

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ**

KATEDRA TECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ BUDOV



STANOVENÍ NEJISTOT

PŘÍLOHA 1

Vypracovala:

Bc. Alžběta Svobodová

Vedoucí práce:

Ing. Daniel Adamovský, Ph.D.

Akademický rok:

2021/2022

Obsah

1	Výpočet nejistoty měření	3
1.1	Nejistota teplotního poměru.....	3
1.1.1	Rychlost	3
1.1.2	Objemový průtok.....	4
1.1.3	Teplota.....	4
1.1.4	Hustota	5
1.1.5	Hmotnostní průtok	6
1.1.6	Výsledná nejistota teplotního poměru.....	7
1.2	Nejistota vlhkostního poměru	9
1.2.1	Relativní vlhkost	9
1.2.2	Měrná vlhkost.....	9
1.2.3	Výsledná nejistota vlhkostního poměru.....	10
1.3	Vnitřní netěsnost.....	13
1.3.1	Objem vzduchu.....	13
1.3.2	Objemový průtok.....	13
2	Nejistoty měření	15
2.1	Měření S1	15
2.2	Měření S2	16
2.3	Měření S3	18
2.4	Měření S4	20
2.5	Měření S5	22
2.6	Měření Z3	23
3	Reference.....	25

1 Výpočet nejistoty měření

Žádné měření není v praxi absolutně přesné, proto je nutné provést výpočet nejistot měření. Nejistotou měření se rozumí interval hodnot okolo naměřené výsledné hodnoty, kde je možné očekávat skutečnou hodnotu. Výpočet nejistot byl proveden podle dokumentu Stanovení nejistot akreditovaných zkoušek. Postup pro výpočet nejistot pro tento typ měření byl odvozen z norem ČSN EN 308 [1] a ČSN EN 16211 [2]. Vzorový výpočet bude proveden pro hodnoty z měření S1, odváděný proud vzduchu I1. Všechny další hodnoty jsou uvedeny v tabulce na konci dokumentu.

Tabulka 1: Naměřené hodnoty v měření S1

$t_i = 22,2 \text{ °C}; p_a = 97,8 \text{ hPa}$	Měření S1			
	Proud I		Proud E	
Označení proudu vzduchu	I1	I2	E1	E2
rychlost proudění [m/s]	2,62	2,58	2,65	2,53
teplota vzduchu [°C]	25,21	12,44	6,11	18,04
relativní vlhkost vzduchu [%]	19,1 %	41,1 %	53,1 %	25,6 %

1.1 Nejistota teplotního poměru

1.1.1 Rychlost

Objemový průtoky byl zjišťován výpočtem z naměřené rychlosti proudění pomocí vrtulkového anemometru Schiltknecht MiniAir64 Micro 0,6 – 20,0 m/s a Schiltknecht MiniAir64 Mini 0,4 – 20 m/s. Výrobce udává standardní nejistotu přístroje pro anemometr označený Micro rovnu $\pm 3 \%$ a pro Mini $\pm 1,5 \%$. Vzhledem k tomu, že je výrobcem nejistota udávána v procentech, je potřeba ji vypočítat pro každé jedno měření. Následující výpočet používá hodnoty z měření S1, rychlost w_{I1} .

Standardní nejistota přístroje u_1 :

$$u_{1,wI1} = 3 \%$$

$$u_{1,wI1} = \mathbf{0,080 \text{ m/s}}$$

Standardní nejistota metodiky u_2 :

Pro každou metodu měření rychlosti norma ČSN EN 16211 [2] udává i standardní nejistotu. Pro měření rychlosti byla v tomto případě využita metoda bodového měření vrtulkovým anemometrem v kruhovém průřezu ve vodorovné a svislé ose.

$$u_{2,wi} = 4 \%$$

$$u_{2,wI1} = \mathbf{0,106 \text{ m/s}}$$

Standardní nejistota odečtu u_3 :

Pro digitální přístroje je v normě uveden postup výpočtu standardní nejistoty odečtu dle rozlišení přístroje pro odečet. Pro sběr hodnot byl použit datalogger Ahlborn Almemo 710 s rozlišením pro odečet rychlosti 0,01 m/s.

$$u_{3,wi} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot \text{rozlišení} \quad (1)$$

$$u_{3,wE1} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot 0,01 = \mathbf{0,003 \text{ m/s}}$$

Standardní nejistota měření u_m :

$$u_{m,wi} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \quad (2)$$

$$u_{m,wE} = \sqrt{0,080^2 + 0,106^2 + 0,003^2} = \mathbf{0,13 \text{ m/s}}$$

1.1.2 Objemový průtok

Objemový průtok je pak z rychlosti vypočten dle rovnice (7) v hlavním dokumentu, kde je jedinou další proměnnou vnitřní průměr potrubí. Nejistota tohoto rozměru bude zanedbána.

Výsledná nejistota objemového průtoku:

$$u_{2,v} = \sqrt{A_{1,w}^2 \cdot u_{m,w}^2} \quad (3)$$

Konstanta $A_{1,w}$ je vypočtena jako parciální derivace vzorce pro výpočet objemového průtoku podle rychlosti:

$$A_{2,w} = \frac{\partial V}{\partial w} = S \quad (4)$$

$$A_{2,w} = \pi \cdot \frac{0,1^2}{4} = 0,0079 \text{ m}^2$$

$$u_{2,v} = \sqrt{0,0079^2 \cdot 0,13^2} = \mathbf{0,001 \text{ m}^3/\text{s}}$$

1.1.3 Teplota

Pro každý proud vzduchu se výsledná kombinovaná nejistota vypočítá z nejistot typu A a typu B. Pro měření teplot byly použity kombinované snímače teploty a relativní vlhkosti Ahlborn Almemo FHA646-E2C. Pro tyto senzory udává kalibrační list přesnost $\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ pro teploty $0 \text{ }^\circ\text{C}$ až $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Nejistoty budou vypočteny pro teplotu I1 v měření S1.

Standardní nejistota typu A:

$$u_{3A,t_i} = k_x \cdot \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{j=1}^n (t_j - \bar{t})^2} \quad (5)$$

kde k_x je opravný koeficient, t_j je j -tá teplota, \bar{t} je aritmetický průměr teplot a n je počet naměřených hodnot. Protože je počet naměřených hodnot vyšší než 10, bude $k_x = 1$.

$$u_{3A,t1} = 1 \cdot \sqrt{\frac{1}{30 \cdot (30-1)} \cdot 1,45} = \mathbf{0,041 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Standardní nejistota typu B:

$$u_{3B,t_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^n u_{3,t_j}^2} \quad (6)$$

$$u_{3,t_j} = \frac{\Delta z_{max,t_j}}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

kde n je počet použitých čidel v měřeném proudu vzduchu a $\Delta z_{max,t_j}$ je standardní nejistota měřidla uváděná výrobcem. Pro měření bylo v daném místě použito jedno čidlo.

$$u_{3,t11} = \frac{0,3}{\sqrt{3}} = \mathbf{0,173 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$u_{3B,t11} = \sqrt{0,173^2} = \mathbf{0,173 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Kombinovaná nejistota průměrných teplot:

$$u_{3,t11} = \sqrt{u_{3A,t11}^2 + u_{3B,t11}^2} \quad (8)$$

$$u_{3,t11} = \sqrt{0,041^2 + 0,173^2} = \mathbf{0,18 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

1.1.4 Hustota

Hustota vzduchu byla vypočítána podle následující rovnice vycházející ze stavové rovnice vlhkého vzduchu [3]:

$$\rho_a = \frac{1,316 \cdot 10^{-3}}{T} \cdot (2,65 \cdot p + \varphi \cdot p''_{vp}) \quad (9)$$

kde T [K] je termodynamická teplota, p [Pa] je celkový tlak vlhkého vzduchu, φ [%] je relativní vlhkost vzduchu a p''_{vp} [Pa] je parciální tlak syté páry.

$$\rho_{a,11} = \frac{1,316 \cdot 10^{-3}}{(25,21 + 273,15)} \cdot (2,65 \cdot 97\,800 + 0,191 \cdot 3208,9) = \mathbf{1,146 \text{ kg/m}^3}$$

Výsledná nejistota stanovení hustoty vzduchu:

$$u_{4,r} = \sqrt{A_{1,t}^2 \cdot u_{3,t}^2 + A_{1,atm}^2 \cdot u_{1,atm}^2} \quad (10)$$

Konstanta $A_{1,t}$ je vypočtena jako parciální derivace hustoty vzduchu podle teploty:

$$A_{4,t} = \frac{\partial \rho_a}{\partial t} = -\frac{1,316 \cdot 10^{-3}}{T^2} \cdot (2,65 \cdot p + \varphi \cdot p''_{vp}) \quad (11)$$

Konstanta $A_{1,atm}$ je vypočtena jako parciální derivace hustoty vzduchu podle barometrického tlaku:

$$A_{4,atm} = \frac{\partial \rho_a}{\partial p} = \frac{3,4875 \cdot 10^{-3}}{T} \quad (12)$$

Barometrický tlak byl odečten na meteostanici nacházející se na střeše UCEEBu. Odchylna odečtu barometrického tlaku bude zanedbána.

$$A_{4,tI1} = -\frac{1,316 \cdot 10^{-3}}{(25,21 + 273,15)^2} \cdot (2,65 \cdot 97800 + 0,191 \cdot 3208,9) = -\mathbf{0,0038 \text{ kg/m}^3}$$

$$u_{4,rI} = \sqrt{0,07^2 \cdot (-0,0038)^2} = \mathbf{0,0007 \text{ kg/m}^3}$$

1.1.5 Hmotnostní průtok

Výsledná nejistota hmotnostního průtoku se vypočítá:

$$u_5 = \sqrt{A_{5,V}^2 \cdot u_{2,V}^2 + A_{5,r}^2 \cdot u_{4,r}^2} \quad (13)$$

Konstanta $A_{5,V}$ se stanoví jako parciální derivace hmotnostního průtoku podle objemového průtoku:

$$A_{5,V} = \frac{\partial M}{\partial V} = \frac{1}{\rho_a} \quad (14)$$

$$A_{5,V} = \frac{1}{1,146} = \mathbf{0,873}$$

Konstanta $A_{1,r}$ se stanoví jako parciální derivace hmotnostního průtoku podle hustoty vzduchu:

$$A_{5,r} = \frac{\partial M}{\partial \rho_a} = -\frac{V}{\rho_a^2} \quad (15)$$

$$A_{5,r} = -\frac{74,08/3600}{1,146^2} = -\mathbf{0,0157}$$

$$u_5 = \sqrt{0,875^2 \cdot 0,001^2 + (-0,0157)^2 \cdot 0,0007^2} = \mathbf{0,00091 \text{ kg/s}}$$

1.1.6 Výsledná nejistota teplotního poměru

Teplotní poměr byl stanoven podle rovnice [1]:

$$\Phi = \frac{t_{E2} - t_{E1}}{t_{I1} - t_{E1}} \quad (16)$$

Výsledná nejistota teplotního poměru:

$$u_{6,t} = \sqrt{A_{tI1}^2 \cdot u_{3,tI1}^2 + A_{tE1}^2 \cdot u_{3,tE1}^2 + A_{tE2}^2 \cdot u_{3,tE2}^2 + A_{m,e}^2 \cdot u_{5,e}^2 + A_{m,i}^2 \cdot u_{5,i}^2} \quad (17)$$

Konstanty A byly stanoveny z následujícího vztahu pro sdílení citelného tepla:

$$\Phi = \frac{m_e \cdot c_{pe} \cdot (t_{E2} - t_{E1})}{\min(m_e \cdot c_{pe}; m_i \cdot c_{pi}) \cdot (t_{I1} - t_{E1})} \quad (18)$$

Konstanta A_{tI1} se stanoví jako parciální derivace teplotního poměru podle teploty vzduchu I1:

$$A_{tI1} = \frac{\partial \Phi}{\partial t_{I1}} = \frac{-\min(m_e \cdot c_{pe}; m_i \cdot c_{pi}) \cdot [m_e \cdot c_{pe} \cdot (t_{E2} - t_{E1})]}{(\min(m_e \cdot c_{pe}; m_i \cdot c_{pi}))^2 \cdot (t_{I1} - t_{E1})^2} \quad (19)$$

$$\min(m_e \cdot c_{pe}; m_i \cdot c_{pi}) = m_i \cdot c_{pi} = 23,815 \text{ J}/(\text{s} \cdot \text{K})$$

$$A_{tI1} = \frac{-23,762 \cdot [0,0255 \cdot 1005 \cdot (18,04 - 6,11)]}{(23,815)^2 \cdot (25,21 - 6,11)^2} = -0,034$$

Konstanta A_{tE1} se stanoví jako parciální derivace teplotního poměru podle teploty vzduchu E1:

$$A_{tE1} = \frac{\partial \Phi}{\partial t_{E1}} = \frac{m_e \cdot c_{pe} \cdot (t_{E2} - t_{E1})}{\min(m_e \cdot c_{pe}; m_i \cdot c_{pi}) \cdot (t_{I1} - t_{E1})^2} \quad (20)$$

$$A_{tE1} = \frac{0,0255 \cdot 1005 \cdot (18,04 - 6,11)}{23,815 \cdot (25,21 - 6,11)^2} = 0,034$$

Konstanta A_{tE2} se stanoví jako parciální derivace teplotního poměru podle teploty vzduchu E2:

$$A_{tE2} = \frac{\partial \Phi}{\partial t_{E2}} = \frac{m_e \cdot c_{pe}}{\min(m_e \cdot c_{pe}; m_i \cdot c_{pi}) \cdot (t_{I1} - t_{E1})} \quad (21)$$

$$A_{tE2} = \frac{0,0255 \cdot 1005}{23,815 \cdot (25,21 - 6,11)} = 0,055$$

Konstanta $A_{m,e}$ se stanoví jako parciální derivace teplotního poměru podle hmotnostního průtoku čerstvého vzduchu:

$$A_{m,e} = \frac{\partial \Phi}{\partial m_e} = \frac{c_{pe} \cdot (t_{E2} - t_{E1}) \cdot (\min(m_e \cdot c_{pe}; m_i \cdot c_{pi})) - m_e \cdot \frac{\partial \min(m_e \cdot c_{pe}; m_i \cdot c_{pi})}{\partial m_e}}{(\min(m_e \cdot c_{pe}; m_i \cdot c_{pi}))^2 \cdot (t_{I1} - t_{E1})} \quad (22)$$

$$\frac{\partial \min(m_e \cdot c_{pe}; m_i \cdot c_{pi})}{\partial m_e} = \frac{\partial (m_i \cdot c_{pi})}{\partial m_e} = 0$$

$$A_{m,e} = \frac{1005 \cdot (18,04 - 6,11) \cdot 23,762 - 0,0255 \cdot 0}{23,815^2 \cdot (25,21 - 6,11)} = \mathbf{26,357}$$

Konstanta $A_{m,i}$ se stanoví jako parciální derivace teplotního poměru podle hmotnostního průtoku odváděného vzduchu:

$$A_{m,i} = \frac{\partial \Phi}{\partial m_i} = \frac{-m_e \cdot c_{pe} \cdot \frac{\partial \min(m_e \cdot c_{pe}; m_i \cdot c_{pi})}{\partial m_i} \cdot (t_{E2} - t_{E1})}{(\min(m_e \cdot c_{pe}; m_i \cdot c_{pi}))^2 \cdot (t_{I1} - t_{E1})} \quad (23)$$

$$\frac{\partial \min(m_e \cdot c_{pe}; m_i \cdot c_{pi})}{\partial m_i} = \frac{\partial (m_i \cdot c_{pi})}{\partial m_i} = c_{pi}$$

$$A_{m,i} = \frac{-0,0249 \cdot 1005 \cdot 1010 \cdot (18,04 - 6,11)}{23,815^2 \cdot (25,21 - 6,11)} = \mathbf{-27,861}$$

Výsledná nejistota teplotního poměru:

$$u_{6,t} = ((-0,034)^2 \cdot 0,18^2 + 0,034^2 \cdot 0,21^2 + 0,055^2 \cdot 0,18^2 + 26,357^2 \cdot 0,00086^2 + (-27,861)^2 \cdot 0,00091^2)^{0,5}$$

$$u_{6,t} = 0,0366 \cdot 100 \% = \mathbf{3,66 \%}$$

Celkový výsledek teplotního poměru pro měření S1:

$$\mathbf{\Phi = 62,46 \% \pm 3,66 \%}$$

1.2 Nejistota vlhkostního poměru

1.2.1 Relativní vlhkost

Pro měření relativních vlhkostí byly použity kombinované snímače teploty a relativní vlhkosti Ahlborn Almemo FHAD46C2. Pro tyto senzory je v kalibračním listu udávána přesnost $\pm 2,7 \%$.

Standardní nejistota typu A:

$$u_{1A,fi} = k_x \cdot \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{j=1}^n (\varphi_j - \bar{\varphi})^2} \quad (24)$$

kde k_x je opravný koeficient, φ_j je j-tá relativní vlhkost, $\bar{\varphi}$ je aritmetický průměr relativních vlhkostí a n je počet naměřených hodnot. Protože je počet naměřených hodnot vyšší než 10, bude $k_x = 1$.

$$u_{1A,fi} = 1 \cdot \sqrt{\frac{1}{30 \cdot (30 - 1)} \cdot 0,951} = \mathbf{0,033}$$

Standardní nejistota typu B:

$$u_{1B,fi} = \frac{\Delta z_{max,fi}}{\sqrt{3}} = \frac{2,7}{\sqrt{3}} = \mathbf{1,559}$$

Kombinovaná nejistota průměrných relativních vlhkostí:

$$u_{1,fi} = \sqrt{u_{4A,fi}^2 + u_{4B,fi}^2} \quad (25)$$

$$u_{1,fi} = \sqrt{0,033^2 + 1,559^2} = \mathbf{1,56 \%}$$

1.2.2 Měrná vlhkost

Měrná vlhkost byla stanovena dle rovnice následující rovnice [3]:

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_v''}{p - \varphi \cdot p_v''} \quad (26)$$

Výsledná nejistota měrné vlhkosti:

$$u_{2,xi} = \sqrt{A_{fi}^2 \cdot u_{1,fi}^2 + A_{atm}^2 \cdot u_{atm}^2 + A_{ti}^2 \cdot u_{3,ti}^2} \quad (27)$$

Člen atmosférického tlaku bude zanedbán.

Konstanta A_{ri} se stanoví jako parciální derivace měrné vlhkosti podle relativní vlhkosti:

$$A_{ri} = \frac{\partial x_i}{\partial \varphi_i} = \frac{0,622 \cdot p''_{vp} \cdot p}{(p - \varphi \cdot p''_{vp})^2} \quad (28)$$

$$A_{ri} = \frac{0,622 \cdot 3208,9 \cdot 97800}{(97800 - 0,191 \cdot 3208,9)^2} = \mathbf{0,021}$$

Konstanta A_{ti} se stanoví jako parciální derivace měrné vlhkosti podle teploty vzduchu:

$$A_{ti} = \frac{\partial x_i}{\partial t_i} = \frac{0,622 \cdot \varphi \cdot p \cdot \frac{\partial p''_{vp}}{\partial t}}{(p - \varphi \cdot p''_{vp})^2} \quad (29)$$

Pro teploty -20 až 0 °C je parciální derivace rovna:

$$\frac{\partial p''_{vp}}{\partial t} = \exp\left(28,926 - \frac{6148}{273,15+t}\right) \cdot \left(\frac{6148}{(273,15+t)^2}\right) \quad (30)$$

Pro teploty 0 až 80 °C je parciální derivace rovna:

$$\frac{\partial p''_{vp}}{\partial t} = \exp\left(23,58 - \frac{4044,2}{235,6+t}\right) \cdot \left(\frac{4044,2}{(235,6+t)^2}\right) \quad (31)$$

Teplota t_1 je 25,17 °C, proto bude použita rovnice parciální derivace pro rozmezí 0 až 80 °C.

$$\frac{\partial p''_{vp}}{\partial t} = \exp\left(23,58 - \frac{4044,2}{235,6 + 25,21}\right) \cdot \left(\frac{4044,2}{(235,6 + 25,21)^2}\right) = \mathbf{190,778}$$

$$A_{ti} = \frac{0,622 \cdot 0,191 \cdot 97800 \cdot 190,778}{(97800 - 0,191 \cdot 3208,9)^2} = \mathbf{0,00024}$$

$$u_{2,xI1} = \sqrt{0,021^2 \cdot 1,559^2 + 0,00023^2 \cdot 0,18^2} = \mathbf{0,0322 \text{ g}_{v.p.}/\text{kg}_{s.v.}}$$

1.2.3 Výsledná nejistota vlhkostního poměru

Vlhkostní poměr byl vypočítán dle rovnice [1]:

$$\Psi = \frac{x_{E2} - x_{E1}}{x_{I1} - x_{E1}} \quad (32)$$

Výsledná nejistota měrné vlhkosti se stanoví podle:

$$u_{3,x} = \sqrt{A_{xI1}^2 \cdot u_{2,xI}^2 + A_{xE}^2 \cdot u_{2,xE}^2 + A_{xE}^2 \cdot u_{2,xE2}^2 + A_{m,e}^2 \cdot u_{5,e}^2 + A_{m,i}^2 \cdot u_{5,i}^2} \quad (33)$$

Konstanty A jsou stanoveny ze vztahu pro účinnost sdílení tepla:

$$\Psi = \frac{m_e \cdot (x_{E2} - x_{E1})}{\min(m_e; m_i) \cdot (x_{I1} - x_{E1})} \quad (34)$$

Konstanta A_{xI1} se stanoví jako parciální derivace vlhkostního poměru podle měrné vlhkosti I1:

$$A_{xI1} = \frac{\partial \Psi}{\partial x_{I1}} = \frac{-\min(m_e; m_i) \cdot [m_e \cdot (x_{E2} - x_{E1})]}{[\min(m_e; m_i)]^2 \cdot (x_{I1} - x_{E1})^2} \quad (35)$$

$$\min(m_e; m_i) = m_i = 0,0236 \text{ kg/s}$$

$$A_{xI1} = \frac{-0,0236 \cdot [0,025 \cdot (3,4 - 3,2)]}{(0,0236)^2 \cdot (3,9 - 3,2)^2} = -\mathbf{0,357}$$

Konstanta A_{xE1} se stanoví jako parciální derivace vlhkostního poměru podle měrné vlhkosti E1:

$$A_{xE1} = \frac{\partial \Psi}{\partial x_{E1}} = \frac{m_e \cdot (x_{E2} - x_{E1})}{\min(m_e; m_i) \cdot (x_{I1} - x_{E1})^2} \quad (36)$$

$$A_{xE1} = \frac{0,0250 \cdot (3,4 - 3,2)}{0,0236 \cdot (3,9 - 3,2)^2} = \mathbf{0,357}$$

Konstanta A_{xE2} se stanoví jako parciální derivace vlhkostního poměru podle měrné vlhkosti E2:

$$A_{xE2} = \frac{\partial \Psi}{\partial x_{E2}} = \frac{m_e}{\min(m_e; m_i) \cdot (x_{I1} - x_{E1})} \quad (37)$$

$$A_{xE2} = \frac{0,0249}{0,0236 \cdot (3,9 - 3,2)} = \mathbf{1,448}$$

Konstanta $A_{m,e}$ se stanoví jako parciální derivace vlhkostního poměru podle hmotnostního průtoku čerstvého vzduchu:

$$A_{m,e} = \frac{\partial \Psi}{\partial m_e} = \frac{(x_{E2} - x_{E1}) \cdot \left[\min(m_e; m_i) - m_e \cdot \frac{\partial \min(m_e; m_i)}{\partial m_e} \right]}{[\min(m_e; m_i)]^2 \cdot (x_{I1} - x_{E1})} \quad (38)$$

$$\frac{\partial \min(m_e; m_i)}{\partial m_e} = \frac{\partial m_i}{\partial m_e} = 0$$

$$A_{m,e} = \frac{(3,4 - 3,2) \cdot (0,0236 - 0,0249 \cdot 0)}{(0,0236)^2 \cdot (3,9 - 3,2)} = \mathbf{11,458}$$

Konstanta $A_{m,i}$ se stanoví jako parciální derivace vlhkostního poměru podle hmotnostního průtoku odváděného vzduchu:

$$A_{m,i} = \frac{\partial \Psi}{\partial m_i} = \frac{-m_e \cdot \frac{\partial \min(m_e; m_i)}{\partial m_i} \cdot (x_{E2} - x_{E1})}{[\min(m_e; m_i)]^2 \cdot (x_{I1} - x_{E1})} \quad (39)$$

$$\frac{\partial \min(m_e; m_i)}{\partial m_i} = \frac{\partial m_i}{\partial m_i} = 1$$

$$A_{m,i} = \frac{-0,0249 \cdot 1 \cdot (3,4 - 3,2)}{0,0236^2 \cdot (3,9 - 3,2)} = -11,054$$

Výsledná nejistota vlhkostního poměru:

$$u_{3,x} = ((-0,357)^2 \cdot 0,0322^2 + 0,357^2 \cdot 0,0106^2 + 1,448^2 \cdot 0,0213^2 + \\ + 10,458^2 \cdot 0,00086^2 + (-11,054)^2 \cdot 0,00091^2)^{0,5}$$

$$u_{3,x} = 0,0358 \cdot 100 \% = 3,6 \%$$

Celkový výsledek vlhkostního poměru pro měření S1:

$$\Psi = 24,7 \% \pm 3,6 \%$$

1.3 Vnitřní netěsnost

Vnitřní netěsnost výměníku se určuje při přetlaku 250 Pa a zatěsnění všech kanálů a netěsností. Velikost přefukujícího objemu vzduchu z jedné strany výměníku na druhou byla změřena pomocí membránového plynoměru.

1.3.1 Objem vzduchu

Kalibrační list membránového plynoměru uvádí přesnost 0,5 %.

Standardní nejistota přístroje $u_{1, Vni}$:

$$u_{1, Vni} = 0,5 \%$$

$$u_{1, Vn} = 0,0001 \text{ m}^3$$

Standardní nejistota odečtu $u_{2, Vni}$:

Standardní nejistota odečtu byla vypočítána podle rovnice (1) v kapitole 1.1.1. Rozlišení pro odečet objemu je 0,001 m³.

$$u_{2, Vni} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{3}} \cdot 0,001 = \mathbf{0,0003 \text{ m}^3}$$

Standardní nejistota měření $u_{m, Vn}$:

Standardní nejistota odečtu byla vypočítána podle rovnice (2) v kapitole 1.1.1.

$$u_{m, Vn} = \sqrt{0,0001^2 + 0,0003^2} = \mathbf{0,0003 \text{ m}^3}$$

1.3.2 Objemový průtok

Výsledná nejistota objemového průtoku se vypočítá podle rovnice (3), obdobně jako v kapitole 1.1.2.

Výsledná nejistota objemového průtoku:

$$u_{2, Vn} = \sqrt{A_{Vn}^2 \cdot u_{m, Vn}^2} \quad (40)$$

Objemový průtok se vypočítá podle rovnice:

$$V = \frac{\Delta V_n}{\tau} = \frac{(V_{n2} - V_{n1})}{\tau} \quad (41)$$

kde $\Delta V_n [m^3]$ je rozdíl odečtených objemů vzduchu před a po uplynutí doby $\tau [s]$.

Konstanta $A_{1,p}$ je vypočtena jako parciální derivace vzorce pro výpočet objemového průtoku podle rozdílu objemu:

$$A_{Vn} = \frac{\partial V}{\partial Vn} = \frac{1}{\tau} \quad (42)$$

$$A_{Vn} = \frac{1}{360} = \mathbf{0,0028}$$

Výsledná nejistota objemového průtoku:

$$u_{2,V} = \sqrt{0,0003^2 \cdot 0,0028^2} = \mathbf{0,0000003 \text{ m}^3/\text{s}}$$

Nejistota teploty vzduchu, hustoty vzduchu a hmotnostního průtoku byla vypočítána stejným způsobem, jako je uvedeno v kapitolách 1.1.3, 1.1.4 a 1.1.5.

Vnitřní netěsnost - měření S	
počáteční hodnota [m ³]	185,650
konečná hodnota [m ³]	185,671
rozdíl [m ³]	0,021
doba měření [s]	360
objemový průtok [m ³ /h]	0,21
teplota vzduchu [°C]	21,3
atmosférický tlak [Pa]	97 900
hustota vzduchu [kg/m ³]	1,16
hmotnostní průtok [kg/h]	0,24 ± 0,001

Vnitřní netěsnost - měření N	
počáteční hodnota [m ³]	186,026
konečná hodnota [m ³]	186,053
rozdíl [m ³]	0,027
doba měření [s]	360
objemový průtok [m ³ /h]	0,27
teplota vzduchu [°C]	21,15
atmosférický tlak [Pa]	96 500
hustota vzduchu [kg/m ³]	1,14
hmotnostní průtok [kg/h]	0,31 ± 0,001

Vnitřní netěsnost - měření S	
u1,Vn	0,0001
u2,Vn	0,0003
um,Vn	0,0003
Avn	0,0028
u2,V	0,0000003
u3,t	0,173
A4,t	-0,0039
u4,r	0,00068
A5,V	0,862
A5,r	-0,00004
u5 [kg/s]	0,0000003
u5 [kg/h]	0,00091

Vnitřní netěsnost - měření N	
u1,Vn	0,0001
u2,Vn	0,0003
um,Vn	0,0003
Avn	0,0028
u2,V	0,0000004
u3,t	0,173
A4,t	-0,0039
u4,r	0,00067
A5,V	0,875
A5,r	-0,00006
u5 [kg/s]	0,0000003
u5 [kg/h]	0,00119

2 Nejistoty měření

2.1 Měření S1

	Měření S1			
	t _i = 22,2 °C; p _a = 97,8 hPa			
	Proud I		Proud E	
Označení proudu vzduchu	I1	I2	E1	E2
rychlost proudění [m/s]	2,62	2,58	2,65	2,53
teplota vzduchu [°C]	25,21	12,44	6,11	18,04
rel. vlhkost vzduchu [%]	19,1 %	41,1 %	53,1 %	25,6 %
parciální tlak syté páry [Pa]	3208,9	1444,3	942,4	2070,1
měrná vlhkost [g _{v.p.} /kg _{s.v.}]	3,9	3,8	3,2	3,4
objemový průtok [m ³ /h]	74,08	72,94	74,99	71,46
teplotní poměr [%]	62,46 % ± 3,66 %			
vlhkostní poměr [%]	24,7 % ± 3,6 %			

	Teploty - Měření S1			
	I1	I2	E1	E2
SUMA (t _j -t _{prum}) ²	1,44	5,27	10,48	2,96
hustota vzduchu	1,146	1,197	1,197	1,224
u _{3A,t_i}	0,041	0,078	0,110	0,058
u _{3B,t_j}	0,173	0,173	0,173	0,173
u _{3,t_i}	0,178	0,190	0,205	0,183
A _{2,w_i}	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079
u _{2,V_i}	0,0010	0,0007	0,0010	0,0007
A _{4,t_i}	-0,0038	-0,0042	-0,0044	-0,0040
u _{4,r_i}	0,0007	0,0008	0,0009	0,0007
A _{5,V_i}	0,873	0,835	0,836	0,817
A _{5,r_i}	-0,0157	-0,0141	-0,0145	-0,0133
u ₅	0,0009	0,0006	0,0009	0,0006
m _i /m _e [kg/h]	0,0236		0,0249	
c _{pi} /c _{pe} [J/(kg.K)]	1010		1005	
m _i *c _{pi} /m _e *c _{pe}	23,815		25,048	
At _{I1}	-0,034			
At _{E1}			0,034	
At _{E2}				0,055
Am _{,e}			26,357	
Am _{,i}	-27,861			
u _{6,t}	3,66%			

	Vlhkosti - Měření S1			
	I1	I2	E1	E2
Suma ($\phi_j - \phi_{prum}$) ²	0,95	29,42	570,04	113,43
u1A,fi	0,033	0,184	0,809	0,361
u1B,fi	1,559	1,559	1,559	1,559
u1,fi	1,559	1,570	1,756	1,600
Ari	0,021	0,009	0,006	0,013
dp''vp/dt	190,778	94,931	65,213	130,113
Ati	0,00024	0,00025	0,00022	0,00021
u2,xi	0,032	0,015	0,011	0,021
AxI1	-0,357			
AxE1			0,357	
AxE2				1,448
Am,e			10,458	
Am,i	-11,054			
u3,x	3,6%			

	Rychlosti - Měření S1			
	I1	I2	E1	E2
wi,prům	2,65	2,53	2,62	2,58
u1,wi	0,080	0,076	0,079	0,077
u2,wi	0,106	0,038	0,105	0,039
u3,wi	0,003	0,003	0,003	0,003
um,wi	0,13	0,08	0,13	0,09

2.2 Měření S2

	Měření S2			
	t _i = 22,2 °C; p _a = 97,8 hPa			
	Proud I		Proud E	
Označení proudu vzduchu	I1	I2	E1	E2
rychlost proudění [m/s]	2,14	1,98	2,24	2,21
teplota vzduchu [°C]	25,16	11,36	5,73	18,04
rel. vlhkost vzduchu [%]	18,6 %	42,0 %	52,0 %	24,7 %
parciální tlak syté páry [Pa]	3199,0	1345,0	917,8	2070,2
měrná vlhkost [g _{v.p.} /kg _{s.v.}]	3,8	3,6	3,1	3,3
objemový průtok [m ³ /h]	60,62	56,06	63,44	62,36
teplotní poměr [%]	63,37 % ± 3,82 %			
vlhkostní poměr [%]	28,0 % ± 3,7 %			

	Teploty - Měření S2			
	I1	I2	E1	E2
SUMA (tj-tprum)^2	0,76	2,51	7,39	3,27
hustota vzduchu	1,146	1,201	1,201	1,225
u3A,ti	0,028	0,050	0,086	0,057
u3B,tj	0,173	0,173	0,173	0,173
u3,ti	0,175	0,180	0,194	0,182
A2,wi	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079
u2,Vi	0,0008	0,0005	0,0009	0,0006
A4,ti	-0,0038	-0,0042	-0,0044	-0,0040
u4,ri	0,0007	0,0008	0,0008	0,0007
A5,Vi	0,873	0,832	0,833	0,816
A5,ri	-0,0128	-0,0108	-0,0122	-0,0115
u5	0,0007	0,0004	0,0007	0,0005
mi/me [kg/h]	0,0193		0,0212	
cpi/cpe [J/(kg.K)]	1010		1005	
mi*cpi/me*cpe	19,489		21,271	
AtI1	-0,0356			
AtE1			0,0356	
AtE2				0,056
Am,e			32,679	
Am,i	-35,845			
u6,t	3,82%			

	Vlhkosti - Měření S2			
	I1	I2	E1	E2
Suma ($\phi_j - \phi_{prum}$)^2	5,14	2,54	31,58	4,31
u1A,fi	0,072	0,051	0,178	0,066
u1B,fi	1,559	1,559	1,559	1,559
u1,fi	1,561	1,560	1,569	1,560
Ari	0,021	0,009	0,006	0,013
dp''vp/dt	190,268	89,189	63,735	130,141
Ati	0,00023	0,00024	0,00021	0,00021
u2,xi	0,032	0,013	0,009	0,021
AxI1	-0,410			
AxE1			0,410	
AxE2				1,463
Am,e			14,511	
Am,i	-15,917			
u3,x	3,7%			

	Rychlosti - Měření S2			
	I1	I2	E1	E2
wi,prům	2,14	1,98	2,24	2,21
u1,wi	0,064	0,059	0,067	0,066
u2,wi	0,086	0,030	0,090	0,033
u3,wi	0,003	0,003	0,003	0,003
um,wi	0,11	0,07	0,11	0,07

2.3 Měření S3

	Měření S3 Provoz dle objemového průtoku			
	t _i = 22,2 °C; p _a = 97,8 hPa			
	Proud I		Proud E	
Označení proudu vzduchu	I1	I2	E1	E2
rychlost proudění [m/s]	1,74	1,54	1,82	1,80
teplota vzduchu [°C]	25,49	11,92	7,15	19,33
relativní vlhkost vzduchu [%]	18,5 %	38,0 %	46,0 %	22,5 %
parciální tlak syté páry [Pa]	3262,8	1396,1	1012,2	2243,7
měrná vlhkost [g _{v.p.} /kg _{s.v.}]	3,9	3,4	3,0	3,2
objemový průtok [m ³ /h]	49,15	43,44	51,45	50,92
teplotní poměr [%]	66,40 % ± 4,11 %			
vlhkostní poměr [%]	28,9 % ± 3,5 %			

	Teploty - Měření S3			
	I1	I2	E1	E2
SUMA (tj-tprum)^2	17,07	2,41	3,28	10,15
hustota vzduchu	1,145	1,199	1,199	1,219
u3A,ti	0,135	0,051	0,059	0,104
u3B,tj	0,173	0,173	0,173	0,173
u3,ti	0,220	0,181	0,183	0,202
A2,wi	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079
u2,Vi	0,0007	0,0005	0,0007	0,0004
A4,ti	-0,0038	-0,0042	-0,0043	-0,0040
u4,ri	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
A5,Vi	0,874	0,834	0,834	0,820
A5,ri	-0,0104	-0,0084	-0,0099	-0,0095
u5	0,0006	0,0004	0,0006	0,0003
mi/me [kg/h]	0,0156		0,0171	
cpi/cpe [J/(kg.K)]	1010		1005	
mi*cpi/me*cpe	15,786		17,215	
AtI1	-0,0395			
AtE1			0,0395	
AtE2				0,059
Am,e			42,274	
Am,i	-46,332			
u6,t	4,11%			

	Vlhkosti - Měření S3			
	I1	I2	E1	E2
Suma ($\phi_j - \phi_{prum}$)^2	38,59	5,12	312,27	126,24
u1A,fi	0,204	0,074	0,579	0,368
u1B,fi	1,559	1,559	1,559	1,559
u1,fi	1,572	1,561	1,663	1,602
Ari	0,021	0,009	0,006	0,014
dp''vp/dt	193,574	92,152	69,472	139,626
Ati	0,00023	0,00023	0,00021	0,00020
u2,xi	0,033	0,014	0,011	0,023
AxI1	-0,352			
AxE1			0,352	
AxE2				1,218
Am,e			18,484	
Am,i	-20,258			
u3,x	3,5%			

	Rychlosti - Měření S3			
	I1	I2	E1	E2
wi,prům	1,82	1,80	1,74	1,54
u1,wi	0,055	0,054	0,052	0,046
u2,wi	0,073	0,027	0,070	0,023
u3,wi	0,003	0,003	0,003	0,003
um,wi	0,09	0,06	0,09	0,05

2.4 Měření S4

	Měření S4			
	Provoz dle hmotnostního průtoku			
	$t_i = 22,2 \text{ °C}; p_a = 97,4 \text{ hPa}$			
	Proud I		Proud E	
Označení proudu vzduchu	I1	I2	E1	E2
rychlost proudění [m/s]	1,88	1,63	1,65	1,72
teplota vzduchu [°C]	25,48	11,61	5,80	19,73
relativní vlhkost vzduchu [%]	17,6 %	37,7 %	42,0 %	19,3 %
parciální tlak syté páry [Pa]	3261,3	1367,6	922,6	2299,9
měrná vlhkost [$g_{v.p.}/kg_{s.v.}$]	3,7	3,3	2,5	2,8
objemový průtok [m^3/h]	53,11	45,97	46,66	48,64
teplotní poměr [%]	70,74 % \pm 2,81 %			
vlhkostní poměr [%]	30,2 % \pm 2,3 %			

	Teploty - Měření S4			
		I2	E1	E2
SUMA (tj-tprum)^2	1,72	5,32	7,70	1,90
hustota vzduchu	1,140	1,195	1,195	1,219
u3A,ti	0,043	0,076	0,091	0,045
u3B,tj	0,173	0,173	0,173	0,173
u3,ti	0,178	0,189	0,196	0,179
A2,wi	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079
u2,Vi	0,0007	0,0004	0,0006	0,0005
A4,ti	-0,0038	-0,0042	-0,0044	-0,0040
u4,ri	0,0007	0,0008	0,0009	0,0007
A5,Vi	0,877	0,837	0,837	0,820
A5,ri	-0,0114	-0,0089	-0,0091	-0,0091
u5	0,0006	0,0004	0,0005	0,0004
mi/me [kg/h]	0,0168		0,0155	
cpi/cpe [J/(kg.K)]	1010		1005	
mi*cpi/me*cpe	16,986		15,562	
AtI1	-0,0360			
AtE1			0,0360	
AtE2				0,051
Am,e			45,685	
Am,i	0			
u6,t	2,81%			

	Vlhkosti - Měření S4			
	I1	I2	E1	E2
Suma ($\phi_j - \phi_{prum}$)^2	1,78	287,59	3911,54	349,24
u1A,fi	0,044	0,556	2,051	0,613
u1B,fi	1,559	1,559	1,559	1,559
u1,fi	1,559	1,655	2,576	1,675
Ari	0,021	0,009	0,006	0,015
dp''vp/dt	193,494	90,501	64,027	142,677
Ati	0,00022	0,00022	0,00017	0,00018
u2,xi	0,033	0,015	0,015	0,025
AxI1	-0,250			
AxE1			0,250	
AxE2				0,827
Am,e			0	
Am,i	0			
u3,x	2,3%			

	Rychlosti - Měření S4			
	I1	I2	E1	E2
wi,prům	1,88	1,63	1,65	1,72
u1,wi	0,056	0,049	0,050	0,052
u2,wi	0,075	0,024	0,066	0,026
u3,wi	0,003	0,003	0,003	0,003
um,wi	0,09	0,05	0,08	0,06

2.5 Měření S5

	Měření S5			
	$t_i = 22,2 \text{ °C}; p_a = 97,4 \text{ hPa}$			
	Proud I		Proud E	
Označení proudu vzduchu	I1	I2	E1	E2
rychlost proudění [m/s]	1,27	1,18	1,29	1,26
teplota vzduchu [°C]	25,85	12,14	6,95	21,63
relativní vlhkost vzduchu [%]	16,9 %	32,0 %	30,9 %	15,6 %
parciální tlak syté páry [Pa]	3333,6	1416,5	998,8	2585,3
měrná vlhkost [g.v./kg.s.v.]	3,6	2,9	2,0	2,6
objemový průtok [m ³ /h]	35,84	33,25	36,36	35,74
teplotní poměr [%]	77,63 % ± 3,39 %			
vlhkostní poměr [%]	37,0 % ± 2,8 %			

	Teploty - Měření S5			
		I2	E1	E2
SUMA (tj-tprum)^2	3,06	31,11	4,84	27,93
hustota vzduchu	1,139	1,193	1,192	1,214
u3A,ti	0,057	0,183	0,072	0,173
u3B,tj	0,173	0,173	0,173	0,173
u3,ti	0,182	0,252	0,188	0,245
A2,wi	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079
u2,Vi	0,0005	0,0003	0,0005	0,0003
A4,ti	-0,0038	-0,0042	-0,0043	-0,0039
u4,ri	0,0007	0,0011	0,0008	0,0010
A5,Vi	0,878	0,838	0,839	0,824
A5,ri	-0,0077	-0,0065	-0,0071	-0,0067
u5	0,0004	0,0003	0,0004	0,0003
mi/me [kg/h]	0,0113		0,0120	
cpi/cpe [J/(kg.K)]	1010		1005	
mi*cpi/me*cpe	11,449		12,101	
AtI1	-0,0434			
AtE1			0,0434	
AtE2				0,056
Am,e			68,142	
Am,i	0			
u6,t	3,39%			

	Vlhkosti - Měření S5			
	I1	I2	E1	E2
Suma ($\phi_j - \phi_{prum}$) ²	1,35	389,51	4299,59	183,56
u1A,fi	0,038	0,647	2,150	0,444
u1B,fi	1,559	1,559	1,559	1,559
u1,fi	1,559	1,688	2,656	1,621
Ari	0,022	0,009	0,006	0,017
dp''vp/dt	197,222	93,332	68,657	158,023
Ati	0,00022	0,00019	0,00014	0,00016
u2,xi	0,034	0,015	0,017	0,027
AxI1	-0,239			
AxE1			0,239	
AxE2				0,645
Am,e			32,674	
Am,i	-34,707			
u3,x	2,8%			

	Rychlosti - Měření S5			
	I1	I2	E1	E2
wi,prům	1,27	1,18	1,29	1,26
u1,wi	0,038	0,035	0,039	0,038
u2,wi	0,051	0,018	0,051	0,019
u3,wi	0,003	0,003	0,003	0,003
um,wi	0,06	0,04	0,06	0,04

2.6 Měření Z3

	Měření Z3			
	t _i = 22,2 °C; p _a = 97,4 hPa			
	Proud I		Proud E	
Označení proudu vzduchu	I1	I2	E1	E2
rychlost proudění [m/s]	1,79	1,79	1,75	1,75
teplota vzduchu [°C]	24,42	6,37	-6,87	14,34
objemový průtok [m ³ /h]	50,73	50,73	49,49	49,49
teplotní poměr [%]	67,79 % ± 1,72 %			

	Teploty - Měření Z3			
		I2	E1	E2
SUMA (tj-tprum)^2	0,05	0,47	0,22	1,32
hustota vzduchu	1,187	1,215	1,215	1,273
u3A,ti	0,003	0,008	0,005	0,013
u3B,tj	0,173	0,173	0,173	0,173
u3,ti	0,173	0,173	0,173	0,174
A2,wi	0,0079	0,0079	0,0079	0,0079
u2,Vi	0,0007	0,0007	0,0005	0,0005
A4,ti	-0,0039	-0,0044	-0,0049	-0,0042
u4,ri	0,0007	0,0008	0,0008	0,0007
A5,Vi	0,842	0,823	0,823	0,786
A5,ri	-0,0100	-0,0095	-0,0093	-0,0085
u5	0,0006	0,0006	0,0004	0,0004
mi/me [kg/h]	0,0167		0,0167	
cpi/cpe [J/(kg.K)]	1010		1005	
mi*cpi/me*cpe	16,900		16,786	
AtI1	-0,0217			
AtE1			0,0217	
AtE2				0,032
Am,e			40,584	
Am,i	0			
u6,t	1,72%			

	Rychlosti - Měření Z3	
	I	E
wi,prům	1,79	1,75
u1,wi	0,054	0,053
u2,wi	0,072	0,026
u3,wi	0,003	0,003
um,wi	0,09	0,06

3 Reference

- [1] ČSN EN 308. *Výměníky tepla - Metody zkoušek pro ověření výkonnosti zařízení pro regeneraci tepla*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1998, 20 s. Třídící znak 696308.
- [2] ČSN EN 16211. *Větrání budov - Provozní měření průtoku vzduchu - Metody*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016, 36 s. Třídící znak 127132.
- [3] Vlhký vzduch - stavové veličiny. In: *Katedra technických zařízení budov K11125* [online]. Praha: Katedra technických zařízení budov, 2022 [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: <http://tzb.fsv.cvut.cz/vyucujici/14/vlhky-vzduch.pdf>