

ESERCIZI UNITA' Z – SOMMARIO

Z. CONTROLLO TERMICO IN ELETTRONICA

Z.I. Scelta di un dissipatore

Z.II. Scelta di un dispositivo di ventilazione

Z.III. Scelta di una soluzione di accoppiamento processore/dissipatore

Z.IV. Verifica termica dei componenti di un sistema elettronico

Z.V. Influenza degli scambi termici attraverso le pareti di un cabinet

Z.VI. Sistema elettronico con dispositivo di raffreddamento a liquido

Z.VII. Influenza degli scambi termici attraverso le pareti di un cabinet (2)

Z.VIII. Valutazione della portata di aerazione

Z.IX. Verifica termica dei componenti di un sistema elettronico (2)

Z.X. Verifica termica dei componenti di un sistema elettronico (3)

Z.I. Scelta di un dissipatore– Problema

I dispositivi di aerazione interna di un cabinet per apparecchiature elettroniche assicurano una portata di $1.2 \text{ m}^3/\text{min}$. Nel cabinet sono alloggiati un microprocessore che assorbe fino a 21 W elettrici e dispositivi di vario tipo che assorbono complessivamente altri 140 W .

Individuare il più conveniente tra i due dissipatori di calore a superficie alettata disponibili, le cui caratteristiche sono illustrate nel seguito, sapendo che il microprocessore, che è il componente più critico, presenta temperatura massima ammissibile pari a 90°C e superficie di scambio termico 1 cm^2 , e che la resistenza di contatto tra dissipatore e microprocessore, riferita all'unità di superficie, è pari a $1 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$. Stimare nei due casi la massima temperatura raggiunta dal microprocessore.

Superficie alettata non ventilata, $R = 1.5^\circ\text{C}/\text{W}$

Superficie alettata con ventola, $R = 0.5^\circ\text{C}/\text{W}$

Si assumano per l'aria densità pari a $1.15 \text{ kg}/\text{m}^3$, calore specifico a pressione costante pari a $1007 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ e temperatura nell'ambiente esterno compresa tra 15°C e 30°C .

– Dati

$$\dot{V} = 1.2 \text{ m}^3/\text{min} = 0.020 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{Q}_{\text{mp}} = 21 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{alia}} = 140 \text{ W}$$

$$T_{\text{mp,max}} = 90^\circ\text{C}$$

$$A_{\text{mp}} = 1 \text{ cm}^2 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$R_c'' = 1 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W} = 0.0001 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$R_{\text{d,s/v}} = 1.5^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$R_{\text{d,c/v}} = 0.5^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$\rho = 1.15 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$c = 1007 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$T_{\text{amb,min}} = 15^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{amb,max}} = 30^\circ\text{C}$$

– Determinare

Massima temperatura raggiunta dal microprocessore nelle due configurazioni indicate

– Ipotesi

Aria gas ideale.

– Soluzione

Il problema si risolve nel valutare la massima temperatura che l'aria può raggiungere nel cabinet e, a partire da questa, la massima temperatura raggiungibile dal microprocessore, in funzione del tipo di dissipatore impiegato.

Il cabinet costituisce un sistema aperto con un ingresso ed una uscita, soggetto ad un flusso stazionario di fluido. La massima temperatura al suo interno può essere stimata a partire dall'equazione di bilancio dell'energia (vedi Es.D.I-II):

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right]$$

Nel caso in esame, si possono trascurare (in favore di sicurezza) gli scambi di calore attraverso le pareti del cabinet. Inoltre, le variazioni di energia cinetica ed energia potenziale sono piccole, essendo minime le variazioni di velocità e di quota dell'aria, e vengono quindi trascurate. Tipicamente piccolo e, di conseguenza, trascurabile (oppure accumulabile nelle dissipazioni elettriche di vario tipo che avvengono all'interno del cabinet) è anche il lavoro fornito dai dispositivi di ventilazione. L'equazione di bilancio dell'energia assume pertanto la seguente forma semplificata:

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

La potenza termica complessivamente dissipata dai dispositivi elettronici e da questi trasferita all'aria (positiva nelle convenzioni termodinamiche) è pari alla potenza elettrica complessivamente assorbita:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{mp} + \dot{Q}_{alia} = 161 \text{ W}$$

La portata in massa vale:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = 0.023 \text{ kg/s}$$

In condizioni ambiente tipiche, l'aria può essere considerata un gas perfetto. Peraltro, il processo avviene a pressione pressoché costante. La variazione di entalpia può quindi essere valutata come segue:

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT \cong c_p (T_2 - T_1)$$

La temperatura dell'aria nell'ambiente esterno è compresa tra 15°C e 30°C. Le condizioni più gravose si avranno, ovviamente, quando la temperatura ambiente è massima, da cui:

$$T_1 = 30^\circ\text{C}$$

Pertanto, la massima temperatura dell'aria all'interno cabinet, che viene raggiunta in prossimità dell'uscita, vale:

$$T_2 = T_1 + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}c_p} = 37.0^\circ\text{C}$$

Dati la temperatura massima dell'aria di raffreddamento (T_2) ed il dissipatore di calore (con la sua resistenza termica R_d), la temperatura del microprocessore in condizioni di carico massimo può essere valutata mediante l'analogia elettrotermica (vedi Es.E.X-XII):

$$T_{mp} = T_2 + (R_c + R_d) \dot{Q}_{mp}$$

La resistenza di contatto R_c è valutabile come segue (vedi Es.E.XI):

$$R_c = \frac{R_c''}{A} = 1 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

In definitiva, la temperatura massima raggiungibile dal processore accoppiato al dissipatore senza ventola sarà pari a:

$$T_{mp,s/v} = T_2 + (R_c + R_{d,s/v}) \dot{Q}_{mp} = 89.5^\circ\text{C}$$

Invece, impiegando il dissipatore con ventola, la temperatura massima raggiungibile dal processore sarà pari a:

$$T_{mp,c/v} = T_2 + (R_c + R_{d,c/v}) \dot{Q}_{mp} = 68.5^\circ\text{C}$$

Entrambe le soluzioni sono in teoria soddisfacenti, ma la prima porta il microprocessore a lavorare in condizioni molto prossime al limite operativo ed è quindi, nella pratica, da considerare con qualche riserva.

Z.II. Scelta di un dispositivo di ventilazione

– Problema

In un cabinet per personal computer sono alloggiati un processore che dissipa fino a 50 W ed apparecchiature elettriche ed elettroniche di vario tipo che dissipano complessivamente altri 150 W.

Individuare il più conveniente tra i due possibili dispositivi di aerazione interna del cabinet, che assicurano le portate d'aria indicate nel seguito, sapendo che il processore presenta temperatura massima ammissibile pari a 80°C e superficie di scambio termico 2.2 cm², che il dissipatore di calore a superficie alettata impiegato per il suo raffreddamento presenta resistenza termica 0.3°C/W e che la resistenza di contatto tra dissipatore e processore, riferita all'unità di superficie, vale 0.7 cm²·°C/W. Stimare nei due casi la massima temperatura raggiunta dal processore.

sistema a ventola doppia, portata d'aria 45 m³/h

sistema a ventola tripla, portata d'aria 95 m³/h

Si assumano per l'aria densità pari a 1.15 kg/m³, calore specifico a pressione costante pari a 1007 J/(kg·°C) e temperatura nell'ambiente esterno compresa tra 25°C e 35°C.

– Dati

$$\dot{Q}_{mp} = 50 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{alia} = 150 \text{ W}$$

$$T_{mp,max} = 80^\circ\text{C}$$

$$A_{mp} = 2.2 \text{ cm}^2 = 2.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$R_c'' = 0.00007 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$R_d = 0.3^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$\dot{V}_{v2} = 45 \text{ m}^3/\text{h} = 0.0125 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{V}_{v3} = 95 \text{ m}^3/\text{h} = 0.0264 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\rho = 1.15 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$c = 1007 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$T_{amb,min} = 25^\circ\text{C}$$

$$T_{amb,max} = 35^\circ\text{C}$$

– Determinare

Massima temperatura raggiunta dal microprocessore nelle due configurazioni indicate

– Ipotesi

Aria gas ideale.

– *Soluzione*

Il problema si risolve nel valutare la massima temperatura che l'aria può raggiungere nel cabinet e, a partire da questa, la massima temperatura raggiungibile dal microprocessore, in funzione del tipo di dispositivo di aerazione interna impiegato.

Il cabinet costituisce un sistema aperto con un ingresso ed una uscita, soggetto ad un flusso stazionario di fluido. La massima temperatura al suo interno può essere quindi stimata a partire dall'equazione di bilancio dell'energia (vedi Es.D.I-II):

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right]$$

Nel caso in esame, si possono trascurare (in favore di sicurezza) gli scambi di calore attraverso le pareti del cabinet. Inoltre, le variazioni di energia cinetica ed energia potenziale sono piccole, essendo minime le variazioni di velocità e di quota dell'aria, e vengono quindi trascurate. Tipicamente piccolo e, di conseguenza, trascurabile (oppure accumulabile nelle dissipazioni elettriche di vario tipo all'interno del cabinet) è anche il lavoro fornito dai dispositivi di ventilazione. L'equazione di bilancio dell'energia assume pertanto la seguente forma semplificata:

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

La potenza termica complessivamente dissipata dai dispositivi elettronici e fornita all'aria (positiva nelle convenzioni termodinamiche) è pari alla potenza elettrica complessivamente assorbita:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{mp} + \dot{Q}_{alia} = 200 \text{ W}$$

La portata in massa nei due casi contemplati vale:

$$\dot{m}_{v2} = \rho \dot{V}_{v2} = 0.0144 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{v3} = \rho \dot{V}_{v3} = 0.0303 \text{ kg/s}$$

In condizioni ambiente tipiche, l'aria può essere considerata un gas perfetto. Peraltro, il processo avviene a pressione pressoché costante. La variazione di entalpia può quindi essere valutata come segue:

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT \cong c_p (T_2 - T_1)$$

La temperatura dell'aria nell'ambiente esterno è compresa tra 25°C e 35°C. Le condizioni più gravose si avranno, ovviamente, quando la temperatura ambiente è massima, da cui:

$$T_1 = 35^\circ\text{C}$$

Pertanto, la massima temperatura dell'aria all'interno cabinet, che viene raggiunta in prossimità dell'uscita, vale, nelle due configurazioni di sistema:

$$T_{2,v2} = T_1 + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_{v2} c_p} = 48.8^\circ\text{C}$$

$$T_{2,v3} = T_1 + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_{v3} c_p} = 41.5^\circ\text{C}$$

Dati la temperatura massima dell'aria di raffreddamento (T_2) ed il dissipatore di calore (con la sua resistenza termica R_d), la temperatura del microprocessore in condizioni di carico massimo può essere valutata mediante l'analogia elettrotermica (vedi Es.E.X-XII):

$$T_{mp} = T_2 + (R_c + R_d)\dot{Q}_{mp}$$

La resistenza di contatto R_c è valutabile come segue (vedi Es.E.XI):

$$R_c = \frac{R_c''}{A} = 0.32 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

In definitiva, se si utilizza il sistema a due ventole, la temperatura massima raggiungibile dal processore si può stimare pari a:

$$T_{mp,v2} = T_{2,v2} + (R_c + R_d)\dot{Q}_{mp} = 79.7^\circ\text{C}$$

Invece, impiegando il dissipatore con ventola tripla, la temperatura massima raggiungibile dal processore sarà pari a:

$$T_{mp,v3} = T_{2,v3} + (R_c + R_d)\dot{Q}_{mp} = 72.5^\circ\text{C}$$

Entrambe le soluzioni sono in teoria soddisfacenti, ma la prima porta il microprocessore a lavorare in condizioni molto prossime al limite operativo ed è quindi, nella pratica, da considerare con qualche riserva.

Z.III. Scelta di una soluzione di accoppiamento processore/dissipatore

– Problema

Il sistema di ventilazione interna di un personal computer assicura una portata di $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$. Nel computer sono presenti un processore che dissipa fino a 30 W e dispositivi elettrici ed elettronici di vario tipo che dissipano complessivamente altri 80 W . La temperatura dell'aria nell'ambiente esterno è compresa tra 10°C e 35°C .

Individuare la più conveniente tra le due soluzioni possibili di accoppiamento termico tra processore e relativo dissipatore, le cui resistenze di contatto riferite all'unità di superficie sono riportate nel seguito, sapendo che il processore presenta temperatura massima ammissibile 70°C e superficie di scambio termico 140 mm^2 , e che il dissipatore a superficie alettata impiegato per il suo raffreddamento presenta resistenza termica 0.4°C/W . Stimare nei due casi la massima temperatura raggiunta dal processore.

Grasso siliconico e media pressione di contatto, resistenza di contatto $0.9 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$

Pasta a base argento ed elevata pressione di contatto, resistenza di contatto $0.2 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$

Si assumano per l'aria una densità pari a 1.16 kg/m^3 ed un calore specifico a pressione costante pari a $1006 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$.

– Dati

$$\dot{V} = 0.01 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{Q}_{mp} = 30 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{alia} = 80 \text{ W}$$

$$T_{amb,min} = 10^\circ\text{C}$$

$$T_{amb,max} = 35^\circ\text{C}$$

$$T_{mp,max} = 70^\circ\text{C}$$

$$A_{mp} = 140 \text{ mm}^2 = 1.40 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$R_d = 0.4^\circ\text{C/W}$$

$$R_{c,1}'' = 0.9 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C/W} = 0.00009 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$$

$$R_{c,2}'' = 0.2 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C/W} = 0.00002 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$$

$$\rho = 1.16 \text{ kg/m}^3$$

$$c = 1006 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$$

– Determinare

Massima temperatura raggiunta dal microprocessore nelle due configurazioni indicate

– Ipotesi

Aria gas ideale.

– Soluzione

Il problema si risolve nel valutare la massima temperatura che l'aria può raggiungere nel cabinet e, a partire da questa, la massima temperatura raggiungibile dal microprocessore, in funzione del tipo di soluzione accoppiamento termico impiegata.

Il cabinet costituisce un sistema aperto con un ingresso ed una uscita, soggetto ad un flusso stazionario di fluido. La massima temperatura al suo interno può essere quindi stimata a partire dall'equazione di bilancio dell'energia (vedi Es.D.I-II):

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right]$$

Nel caso in esame, si possono trascurare (in favore di sicurezza) gli scambi di calore attraverso le pareti del cabinet. Inoltre, le variazioni di energia cinetica ed energia potenziale sono piccole, essendo minime le variazioni di velocità e di quota dell'aria, e vengono quindi trascurate. Tipicamente piccolo e, di conseguenza, trascurabile (oppure accumulabile nelle dissipazioni elettriche di vario tipo all'interno del cabinet) è anche il lavoro fornito dai dispositivi di ventilazione. L'equazione di bilancio dell'energia assume pertanto la seguente forma semplificata:

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

La potenza termica complessivamente dissipata dai dispositivi elettronici e fornita all'aria (positiva nelle convenzioni termodinamiche) è pari alla potenza elettrica complessivamente assorbita:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{mp} + \dot{Q}_{alia} = 110 \text{ W}$$

La portata in massa vale:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = 0.0116 \text{ kg/s}$$

In condizioni ambiente tipiche, l'aria può essere considerata un gas perfetto. Peraltro, il processo avviene a pressione pressoché costante. La variazione di entalpia può quindi essere valutata come segue:

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT \cong c_p (T_2 - T_1)$$

La temperatura dell'aria nell'ambiente esterno è compresa tra 10°C e 35°C. Le condizioni più gravose si avranno, ovviamente, quando la temperatura ambiente è massima, da cui:

$$T_1 = 35^\circ\text{C}$$

Pertanto, la massima temperatura dell'aria all'interno cabinet, che viene raggiunta in prossimità dell'uscita, vale:

$$T_2 = T_1 + \frac{\dot{Q}}{mc_p} = 44.4^\circ\text{C}$$

Dati la temperatura massima dell'aria di raffreddamento (T_2) ed il dissipatore di calore con la sua resistenza termica R_d , la temperatura del microprocessore in condizioni di carico massimo può essere valutata mediante l'analogia elettrotermica (vedi Es.E.X-XII):

$$T_{mp} = T_2 + (R_c + R_d)\dot{Q}_{mp}$$

Le resistenze di contatto per le due soluzioni di accoppiamento microprocessore-dissipatore in esame sono valutabili come segue (vedi Es.E.XI):

$$R_{c,1} = \frac{R''_{c,1}}{A} = 0.643 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$R_{c,2} = \frac{R''_{c,2}}{A} = 0.143 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

In definitiva, con la prima soluzione di accoppiamento la temperatura massima del processore sarà pari a

$$T_{mp,1} = T_2 + (R_{c,1} + R_d)\dot{Q}_{mp} = 75.7^\circ\text{C}$$

mentre, con la seconda soluzione di accoppiamento, sarà pari a

$$T_{mp,2} = T_2 + (R_{c,2} + R_d)\dot{Q}_{mp} = 60.7^\circ\text{C}$$

Solo la seconda soluzione è soddisfacente, poiché permette al microprocessore di lavorare in ogni condizione a temperatura inferiore al limite operativo.

Z.IV. Verifica termica dei componenti di un sistema elettronico

– *Problema*

L'apparato di aerazione interna di un sistema elettronico assicura una portata pari a $18 \text{ m}^3/\text{h}$. La temperatura nell'ambiente esterno è compresa tra -10°C e 40°C . Assumendo per l'aria $\rho=1.16 \text{ kg/m}^3$ e $c_p=1006 \text{ J/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$ costanti, verificare se i vari dispositivi presenti nel sistema, complessivamente elencati nel seguito, lavorano in sicurezza:

- microprocessore A con massima potenza elettrica dissipata 20 W , temperatura massima ammissibile 85°C e superficie di scambio 0.8 cm^2 , raffreddato mediante un dissipatore di calore a superficie alettata con resistenza termica 0.6°C/W e resistenza di contatto $0.7 \text{ cm}^2\cdot^\circ\text{C/W}$ tra dissipatore e microprocessore, riferita all'unità di superficie;
- microprocessore B con massima potenza elettrica dissipata 0.5 W , temperatura massima 120°C e superficie di scambio termico $25.4 \text{ mm} \times 25.4 \text{ mm}$, privo di dissipatore e raffreddato per convezione naturale con coefficiente di adduzione $9 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$;
- dispositivo C con massima potenza elettrica dissipata 14 W , temperatura massima ammissibile 90°C , raffreddato mediante un dissipatore di calore a superficie alettata privo di ventola, con resistenza termica 3°C/W inclusa la resistenza di contatto.

– Dati

$$\dot{V} = 18 \text{ m}^3/\text{h} = 0.005 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$T_{\text{amb,min}} = -10^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{amb,max}} = 40^\circ\text{C}$$

$$\rho = 1.16 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$c = 1006 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$$

$$\dot{Q}_{\text{mpA}} = 20 \text{ W}$$

$$T_{\text{max,mpA}} = 85^\circ\text{C}$$

$$A_{\text{mpA}} = 0.8 \text{ cm}^2 = 0.8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$R''_{\text{c,mpA}} = 0.7 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W} = 0.00007 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$R_{\text{d,mpA}} = 0.6^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$\dot{Q}_{\text{mpB}} = 0.5 \text{ W}$$

$$T_{\text{max,mpB}} = 120^\circ\text{C}$$

$$L_{1,\text{mpB}} = 25.4 \text{ mm} = 25.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$L_{2,\text{mpB}} = 25.4 \text{ mm} = 25.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$h_{\text{mpB}} = 9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\dot{Q}_{\text{C}} = 14 \text{ W}$$

$$T_{\text{max,C}} = 90^\circ\text{C}$$

$$R_{\text{c+d,C}} = 3^\circ\text{C}/\text{W}$$

– Determinare

Massima temperatura raggiunta dai microprocessori A e B e dal dispositivo C

– Ipotesi

Aria gas ideale.

– Soluzione

Il problema si risolve nel valutare la massima temperatura che l'aria può raggiungere nel cabinet e, a partire da questa, la massima temperatura raggiungibile dai vari dispositivi.

Il cabinet costituisce un sistema aperto con un ingresso ed una uscita, soggetto ad un flusso stazionario di fluido. La massima temperatura al suo interno può essere quindi stimata a partire dall'equazione di bilancio dell'energia (vedi Es.D.I-II):

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right]$$

Nel caso in esame, si possono trascurare (in favore di sicurezza) gli scambi di calore attraverso le pareti del cabinet. Inoltre, le variazioni di energia cinetica ed energia potenziale sono piccole, essendo minime le variazioni di velocità e di quota dell'aria, e vengono quindi trascurate. Tipicamente piccolo e, di conseguenza, trascurabile (oppure accumulabile nelle dissipazioni elettriche di vario tipo all'interno del cabinet) è anche il lavoro fornito dai dispositivi di ventilazione. L'equazione di bilancio dell'energia assume pertanto la seguente forma semplificata:

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

La potenza termica complessivamente dissipata dai dispositivi elettronici e fornita all'aria (positiva nelle convenzioni termodinamiche) è pari alla potenza elettrica complessivamente assorbita:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{mpA} + \dot{Q}_{mpB} + \dot{Q}_C = 34.5 \text{ W}$$

La portata in massa vale:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = 0.0058 \text{ kg/s}$$

In condizioni ambiente tipiche, l'aria può essere considerata un gas perfetto. Peraltro, il processo avviene a pressione pressoché costante. La variazione di entalpia può quindi essere valutata come segue:

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT \cong c_p (T_2 - T_1)$$

La temperatura dell'aria nell'ambiente esterno è compresa tra -10°C e 40°C . Le condizioni più gravose si avranno, ovviamente, quando la temperatura ambiente è massima, da cui:

$$T_1 = 40^\circ\text{C}$$

Pertanto, la massima temperatura dell'aria all'interno cabinet, che viene raggiunta in prossimità dell'uscita, vale:

$$T_2 = T_1 + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}c_p} = 45.9^\circ\text{C}$$

La resistenza di contatto tra microprocessore A e relativo dissipatore è valutabile come segue (vedi Es.E.XI):

$$R_{c,mpA} = \frac{R''_{c,mpA}}{A_{mpA}} = 0.875 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

Data la temperatura massima dell'aria di raffreddamento (T_2), la temperatura del microprocessore A in condizioni di carico massimo può essere valutata mediante l'analogia elettrotermica (vedi Es.E.X-XII):

$$T_{mpA} = T_2 + (R_{c,mpA} + R_{d,mpA}) \dot{Q}_{mpA} = 75.4 \text{ }^\circ\text{C} < T_{max,mpA} = 85^\circ\text{C}$$

Il microprocessore A lavora in ogni caso a temperatura inferiore al limite operativo.

L'area della superficie superiore del microprocessore B, esposta all'aria in quanto il dispositivo è privo di dissipatore, vale:

$$A_{mpB} = L_{1,mpB} L_{2,mpB} = 6.45 \cdot 10^4 \text{ m}^2$$

Trascurando gli scambi termici sulle (piccole) superfici laterali, la resistenza alla trasmissione del calore tra microprocessore B e ambiente nel cabinet (il coefficiente di adduzione comprende sia gli effetti convettivi che quelli radiativi) è pari a:

$$R_{h,mpB} = \frac{1}{h_{mpB} A_{mpB}} = 172 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

La temperatura del microprocessore B in condizioni di carico massimo può essere anch'essa valutata mediante l'analogia elettrotermica:

$$T_{mpB} = T_2 + R_{h,mpB} \dot{Q}_{mpB} = 132^\circ\text{C} > T_{max,mpB} = 120^\circ\text{C}$$

Il microprocessore B non lavora in sicurezza.

La temperatura del dispositivo C in condizioni di carico massimo vale:

$$T_C = T_2 + R_{c+d,C} \dot{Q}_C = 87.9^\circ\text{C} < T_{\text{max},C} = 90^\circ\text{C}$$

La soluzione di raffreddamento è in teoria soddisfacente, ma porta il microprocessore a lavorare in condizioni molto prossime al limite operativo ed è quindi, nella pratica, da considerare con qualche riserva.

– Commenti

In linea di principio, una verifica della massima temperatura raggiungibile va effettuata per ogni componente presente in un sistema elettronico.

Z.V. Influenza degli scambi termici attraverso le pareti di un cabinet

– Problema

I dispositivi di aerazione interna di un cabinet per apparecchiature elettroniche assicurano una portata di $2.4 \text{ m}^3/\text{min}$. Nel cabinet sono inseriti un microprocessore che dissipa fino a 55 W ed apparecchiature elettriche ed elettroniche di vario tipo che dissipano complessivamente altri 190 W . Il microprocessore è inoltre caratterizzato da temperatura massima ammissibile 65°C e superficie di scambio 1.3 cm^2 , ed è raffreddato mediante un dissipatore di calore a superficie alettata con resistenza termica $0.35^\circ\text{C}/\text{W}$ e resistenza di contatto $0.00002 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ tra dissipatore e microprocessore, riferita all'unità di superficie. Stimare la massima temperatura raggiunta dal microprocessore, verificando che questo operi in sicurezza. Inoltre, assumendo la temperatura media dell'aria nel cabinet pari alla media aritmetica delle temperature in ingresso e in uscita precedentemente calcolate, stimare la potenza termica trasmessa attraverso le pareti (tipicamente trascurata in favore di sicurezza).

Il cabinet presenta dimensioni esterne $40 \text{ cm} \times 80 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$, spessore di parete 0.5 mm e conduttività termica di parete $16 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; tutte le sue superfici sono libere ed i coefficienti di adduzione interno ed esterno valgono, rispettivamente, $15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ e $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Si assumano per l'aria una densità pari a $1.16 \text{ kg}/\text{m}^3$, un calore specifico a pressione costante pari a $1007 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, ed una temperatura nell'ambiente esterno di 30°C .

– Dati

$$\dot{V} = 2.4 \text{ m}^3/\text{min} = 0.04 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{Q}_{\text{mp}} = 55 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{alia}} = 190 \text{ W}$$

$$T_{\text{mp,max}} = 65^\circ\text{C}$$

$$A_{\text{mp}} = 1.3 \text{ cm}^2 = 1.3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$R_d = 0.35^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$R_c'' = 0.00002 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$\rho = 1.16 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$c = 1007 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$T_{\text{amb}} = 30^\circ\text{C}$$

$$L_1 = 40 \text{ cm} = 0.40 \text{ m}$$

$$L_2 = 80 \text{ cm} = 0.80 \text{ m}$$

$$L_3 = 25 \text{ cm} = 0.25 \text{ m}$$

$$s_p = 0.5 \text{ mm} = 0.0005 \text{ m}$$

$$\lambda_p = 16 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$$

$$h_i = 15 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$$

$$h_e = 10 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$$

– Determinare

Massima temperatura raggiunta dal microprocessore

\dot{Q}_p trasmessa attraverso le pareti del cabinet

– Ipotesi

Aria gas ideale, coefficienti di convezione uniformi sulle pareti del cabinet, $T_i = (T_1 + T_2)/2$

– Soluzione

Il problema si risolve nel valutare la massima temperatura che l'aria può raggiungere nel cabinet e, a partire da questa, la massima temperatura raggiungibile dal microprocessore.

Il cabinet costituisce un sistema aperto con un ingresso ed una uscita, soggetto ad un flusso stazionario di fluido. La massima temperatura al suo interno può essere quindi stimata a partire dall'equazione di bilancio dell'energia (vedi Es.D.I-II):

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right]$$

Nel caso in esame, si trascurano, in prima approssimazione e in favore di sicurezza, gli scambi di calore attraverso le pareti del cabinet. Inoltre, le variazioni di energia cinetica ed energia potenziale sono piccole, essendo minime le variazioni di velocità e di quota dell'aria, e vengono quindi trascurate. Tipicamente piccolo e, di conseguenza, trascurabile è anche il lavoro fornito dai dispositivi di ventilazione. L'equazione di bilancio dell'energia assume pertanto la seguente forma semplificata:

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

La potenza termica complessivamente dissipata dai dispositivi elettronici e fornita all'aria (positiva nelle convenzioni termodinamiche) è pari alla potenza elettrica complessivamente assorbita:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{mp} + \dot{Q}_{alia} = 245 \text{ W}$$

La portata in massa vale:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = 0.0464 \text{ kg/s}$$

In condizioni ambiente tipiche, l'aria può essere considerata un gas perfetto. Peraltro, il processo avviene a pressione pressoché costante. La variazione di entalpia può quindi essere valutata come segue:

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT \cong c_p(T_2 - T_1)$$

La temperatura dell'aria aspirata nel cabinet è pari alla temperatura dell'aria nell'ambiente esterno:

$$T_1 = T_a = 30^\circ\text{C}$$

Pertanto, la massima temperatura dell'aria all'interno cabinet, che viene raggiunta in prossimità dell'uscita, vale:

$$T_2 = T_1 + \frac{\dot{Q}}{mc_p} = 35.2^\circ\text{C}$$

Dati la temperatura massima dell'aria di raffreddamento (T_2) ed il dissipatore di calore con la sua resistenza termica R_d , la temperatura del microprocessore in condizioni di carico massimo può essere valutata mediante l'analogia elettrotermica (vedi Es.E.X-XII):

$$T_{mp} = T_2 + (R_c + R_d)\dot{Q}_{mp}$$

La resistenza di contatto microprocessore-dissipatore è valutabile come segue (vedi Es.E.XI):

$$R_c = \frac{R_c''}{A_{mp}} = 0.154 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

In definitiva, la temperatura massima del processore sarà pari a

$$T_{mp} = T_2 + (R_c + R_d)\dot{Q}_{mp} = 63^\circ\text{C} < T_{mp,max} = 65^\circ\text{C}$$

La soluzione di raffreddamento è soddisfacente, ma porta il microprocessore a lavorare in condizioni molto prossime al limite operativo ed è quindi, nella pratica, da considerare con qualche riserva.

La potenza termica trasmessa attraverso le pareti del cabinet si può in prima approssimazione stimare mediante il prodotto della resistenza termica delle pareti stesse per la differenza tra la temperatura media dell'aria nel cabinet e la temperatura dell'aria esterna. La temperatura media dell'aria all'interno del cabinet si assume per ipotesi pari a:

$$T_i = \frac{(T_1 + T_2)}{2} = 32.6 \text{ }^\circ\text{C}$$

In generale, la resistenza equivalente di un insieme di pareti che delimitano un vano e presentano identiche caratteristiche rispetto alla direzione normale alle loro superfici principali (materiali, spessori, coefficienti di convezione) è equivalente alla resistenza di una singola parete con area di passaggio del calore pari alla somma delle aree delle pareti dell'insieme suddetto. La superficie esterna del cabinet è pari a:

$$A_e = 2 \cdot (L_1L_2 + L_1L_3 + L_2L_3) = 1.24 \text{ m}^2$$

La resistenza convettiva esterna vale:

$$R_e = \frac{1}{h_e A_e} = 0.0806 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

Il virtù del ridotto spessore delle pareti è lecito assimilare l'area della sezione di passaggio del calore per conduzione attraverso le pareti e l'area della superficie interna delle stesse all'area della superficie esterna:

$$A_p \cong A_i \cong A_e = 1.24 \text{ m}^2$$

La resistenza conduttiva delle pareti vale quindi:

$$R_p = \frac{s_p}{\lambda_p A_p} = 0.000025 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

La resistenza convettiva interna vale:

$$R_i = \frac{1}{h_i A_i} = 0.0538 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

La resistenza totale alla trasmissione del calore delle pareti è pari alla somma delle singole resistenze:

$$R = R_e + R_p + R_i = 0.134 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

In conclusione, la potenza termica trasmessa attraverso le pareti vale:

$$\dot{Q}_p = \frac{T_i - T_a}{R} = 19.5 \text{ W}$$

– Commenti

Il valore calcolato rappresenta circa l' 8% della potenza termica da estrarre dal cabinet. Averla trascurata assicura un qualche margine di sicurezza. Infatti, volendone tenerne conto, si ricava:

$$\dot{Q}' = \dot{Q}_{mp} + \dot{Q}_{alia} - \dot{Q}_p = 225.5 \text{ W}$$

$$T_2' = T_1 + \frac{\dot{Q}'}{\dot{m}c_p} = 34.8^\circ\text{C}$$

$$T_{mp}' = T_2' + (R_c + R_d)\dot{Q}_{mp} = 62.5^\circ\text{C}$$

Il risultato è, seppur di poco, più favorevole. Il calcolo può essere inoltre rifinito con una procedura di tipo iterativo:

$$T_i' = \frac{(T_1 + T_2')}{2} = 32.4^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_p' = \frac{T_i' - T_a}{R} = 17.9 \text{ W}$$

$$\dot{Q}'' = \dot{Q}_{mp} + \dot{Q}_{alia} - \dot{Q}_p' = 227.1 \text{ W}$$

$$T_2'' = T_1 + \frac{\dot{Q}''}{\dot{m}c_p} = 34.9^\circ\text{C}$$

$$T_{mp}'' = T_2'' + (R_c + R_d)\dot{Q}_{mp} = 62.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La procedura converge molto rapidamente ($T_{mp}'' \cong T_{mp}'$).

Assumere un valore della temperatura interna dell'aria pari alla media aritmetica delle temperature in ingresso e in uscita rappresenta un'approssimazione tipicamente ragionevole.

La resistenza termica conduttiva di parete è in genere trascurabile, specie se le pareti del cabinet sono realizzate in metallo (conduttività termica $> 10 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$, spessori di parete tipici $< 1\text{mm}$).

Z.VI. Sistema elettronico con dispositivo di raffreddamento a liquido

– Problema

Un processore ad elevate prestazioni, che in condizioni di massimo carico assorbe una potenza pari a 85 W elettrici ed è caratterizzato da temperatura massima ammissibile 80°C , viene raffreddato mediante un dissipatore di calore a liquido. Il dissipatore è costituito da un blocchetto in materiale metallico altamente conduttivo, al cui interno è ricavata una

canalizzazione circolare con diametro 2 mm e sviluppo longitudinale totale 36 mm. Nella canalizzazione fluisce una corrente d'acqua con portata 600 mL/min e temperatura in ingresso 28°C. Il coefficiente di scambio termico convettivo sulle superfici della canalizzazione è pari a 15000 W/(m²·°C). Il dissipatore è posto in contatto diretto con la superficie superiore del processore; la resistenza di contatto tra dissipatore e processore, riferita all'unità di superficie, è pari a 0.4 °C·cm²/W, l'area della superficie di contatto è pari a 180 mm². Trascurando, in favore di sicurezza, le dispersioni di calore attraverso superfici diverse da quella di contatto, ed assumendo trascurabile anche la ridotta resistenza di forma per conduzione tra superficie di contatto e superfici delle canalizzazioni, in virtù dell'elevata conduttività del materiale metallico con cui è realizzato il dissipatore, stimare:

- a) temperatura in uscita dell'acqua
- b) massima temperatura raggiunta dal processore

Si assumano per l'acqua una densità di 1000 kg/m³ ed un calore specifico di 4190 J/(kg·°C).

– Dati

$$\dot{Q}_p = 85 \text{ W}$$

$$T_{p,\max} = 80^\circ\text{C}$$

$$\dot{V} = 600 \text{ L/min} = 1.0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$T_{\text{in}} = 28^\circ\text{C}$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$c = 4190 \text{ J/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$$

$$D = 2 \text{ mm} = 0.002 \text{ m}$$

$$L = 36 \text{ mm} = 0.036 \text{ m}$$

$$h_i = 15000 \text{ W/(m}^2\cdot^\circ\text{C)}$$

$$R_c'' = 0.4 \text{ cm}^2\cdot^\circ\text{C/W} = 0.00004 \text{ m}^2\cdot^\circ\text{C/W}$$

$$A_c = A_{p,\text{sup}} = 180 \text{ mm}^2 = 1.80 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

– Determinare

Temperatura in uscita dell'acqua

Massima temperatura raggiunta dal processore

– Ipotesi

Coefficiente di convezione omogeneo, resistenza di contatto omogenea, proprietà del fluido costanti, dispersioni di calore attraverso le superfici diverse da quelle di contatto trascurabili nel processore e nel dissipatore, resistenze di forma per conduzione trascurabili nel dissipatore, condizioni stazionarie.

– Soluzione

Il problema si risolve partendo con la valutazione della massima temperatura che l'acqua può raggiungere nel dissipatore di calore e, a partire da questa, la massima temperatura raggiungibile dal processore.

Il dissipatore costituisce un sistema aperto con un ingresso ed una uscita, soggetto ad un flusso stazionario di fluido. La massima temperatura al suo interno può essere quindi stimata a partire dall'equazione di bilancio dell'energia (vedi Es.D.I-II):

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m} \left[h_{\text{out}} - h_{\text{in}} + \frac{w_{\text{out}}^2 - w_{\text{in}}^2}{2} + g(z_{\text{out}} - z_{\text{in}}) \right]$$

Nel caso in esame, si trascurano per ipotesi gli scambi termici attraverso le superfici diverse da quella di contatto con il processore. Inoltre, le variazioni di energia cinetica ed energia potenziale sono piccole, essendo minime per l'acqua le variazioni di velocità (la sezione di passaggio è costante e i liquidi sono incomprimibili) e di quota, che vengono quindi trascurate. I dispositivi di pompaggio eventuali non sono collocati nel dissipatore e non entrano nel computo. L'equazione di bilancio dell'energia assume pertanto la seguente forma semplificata:

$$\dot{Q}_p = \dot{m}(h_{\text{out}} - h_{\text{in}})$$

La portata in massa vale:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = 0.0464 \text{ kg/s}$$

Per un liquido, la variazione di entalpia può essere stimata come segue:

$$h_{\text{out}} - h_{\text{in}} = \int_{T_{\text{in}}}^{T_{\text{out}}} c(T) dT \cong c(T_{\text{out}} - T_{\text{in}})$$

Pertanto, la massima temperatura dell'acqua nel dissipatore, che viene raggiunta in prossimità dell'uscita, vale:

$$T_{\text{out}} = T_{\text{in}} + \frac{\dot{Q}_p}{\dot{m}c} = 30^\circ\text{C}$$

Data la temperatura massima dell'acqua di raffreddamento (T_{out}), la temperatura del processore in condizioni di carico massimo può essere valutata mediante l'analogia elettrotermica (vedi Es.E.X-XII):

$$T_p = T_{\text{out}} + (R_c + R_i) \dot{Q}_p$$

Si sono trascurate per ipotesi le resistenze alla conduzione del calore all'interno del materiale metallico del dissipatore. La resistenza di contatto processore-dissipatore è valutabile come segue (vedi Es.E.XI):

$$R_c = \frac{R_c''}{A_c} = 0.22 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

La superficie di scambio termico convettivo nei condotti del dissipatore di calore vale:

$$A_i = \pi \cdot DL = 2.26 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

La resistenza convettiva interna vale quindi:

$$R_i = \frac{1}{h_i A_i} = 0.29 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

In definitiva, la temperatura massima del processore sarà pari a:

$$T_p = T_{\text{out}} + (R_c + R_i) \dot{Q}_p = 74^\circ\text{C} < T_{p,\text{max}} = 80^\circ\text{C}$$

La soluzione di raffreddamento è soddisfacente.

– Commenti

Impiegando un liquido in convezione forzata, si ottengono valori elevatissimi del coefficiente di convezione.

Il raffreddamento a liquido è in generale più efficiente di quello ad aria, ma comporta significative complicazioni del sistema: si deve scongiurare il rischio di perdite di liquido, che avrebbero conseguenze deleterie; inoltre, vanno previsti uno scambiatore di calore esterno, per raffreddare l'acqua, ed una pompa per farla circolare.

Z.VII. Influenza degli scambi termici attraverso le pareti di un cabinet (2)

– *Problema*

I dispositivi di aerazione interna di un cabinet per apparecchiature elettroniche assicurano una portata di 45 m³/h. Nel cabinet sono inseriti un microprocessore che dissipa fino a 50 W ed apparecchiature elettriche ed elettroniche di vario tipo che dissipano complessivamente altri 220 W. Il microprocessore è caratterizzato da temperatura massima ammissibile 85°C e superficie di scambio 120 mm², ed è raffreddato mediante un dissipatore di calore a superficie alettata con resistenza termica 0.4°C/W e resistenza di contatto 0.3·10⁻⁴ m²·°C/W tra dissipatore e microprocessore, riferita all'unità di superficie. Il cabinet presenta dimensioni esterne 430 mm x 860 mm x 215 mm, spessore di parete 1.5 mm e conduttività termica di parete 16.5 W/(m·°C); tutte le superfici interne ed esterne sono libere ed i coefficienti di adduzione interno ed esterno valgono, rispettivamente, 15 W/(m²·°C) e 9 W/(m²·°C).

Assumendo, ai fini della stima degli scambi termici attraverso le pareti, che la temperatura media dell'aria entro il cabinet sia pari alla media aritmetica delle temperatura in ingresso e della temperatura che si avrebbe in uscita considerando le pareti adiabatiche, stimare la massima temperatura raggiunta dal microprocessore e verificare che questo operi in sicurezza.

Si assumano per l'aria una densità pari a 1.15 kg/m³, un calore specifico a pressione costante pari a 1006 J/(kg·°C), ed una temperatura nell'ambiente esterno di 35°C.

– *Dati*

$$\dot{V} = 45 \text{ m}^3/\text{h} = 0.0125 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{Q}_{\text{mp}} = 50 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{alia}} = 220 \text{ W}$$

$$T_{\text{mp,max}} = 85^\circ\text{C}$$

$$A_{\text{mp}} = 120 \text{ mm}^2 = 1.20 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$R_d = 0.4^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$R_c'' = 0.3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$L_1 = 430 \text{ mm} = 0.430 \text{ m}$$

$$L_2 = 860 \text{ mm} = 0.860 \text{ m}$$

$$L_3 = 215 \text{ mm} = 0.215 \text{ m}$$

$$s_p = 1.5 \text{ mm} = 0.0015 \text{ m}$$

$$\lambda_p = 16.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$h_i = 15 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$h_e = 9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\rho = 1.15 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$c = 1006 \text{ J/(kg}\cdot\text{°C)}$$

$$T_{\text{amb}} = 35\text{°C}$$

– Determinare

Massima temperatura raggiunta dal microprocessore

– Ipotesi

Aria gas ideale, coefficienti di convezione omogenei sulle pareti del cabinet, superfici interne ed esterne completamente libere, $T_i = (T_1 + T_2)/2$

– Soluzione

Il problema si risolve nel valutare la massima temperatura che l'aria può raggiungere nel cabinet e, a partire da questa, la massima temperatura raggiungibile dal microprocessore.

Il cabinet costituisce un sistema aperto con un ingresso ed una uscita, soggetto ad un flusso stazionario di fluido. La massima temperatura al suo interno può essere quindi stimata a partire dall'equazione di bilancio dell'energia (vedi Es.D.I-II):

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right]$$

Nel caso in esame, si trascurano, in prima approssimazione, gli scambi di calore attraverso le pareti del cabinet. Inoltre, le variazioni di energia cinetica ed energia potenziale sono piccole, essendo minime le variazioni di velocità e di quota dell'aria, e vengono quindi trascurate. Tipicamente piccolo e, di conseguenza, trascurabile è anche il lavoro fornito dai dispositivi di ventilazione. L'equazione di bilancio dell'energia assume pertanto la seguente forma semplificata:

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

Trascurando gli scambi di calore attraverso le pareti del cabinet, la potenza termica complessivamente fornita all'aria (positiva nelle convenzioni termodinamiche) è pari alla potenza elettrica complessivamente assorbita e dissipata dai dispositivi elettronici:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{mp}} + \dot{Q}_{\text{alia}} = 270 \text{ W}$$

La portata in massa vale:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = 0.0144 \text{ kg/s}$$

In condizioni ambiente tipiche, l'aria può essere considerata un gas perfetto. Peraltro, il processo avviene a pressione pressoché costante. La variazione di entalpia può quindi essere valutata come segue:

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT \cong c_p (T_2 - T_1)$$

La temperatura dell'aria aspirata nel cabinet è pari alla temperatura dell'aria nell'ambiente esterno:

$$T_1 = T_a = 35 \text{ °C}$$

Pertanto, la massima temperatura dell'aria all'interno cabinet, che viene raggiunta in prossimità dell'uscita, vale:

$$T_2 = T_1 + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}c_p} = 53.7 \text{ °C}$$

Si rammenta che il risultato è ottenuto trascurando gli scambi termici attraverso le pareti del cabinet.

Dati la temperatura massima dell'aria di raffreddamento (T_2) ed il dissipatore di calore con la sua resistenza termica R_d , la temperatura del microprocessore in condizioni di carico massimo può essere valutata mediante l'analogia elettrotermica (vedi Es.E.X-XII):

$$T_{mp} = T_2 + (R_c + R_d)\dot{Q}_{mp}$$

La resistenza di contatto microprocessore-dissipatore è valutabile come segue (vedi Es.E.XI):

$$R_c = \frac{R_c''}{A_{mp}} = 0.25 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Nelle condizioni considerate, la temperatura massima che il processore può raggiungere risulterebbe essere pari a

$$T_{mp} = T_2 + (R_c + R_d)\dot{Q}_{mp} = 53.7 + (0.25 + 0.4) \cdot 50 = 86.2^\circ\text{C} > T_{mp,max} = 85^\circ\text{C}$$

La soluzione di raffreddamento non sembrerebbe soddisfacente, poiché potrebbe portare il microprocessore a lavorare oltre i suoi limiti operativi. Peraltro, non si è finora presa in considerazione la potenza termica trasmessa attraverso le pareti del cabinet, che porterebbe ad una riduzione del carico termico complessivo del sistema. Tale potenza si può in prima approssimazione stimare mediante il prodotto della resistenza termica delle pareti stesse per la differenza tra la temperatura media dell'aria all'interno del cabinet e la temperatura esterna. La temperatura media dell'aria nel cabinet si assume per ipotesi pari a:

$$T_i = \frac{(T_1 + T_2)}{2} = \frac{(35 + 53.7)}{2} = 44.3^\circ\text{C}$$

In generale, la resistenza equivalente di un insieme di pareti che delimitano un vano e presentano identiche caratteristiche rispetto alla direzione normale alle loro superfici principali (materiali, spessori, coefficienti di convezione) è equivalente alla resistenza di una singola parete con area di passaggio del calore pari alla somma delle aree delle pareti dell'insieme suddetto. La superficie esterna del cabinet è pari a:

$$A_e = 2 \cdot (L_1L_2 + L_1L_3 + L_2L_3) = 1.29 \text{ m}^2$$

La resistenza convettiva esterna vale:

$$R_e = \frac{1}{h_e A_e} = 0.0858 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Il virtù del ridotto spessore delle pareti è lecito assimilare l'area della sezione di passaggio del calore per conduzione attraverso le pareti e l'area della superficie interna delle stesse all'area della superficie esterna:

$$A_p \cong A_i \cong A_e = 1.29 \text{ m}^2$$

La resistenza conduttiva delle pareti vale quindi:

$$R_p = \frac{s_p}{\lambda_p A_p} = 0.00007 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

La resistenza convettiva interna vale:

$$R_i = \frac{1}{h_i A_i} = 0.0515 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

La resistenza totale alla trasmissione del calore delle pareti è pari alla somma delle singole resistenze:

$$R = R_e + R_p + R_i = 0.137 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

In conclusione, la potenza termica trasmessa attraverso le pareti vale:

$$\dot{Q}_p = \frac{T_i - T_a}{R} = \frac{44.3 - 35}{0.137} = 67.9 \text{ W}$$

Il valore calcolato rappresenta circa il 25% della potenza termica da estrarre dal cabinet, motivo per cui il margine di sicurezza che si ottiene trascurandola può essere eccessivo. È quindi opportuno ricalcolare la potenza termica complessivamente fornita all'aria, sottraendo alla potenza termica complessivamente dissipata dai dispositivi elettronici la potenza termica scambiata attraverso le pareti del cabinet

$$\dot{Q}' = \dot{Q}_{mp} + \dot{Q}_{alia} - \dot{Q}_p = 202.1 \text{ W}$$

Pertanto, un valore un po' più accurato della massima temperatura dell'aria all'interno cabinet, che viene raggiunta in prossimità dell'uscita, è:

$$T'_2 = T_1 + \frac{\dot{Q}'}{\dot{m}c_p} = 49.0^\circ\text{C}$$

In conclusione, la temperatura massima che il processore può raggiungere è pari a

$$T'_{mp} = T'_2 + (R_c + R_d)\dot{Q}_{mp} = 49.0 + (0.25 + 0.4) \cdot 50 = 81.5^\circ\text{C} < T_{mp,max} = 85^\circ\text{C}$$

Se si tiene conto degli scambi termici attraverso le pareti, la soluzione di raffreddamento si rivela soddisfacente, anche se porta il microprocessore a lavorare in condizioni abbastanza prossime al limite operativo.

– Commenti

Il calcolo può essere ulteriormente perfezionato ricalcolando la temperatura media dell'aria all'interno del cabinet sulla base della nuova temperatura calcolata in uscita:

$$T'_i = \frac{(T_1 + T'_2)}{2} = \frac{(35 + 49.0)}{2} = 42.0^\circ\text{C}$$

Sulla base di tale temperatura si possono quindi ricalcolare la potenza termica trasmessa attraverso le pareti e la potenza termica complessivamente fornita all'aria:

$$\dot{Q}'_p = \frac{T'_i - T_a}{R} = \frac{42.0 - 35}{0.137} = 50.8 \text{ W}$$

$$\dot{Q}'' = \dot{Q}_{mp} + \dot{Q}_{alia} - \dot{Q}'_p = 219.2 \text{ W}$$

Pertanto, un valore ancora più accurato della massima temperatura dell'aria all'interno cabinet, che viene sempre raggiunta in prossimità dell'uscita, è:

$$T''_2 = T_1 + \frac{\dot{Q}''}{\dot{m}c_p} = 50.2^\circ\text{C}$$

In conclusione, la temperatura massima che il processore può raggiungere è pari a

$$T''_{mp} = T''_2 + (R_c + R_d)\dot{Q}_{mp} = 50.2 + (0.25 + 0.4) \cdot 50 = 82.7^\circ\text{C}$$

La seconda iterazione ha portato ad una modifica del risultato precedentemente ottenuto non trascurabile, ma tuttavia molto più ridotta rispetto alla prima iterazione. Ogni successiva iterazione porterà a correzioni sempre più modeste, fino a raggiungere asintoticamente il valore "esatto" (nei limiti delle approssimazioni effettuate). Infatti, una terza iterazione restituisce:

$$T'' = T_i = \frac{(T_1 + T_2'')}{2} = \frac{(35 + 50.2)}{2} = 42.6^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_p'' = \frac{T_i'' - T_a}{R} = \frac{42.6 - 35}{0.137} = 55.1 \text{ W}$$

$$\dot{Q}''' = \dot{Q}_{mp} + \dot{Q}_{alia} - \dot{Q}_p'' = 214.9 \text{ W}$$

$$T_2''' = T_1 + \frac{\dot{Q}'''}{\dot{m}c_p} = 49.9^\circ\text{C}$$

$$T_{mp}''' = T_2''' + (R_c + R_d)\dot{Q}_{mp} = 49.9 + (0.25 + 0.4) \cdot 50 = 82.4^\circ\text{C}$$

Z.VIII. Valutazione della portata di aerazione

– Problema

In un cabinet per apparecchiature elettroniche sono inseriti un microprocessore che dissipa fino a 28 W ed apparecchiature elettriche ed elettroniche di vario tipo che dissipano complessivamente altri 150 W. Il microprocessore è caratterizzato da temperatura massima ammissibile 90°C e superficie di scambio 185 mm^2 , ed è raffreddato mediante un dissipatore di calore a superficie alettata con resistenza termica $0.3^\circ\text{C}/\text{W}$ e resistenza di contatto $0.2 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ tra dissipatore e microprocessore, riferita all'unità di superficie. Al solo fine della stima degli scambi termici attraverso le pareti, che non vanno quindi considerate adiabatiche, si valuti la temperatura media dell'aria entro il cabinet come la media aritmetica delle temperature in ingresso e in uscita. Il cabinet presenta dimensioni esterne $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 375 \text{ mm}$, spessore di parete 2.5 mm e conduttività termica di parete $1.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; tutte le superfici interne ed esterne sono libere ed i coefficienti di adduzione interno ed esterno valgono, rispettivamente, $12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ e $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Stimare la minima portata volumica (in m^3/h) che i dispositivi d'aerazione interna del cabinet devono assicurare affinché il processore si mantenga sempre ad una temperatura inferiore di almeno 15°C al valore massimo ammissibile.

Si assumano per l'aria una densità pari a $1.08 \text{ kg}/\text{m}^3$, un calore specifico a pressione costante pari a $1.008 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, ed una temperatura nell'ambiente esterno di 40°C .

– Dati

$$\dot{Q}_{mp} = 28 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{alia} = 150 \text{ W}$$

$$T_{mp,max} = 90^\circ\text{C}$$

$$A_{mp} = 185 \text{ mm}^2 = 1.85 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$R_d = 0.3^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$R_c'' = 0.2 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$\rho = 1.08 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$c = 1.008 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) = 1008 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$T_{amb} = 40^\circ\text{C}$$

$$L_1 = 500 \text{ mm} = 0.500 \text{ m}$$

$$L_2 = 500 \text{ mm} = 0.500 \text{ m}$$

$$L_3 = 375 \text{ mm} = 0.375 \text{ m}$$

$$s_p = 2.5 \text{ mm} = 0.0015 \text{ m}$$

$$\lambda_p = 1.2 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$$

$$h_i = 12 \text{ W/(m}^2\cdot\text{°C)}$$

$$h_e = 10 \text{ W/(m}^2\cdot\text{°C)}$$

$$\Delta T_{mp,max} = 15\text{°C}$$

– Determinare

Minima portata volumica richiesta, in m³/h

– Ipotesi

Aria gas ideale, coefficienti di convezione omogenei sulle pareti del cabinet, superfici interne ed esterne completamente libere, temperature interna $T_i = (T_1 + T_2)/2$.

– Soluzione

Il problema si risolve nel valutare la massima temperatura che l'aria può raggiungere nel cabinet e, a partire da questa, la minima portata richiesta al dispositivo di ventilazione.

Il cabinet costituisce un sistema aperto con un ingresso ed una uscita, soggetto ad un flusso stazionario di fluido. La massima temperatura al suo interno può essere quindi stimata a partire dall'equazione di bilancio dell'energia (vedi Es.D.I-II):

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right]$$

Nel caso in esame, le variazioni di energia cinetica ed energia potenziale sono piccole, essendo minime le variazioni di velocità e di quota dell'aria, e vengono quindi trascurate. Tipicamente piccolo e, di conseguenza, trascurabile è anche il lavoro fornito dai dispositivi di ventilazione. L'equazione di bilancio dell'energia assume pertanto la seguente forma semplificata:

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

La potenza termica complessivamente fornita all'aria si ottiene sottraendo alla potenza elettrica complessivamente assorbita, e dissipata sotto forma di calore, dai dispositivi elettronici quella scambiata attraverso le pareti del cabinet (che, in questo caso, non si vuole trascurare).

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{mp} + \dot{Q}_{alia} - Q_p$$

Per arrivare alla stima della potenza termica scambiata attraverso le pareti, incognita, sono necessari alcuni passaggi preparatori.

Dato il margine di sicurezza $\Delta T_{mp,max}$ che si richiede rispetto alla massima temperatura ammissibile del processore, $T_{mp,max}$, la massima temperatura a cui si vuole esporre il processore stesso è pari a:

$$T_{mp} = T_{mp,max} - \Delta T_{mp,max} = 90 - 15 = 75\text{°C}$$

A partire da tale valore, la massima temperatura che, in condizioni di carico massimo, non deve essere superata dall'aria che lambisce il processore è valutabile mediante l'analogia elettrotermica (vedi Es.E.X-XII):

$$T_{mp} = T_{aria,max} + (R_c + R_d)\dot{Q}_{mp}$$

Va rammentato che la temperatura massima dell'aria all'interno del cabinet si raggiunge tipicamente in corrispondenza delle aperture di espulsione, in prossimità delle quali è opportuno supporre collocato, in favore di sicurezza, il microprocessore. La massima temperatura che non deve essere superata dall'aria che lambisce il processore coincide quindi con la temperatura dell'aria espulsa dal cabinet.

La resistenza termica R_d del dissipatore è nota, mentre la resistenza di contatto microprocessore-dissipatore è valutabile come segue (vedi Es.E.XI):

$$R_c = \frac{R_c''}{A_{mp}} = 0.108 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Pertanto, la temperatura dell'aria in efflusso dal cabinet, T_2 , dovrà essere pari a:

$$T_2 = T_{aria,max} = T_{mp} - (R_c + R_d)\dot{Q}_{mp} = 75 - (0.108 + 0.3) \cdot 28 = 63.6^\circ\text{C}$$

La temperatura dell'aria aspirata nel cabinet è invece pari alla temperatura dell'aria nell'ambiente esterno:

$$T_1 = T_a = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Per valutare il carico termico del sistema, è necessario stimare la potenza termica trasmessa attraverso le pareti del cabinet. Tale potenza si può in prima approssimazione calcolare come il prodotto della resistenza termica delle pareti stesse per la differenza tra la temperatura media dell'aria nel cabinet e la temperatura esterna. La temperatura media dell'aria nel cabinet si assume per ipotesi pari alla media aritmetica delle temperature in ingresso e in uscita:

$$T_i = \frac{(T_1 + T_2)}{2} = \frac{(40 + 63.6)}{2} = 51.8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

In generale, la resistenza equivalente di un insieme di pareti che delimitano un vano e presentano identiche caratteristiche rispetto alla direzione normale alle loro superfici principali (materiali, spessori, coefficienti di convezione) è equivalente alla resistenza di una singola parete con area di passaggio del calore pari alla somma delle aree delle pareti dell'insieme suddetto. La superficie esterna del cabinet è pari a:

$$A_e = 2 \cdot (L_1L_2 + L_1L_3 + L_2L_3) = 1.25 \text{ m}^2$$

La resistenza adduttiva esterna vale:

$$R_e = \frac{1}{h_e A_e} = 0.0667 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Il virtù del ridotto spessore delle pareti, è lecito assimilare all'area della superficie esterna delle pareti stesse le aree della sezione di passaggio del calore per conduzione e della superficie interna:

$$A_p \cong A_i \cong A_e = 1.25 \text{ m}^2$$

La resistenza conduttiva delle pareti vale quindi:

$$R_p = \frac{s_p}{\lambda_p A_p} = 0.0017 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

La resistenza adduttiva interna vale:

$$R_i = \frac{1}{h_i A_i} = 0.0800 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

La resistenza totale alla trasmissione del calore delle pareti è pari alla somma delle singole resistenze:

$$R = R_e + R_p + R_i = 0.148 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

La potenza termica trasmessa attraverso le pareti vale, quindi:

$$\dot{Q}_p = \frac{T_i - T_a}{R} = \frac{51.8 - 40}{0.148} = 79.5 \text{ W}$$

In definitiva, la potenza termica complessivamente fornita all'aria vale:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{mp} + \dot{Q}_{alia} - \dot{Q}_p = 28 + 150 - 79.5 = 98.5 \text{ W}$$

Per stimare la portata minima dell'aria di ventilazione, si può considerare che il processo avviene a pressione pressoché costante, o che l'aria, in condizioni ambientali tipiche, è assimilabile ad un gas perfetto. Da ciò si ottiene:

$$\dot{m}(h_2 - h_1) = \dot{m} \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT \cong \dot{m} c_p (T_2 - T_1) = \dot{Q}$$

In conclusione, la portata minima dell'aria di ventilazione vale, in massa,

$$\dot{m} \cong \frac{\dot{Q}}{c_p (T_2 - T_1)} = \frac{98.5}{1008 \cdot (63.6 - 40)} = 0.00415 \text{ kg/s}$$

e, in volume,

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = 0.00384 \text{ m}^3/\text{s} = 13.8 \text{ m}^3/\text{h}$$

– Commenti

La resistenza alla conduzione delle pareti, in questo caso realizzate con un materiale non metallico (il valore della conduttività termica dato è comparabile a quello tipico di materiali plastici rigidi), è ancora una volta piccola, ma non del tutto trascurabile.

Il coefficiente di adduzione congloba gli effetti convettivi e radiativi.

Z.IX. Verifica termica dei componenti di un sistema elettronico (2)

– Problema

Un computer server integra due processori, che dissipano fino a 67 W ciascuno, nonché apparecchiature elettriche ed elettroniche di vario tipo, che dissipano complessivamente altri 300 W. Ognuno dei processori presenta temperatura massima ammissibile 70°C e superficie di scambio termico 210 mm². Il loro raffreddamento è assicurato da dissipatori di calore a superficie alettata che presentano resistenza termica 0.30°C/W. La resistenza di contatto dissipatore/processore, riferita all'unità di superficie, è pari a 0.4 cm²·°C/W. Il dispositivo d'aerazione interna del server assicura una portata di 5 m³/min d'aria. La temperatura nel locale in cui il server è installato è mantenuta stabilmente tra 22°C e 36°C. Si assumano per l'aria densità pari a 1.15 kg/m³ e calore specifico a pressione costante pari a 1007 J/(kg·°C). Stimare la massima temperatura raggiunta dai processori.

– Dati

$$N_{\text{CPU}} = 2$$

$$\dot{Q}_{\text{CPU}} = 67 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{alia}} = 300 \text{ W}$$

$$T_{\text{max,CPU}} = 70^\circ\text{C}$$

$$A_{\text{CPU}} = 210 \text{ mm}^2 = 2.10 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$R_{\text{d,CPU}} = 0.30^\circ\text{C/W}$$

$$R''_{\text{c,CPU}} = 0.4 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C/W} = 0.00004 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$$

$$\dot{V} = 5 \text{ m}^3/\text{min} = 0.083 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$T_{\text{amb,min}} = 22^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{amb,max}} = 36^\circ\text{C}$$

$$\rho = 1.16 \text{ kg/m}^3$$

$$c = 1006 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$$

– Determinare

Massima temperatura dei processori

– Ipotesi

Aria gas ideale

– Soluzione

Il problema si risolve nel valutare la massima temperatura che l'aria può raggiungere nel cabinet e, a partire da questa, la massima temperatura raggiungibile dai processori.

Il cabinet costituisce un sistema aperto con un ingresso ed una uscita, soggetto ad un flusso stazionario di fluido. La massima temperatura al suo interno può essere quindi stimata a partire dall'equazione di bilancio dell'energia (vedi Es.D.I-II):

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right]$$

Nel caso in esame, si possono trascurare (in favore di sicurezza) gli scambi di calore attraverso le pareti del cabinet. Inoltre, le variazioni d'energia cinetica ed energia potenziale sono piccole, essendo minime le variazioni di velocità e di quota dell'aria, e possono quindi essere anch'esse trascurate. Tipicamente piccolo e, di conseguenza, trascurabile (oppure accumulabile nelle dissipazioni elettriche di vario tipo all'interno del cabinet) è anche il lavoro fornito dai dispositivi di ventilazione. L'equazione di bilancio dell'energia assume pertanto la seguente forma semplificata:

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

La potenza termica complessivamente dissipata dai dispositivi elettronici e fornita all'aria (positiva nelle convenzioni termodinamiche) è pari alla potenza elettrica complessivamente assorbita:

$$\dot{Q} = N_{\text{CPU}} \dot{Q}_{\text{CPU}} + \dot{Q}_{\text{alia}} = 434 \text{ W}$$

La portata in massa vale:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = 0.0958 \text{ kg/s}$$

In condizioni ambiente tipiche, l'aria può essere considerata un gas perfetto. Peraltro, il processo avviene a pressione pressoché costante. La variazione d'entalpia può quindi essere valutata come segue:

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT \cong c_p (T_2 - T_1)$$

La temperatura dell'aria nell'ambiente esterno è compresa tra 22°C e 36°C. Le condizioni più gravose si avranno, ovviamente, quando la temperatura ambiente è massima, da cui:

$$T_1 = 36^\circ\text{C}$$

Pertanto, la massima temperatura dell'aria all'interno cabinet, che viene raggiunta in prossimità dell'uscita, vale:

$$T_2 = T_1 + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}c_p} = 40.5^\circ\text{C}$$

La resistenza di contatto tra un processore ed il relativo dissipatore è valutabile come segue (vedi Es.E.XI):

$$R_{c,\text{CPU}} = \frac{R''_{c,\text{CPU}}}{A_{\text{CPU}}} = 0.19 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Data la temperatura massima dell'aria di raffreddamento (T_2), la temperatura di un processore in condizioni di carico massimo può essere valutata mediante l'analogia elettrotermica (vedi Es.E.X-XII):

$$T_{\text{CPU}} = T_2 + (R_{c,\text{CPU}} + R_{d,\text{CPU}})\dot{Q}_{\text{CPU}} = 73.4 \text{ } ^\circ\text{C} > T_{\text{max,CPU}} = 70^\circ\text{C}$$

Evidentemente, la temperatura è superiore a quella massima ammissibile, perciò possono verificarsi condizioni in cui i due processori non lavorano in sicurezza e possono incorrere in malfunzionamenti o danneggiamenti.

– Commenti

Essendo i processori ed i loro sistemi di dissipazione identici, la verifica della massima temperatura operativa dei processori, a partire dalla massima temperatura raggiunta dall'aria nel sistema, può essere svolta facendo riferimento ad un solo processore.

La soluzione di raffreddamento non è in teoria soddisfacente, ma di poco. Poiché si sono applicate svariate semplificazioni in favore di sicurezza come, ad esempio, il considerare le pareti del cabinet adiabatiche, o i processori posizionati in prossimità delle aperture di estrazione dell'aria, una verifica più dettagliata potrebbe dimostrare che la soluzione di raffreddamento è in realtà accettabile.

Z.X. Verifica termica dei componenti di un sistema elettronico (3)

– Problema

Un computer integra un processore che dissipa fino a 39 W, nonché apparecchiature elettriche ed elettroniche di vario tipo che dissipano complessivamente altri 200 W. Il processore presenta temperatura massima ammissibile 65°C e superficie di scambio termico 400 mm², il suo raffreddamento è assicurato da un dissipatore di calore a superficie alettata con resistenza termica 0.6°C/W; la resistenza di contatto dissipatore/processore, riferita all'unità di

superficie, è pari a $0.5 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$. Il dispositivo d'aerazione interna del computer assicura una portata di $180 \text{ m}^3/\text{ora}$ d'aria. Il locale in cui il computer è installato, che presenta volume interno $4.00 \times 4.00 \times 2.80 \text{ m}^3$, non è areato ed è completamente circondato da ambienti a temperatura 25°C ; le pareti presentano spessore 12 cm e conduttività termica $0.45 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$; il coefficiente di scambio termico medio sulle superfici, interne e esterne, di tutte le pareti si può stimare pari a $8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Si assumano per l'aria densità pari a $1.15 \text{ kg}/\text{m}^3$ e calore specifico a pressione costante pari a $1007 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$.

Calcolare la massima temperatura dell'aria nel locale e la massima temperatura del processore.

– Dati

$$\dot{Q}_{\text{CPU}} = 39 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{alia}} = 200 \text{ W}$$

$$T_{\text{max,CPU}} = 65^\circ\text{C}$$

$$A_{\text{CPU}} = 400 \text{ mm}^2 = 2.10 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$R_{\text{d,CPU}} = 0.6^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$R''_{\text{c,CPU}} = 0.5 \text{ cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W} = 0.00005 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$\dot{V} = 180 \text{ m}^3/\text{ora} = 0.050 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$T_e = 25^\circ\text{C}$$

$$L_1 = 4.00 \text{ m}$$

$$L_2 = 4.00 \text{ m}$$

$$L_3 = 2.80 \text{ m}$$

$$s_p = 12 \text{ cm} = 0.12 \text{ m}$$

$$\lambda_p = 0.45 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$h = h_i = h_e = 8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\rho = 1.15 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$c = 1007 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$$

– Determinare

Massima temperatura dell'aria nel locale, massima temperatura raggiungibile dal processore

– Ipotesi

Aria gas ideale, locale completamente circondato da altri ambienti, temperatura dell'aria nel locale uniforme, proprietà del materiale di parete uniformi, coefficienti di convezione uniformi sulle superfici, condizioni stazionarie.

– Soluzione

Il problema si risolve nel valutare la massima temperatura che l'aria può raggiungere nel locale, quindi la massima temperatura che l'aria può raggiungere all'interno del cabinet e, infine, la massima temperatura raggiungibile dal processore.

Il locale costituisce un sistema chiuso, che può scambiare calore attraverso le sue pareti. In condizioni stazionarie, tutta la potenza termica prodotta dal computer (nell'ipotesi che questo sia il solo dispositivo presente soggetto a dissipazione termica) deve essere trasferita all'esterno.

$$\frac{(T_i - T_e)}{R} = \dot{Q} = \dot{Q}_{\text{CPU}} + \dot{Q}_{\text{alia}} = 239 \text{ W}$$

in cui R è la resistenza complessiva delle pareti alla trasmissione del calore.

Se si osserva in sezione una qualunque delle pareti del locale, si può chiaramente vedere che questa non presenta in realtà una sezione di passaggio del calore uniforme rispetto allo spessore (vedi Es.E.VI). Il problema della trasmissione del calore è quindi multidimensionale. Ci si può tuttavia ricondurre al caso monodimensionale scegliendo, per ogni parete, un'opportuna area di riferimento, che si assumerà poi costante rispetto allo spessore.

In prima istanza, l'area di riferimento si potrebbe assumere pari all'area media della sezione di passaggio del calore, ovvero all'area della sezione di passaggio in corrispondenza della metà dello spessore. Tuttavia, prendendo a riferimento l'area della superficie interna, si ottiene un valore più elevato della resistenza alla trasmissione del calore delle pareti (che, in un problema come quello in esame, si vorrebbe minimizzare), operando così in favore di sicurezza.

In generale, la resistenza equivalente di un insieme di pareti che delimitano un vano e presentano identiche caratteristiche rispetto alla direzione normale alle loro superfici principali (materiali, spessori, coefficienti di convezione) è uguale alla resistenza di una singola parete con area di passaggio del calore pari alla somma delle aree delle pareti dell'insieme suddetto (vedi Es.E.VI).

$$A = 2 \cdot (L_1 L_2 + L_1 L_3 + L_2 L_3) = 2 \cdot (4.00 \cdot 4.00 + 4.00 \cdot 2.80 + 4.00 \cdot 2.80) = 76.8 \text{ m}^2$$

La resistenza termica complessiva delle pareti del locale considerato sarà quindi pari a:

$$R = \frac{1}{A} \left(\frac{1}{h_i} + \frac{s_p}{\lambda_p} + \frac{1}{h_e} \right) = 0.00673 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

In definitiva, la massima temperatura raggiungibile dall'aria nel locale vale:

$$T_i = T_e + R\dot{Q} = 25 + 0.00673 \cdot 239 = 26.6^\circ\text{C}$$

Il cabinet costituisce un sistema aperto con un ingresso ed una uscita, soggetto ad un flusso stazionario di fluido. La massima temperatura al suo interno può essere quindi stimata a partire dall'equazione di bilancio dell'energia (vedi Es.D.I-II):

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m} \left[h_2 - h_1 + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right]$$

Nel caso in esame, si possono trascurare (in favore di sicurezza) gli scambi di calore attraverso le pareti del cabinet. Inoltre, le variazioni d'energia cinetica ed energia potenziale sono piccole, essendo minime le variazioni di velocità e di quota dell'aria, e possono quindi essere anch'esse trascurate. Tipicamente piccolo e, di conseguenza, trascurabile (oppure accumulabile nelle dissipazioni elettriche di vario tipo all'interno del cabinet) è anche il lavoro fornito dai dispositivi di ventilazione. L'equazione di bilancio dell'energia assume pertanto la seguente forma semplificata:

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

in cui la potenza termica complessivamente dissipata dai dispositivi elettronici e fornita all'aria (positiva nelle convenzioni termodinamiche) è pari alla potenza elettrica complessivamente assorbita, calcolata in precedenza.

La portata in massa di aria vale:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = 0.0575 \text{ kg/s}$$

In condizioni ambiente tipiche, l'aria può essere considerata un gas perfetto. Peraltro, il processo avviene a pressione pressoché costante. La variazione d'entalpia può quindi essere valutata come segue:

$$h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT \cong c_p (T_2 - T_1)$$

La temperatura dell'aria nell'ambiente esterno è quella valutata in precedenza per il locale:

$$T_1 = T_i = 26.6^\circ\text{C}$$

Pertanto, la massima temperatura dell'aria all'interno cabinet, che viene raggiunta in prossimità dell'uscita, vale:

$$T_2 = T_1 + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}c_p} = 30.7^\circ\text{C}$$

La resistenza di contatto tra processore e relativo dissipatore è valutabile come segue (vedi Es.E.XI):

$$R_{c,CPU} = \frac{R''_{c,CPU}}{A_{CPU}} = 0.13 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

Data la temperatura massima dell'aria di raffreddamento (T_2), la temperatura del processore in condizioni di carico massimo può essere valutata mediante l'analogia elettrotermica (vedi Es.E.X-XII):

$$T_{CPU} = T_2 + (R_{c,CPU} + R_{d,CPU})\dot{Q}_{CPU} = 59.0 \text{ }^\circ\text{C} < T_{max,CPU} = 65^\circ\text{C}$$

– Commenti

Se il locale fosse stato molto più piccolo, ad esempio $1.50 \times 1.00 \times 2.20 \text{ m}^2$, si sarebbe avuto:

$$A = 2 \cdot (L_1L_2 + L_1L_3 + L_2L_3) = 2 \cdot (1.50 \cdot 1.00 + 1.50 \cdot 2.20 + 1.00 \cdot 2.20) = 14 \text{ m}^2$$

$$R = \frac{1}{A} \left(\frac{1}{h_i} + \frac{s_p}{\lambda_p} + \frac{1}{h_e} \right) = 0.0369 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$T_1 \equiv T_i = T_e + R\dot{Q} = 25 + 0.0369 \cdot 239 = 33.8^\circ\text{C}$$

$$T_2 = T_1 + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}c_p} = 37.9^\circ\text{C}$$

$$T_{CPU} = T_2 + (R_{c,CPU} + R_{d,CPU})\dot{Q}_{CPU} = 66.2 \text{ }^\circ\text{C} > T_{max,CPU} = 65^\circ\text{C}$$

Chiudere un computer in un ripostiglio non ventilato può riservare spiacevoli sorprese.