{bm} + \\ & + n A_b \alpha_b) \Delta t_b - (n A_a \alpha_a + n A_b \alpha_b + n \cdot 0,161 + \dot{G}_1 c_{pp} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+ G'_p \cdot c_{pp} \cdot s) \Delta t_p - (n A_a k_{as} + n A_b k_{bs} + \bar{f}_s \cdot G_s c_{ps} \cdot s) \Delta t_s - \\
 &- (n A_a k_{am} + n A_b k_{bm} + \bar{f}_m G_m c_{pm} s) \Delta t_m = -n \dot{B}_1 \quad (7)
 \end{aligned}$$

gdzie:

$$\begin{aligned}
 \dot{B}_1 = & [A_a k_{as} (t'_a - t'_s) + A_b k_{bs} (t'_b - t'_s) + A_a \alpha_a (t'_a - t'_p) + \\
 & + A_b \alpha_b (t'_b - t'_p) + A_a k_{am} (t'_a - t'_m) + A_b k_{bm} (t'_b - t'_m) + \\
 & + 5,29 - 0,161 t'_p] \quad (8)
 \end{aligned}$$

s - operator, zmienna niezależna transformaty równania różniczkowego.

Wielkości oznaczone przecinkiem u góry np.  $t'_a$  odnoszą się do stanu ustalonego istniejącego przed zakłóceniem. Pozostałe zależności uzyskuje się z bilansów cieplnych ścian otaczających salę, mebli znajdujących się w sali oraz powierzchni  $A_a$  i  $A_b$ . Równanie bilansu cieplnego ścian sali wyraża się wzorem

$$\begin{aligned}
 (\Delta \dot{Q}_0 + \Delta \dot{E}_s) = & A_s \alpha_s (\Delta t_p - \Delta t_s) + n [A_a k_{as} (\Delta t_a - \Delta t_s) + \\
 & + A_b k_{bs} (\Delta t_b - \Delta t_s)] + A_m k_{ms} (\Delta t_m - \Delta t_s) + n \dot{B}_2 \quad (9)
 \end{aligned}$$

gdzie:

$$\dot{B}_2 = A_a k_{as} (t'_a - t'_s) + A_b k_{bs} (t'_b - t'_s) \quad (10)$$

Po podstawieniu (5) do (9) i wykonaniu działań otrzymuje się:

$$\begin{aligned}
 &(\bar{f}_s G_s c_{ps} \cdot s + A_s \alpha_s + n A_a k_{as} + n A_b k_{bs} + A_m k_{ms}) \Delta t_s - \\
 &- A_m k_{ms} \Delta t_m - A_s \alpha_s \Delta t_p - n A_a k_{as} \Delta t_a - n A_b k_{bs} \Delta t_b = n \dot{B}_2 \quad (11)
 \end{aligned}$$

Podobnie otrzymuje się równanie bilansu cieplnego dla mebli:

$$\Delta \dot{Q}_m = A_m \alpha_m (\Delta t_p - \Delta t_m) + A_m k_{ms} (\Delta t_s - \Delta t_m) + n [A_a k_{am} (\Delta t_a - \Delta t_m) + A_b k_{bm} (\Delta t_b - \Delta t_m)] + n \dot{B}_3 \quad (12)$$

gdzie:

$$\dot{B}_3 = A_a k_{am} (t'_a - t'_m) + A_b k_{bm} (t'_b - t'_m) \quad (13)$$

Po uwzględnieniu zależności (6) równanie (12) sprowadzi się do postaci:

$$(\bar{F}_m G_m c_{pm} s + A_m \alpha_m + A_m k_{ms} + n A_a k_{am} + n A_b k_{bm}) \Delta t_m - A_m \alpha_m \Delta t_p - A_m k_{ms} \Delta t_s - n A_a k_{am} \Delta t_a - n A_b k_{bm} \Delta t_b = n \dot{B}_3 \quad (14)$$

Bilans cieplny powierzchni  $A_a$  i powierzchni  $A_b$  przedstawiają równania:

$$A_a (k_a + \alpha_a) \Delta t_a - A_a k_{as} \Delta t_s - A_a k_{am} \Delta t_m - A_a k_{ab} \Delta t_b - A_a \alpha_a \Delta t_p = \dot{B}_4 \quad (15)$$

$$A_b (k_b + \alpha_b) \Delta t_b - A_b k_{bs} \Delta t_s - A_b k_{bm} \Delta t_m - A_b k_{ba} \Delta t_a - A_b \alpha_b \Delta t_p = \dot{B}_5 \quad (16)$$

gdzie:

$$\dot{B}_4 = \dot{Q}_{a1}'' - \dot{Q}_a'' = A_a k_{a1} [t'_{a1} - (t_{ef})'_{a1}] - A_a k_a [t'_{a1} - (t_{ef})''_a] \quad (17)$$

$$\dot{B}_5 = \dot{Q}_{b1}'' - \dot{Q}_b'' = A_b k_{b1} [t'_{b1} - (t_{ef})'_{b1}] - A_b k_b [t'_{b1} - (t_{ef})''_b] \quad (18)$$

$\alpha_a, \alpha_b$  - współczynnik przechodzenia ciepła z wnętrza organizmu do powierzchni  $A_a$  i  $A_b$ ,  $\left[ \frac{W}{m^2 \text{ grad}} \right]$ .

Łącząc ze sobą równania (7), (11), (14), (15), (16) otrzymuje się układ pięciu równań o pięciu niewiadomych opisujący niustalowaną wymianę ciepła w sali z ludźmi:

$$\begin{aligned}
 a_{11} \Delta t_p - a_{12} \Delta t_a - a_{13} \Delta t_b + a_{14} \Delta t_s + a_{15} \Delta t_m &= + b_{11} \\
 a_{21} \Delta t_p - a_{22} \Delta t_a + a_{23} \Delta t_b + a_{24} \Delta t_s + a_{25} \Delta t_m &= - b_{21} \\
 a_{31} \Delta t_p + a_{32} \Delta t_a - a_{33} \Delta t_b + a_{34} \Delta t_s + a_{35} \Delta t_m &= - b_{31} \\
 a_{41} \Delta t_p + a_{42} \Delta t_a + a_{43} \Delta t_b - a_{44} \Delta t_s + a_{45} \Delta t_m &= - b_{41} \\
 a_{51} \Delta t_p + a_{52} \Delta t_a + a_{53} \Delta t_b + a_{54} \Delta t_s - a_{55} \Delta t_m &= - b_{51}
 \end{aligned} \tag{19}$$

Oznaczenia zastosowane w powyższym układzie równań:

$$a_{11} = (n A_a \alpha_a + n A_b \alpha_b + n \cdot 0,161 + \dot{G}_1 c_{pp} + G'_p c_{pp} s)$$

$$a_{12} = (n A_a k_{as} + n A_a k_{em} + n A_a \alpha_a)$$

$$a_{13} = (n A_b k_{bs} + n A_b k_{bm} + n A_b \alpha_b)$$

$$a_{14} = (n A_a k_{as} + n A_b k_{bs} + \bar{f}_s G_s c_{ps} \cdot s)$$

$$a_{15} = (n A_a k_{am} + n A_b k_{bm} + \bar{f}_m G_m c_{pm} s)$$

$$a_{21} = A_a \alpha_a$$

$$a_{22} = A_a (k_a + \alpha_a)$$

$$a_{23} = A_a k_{ab}$$

$$a_{24} = A_a k_{as}$$

$$a_{25} = A_a k_{am}$$



$$a_{31} = A_b \alpha_b$$

$$a_{32} = A_b k_{ba}$$

$$a_{33} = A_b (k_b + x_b)$$

$$a_{34} = A_b k_{bs}$$

$$a_{35} = A_b k_{bm}$$

$$a_{41} = A_s \alpha_s$$

$$a_{42} = n A_a k_{as}$$

$$a_{43} = n A_b k_{bs}$$

$$a_{44} = (\bar{f}_s G_s c_{ps} \cdot s + A_s \alpha_s + n A_a k_{as} + n A_b k_{bs} + A_m k_{ms})$$

$$a_{45} = A_m k_{ms}$$

$$a_{51} = A_m \alpha_m$$

(20)

$$a_{52} = n A_a k_{am}$$

$$a_{53} = n A_b k_{bm}$$

$$a_{54} = A_m k_{ms}$$

$$a_{55} = (\bar{f}_m G_m c_{pm} s + A_m \alpha_m + A_m k_{ms} + n A_a k_{am} + n A_b k_{bm})$$

$$b_{11} = n \dot{B}_1 - \text{wg równania (8)}$$

$$b_{21} = \dot{B}_4 - \text{wg równania (15)}$$

$$b_{31} = \dot{B}_5 - \text{wg równania (16)}$$

$$b_{41} = \dot{B}_2 - \text{wg równania (10)}$$

$$b_{51} = \dot{B}_3 - \text{wg równania (13)}$$

Rozwiązując układ równań (19) otrzymuje się odpowiednie przyrosty temperatur:

$$\begin{aligned}\Delta t_p(s) & \frac{W_1}{W} \\ \Delta t_a(s) & \frac{W_2}{W} \\ \Delta t_b(s) & \frac{W_3}{W} \\ \Delta t_s(s) & \frac{W_4}{W} \\ \Delta t_m(s) & \frac{W_5}{W}\end{aligned}\tag{21}$$

$$(\Delta t_{ef})_a(s) = \frac{\alpha_a}{k_a} \frac{W_1}{W} + \frac{k_{ab}}{k_a} \frac{W_3}{W} + \frac{k_{as}}{k_a} \frac{W_4}{W} + \frac{k_{am}}{k_a} \frac{W_5}{W}$$

$$(\Delta t_{ef})_b(s) = \frac{\alpha_b}{k_b} \frac{W_1}{W} + \frac{k_{ba}}{k_b} \frac{W_2}{W} + \frac{k_{bs}}{k_b} \frac{W_4}{W} + \frac{k_{bm}}{k_b} \frac{W_5}{W}$$

gdzie:

$$W = \begin{vmatrix} + a_{11} & - a_{12} & - a_{13} & + a_{14} & + a_{15} \\ + a_{21} & - a_{22} & + a_{23} & + a_{24} & + a_{25} \\ + a_{31} & + a_{32} & - a_{33} & + a_{34} & + a_{35} \\ + a_{41} & + a_{42} & + a_{43} & - a_{44} & + a_{45} \\ + a_{51} & + a_{52} & + a_{53} & + a_{54} & - a_{55} \end{vmatrix}\tag{22}$$

Podwyznaczniki  $W_i$  powstają z wyznacznika  $W$  przez zastąpienie w nim  $i$ -tej kolumny kolumną wyrazów wolnych.

Przykładem szczególnym w analizie rozpatrywanych procesów nieustalonych jest sala z ludźmi bez mebli. W ten sposób z dużym przybliżeniem można traktować te pomieszczenia, których umeblowanie składa się wyłącznie z krzeseł (sale kinowe, teatralne itp.). Przyrost energii krzeseł oraz ich udział w wymianie ciepła przez promieniowanie jest mały i błąd spowodowany nieuwzględnianiem tych pozycji jest do pominięcia. Poszczególne przyrosty temperatur  $\Delta t_i(s)$  dla tego szczególnego przypadku wyrażą się przy pomocy równań (21), natomiast wyznacznik charakterystyczny  $W$  należy obliczać według wzoru:

$$W = \begin{vmatrix} + a_{11} - a_{12} - a_{13} + a_{14} \\ + a_{21} - a_{22} + a_{23} + a_{24} \\ + a_{31} + a_{32} - a_{33} + a_{34} \\ + a_{41} + a_{42} + a_{43} - a_{44} \end{vmatrix} \quad (23)$$

Wyrazy  $a$  i  $j$  wyznacznika (23) należy obliczać wg równań (20) z tym, że przy obliczeniu wyrazu  $a_{44}$  należy przyjąć  $A_m = 0$ .

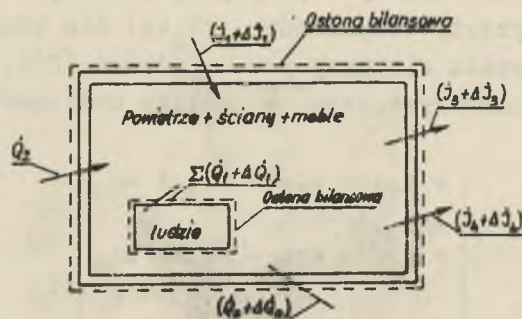
### 3. Sala widowiskowa z ludźmi - stan ustalony zakłócony skokową zmianą temperatury powietrza nawiewanego

Przyjęto następujące upraszczające założenia:

- W nieskończenie krótkim czasie następuje dokładne wymieszanie powietrza świeżego z powietrzem znajdującym się w sali.
- Wilgotność powietrza doprowadzanego do sali jest stała.
- Sala zapełniona jest kompletem widzów.

- d) Sala z ludźmi znajduje się w stanie ustalonej wymiany ciepła.  
 e) W czasie  $\tau = \tau_0$  temperatura powietrza tłoczonego na salę zmieniła się skokowo.

Schemat bilansowanego układu oraz sposób prowadzenia osłony bilansowej podano na rys. 2.



Rys. 2. Osłona bilansowa sali z ludźmi (zakłócenie spowodowane skokową zmianą temperatury świeżego powietrza)

Równanie bilansu sali dla stanu nieustalonego ma postać:

$$\dot{I}_1 + \Delta \dot{I}_1 + \dot{Q}_2 + \Sigma \dot{Q}_1 + \Sigma \Delta \dot{Q}_1 = \dot{I}_3 + \Delta \dot{I}_3 + \dot{I}_4 + \Delta \dot{I}_4 + \dot{Q}_0 + \Delta \dot{Q}_0 + \Delta \dot{E}_m + \Delta \dot{E}_s \quad (24)$$

Oznaczenia jak w p. 2.

Odejmując od równania (24) równanie bilansu sali w stanie ustalonym otrzymuje się:

$$\Delta \dot{I}_1 + \Sigma \Delta \dot{Q}_1 = \Delta \dot{I}_3 + \Delta \dot{I}_4 + \Delta \dot{Q}_0 + \Delta \dot{E}_m + \Delta \dot{E}_s \quad (25)$$

Przyrost entalpii powietrza na wejściu określony jest zależnością:

$$\Delta \dot{I}_1 = \dot{G} \cdot c_{pp} \cdot \Delta t_1 \quad (26)$$

Przyrost ilości ciepła  $\Sigma \Delta Q_1$  otrzymuje się z równania (3)

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta Q_1 = n \left\{ A_a [k_{as}(\Delta t_a - \Delta t_s) + k_{am}(\Delta t_a - \Delta t_m)] + \right. \\ + A_b [k_{bs}(\Delta t_b - \Delta t_s) + k_{bm}(\Delta t_b - \Delta t_m)] + \\ \left. + A_a \alpha_a (\Delta t_a - \Delta t_p) + A_b \alpha_b (\Delta t_b - \Delta t_p) - 0,161 \Delta t_p \right\} \quad (27) \end{aligned}$$

Suma przyrostu energii wewnętrznej powietrza w sali i przyrostu entalpii powietrza odprowadzanego z sali określona jest równaniem (4), natomiast suma przyrostu energii wewnętrznej ścian i przyrostu straty na rzecz otoczenia oraz przyrostu energii wewnętrznej mebli wyraża się wzorami (5), (6).

Podstawiając (3), (4), (5), (6), (26) do równania (25) otrzymuje się:

$$\begin{aligned} (n A_a k_{as} + n A_a k_{am} + n A_a \alpha_a) \Delta t_a + (n A_b k_{bs} + n A_b k_{bm} + \\ + n A_b \alpha_b) \Delta t_b - (n A_a \alpha_a + n A_b \alpha_b + n \cdot 0,161 + \dot{G}_1 c_{pp} + \\ + G'_p c_{pp} s) \Delta t_p - (n A_a k_{as} + n A_b k_{bs} + \bar{f}_s G_s c_{ps} s) \Delta t_s - \\ - (n A_a k_{am} + n A_b k_{bm} + \bar{f}_m G_m c_{pm} s) \Delta t_m = - \dot{G}_1 c_{pp} \Delta t_1 \quad (28) \end{aligned}$$

Podstawiając w równaniu (11)  $\dot{B}_2 = 0$  oraz w równaniu (14)  $\dot{B}_3 = 0$  otrzymuje się równania bilansu ścian i mebli:

$$\begin{aligned} (\bar{f}_s G_s c_{ps} s + A_s \alpha_s + n A_a k_{as} + n A_b k_{bs} + A_m k_{ms}) \Delta t_s - \\ - A_m k_{ms} \Delta t_m - A_s \alpha_s \Delta t_p - n A_a k_{as} \Delta t_a - n A_b k_{bs} \Delta t_b = 0 \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned}
 & (\bar{r}_m G_m c_{pm} s + A_m \alpha_m + A_m k_{ms} + n A_a k_{am} + n A_b k_{bm}) \Delta t_m - \\
 & - A_m \alpha_m \Delta t_p - A_m k_{ms} \Delta t_s - n A_a k_{am} \Delta t_a - n A_b k_{bm} \Delta t_b = 0
 \end{aligned} \tag{30}$$

Podobnie otrzymuje się równanie bilansowe powierzchni  $A_a$  i  $A_b$  podstawiając w równaniu (15), (16)  $\dot{B}_4 = 0$  oraz  $\dot{B}_5 = 0$ .

$$\begin{aligned}
 & A_a (k_a + \alpha_a) \Delta t_a - A_a k_{as} \Delta t_s - A_a k_{am} \Delta t_m - A_a k_{ab} \Delta t_b - \\
 & - A_a \alpha_a \Delta t_p = 0
 \end{aligned} \tag{31}$$

$$\begin{aligned}
 & A_b (k_b + \alpha_b) \Delta t_b - A_b k_{bs} \Delta t_s - A_b k_{bm} \Delta t_m - A_b k_{ba} \Delta t_a - \\
 & - A_b \alpha_b \Delta t_p = 0
 \end{aligned} \tag{32}$$

Łącząc ze sobą równania (28), (29), (30), (31), (32) otrzymuje się układ pięciu równań o pięciu niewiadomych opisujący stan nieustalony w seli z ludźmi wywołany skokową zmianą temperatury powietrza świeżego.

$$\begin{aligned}
 a_{11} \Delta t_p - a_{12} \Delta t_a - a_{13} \Delta t_b + a_{14} \Delta t_s + a_{15} \Delta t_m &= b_{11} \\
 a_{21} \Delta t_p - a_{22} \Delta t_a + a_{23} \Delta t_b + a_{24} \Delta t_s + a_{25} \Delta t_m &= 0 \\
 a_{31} \Delta t_p + a_{32} \Delta t_a - a_{33} \Delta t_b + a_{34} \Delta t_s + a_{35} \Delta t_m &= 0 \tag{33} \\
 a_{41} \Delta t_p + a_{42} \Delta t_a + a_{43} \Delta t_b - a_{44} \Delta t_s + a_{45} \Delta t_m &= 0 \\
 a_{51} \Delta t_p + a_{52} \Delta t_a + a_{53} \Delta t_b + a_{54} \Delta t_s - a_{55} \Delta t_m &= 0
 \end{aligned}$$

Wartości wyrazów  $a_{ij}$  podano we wzorze (20). Wyraz wolny  $b_{11}$  należy obliczać z równania:  $b_{11} = G_1 c_{pp} \Delta t_1$ .

Rozwiązując układ równań (33) otrzymuje się odpowiednie przyrosty temperatur:

$$\Delta t_p(s) = \frac{W_{o1}}{W_o}$$

$$\Delta t_a(s) = \frac{W_{o2}}{W_o}$$

$$\Delta t_b(s) = \frac{W_{o3}}{W_o}$$

$$\Delta t_s(s) = \frac{W_{o4}}{W_o}$$

$$\Delta t_m(s) = \frac{W_{o5}}{W_o}$$

(34)

$$(\Delta t_{er})_a = \frac{\alpha_a}{k_a} \frac{W_{o1}}{W_o} + \frac{k_{ab}}{k_a} \frac{W_{o3}}{W_o} + \frac{k_{as}}{k_a} \frac{W_{o4}}{W_o} + \frac{k_{am}}{k_a} \frac{W_{o5}}{W_o}$$

$$(\Delta t_{er})_b = \frac{\alpha_b}{k_b} \frac{W_{o1}}{W_o} + \frac{k_{ba}}{k_b} \frac{W_{o2}}{W_o} + \frac{k_{bs}}{k_b} \frac{W_{o4}}{W_o} + \frac{k_{bm}}{k_b} \frac{W_{o5}}{W_o},$$

gdzie:

$$W_o = \begin{vmatrix} + a_{11} - a_{12} - a_{13} + a_{14} + a_{15} \\ + a_{21} - a_{22} + a_{23} + a_{24} + a_{25} \\ + a_{31} + a_{32} - a_{33} + a_{34} + a_{35} \\ + a_{41} + a_{42} + a_{43} - a_{44} + a_{45} \\ + a_{51} + a_{52} + a_{53} + a_{54} - a_{55} \end{vmatrix} \quad (35)$$

Pomijając udział mebli w wymianie ciepła w sali otrzymuje się uproszczony układ równań. Przyrosty temperatur dla tego przypadku należy również obliczać z wzorów (34) z tym, że wyznacznik  $W_0$  i podwyznaczniki  $W_{0i}$  należy obliczyć z wzoru (36). Wyrazy  $a_{ij}$  we wzorze (36) należy obliczać z wzorów (20) przyjmując przy obliczaniu  $a_{44}: A_m = 0$  oraz  $b_{11} = \dot{G}_1 c_{pp} t_1$

$$W_0 = \begin{vmatrix} + a_{11} - a_{12} - a_{13} + a_{14} \\ + a_{21} - a_{22} - a_{23} + a_{24} \\ + a_{31} + a_{32} - a_{33} + a_{34} \\ + a_{41} + a_{42} + a_{43} - a_{44} \end{vmatrix} \quad (36)$$

Schemat blokowy sali z ludźmi przedstawiono na rys. 3. Zakłóceniem jest pojawienie się ludzi na sali ( $z = \Delta n$ ), wielkością nastawczą temperatura świeżego powietrza doprowadzanego na salę, wielkością regulowaną temperatura efektywna ( $t_{ef}$ )<sub>a</sub> i ( $t_{ef}$ )<sub>b</sub>.

Oznaczenia użyte na rys. 3.

$F_{x1}$  - nastawcza transmitancja operatorowa,

$F_{zi}$  - zakłóceniewa transmitancja operatorowa,

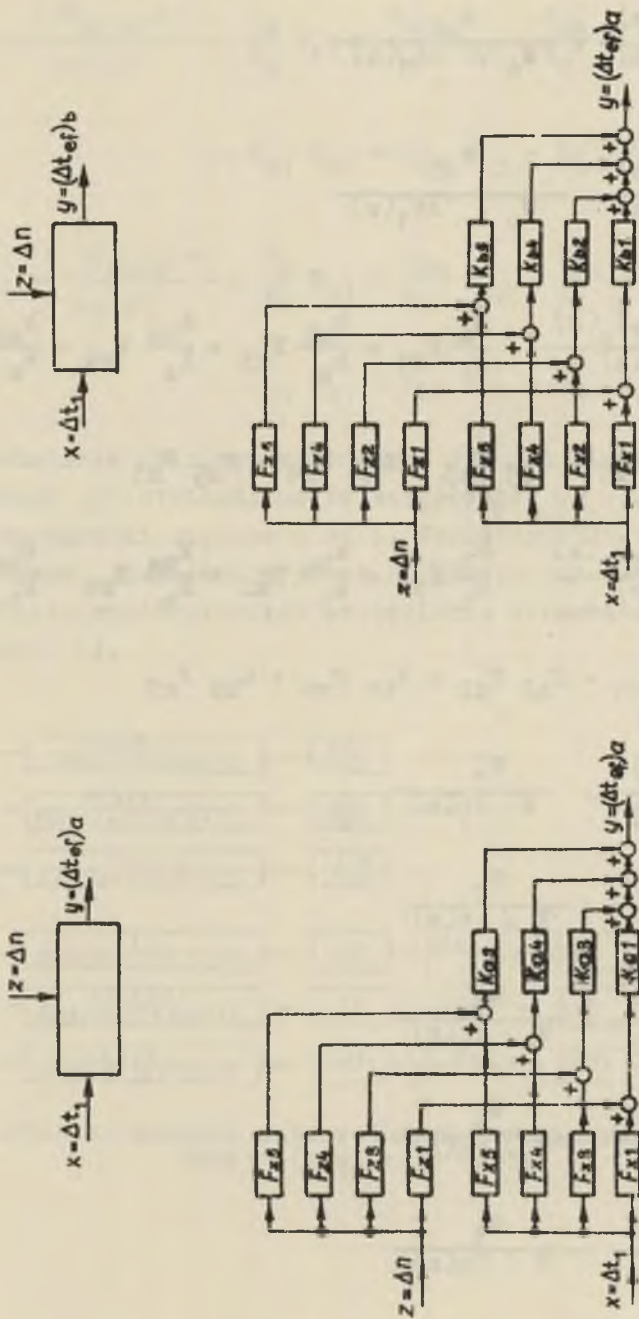
$K_{ij}$  - współczynnik wzmocnienia,

$$F_{x1} = \frac{\Delta t_p(s)}{\Delta t_1(s)} = \frac{W_{01}}{W_0 \cdot \Delta t_1(s)}$$

$$F_{x2} = \frac{\Delta t_a(s)}{\Delta t_1(s)} = \frac{W_{02}}{W_0 \cdot \Delta t_1(s)}$$

$$F_{x3} = \frac{\Delta t_b(s)}{\Delta t_1(s)} = \frac{W_{03}}{W_0 \cdot \Delta t_1(s)}$$





Rys. 3. Schematy blokowe sali z ludźmi jako obiektu w procesie regulacji temperatury

$$F_{x4} = \frac{\Delta t_s(s)}{\Delta t_1(s)} = \frac{W_{04}}{W_0 \cdot \Delta t_1(s)}$$

$$F_{x5} = \frac{\Delta t_m(s)}{\Delta t_1(s)} = \frac{W_{05}}{W_0 \cdot \Delta t_1(s)}$$

$$F_{x6} = \frac{(\Delta t_{ef})_a(s)}{\Delta t_1(s)} = \frac{\alpha_a}{k_a} F_{x1} + \frac{k_{ab}}{k_a} F_{x3} + \frac{k_{as}}{k_a} F_{x4} + \frac{k_{am}}{k_a} F_{x5} =$$

$$= K_{a1} F_{x1} + K_{a3} F_{x3} + K_{a4} F_{x4} + K_{a5} F_{x5}$$

$$F_{x7} = \frac{(\Delta t_{ef})_b(s)}{t_1(s)} = \frac{\alpha_b}{k_b} F_{x1} + \frac{k_{ba}}{k_b} F_{x2} + \frac{k_{bs}}{k_b} F_{x4} + \frac{k_{bm}}{k_b} F_{x5} =$$

$$= K_{b1} F_{x1} + K_{b2} F_{x2} + K_{b4} F_{x4} + K_{b5} F_{x5}$$

$$F_{z1} = \frac{\Delta t_p(s)}{\Delta n(s)} = \frac{W_1}{W \cdot \Delta n(s)}$$

$$F_{z2} = \frac{\Delta t_e(s)}{\Delta n(s)} = \frac{W_2}{W \cdot \Delta n(s)}$$

$$F_{z3} = \frac{\Delta t_b(s)}{\Delta n(s)} = \frac{W_3}{W \cdot \Delta n(s)}$$

$$F_{z4} = \frac{\Delta t_s(s)}{\Delta n(s)} = \frac{W_4}{W \cdot \Delta n(s)}$$

$$F_{z5} = \frac{\Delta t_m(s)}{\Delta n(s)} = \frac{W_5}{W \cdot \Delta n(s)}$$

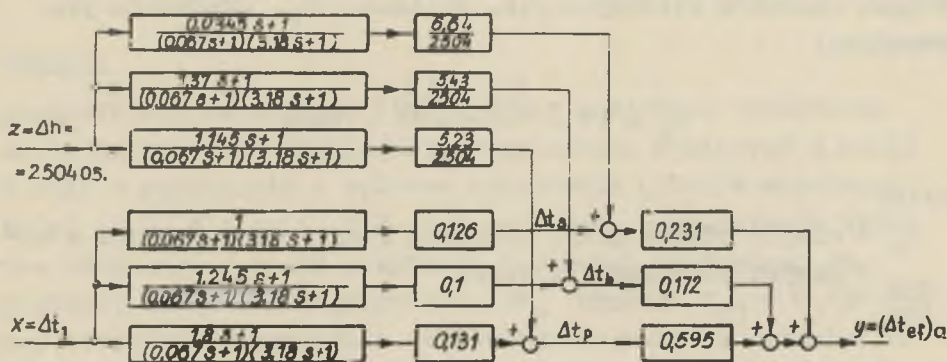
$$F_{z6} = \frac{(\Delta t_{ef})_a(s)}{\Delta n(s)} = \frac{\alpha_a}{k_a} F_{z1} + \frac{k_{ab}}{k_a} F_{z3} + \frac{k_{as}}{k_a} F_{z4} + \frac{k_{am}}{k_a} F_{z5} =$$

$$= K_{a1} F_{z1} + K_{a3} F_{z3} + K_{a4} F_{z4} + K_{a5} F_{z5}$$

$$F_{z7} = \frac{(\Delta t_{ef})_b(s)}{\Delta n(s)} = \frac{\alpha_b}{k_b} F_{z1} + \frac{k_{ba}}{k_b} F_{z2} + \frac{k_{bs}}{k_b} F_{z4} + \frac{k_{bm}}{k_b} F_{z5} =$$

$$= K_{b1} F_{z1} + K_{b2} F_{z2} + K_{b4} F_{z4} + K_{b5} F_{z5}$$

Na podstawie obliczeń wykonanych dla Sali Domu Muzyki i Tańca w Zabrze [7] stwierdzono, że zakłócenie  $\Delta n$  bardzo poważnie wpływa na warunki cieplne w sali. Współczynniki wzmocnienia transmitancji zakłóceńowych są kilkadziesiąt razy większe od odpowiednich współczynników wzmocnienia transmitancji nastawczych (rys. 4).



Rys. 4. Schemat blokowy sali z ludźmi Domu Muzyki i Tańca w Zabrze (pominięto meble)

4. Komfort temperaturowy sali z ludźmi [7]

Z chwilą pojawienia się widzów na sali zmieniają się warunki wymiany ciepła pomiędzy organizmem ludzkim i otoczeniem. Zmiana ta spowodowana jest zmianą współczynników przechodzenia ciepła  $k_{ij}$ . Dla oceny komfortu temperaturowego sali z ludźmi nie wystarcza znajomość temperatury powietrza, prędkości powietrza i temperatury ścian. Nie rozwiązuje również problemu wprowadzenie temperatur efektywnych  $(t_{ef})_a$ ,  $(t_{ef})_b$ , ponieważ temperatura efektywna określa warunki wymiany ciepła tylko jednej powierzchni  $A_a$  względnie  $A_b$ , a nie całego organizmu. Jednoznacznej oceny komfortu temperaturowego można dokonać przez porównanie ze sobą ilości ciepła odprowadzonego przez organizm ludzki do otoczenia w różnych warunkach. Przyjmując za poziom odniesienia ilość ciepła odprowadzoną do otoczenia w warunkach pełnego komfortu temperaturowego należy traktować każdą zmianę ilości odprowadzanego ciepła jako pogorszenie się komfortu temperaturowego. Opierając się na powyższym i zakładając podobieństwo ubioru osób można wprowadzić pojęcie współczynnika komfortu temperaturowego  $\epsilon_k$  pozwalającego na porównanie ze sobą różnych warunków klimatycznych. Wielkość  $\epsilon_k$  określona jest równaniem:

$$\epsilon_k = \left(1 - \frac{|\dot{Q}_x - \dot{Q}_y|}{\dot{Q}_y}\right) \cdot 100\%, \quad (37)$$

gdzie:

$\dot{Q}_x$  - ciepło oddane przez organizm ludzki do otoczenia w badanych warunkach wg wzoru:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_x = & \left\{ A_a \left[ k_{as}(t'_{a1} - t'_{s1}) + k_{am}(t'_{a1} - t'_{m1}) + \alpha_a(t'_{a1} - t'_{p1}) \right] + \right. \\ & + A_b \left[ k_{bs}(t'_{b1} - t'_{s1}) + k_{bm}(t'_{b1} - t'_{m1}) + \alpha_b(t'_{b1} - t'_{p1}) \right] + \\ & \left. + 5,29 - 0,161 t'_{p1} \right\} + \left\{ A_a \left[ k_{as}(\Delta t_a - \Delta t_s) + k_{am}(\Delta t_a - \Delta t_m) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \alpha_a(\Delta t_a - \Delta t_p) \right] + A_b \left[ k_{bs}(\Delta t_b - \Delta t_s) + k_{bm}(\Delta t_b - \Delta t_m) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \alpha_b(\Delta t_b - \Delta t_p) \right] \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \alpha_a (\Delta t_a - \Delta t_p) \Big] + A_b \left[ k_{bs} (\Delta t_b - \Delta t_s) + k_{bm} (\Delta t_b - \Delta t_m) + \right. \\
 & \left. + \alpha_b (\Delta t_b - \Delta t_p) \right] - 0,161 \Delta t_p \Big\} \text{ [W]} \quad (38)
 \end{aligned}$$

$\dot{Q}_y$  - ciepło oddane przez organizm ludzi do otoczenia w warunkach pełnego komfortu temperaturowego wg wzoru:

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_y = & A_a \left[ k_{as1} (t'_{a1} - t'_{s1}) + k_{am1} (t'_{a1} - t'_{m1}) + \alpha_{a1} (t'_{a1} - t'_{p1}) \right] + \\
 & + A_b \left[ k_{bs1} (t'_{b1} - t'_{s1}) + k_{bm1} (t'_{b1} - t'_{m1}) + \alpha_{b1} (t'_{b1} - t'_{p1}) \right] + \\
 & + 5,29 - 0,161 t'_p \text{ [W]} \quad (39)
 \end{aligned}$$

Dla optymalnych warunków temperaturowych moduł  $|\dot{Q}_x - \dot{Q}_y| = 0$  oraz  $\epsilon_k = 100\%$ .

## 5. Wnioski

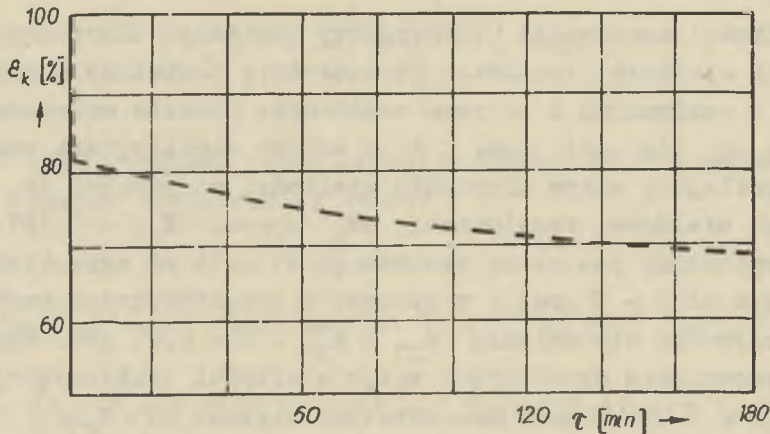
Wpływ wielkości nastawczej (temperatury powietrza tłoczonego do sali) na wielkość regulowaną (temperaturę powietrza w sali) jest mały w porównaniu z wpływem zakłócenia (ludzie wchodzący do sali) i np. dla sali D.M. i T. w Zabrzu współczynnik wzmocnienia określający wpływ przyrostu wielkości nastawczej  $\Delta t_1$  na przyrost wielkości regulowanej  $\Delta t_p$  wynosi  $K_{a1} = 0,131 \frac{\text{grd}}{\text{grd}}$ . Zmiany temperatury powietrza tłoczonego do sali są ograniczone (nie większe od 3 - 5 grd) i w związku z tym maksymalne wartości współczynnika wzmocnienia  $K_{x1} = K_{a1} \cdot 5 = 0,66 \text{ grd}$ . Współczynnik wzmocnienia określający wpływ wielkości zakłócającej wynosi  $K_{s1} = 5,23$  i jest ośmiokrotnie większy od  $K_{x1}$ .

Temperatura powietrza znajdującego się w sali nie określa dokładnie warunków temperaturowych sali [6] i w związku z tym należałoby zdecydować się na inną wielkość regulowaną. Przyję-

cie wielkości regulowanej uwzględniającej również wymianę ciepła przez promieniowanie, np. temperatury efektywnej sali w stosunku do powierzchni  $A_a - (t_{ef})_a$ , jeszcze pogarsza sytuację. Wpływ zakłócenia (pojawienie się ludzi w sali) jest ok. 20-krotnie większy od wpływu wielkości nastawczej (temperatury świeżego powietrza wtłoczonego na salę). Z powyższego wynika, że jedna wielkość nastawcza - temperatura powietrza świeżego - nie umożliwi zrealizowania poprawnie działającego układu regulacji automatycznej. Trzeba wprowadzić dodatkowe wielkości nastawcze, np. temperaturę ścian bocznych i sufitu.

Wprowadzenie współczynnika komfortu temperaturowego sali  $\varepsilon_k$  pozwala na jednoznaczny ocenę warunków temperaturowych. sali. Współczynnik ten nie jest stały i zmienia swoją wartość. Zakładając stałą temperaturę świeżego powietrza  $t_1$  oraz  $\varepsilon_k = 100\%$  dla sali bez ludzi, otrzymuje się zawsze znaczne pogorszenie współczynnika komfortu temperaturowego dla sali z ludźmi.

Na rysunku 5 przedstawiono przebieg krzywej  $\varepsilon_k = f(\tau)$  dla wspomnianej powyżej sali D.M. i T. w Zabrze (krzywa uzyskana na drodze obliczeniowej). Przed wejściem ludzi  $\varepsilon_k$  wynosił 100%. Z chwilą wejścia ludzi na salę, wartość  $\varepsilon_k$  skokowo zmniejszył swoją wartość do  $\varepsilon_k = \sim 80\%$  i następnie zmieniał się



Rys. 5. Wykres  $\varepsilon_k = f(\tau)$  dla sali D.M. i T. w Zabrze

wg krzywej wykładniczej od  $\varepsilon_k = 80\%$  do  $\varepsilon_k = 68\%$  po upływie trzech godzin. Temperatury efektywne  $(t_{ef})_a$  i  $(t_{ef})_b$  przed wejściem ludzi do sali powinny być niższe od optymalnych, ilość ciepła oddana do otoczenia  $\dot{Q}_x > \dot{Q}_y$  oraz  $\varepsilon_k < 100\%$ . Pojawienie się ludzi spowoduje zmniejszenie się ilości ciepła  $\dot{Q}_x$ . W chwili gdy  $\dot{Q}_x$  będzie równe  $\dot{Q}_y$ ,  $\varepsilon_k = 100\%$ . Dalsze zmniejszanie się ilości ciepła  $\dot{Q}_x$  powoduje spadek  $\varepsilon_k$  ( $\dot{Q}_x < \dot{Q}_y$ ). Można znaleźć taką wartość  $\varepsilon_k''$  dla pustej sali, przy której pojawienie się widzów pozwoli osiągnąć wartość  $\varepsilon_k'$  równą  $(\varepsilon_k')_{max}$ . Zależność ta określona jest wzorem:

$$\varepsilon_k' = \frac{100 + \varepsilon_k''}{2}$$

gdzie:

$\varepsilon_k'$  - współczynnik komfortu temperaturowego sali bez ludzi,

$\varepsilon_k''$  - współczynnik komfortu temperaturowego sali z ludźmi przy założeniu że  $\varepsilon_k'$  pustej sali wynosiło 100%.

#### LITERATURA

- [1] CAMPBELL D.P.: Dynamika procesów, PWN, Warszawa 1962.
- [2] FERENCOWICZ J.: Wentylacja i klimatyzacja, Arkady, Warszawa 1962.
- [3] FINDEISEN W.: Technika regulacji automatycznej, PWN, Warszawa 1965.
- [4] KÄMPFER, HÖTTINGER, GONZENBACH: Ogrzewanie i wentylacja w budownictwie, Arkady, Warszawa 1960.
- [5] KOPEC St.: Sala widowiskowa bez ludzi jako obiekt w procesie regulacji temperatury. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Energetyka z. 22, Gliwice 1966.

- [6] KOPEC ST.: Warunki oddawania ciepła przez człowieka znajdujące się w sali widowiskowej lub audytoryjnej, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Energetyka z. 28, Gliwice 1967.
- [7] KOPEC ST.: Dynamika procesów regulacji temperatury w salach widowiskowych i audytoryjnych. Praca doktorska, Gliwice 1965.
- [8] OCHĘDUSZKO ST.: Termodynamika stosowana, WNT, Warszawa 1964.
- [9] RIETSCHEL H., RAISS W.: Podręcznik ogrzewania i wietrzenia, Arkady, Warszawa 1963.
- [10] STREJC V., SALAMON M., KOTEK Z.: Teoria regulacji automatycznej, WNT, Warszawa 1962.

**ЗРИТЕЛЬНЫЕ ЗАЛЫ С ЛЮДЬМИ В КАЧЕСТВЕ ОБЪЕКТОВ  
В ПРОЦЕССЕ РЕГУЛИРОВКИ ТЕМПЕРАТУРЫ**

**Резюме**

Проведен анализ динамических свойств зрительных залов и аудиторий, принимая, что рассматриваемый элемент автоматики (зрительный зал) имеет два входных сигнала (нарушение - входящие в зал зрители, установочная величина - температура нагнетаемого в зал свежего воздуха) а также один выходной сигнал (регулируемая величина - температура воздуха в зале).

Приведены системы уравнений, описывающих неустойчивые состояния и следующие из них операторные трансмитации. Для однозначного определения температурных условий зрительных залов вводили понятие коэффициента температурного комфорта.

В заключение указаны результаты вычислений и опытов для зала Д.М. и Т. в г. Забрже, а также следующие из вычислений и опытов выводы.



**THEATRE AND CINEMA HALLS AS OBJECTS  
IN THE TEMPERATURE REGULATION PROCESS****S u m m a r y**

In the paper the dynamic properties of theatre, cinema and lecture halls have been analysed. It was assumed that the considered element of automation (theatre or cinema halls) has two inlet signals (disturbance - spectator coming in, manipulated variable - temperature of the fresh air pumped into the hall) and one outlet signal (controlled variable - temperature of the hall air).

The equations describe unsteady conditions as well as operative transmittances derived from them. For the univocal determination of temperature conditions in theatre and cinema halls a notion of comfortable temperature coefficient has been introduced.

At the end the computation and experimental results for the Hall of Music and Dance in Zabrze as well as the conclusions drawn from them have been given.