

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

---

**STUDIE PROVOZU REZIDENČNÍ  
VZDUCHOTECHNICKÉ JEDNOTKY**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

PETR CALTA

1 – IB – 2020

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Calta** Jméno: **Petr** Osobní číslo: **438323**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav techniky prostředí**  
Studijní program: **Inteligentní budovy**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Studie provozu rezidenční vzduchotechnické jednotky**

Název diplomové práce anglicky:

**Operation Survey of Residential Air Handling Unit**

Pokyny pro vypracování:

Na poskytnuté komerční VZT jednotce stanovte její dostupné provozní parametry. Především stanovte průtokové charakteristiky použitých ventilátorů. Pro měření objemového průtoku využijte škrticí clonu, kterou vhodně zkalibrujte. Dále stanovte charakteristiku použitého rotačního výměníku. Vypočtete teplotní faktor a účinnost zpětného získávání tepla, příp. vlhkosti a to pro různé provozní stavy, otáčky kola (atp.), které jednotka umožňuje. Při měření porovnejte data poskytovaná jednotkou s laboratorně měřenými údaji a diskutujte je. Popište a zhodnoťte jednotku jako celek z hlediska všech jejích provozních možností a porovnejte údaje deklarované výrobcem s naměřenými hodnotami. Zhodnoťte rovněž vhodným způsobem také ekonomiku provozu.

Seznam doporučené literatury:

Drkal, F., Zmrhal, V. Větrání. ČVUT v Praze. 2018. 160 s. ISBN 978-80-010-6378-1.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

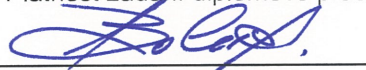
**Ing. Jindřich Boháč, Ph.D., Ú 12116**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

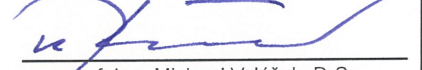
Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce:

  
Ing. Jindřich Boháč, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
doc. Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

30.4.2020

Datum převzetí zadání

Calta

Podpis studenta

## Souhrn

Práce v první části rozebírá problematiku větrání rezidenčních budov. Shrnuje současné technické možnosti systémů pro větrání a detailněji popisuje funkce a parametry vzduchotechnické jednotky Systemair SAVE VTR 500. Uvádí možnosti řešení systémů pro zpětné získávání tepla s odkazem na legislativu. Praktická část práce se zabývá měřením provozních průtoků vzduchu na jednotce VTR 500 pomocí clony FMU 200-160. Práce se věnuje stanovení přesnosti použité clony a navrhuje postup pro zpřesnění. Dále stanovuje měřením teplotní a vlhkostní faktor dosahovaný regeneračním rotačním výměníkem pro zpětné získávání tepla osazeným v jednotce VTR 500. Popisuje použité měřicí přístroje pro měření teplot a vlhkostí a následně porovnává profesionální měřicí zařízení s experimentálním. Závěrečná část práce bilancuje celoroční provoz vzduchotechnické jednotky VTR 500 a na základě této bilance stanovuje energetické a ekonomické důsledky provozu a pořízení vzduchotechnické jednotky.

## Summary

In the first part, the thesis analyses the issues of ventilation of residential buildings. It summarizes current technical options of ventilation and it describes in details the functions and parameters of ventilating unit Systemair SAVE VTR 500. The thesis also presents the possible system arrangements for heat recovery with the reference to legislation. The practical part of the thesis is focused on measuring operational flow rates on the VTR 500 unit by means of the measuring orifice FMU 200-160. The thesis deals with determination of accuracy of used measuring orifice for the airflow rates, and a procedure of its accuracy improvement is suggested. Furthermore, by means of a measurement, it determines temperature and humidity ratio gained by heat exchanger regenerative set in the VTR 500 unit for the heat recovery. The thesis also describes used measuring instruments for the heat and humidity measurements and then it compares the professional measuring instruments with the experimental ones. The final part of the thesis reviews a year-round running of the ventilating unit VTR 500, and on the grounds of the balance, it determines energetic and economic consequences of the year-round operation and the purchase of the ventilating unit.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Studie provozu rezidenční vzduchotechnické jednotky“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jindřicha Boháče, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze 31. 7. 2020



Petr Calta

## Poděkování

Tímto děkuji Ing. Jindřichu Boháčovi, Ph.D. za vstřícnost, cenné rady a věcné připomínky při vedení diplomové práce.

# Obsah

1	Úvod .....	- 11 -
2	Větrání rezidenčních budov .....	- 13 -
2.1	Jednotky pro celkové větrání .....	- 14 -
2.1.1	Nařízení komise Evropské unie č. 1253/2014 .....	- 15 -
2.1.2	Prvky vzduchotechnických jednotek.....	- 15 -
2.1.3	Zařízení pro ZZT.....	- 16 -
3	Větrací jednotka Systemair SAVE VTR 500 R .....	- 21 -
3.1	Konstrukce a technické parametry .....	- 21 -
3.2	Nastavení a funkce jednotky.....	- 27 -
4	Praktické měření na jednotce Systemair SAVE VTR 500 R .....	- 30 -
4.1	Měření průtoků vzduchu.....	- 31 -
4.1.1	Kalibrace měřicích clon.....	- 33 -
4.1.2	Nejistota měření průtoků vzduchu clonkou.....	- 38 -
4.1.3	Měření průtoků na jednotce Systemair SAVE VTR 500 R.....	- 43 -
4.2	Měření teplotních a vlhkostních charakteristik výměníku ZZT .....	- 47 -
4.2.1	Rychlost otáčení rotačního výměníku ZZT .....	- 48 -
4.2.2	Měření teplot a vlhkostí.....	- 49 -
4.2.3	Teplotní a vlhkostní faktor výměníku ZZT v jednotce VTR 500.....	- 59 -
5	Ekonomika provozu vzduchotechnické jednotky.....	- 74 -
5.1	Výpočetní nástroj .....	- 74 -
5.2	Výsledky.....	- 78 -
5.3	Porovnání výsledků s hodnotou SEC .....	- 82 -
6	Závěr .....	- 87 -
7	Seznam literatury a použitých pramenů.....	- 90 -

## Soupis značení

<b>Značka</b>	<b>Veličina</b>	<b>Jednotka</b>
$A_{Ve}$	– koeficient citlivosti teplotního faktoru na průtoku $V_e$	[h.m <sup>-3</sup> ]
$A_{Vi}$	– koeficient citlivosti teplotního faktoru na průtoku $V_i$	[h.m <sup>-3</sup> ]
$A_{ta}$	– koeficient citlivosti hustoty na teplotě	[kg.m <sup>-3</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$A_{te1}$	– koeficient citlivosti teplotního faktoru na teplotě $t_{e1}$	[K <sup>-1</sup> ]
$A_{te2}$	– koeficient citlivosti teplotního faktoru na teplotě $t_{e2}$	[K <sup>-1</sup> ]
$A_{ti1}$	– koeficient citlivosti teplotního faktoru na teplotě $t_{i1}$	[K <sup>-1</sup> ]
$A_{l0}$	– koeficient citlivosti rozdílu tlaků na rozměru $l_0$	[Pa.m <sup>-1</sup> ]
$A_{l1}$	– koeficient citlivosti rozdílu tlaků na rozměru $l_1$	[Pa.m <sup>-1</sup> ]
$A_{\rho L}$	– koeficient citlivosti rozdílu tlaků na hustotě	[Pa.m <sup>3</sup> .kg <sup>-1</sup> ]
$C$	– součinitel průtoku	[-]
$CTRL$	– faktor řízení větrání	[-]
$CoeffTemp$	– teplotní kompenzační koeficient	[% .K <sup>-1</sup> ]
$I$	– intenzita větrání	[h <sup>-1</sup> ]
$MISC$	– souhrnný faktor obecné typologie, který zahrnuje faktory účinnosti větrání, netěsnosti potrubí a zvláštní infiltrace	[-]
$Q_{defr}$	– tepelná energie ročně vynaložená na m <sup>2</sup> vytápěné podlahové plochy, za účelem odtávání, založená na variabilním elektrickém odporovém vytápění	[kWh.m <sup>-2</sup> .a <sup>-1</sup> ]
$RH_{compensatedT}$	– relativní vlhkost kompenzovaná podle teploty	[%]
$RH_{actualT}$	– relativní vlhkost naměřená snímačem HTU21D	[%]
$SEC$	– specifická spotřeba energie na větrání na m <sup>2</sup> vytápěné podlahové plochy	[kWh.m <sup>-2</sup> .a <sup>-1</sup> ]
$SPI$	– měrný příkon	[kW.m <sup>3</sup> .h]

$T$	– teplota vzduchu	[°C]
$T_{\text{actual}}$	– teplota naměřená snímačem HTU21D	[°C]
$U_q$	– rozšířená nejistota hmotnostního průtoku	[kg.s <sup>-1</sup> ]
$U_V$	– rozšířená nejistota objemového průtoku	[m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]
$\dot{V}$	– objemový průtok vzduchu protékající clonkou	[m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]
$V_e$	– objemový průtok venkovního přiváděného vzduchu	[m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]
$V_i$	– objemový průtok vnitřního odváděného vzduchu	[m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]
$c_{\text{air}}$	– měrná tepelná kapacita vzduchu	[kWh.m <sup>-3</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$d_{\text{kc}}$	– vnitřní průměr kalibrační clonky	[m]
$d_{\text{mc}}$	– vnitřní průměr měřicí clony	[m]
$g$	– tíhové zrychlení	[m.s <sup>-2</sup> ]
$h_{e1}$	– měrná entalpie přiváděného venkovního vzduchu	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
$h_{e2}$	– měrná entalpie přiváděného vzduchu po průchodu ZZT	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
$h_{i1}$	– měrná entalpie odváděného vnitřního vzduchu	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
$h_{i2}$	– měrná entalpie odváděného vzduchu po průchodu ZZT	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
$k$	– koeficient sklonu ramena mikromanometru	[-]
$l_0$	– délka sloupce před měřením na mikromanometru	[m]
$l_1$	– délka sloupce na mikromanometru	[m]
$p_1$	– absolutní tlak před clonkou	[Pa]
$p_b$	– atmosférický tlak	[Pa]
$p_{ef}$	– faktor primární energie pro výrobu a distribuci el. e.	[-]
$p_{\text{skc}}$	– absolutní statický tlak v potrubí před clonkou	[Pa]
$p_{\text{vs}}$	– parciální tlak sytých vodních par	[Pa]
$q_m$	– hmotnostní průtok clonkou	[kg.s <sup>-1</sup> ]
$q_{\text{net}}$	– požadavek na čistou výměru vzduchu na m <sup>2</sup> vytápěné podlahové plochy	[m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> ]



$q_{\text{ref}}$	– referenční míra přirozené výměny vzduchu na $\text{m}^2$ vytápěné podlahové plochy	$[\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}]$
$r_a$	– měrná plynová konstanta suchého vzduchu	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
$t_a$	– teplota „suchého teploměru“ vzduchu (okolí)	$[^\circ\text{C}]$
$t_a$	– počet ročních provozních hodin	$[\text{h} \cdot \text{a}^{-1}]$
$t_{e1}$	– teplota přiváděného venkovního vzduchu	$[^\circ\text{C}]$
$t_{e2}$	– teplota přiváděného vzduchu po průchodu ZZT	$[^\circ\text{C}]$
$t_h$	– celkové trvání otopného období	$[\text{h}]$
$t_{i1}$	– teplota odváděného vnitřního vzduchu	$[^\circ\text{C}]$
$t_{i2}$	– teplota odváděného vzduchu po průchodu ZZT	$[^\circ\text{C}]$
$x_{e1}$	– měrná vlhkost přiváděného venkovního vzduchu	$[\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$x_{e2}$	– měrná vlhkost přiváděného vzduchu po průchodu ZZT	$[\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$x_{i1}$	– měrná vlhkost odváděného vnitřního vzduchu	$[\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$x_{i2}$	– měrná vlhkost odváděného vzduchu po průchodu ZZT	$[\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$\Delta p_{\text{kc}}$	– rozdíl tlaků na kalibrační clonce	$[\text{Pa}]$
$\Delta p_{\text{mc}}$	– rozdíl tlaků na měřicí cloně	$[\text{Pa}]$
$\Delta h$	– rozdíl výšek hladin při měření na U-trubici	$[\text{m}]$
$\Delta T_h$	– průměrný rozdíl vnitřní ( $19^\circ\text{C}$ ) a venkovní teploty v otopném období mínus $3\text{ K}$ o solární a vnitřní zisky	$[\text{K}]$
$\Delta z_{\text{max}}$	– maximální chyba čtení na stupnici obecné veličiny $z$	$[-]$
$\Phi_e$	– teplotní faktor pro venkovní stranu výměníku	$[\%]$
$\chi$	– koeficient rozložení pravděpodobnosti	$[-]$
$\Psi_e$	– vlhkostní faktor pro venkovní stranu výměníku	$[\%]$

$\alpha$	– úhrnný součinitel průtoku	[-]
$\alpha_{kc}$	– úhrnný součinitel průtoku pro kalibrační clonku	[-]
$\alpha_{mc}$	– úhrnný součinitel průtoku pro měřicí clonu	[-]
$\beta$	– poměr vnitřního průměru clonky/clony a potrubí	[-]
$\delta q_m$	– standardní nejistota hmotnostního průtoku clonkou	[kg.s <sup>-1</sup> ]
$\delta u_{Bz}$	– nejistota typu B obecné veličiny $z$	[-]
$\delta \Delta p$	– nejistota stanovení rozdílu tlaků	[-]
$\delta \phi$	– standardní nejistota stanovení teplotního faktoru	[%]
$\varepsilon$	– expanzní součinitel	[-]
$\varepsilon_{kc}$	– expanzní součinitel kalibrační clonky	[-]
$\varepsilon_{mc}$	– expanzní součinitel měřicí clony	[-]
$\eta_e$	– entalpická účinnost výměníku	[%]
$\eta_h$	– průměrná účinnost vytápění prostor	[-]
$\eta_t$	– tepelná účinnost zpětného získávání tepla	[-]
$\kappa$	– Poissonova konstanta (izoentropický exponent)	[-]
$\rho$	– hustota vzduchu	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\rho_L$	– hustota kapaliny v mikromanometru (líh)	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\rho_{kc}$	– hustota vzduchu před kalibrační clonkou	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\rho_i$	– hustota vzduchu při tlaku a teplotě laboratoře	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\rho_{mc}$	– hustota vzduchu před měřicí clonou	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\varphi$	– relativní vlhkost vzduchu	[-]
$\varphi_{e1}$	– relativní vlhkost přiváděného venkovního vzduchu	[%]
$\varphi_{e2}$	– relativní vlhkost přiváděného vzduchu po průchodu ZZT	[%]
$\varphi_{i1}$	– relativní vlhkost odváděného vnitřního vzduchu	[%]
$\varphi_{i2}$	– relativní vlhkost odváděného vzduchu po průchodu ZZT	[%]

# 1 Úvod

Projevy globálního oteplování, nyní skloňovaného spíše jako globální změna klimatu, se začínají projevovat ve větší míře a častěji. Existuje stále spousta hlasů, které tyto projevy přičítají jiným faktorům. Trend udržitelné budoucnosti nastolený v Evropě přibližně před 20 lety nabírá postupně na síle. Politika má v tomto odvětví velkou a zcela zásadní roli. Pouze některá z nutných opatření jsou schopna korigovat negativní dopady a zároveň generovat ekonomický zisk. Úkolem veřejných rozpočtů je tedy podpora těchto aktivit, která nakonec může prospět i ekonomice. Otázkou je, do jaké míry a jak rychle přijme podobnou myšlenku celý svět a jak dokážeme jako lidstvo vyvážit ekonomické (materiální) zájmy se zájmy o udržitelnou budoucnost.

Obecně se v posledních letech daří zvyšovat energetickou účinnost většiny domácích spotřebičů, zdrojů tepla, efektivitu výroby, dopravy nebo zemědělství. Daří se také snižovat emise dopravních prostředků, velkých i menších spalovacích zdrojů. Snižování spotřebované energie, především primární neobnovitelné, je právě jedním z hlavních cílů environmentální strategie Evropské unie, tzv. strategie 20-20-20. Předsevzatého cíle ve formě množství spotřebované energie pro rok 2020, byť ne s velkým deficitem, se pravděpodobně dosáhnout nepodaří. Vzhledem k růstu ekonomiky totiž celkový objem spotřebované energie v Evropě klesá jen velmi pomalu (pro rok 2017 to bylo -0,4 % oproti roku 1990) a v celosvětovém měřítku naopak stále roste. Nyní se začínají objevovat nové ještě ambicióznější cíle pro rok 2030. Nejvíce skloňován je cíl snížení emisí skleníkových plynů na 55% úroveň ve srovnání s rokem 1990 spolu s následným cílem dosáhnou uhlíkové neutrality v roce 2050. [L1] [L2] [L3] [L4]

Strategie 20-20-20 cílila v době vzniku velkou pozornost na kvalitní vzduchotěsnost budov a s tím související adekvátní efektivní větrání, které bude muset být ve většině případů řešeno nuceně. Cíl ve formě utěsnění obálek budov pomocí zateplení nebo výměny výplně okenních otvorů se daří prosazovat dobře. Nakonec tato opatření vedou i k poměrně rychlé návratnosti vložené investice. Cíle spojené s kvalitním větráním budov se už tak dobře plnit nedaří. Standardem je dnes systém větrání u většiny nových

a rekonstruovaných administrativních budov nebo prodejních domů a center. Zdaleka už ale není systém větrání standardem u novostaveb obytných domů, rodinných domů, rekonstrukcí sídlišť nebo státních budov pro vzdělávání. Tyto budovy zůstávají často bez dobře vyřešeného větrání i po realizaci kvalitních vzduchotěsných opatření. Proč se nedaří prosadit kvalitní větrání budov ve větší míře a proč není automaticky s utěšňováním obvodového pláště řešeno kvalitní větrání? Možnou odpověď by částečně mohla nalézt i tato diplomová práce ve své závěrečné části. [L5] [L6] [L7]

Ostatní praktické části práce mají ukázat možnost a přesnost měření průtoku vzduchu na konkrétní instalované vzduchotechnické jednotce při různých provozních stavech. Cílem je na základě změřených průtoků určit teplotní a vlhkostní faktor zpětného získávání tepla (dále jen ZZT) a komentovat přesnost získaných parametrů v porovnání s daty výrobce. Dílčím cílem je porovnání různých záznamníků (dataloggerů) pro kontinuální měření teplot. Závěrečná část má za cíl zpracovat bilanční výpočet pro určení spotřeby a úspor energií při instalaci vzduchotechnické jednotky (dále jen VZT jednotky). Snahou výpočtu je simulovat co nejpřesněji provoz VZT jednotky při celoročním užívání s využitím podrobných dat venkovních teplot a naměřených provozních dat při praktickém měření.

## 2 Větrání rezidenčních budov

Větráním se přivádí čerstvý vzduch do vnitřních prostorů budov a zároveň odvádí vzduch znehodnocený škodlivinami nebo teplem. Škodlivinami v obytných budovách jsou hlavně oxid uhličitý a případně vzdušná vlhkost. Množství přivedeného čerstvého vzduchu je nejčastěji charakterizováno veličinou intenzita větrání  $I$  [ $\text{h}^{-1}$ ]. Potřebné množství přiváděného čerstvého vzduchu upravují, mimo jiné, vyhláška č.268/2009 Sb. o technických požadavcích na stavby a norma ČSN EN 15665. Zmiňovaná vyhláška uvádí, že pro bytové místnosti musí být zajištěna minimální intenzita větrání  $0,5 \text{ h}^{-1}$  (v době přítomnosti osob) a zároveň dodržen požadavek dávky čerstvého vzduchu na osobu  $25 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Norma ČSN EN 15665 doporučuje totéž a jako minimální přípouští hodnotu intenzity větrání  $0,3 \text{ h}^{-1}$  a dávku čerstvého vzduchu na osobu  $15 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Úplně základní rozdělení větrání je na přirozené a nucené. [L8]

Mezi přirozené větrání se v rámci obytných budov řadí provětrávání (větrání otevřenými okny), infiltrace (výměna vzduchu netěsnostmi spár oken, dveří, případně netěsnostmi obvodového pláště) a u vícepodlažních budov ještě šachtové větrání. Vlivem stále těsnějších obvodových plášťů u nově realizovaných nebo rekonstruovaných budov už však nelze spoléhat na přirozenou výměnu vzduchu nebo jen velmi částečně. Motivací pro utěšňování obvodových plášťů je snaha snížit tepelné ztráty větráním a snížit tak potřebné množství energie na vytápění. Pro minimalizaci tepelné ztráty větráním je nutné přivést do objektu v daný okamžik právě potřebné množství čerstvého vzduchu. To však jde ve většině případů spolehlivě splnit pouze za pomoci nuceného větrání. [L8]

Nucené větrání v rezidenčních objektech lze rozdělit na celkové větrání a místní odsávání. V případě místního odsávání se jedná o nejjednodušší formu nuceného větrání, kdy se odsává vzduch zpravidla v hygienických místnostech nebo v kuchyni bytové jednotky a čerstvý vzduch je přiváděn do celého prostoru bytu netěsnostmi v obvodových konstrukcích. Toto řešení je však pro dnešní těsné obvodové pláště obtížněji realizovatelné. Řešení, které je schopno zajistit dostatečné množství čerstvého vzduchu, je systém celkového větrání. Systém celkového větrání je charakterizován přívodem

čerstvého vzduchu v obytných místnostech a zároveň odvodem znehodnoceného vzduchu z hygienických místností, případně kuchyně. Zpravidla tento systém využívá zařízení ZZT pro úsporu energií na ohřev čerstvého vzduchu. Další trochu specifickou kategorií jsou místní jednotky pro větrání s možností ZZT, které často slouží pro větrání pouze jedné místnosti a jsou tak vhodnou alternativou při rekonstrukcích, kde instalace rozvodů vzduchu je nemožná nebo značně složitá. [L8]

## 2.1 Jednotky pro celkové větrání

Jak již bylo uvedeno, nejčastěji je celkové větrání realizováno přívodem vzduchu v obytných místnostech a odvodem znehodnoceného vzduchu z WC, koupelny, případně z kuchyně. Nejčastěji je řešeno jako rovnotlaké, což je výhodné hned z několika důvodů. Jeden z důvodů je, že nedochází k tepelným ztrátám, jako je tomu v případě podtlakového nebo přetlakového větrání, kdy část vzduchu proniká skrz obvodový plášť dovnitř nebo ven, bez možnosti zpětného zisku tepla. Další výhodou rovnotlakého systému je minimalizace proudění vzduchu skrz obvodový plášť budovy a tím minimalizace kondenzace vzdušné vlhkosti uvnitř konstrukce. Jádrem celého systému je pak vzduchotechnická jednotka, která může mít v závislosti na různých požadavcích, kromě samotného větrání, i další funkce. Pokud vzduchotechnická jednotka upravuje aktivně parametry vzduchu jako je teplota a vlhkost, hovoříme už o komfortní klimatizaci. Také pro komfortní klimatizaci je primárním úkolem větrat, tedy zajistit potřebné množství čerstvého vzduchu. Při větrání bytových domů lze aplikovat dva přístupy. První přístup využívá centrální vzduchotechnickou jednotku pro celý bytový dům, kdežto druhý přístup volí samostatnou jednotku pro každý samostatný byt, případně patro. Jedna společná jednotka má výhodu v lepší účinnosti většího zařízení, snadnější údržbě a snadnějším umístění na střeše nebo ve sklepě domu. Nevýhodou je pak nutnost objemných rozvodů napříč domem, které jsou ve starší zástavbě často špatně realizovatelné. Druhý přístup se samostatnou jednotkou tuto nevýhodu eliminuje, na druhou stranu nevýhodami tohoto systému je komplikovanější umístění jednotky v rámci bytu nebo přilehlé chodby, složitější odhlučnění jednotky a zpravidla nižší účinnost. [L8]

Z hlediska provedení a dosahovaných parametrů jsou na vzduchotechnické jednotky kladeny legislativní nároky stanovené nařízením komise Evropské unie č. 1253/2014, nazývané také jako tzv. ekodesign větracích jednotek. [L9]

### **2.1.1 Nařízení komise Evropské unie č. 1253/2014**

Dvě části tohoto nařízení vstoupily postupně v platnost v letech 2016 a 2018. Nařízení stanovuje požadavky na konstrukční provedení a dosahované parametry větracích jednotek pro obytné a jiné než bytové budovy. Nařízení dále stanovuje metodiku pro hodnocení těchto jednotek za účelem zařazení jednotek do určitých energetických tříd. Díky tomu se tak vytvořila možnost jednotky mezi sebou jednodušeji porovnávat. Také stanovuje seznam parametrů, jež musí výrobci jednotek o výrobcích uvádět. Jedno z nejdůležitějších kritérií pro hodnocení jednotek je vypočtená hodnota, tzv. SEC [kWh.m<sup>-2</sup>.a<sup>-1</sup>] (specific electric consumption). Tato hodnota udává množství spotřebované energie za jeden rok při větrání, vztažené na jednotku vytápěné podlahové plochy. Limitem pro jednotky určené pro obytné budovy je od roku 2018 hodnota - 20 kWh.m<sup>-2</sup>.a<sup>-1</sup>. Dokument dále nařizuje jednotky vybavovat pouze ventilátory s motory, které umožňují změnu otáček minimálně ve 3 stupních. Dále stanovuje nutnost vybavit všechna zařízení obtokem ZZT a stanovuje nutnost vybavit zařízení vizuální signalizací pro výměnu filtrů. [L9]

### **2.1.2 Prvky vzduchotechnických jednotek**

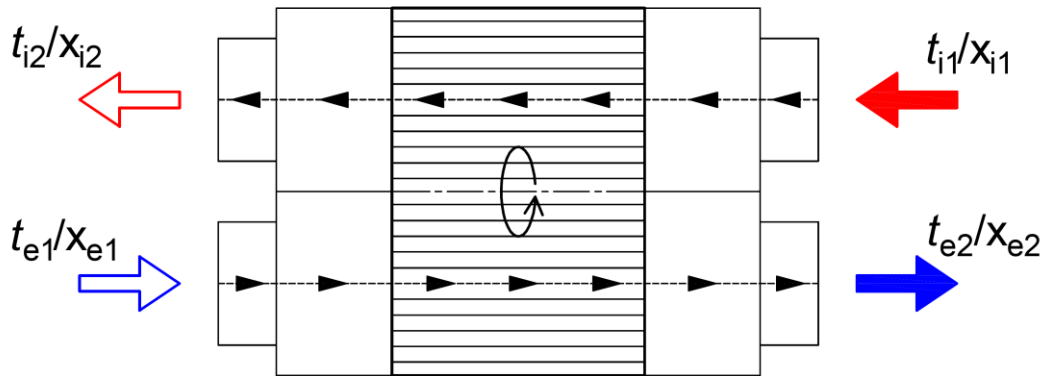
Typická vzduchotechnická jednotka pro centrální větrání obytných budov je v nezákladnějším provedení složena z filtru na vstupu venkovního vzduchu do jednotky, ventilátoru přívodního vzduchu, zařízení pro zpětné získávání tepla, ventilátoru odvodního vzduchu a filtru na vstupu odváděného vzduchu do jednotky. Dále bývají jednotky vybaveny ohříváčem, který nejčastěji slouží pro dohřev vzduchu za zařízením ZZT při extrémně nízkých teplotách venkovního vzduchu nebo může sloužit jako plnohodnotný ohříváč s vyšším výkonem pro plnohodnotné teplovzdušné vytápění. Samozřejmě je možné jednotky vybavit také chladičem nebo zvlhčovačem pro možnost dalších úprav vzduchu. Potom se už bezesporu jedná o klimatizační zařízení. Náročnými prvky z hlediska spotřeby energie jsou ventilátory. Proto je snahou, aby jejich účinnost

byla co možná nejvyšší. Další prvek, který může podstatně ovlivnit celkovou efektivitu jednotky je zařízení pro ZZT. [L9]

### **2.1.3 Zařízení pro ZZT**

Hlavním cílem zařízení pro zpětné získávání tepla je odebrat odpadnímu vzduchu co možná největší množství energie, a tu s co možná nejmenšími ztrátami předat vzduchu čerstvému, který má zpravidla nižší teplotu. Pokud je používáno zařízení v letním období, lze jej samozřejmě využít ke stejnému účelu a zpětně získávat z odpadního vzduchu „chlad“. Zařízení ZZT se dělí do dvou základních skupin dle způsobu výměny tepla na rekuperační a regenerační. Rekuperační výměníky pracují na přímé výměně tepla (prostupu tepla) přes teplosměnnou plochu (deskové a trubkové výměníky). Lze také využít výměníky dva, kde je teplo transportováno pomocnou tekutinou mezi výměníky na větší vzdálenost. Regenerační výměníky pak využívají princip akumulace tepla do hmoty. Existují výměníky s pohyblivou akumulací hmotou (rotační výměníky) nebo výměníky s pevnou akumulací hmotou (tzv. přepínací výměníky). Většina zmiňovaných výměníků je konstruována na získání citelného tepla. Některé výměníky získávají také vlhkost a tím předávají teplo vázané. Tyto výměníky se nazývají entalpické výměníky. Existují také aplikace, kde je vzduchotechnická jednotka vybavena tepelným čerpadlem. Získané teplo pak nemusí být předáváno venkovnímu vzduchu, ale lze jím například připravovat teplou vodu. [L9]





- $t_{i1}/x_{i1}$  TEPLOTA/MĚRNÁ VLHKOST ODVÁDĚNÉHO VZDUCHU  
 $t_{i2}/x_{i2}$  TEPLOTA/MĚRNÁ VLHKOST ODVÁDĚNÉHO VZDUCHU  
 PO PRŮCHODU ZZT  
 $t_{e1}/x_{e1}$  TEPLOTA/MĚRNÁ VLHKOST PŘIVÁDĚNÉHO VENKOVNÍHO VZDUCHU  
 $t_{e2}/x_{e2}$  TEPLOTA/MĚRNÁ VLHKOST PŘIVÁDĚNÉHO VENKOVNÍHO VZDUCHU  
 PO PRŮCHODU ZZT

**Obrázek 1** Schéma procházejících proudů vzduchu výměníkem ZZT (rotační výměník)

Důležitým kvalitativním parametrem výměníků pro ZZT je teplotní faktor (někdy nesprávně označována jako teplotní účinnost). Pro přívodní stranu výměníku je teplotní faktor  $\Phi_e$  [%] definován jako:

$$\Phi_e = \frac{t_{e2} - t_{e1}}{t_{i1} - t_{e1}}, \quad (1)$$

- kde  $t_{i1}$  je teplota odváděného vnitřního vzduchu [°C],  
 $t_{e1}$  je teplota přiváděného venkovního vzduchu [°C],  
 $t_{e2}$  je teplota přiváděného vzduchu po průchodu ZZT [°C]. [L9]

Obdobně jako ve vztahu (1) lze definovat vlhkostní faktor. Pro přívodní stranu výměníku je vlhkostní faktor  $\Psi_e$  [%] definován jako:

$$\Psi_e = \frac{x_{e2} - x_{e1}}{x_{i1} - x_{e1}}, \quad (2)$$

- kde  $x_{i1}$  je měrná vlhkost odváděného vnitřního vzduchu [g.kg<sup>-1</sup>],  
 $x_{e1}$  je měrná vlhkost přiváděného venkovního vzduchu [g.kg<sup>-1</sup>],  
 $x_{e2}$  je měrná vlhkost přiváděného vzduchu po průchodu ZZT [g.kg<sup>-1</sup>]. [L9]

Ze vztahu (1) je zřejmé, že pokrývá pouze zmiňovanou oblast citelného tepla. Pokud použijeme vztah zahrnující také přenos vázaného tepla, získáme tak entalpickou účinnost výměníku  $\eta_e$  [%], ve tvaru:

$$\eta_e = \frac{h_{e2} - h_{e1}}{h_{i1} - h_{e1}}, \quad (3)$$

kde  $h_{i1}$  je měrná entalpie odváděného vnitřního vzduchu [ $\text{kJ.kg}^{-1}$ ],  
 $h_{e1}$  je měrná entalpie přiváděného venkovního vzduchu [ $\text{kJ.kg}^{-1}$ ],  
 $h_{e2}$  je měrná entalpie přiváděného vzduchu po průchodu ZZT [ $\text{kJ.kg}^{-1}$ ].

Zmíněné vztahy (1), (2) a (3) platí pouze za předpokladu vyrovnaných hmotnostních průtoků na obou stranách výměníku. [L9] [L10]

### **Deskový rekuperační výměník ZZT**

Jedná se o velice používaný typ výměníku ve VZT jednotkách. Většinou se skládá z velkého množství profilovaných desek, které jsou k sobě lepeny, letovány, svařovány apod. Desky jsou uspořádány tak, aby byl výměník tvořen dvěma oddělenými prostory pro přívodní a odvodní proud vzduchu. Desky jsou vyráběny z různých materiálů (plasty, slitiny lehkých kovů, nerezavějící oceli, na bázi papíru a další...). Převážně kovy a neporézní plasty tvoří pro vlhkost nepropustnou bariéru, proto tyto typy výměníků slouží pouze pro předávání citelného tepla. Nejvyššího teplotního faktoru dosahují v protiproudém zapojení. Teplotní faktor těchto výměníků dosahuje až 85 % v závislosti na provedení a rychlosti proudění vzduchu. Může na nich docházet ke kondenzaci a musejí tak být odolné proti vodě. Jednotka musí být vybavena prvky pro protimrazovou ochranu pro případ zamrzání. Speciální plasty nebo materiály na bázi papíru umožňují, mimo prostup tepla, také přenos vlhkosti. Tyto výměníky jsou pak vzhledem k nasákavosti náchylnější na nízké teploty, proto je u nich důležité zajistit důslednou protimrazovou ochranu. Obecně jsou deskové výměníky náročnější na prostor, proto jsou nejčastěji používány v menších jednotkách. [L9] [L11]

### **Trubkový rekuperační výměník**

Tento typ výměníku se vzhledem ke svému obecně nižšímu teplotnímu faktoru v rezidenčních budovách téměř nepoužívá. Teplotní faktor se u těchto výměníků pohybuje okolo 50 %. Výměník je sestaven ze svazku trubek, které jsou nejčastěji

obtékány přívodním vzduchem. Trubkami pak protéká vzduch odváděný a přes stěnu trubky se předává teplo vzduchu přiváděnému. Prakticky dokonale odděluje oba proudy vzduchu a vzhledem ke své konstrukci je snadno čistitelný. [L9] [L11]

### **Výměníky s kapalinovým okruhem**

Jejich hlavní předností je možnost předávat teplo na větší vzdálenosti. Není tak nutné trasovat přívodní a odvodní potrubí do jednoho místa. Další výhodou je úplné znemožnění přenosu škodlivin mezi odváděným a přívodním proudem vzduchu. Dva výměníky typu voda – vzduch jsou umístěny v obou vzduchovodech. Společně jsou propojeny potrubím s oběhovým čerpadlem a příslušenstvím. Potrubí je kvůli možným nízkým teplotám naplněno nemrznoucí kapalinou. Teplotní faktor u těchto výměníků běžně dosahuje 30 až 50 %, při použití speciálních víceřadých výměníků lze docílit teplotního faktoru až 80 %. Nevýhodami tohoto systému jsou nutné dodatečné nároky na energii pro oběhové čerpadlo a tepelné ztráty při dopravě tepla mezi výměníky. Kvůli nižšímu teplotnímu faktoru a potřebě dodatečné energie jsou tyto výměníky používány pouze v opodstatněných případech. [L9] [L11]

### **Výměníky s přirozeným oběhem chladiva (tepelné trubice)**

Fungují na principu vypařování kapalného chladiva, které se nachází ve spodní polovině svislé trubice v odpadním proudu vzduchu. Vypařené chladivo vystoupá trubicí do horní poloviny, kde je obtékáno přívodním chladnějším vzduchem, kterému předá výparné teplo, zkondenzované chladivo pak stéká po stěnách trubice zpět do spodní poloviny. Tyto výměníky se skládají z více trubic. Pro správnou funkci musí teplota varu a kondenzace chladiva odpovídat teplotám přívodního a odpadního vzduchu. Většinou se tepelné trubice opatřují žebry pro zvětšení plochy přestupu tepla a existují i konstrukce pro vodorovné umístění trubic. Z hlediska přenosu škodlivin mezi odpadním a přívodním vzduchem patří tepelné trubice mezi bezpečná zařízení. Teplotní faktor těchto zařízení dosahuje 65 % a i z tohoto důvodu se pro rezidenční aplikace používají jen výjimečně. [L9] [L11]

### **Regenerační rotační výměník**

Skládá se z rotační akumulární hmoty a pohonu, kdy spojení pohonu a válce zajišťuje většinou plochý řemen. Akumulační válec je prostoupen drobnými kanálky, aby jím mohl proudit vzduch. Kanálky jsou většinou vytvořeny stočením zvlněného plechu. Každá polovina válce zabírá část průřezu přívodního a odvodního potrubí. Proudící odpadní vzduch akumuluje do části hmoty válce teplo, které se následně při pootočení válce předá do proudu přívodního vzduchu. Otáčky válce se nejčastěji pohybují v rozmezí 5 až 20 min<sup>-1</sup>. Teplotní faktor těchto výměníků se běžně pohybuje okolo 80 %. Vzhledem k nutnosti zajištění otáčení válce nelze mezi odvodním a přívodním potrubím docílit absolutního oddělení proudů vzduchu. Proto se často v přívodním potrubí udržuje mírný přetlak a rozhraní mezi proudy vzduchu je opatřeno pohyblivým těsněním. Větší výměníky obsahují navíc často tzv. čisticí zónu, kde dochází k profukování výměníku menším množstvím čerstvého vzduchu za účelem jeho pročištění. Vzhledem k tomu, že u rezidenčních budov se v odpadním vzduchu nenachází žádné významné škodliviny ani velké množství prachu, nachází zde tyto výměníky velké uplatnění. Výhodou těchto výměníků je také dobrý vlhkostní faktor, který běžně dosahuje 10 až 20 %. Pokud se povrch výměníku opatří vhodnou hygroskopickou vrstvou, může vlhkostní faktor dosahovat až 70 %. Další výhodou jsou poměrně malé prostorové nároky, především u výkonnějších zařízení. [L9] [L11]

### **Přepínací regenerační výměník**

Funguje na principu cyklického „nabíjení“ a „vybíjení“ tepla prostřednictvím akumulární hmoty. Princip pro celkové větrání využívá dvou akumulárních hmot, kdy část doby se jeden z výměníků ohřívá odpadním vzduchem a druhý výměník se ochlazuje vzduchem přívodním. Po určité době (řádově desítkách sekund) se pomocí klapky přesměrují proudy vzduchu a proces probíhá opačně. Systémy pro místní větrání využívají dvou zařízení. Každé zařízení obsahuje jeden ventilátor a jednu akumulární hmotu. Cyklicky se pak mění směr proudění v obou zařízeních. Teplotní faktor těchto výměníků dosahuje 60 až 90 % a vlhkostní faktor se pohybuje okolo 60 %. [L9] [L11]

### 3 Větrací jednotka Systemair SAVE VTR 500 R

#### 3.1 Konstrukce a technické parametry

Jedná se o rezidenční větrací jednotku s regeneračním rotačním výměníkem pro ZZT. Tato jednotka je koncipována pro stěnovou montáž. Jednotka je v základním provedení vybavena radiálními ventilátory s EC (elektronicky komutovanými) motory, regeneračním rotačním výměníkem pro ZZT, elektrickým ohřivačem vzduchu, kapsovými filtry vzduchu na vstupních hrdlech vzduchu do jednotky a řídicím elektronickým systémem. Volitelně lze jednotku doplnit vodním ohřivačem nebo chladičem, případně přímým výparníkem. Připojení k elektrické síti je standardní 230 V/50 Hz. [L12]

Dvojité plášť jednotky je vyroben z pozinkovaného plechu. Dutina mezi stěnami je vyplněna tepelnou a protihlukovou izolací z minerální vaty (30 mm). Na horním povrchu jednotky je umístěn připojovací box pro veškeré vstupní a výstupní el. obvody. Pro případ servisních úkonů, čištění a výměnu filtrů má jednotka snadno otevíratelné čelní dveře. Průměr vstupních a výstupních hrdel pro napojení vzduchovodů je 200 mm. [L12]



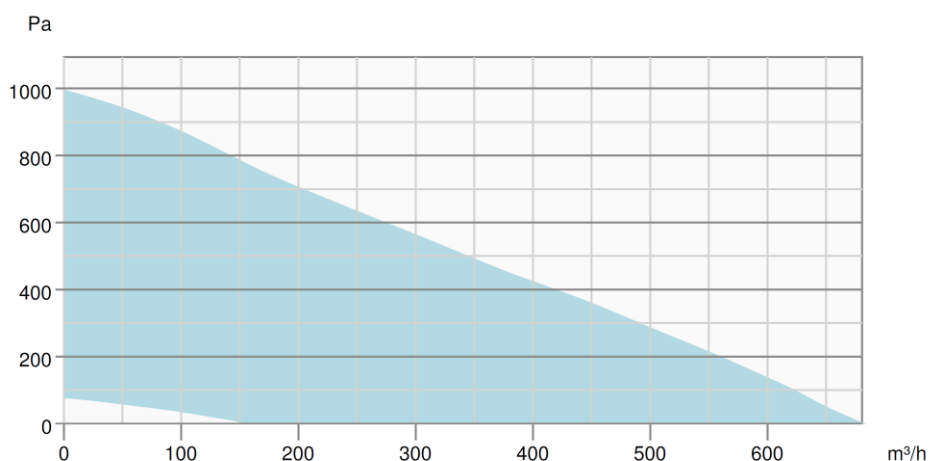
**Obrázek 2** Vzduchotechnická jednotka Systemair SAVE VTR 500 R [L12]

### Ventilátory

Jednotka je osazena radiálními ventilátory od firmy EBM – PABST s označením K3G190-RD45-14. Oběžné kolo ventilátoru s průměrem 200 mm se skládá ze sedmi dozadu zahnutých lopatek, pohon kola je zajištěn pomocí EC motoru. Max. příkon ventilátoru je 169 W, při jmenovitých otáčkách  $4129 \text{ min}^{-1}$ . Celková účinnost ventilátoru při jmenovitých parametrech je 56 %. Otáčky ventilátorů jsou regulovatelné v rozmezí 10 až 100 % napětovou regulací v rozsahu 0 až 10 V. Maximální průtok vzduchu jednotkou je v závislosti na tlakové ztrátě vzduchovodu přibližně  $500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Podrobnější parametry uvádí výkonová křivka viz obrázek 4. Jedná se o křivku ventilátoru včetně uvažování vnitřní tlakové ztráty jednotky. [L13] [L12]



*Obrázek 3 Ventilátor EBM – PABST K3G190-RD45-14*



**Obrázek 4** Závislost průtoku vzduchu jednotkou na externí tlakové ztrátě – přívod [L12]

\* Závislost pro odvod je velmi obdobná

### Regenerační výměník

Regenerační rotační výměník tepla se skládá z rotačního válce z vlnitého plechu a EC motoru, jehož otáčky jsou regulovatelné v rozsahu přibližně 1 až 10 min<sup>-1</sup> napěťovou regulací v rozsahu 1 až 10 V. Těsnost mezi rotačním výměníkem a pevnou částí jednotky je zajištěna pomocí kartáčového těsnění. Spojení rotoru a motoru je pomocí plochého pryžového řemenu. Teplotní účinnost výměníku ZZT je dle údajů výrobce 84 %. Výrobce neudává technické parametry pro přenos vlhkosti výměníkem ZZT. [L12]



**Obrázek 5** Rotační regenerační výměník tepla (detail)

**Elektrický ohřivač**

Osazen je těsně před výstupním hrdlem čerstvého přiváděného vzduchu. Výkon ohřivače je 1,67 kW a slouží pouze pro navýšení teploty v případě velice nízkých venkovních teplot. Regulace výkonu je řešena plynule pomocí elektroniky s triakem. Ohřivač je vybaven elektronickou ochranou proti nadměrnému ohřátí vzduchu. Max. teplota vzduchu za ohřivačem se nastavuje v servisním nastavení jednotky a je měřena samostatným snímačem teploty. Sekundárně je ohřivač vybaven také mechanickou ochranou proti přehřátí, kterou je v případě překročení určité teploty a vybavení ochrany nutno obnovit mechanicky pomocí tlačítka. [L12]

**Filtry**

Jednotka je v základním vybavení dodávána s kapsovým filtrem na vstupu čerstvého vzduchu s třídou filtrace F7 a na vstupu odváděného vzduchu kapsovým filtrem s třídou filtrace G3. Tyto filtry jsou po otevření čelních dveří vyjmutelné pro případnou výměnu. Výrobce doporučuje výměnu filtrů každých 3 až 15 měsíců dle množství znečištění. Software jednotky umožňuje libovolně nastavit interval výměny za účelem automatického upozornění. [L12]

**Řídicí elektronika**

Pracuje na protokolu ModBus/RS485, obsahuje několik analogových, digitálních a univerzálních vstupů případně výstupů. LCD dotykový display slouží pro čtení informací a pro uživatelské, případně servisní ovládání. Umístěn je na čelní stěně jednotky. Další externí ovládací panely lze k jednotce připojit pomocí příslušných vodičů s maximální doporučenou vzdáleností 50 m. [L12]

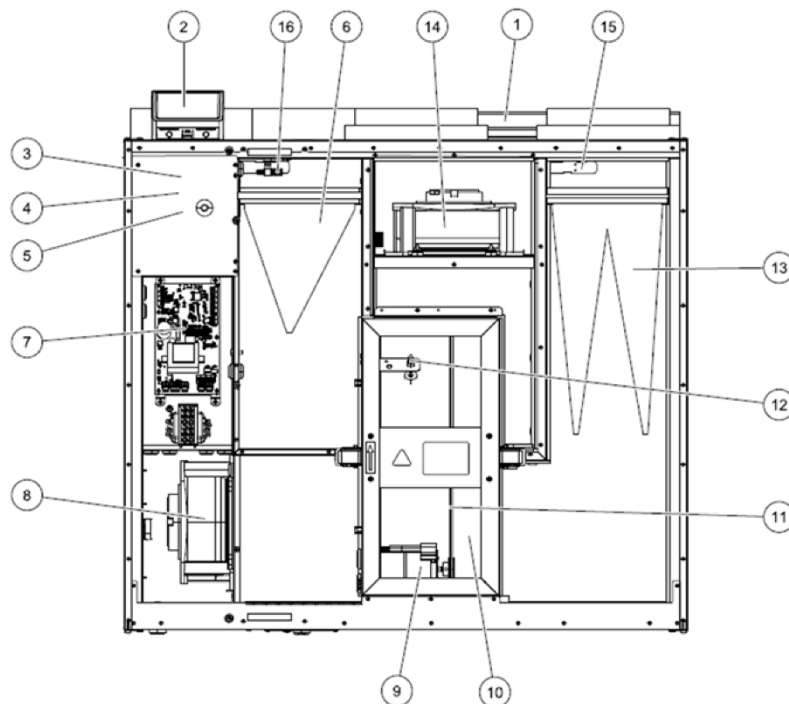
**Senzorové vybavení**

Jednotka je v základním provedení vybavena čtyřmi teplotními a jedním vlhkostním snímačem. Měření teploty vzduchu zajišťují analogová teplotní čidla s NTC charakteristikou a odporem 10 k $\Omega$  při 25 °C. Měření vlhkosti obstarává snímač neznámého typu. Další snímače pro regulaci volitelného příslušenství je možné připojit k připraveným vstupním pinům. [L12]



### **Volitelné komponenty**

Volitelně lze k jednotce připojit několik doplňkových zařízení za účelem využití dalších dostupných energií v domě nebo za účelem rozšíření o další funkce. **Vodní ohříváč** je dodáván ve dvou verzích. Lze jím nahradit standardně dodávaný elektrický ohříváč nebo je možné jej napojit na potrubí přiváděného vzduchu. Ohříváč je možné volit z několika výkonových variant. Lze s ním tedy provozovat jednotku v režimu částečného nebo úplného teplovzdušného vytápění. Regulace na straně topné vody je řešena pomocí směšovacího setu (třícestná směšovací armatura + servopohon). Pro spolehlivý a bezpečný provoz vodního ohříváče je nutné dovybavit jednotku odpovídajícími prvky pro protimrazovou ochranu výměníku. Pro tyto účely se na přívodní a odvodní potrubí instalují potrubní uzavírací klapky s havarijní funkcí. Dalším prvkem protimrazové ochrany je teplotní senzor, který se připevňuje na vratné potrubí vodního výměníku. **Uzavírací klapky** se instalují i v případě, že se nepředpokládá kontinuální provoz jednotky. Klapky pak slouží k zabránění vzniku přirozeného tahu v potrubí. **Vodní chladič** se k jednotce připojuje obdobně jako ohříváč, odpadá zde pouze protimrazová ochrana. Další možností je napojení kombinovaného přepínacího vodního výměníku, který v sobě kombinuje funkce jak ohříváče, tak chladiče. Jednotku je také možné vybavit sadou pro regulaci průtoku vzduchu **VAV/CAV**. Sada pro regulaci průtoku vzduchu na konstantní tlak VAV obsahuje diferenční tlakový převodník a externí regulátor. Sada pro regulaci průtoku vzduchu na konstantní objem CAV obsahuje navíc ještě škrtící nastavitelnou clonu. [L12]



Pozice	Popis
1	Montážní konzola
2	Externí připojení na plášti jednotky
3	Teplotní čidlo, přívod vzduchu
4	Čidlo tepelné ochrany
5	Elektrický ohřívač
6	Filtr, odvod vzduchu
7	Řídící deska se svorkami
8	Ventilátor, přívod vzduchu
9	Motor rekuperátoru a řemenice
10	Rotační rekuperátor
11	Hnací řemen rotačního rekuperátoru
12	Čidlo kontroly otáčení rotačního rekuperátoru
13	Filtr, přívod vzduchu
14	Ventilátor, odvod vzduchu
15	Teplotní čidlo, venkovní vzduch
16	Čidlo relativní vlhkosti / Teplotní čidlo, odvod vzduchu

**Obrázek 6** Popis a umístění komponent – jednotka SAVE VTR 500 [L12]

\* Obrázek 6 popisuje levé provedení jednotky

## 3.2 Nastavení a funkce jednotky

### Uživatelské možnosti

Uživatel má k dispozici pro regulaci 2 hlavní a 5 pomocných režimů. Hlavní režimy jsou po aktivaci spuštěny na neomezenou dobu. Pomocné režimy jsou aktivní pouze po určitou dobu (většinou nastavenou uživatelem). Po deaktivaci pracuje jednotka v hlavním režimu, ve kterém pracovala před aktivací režimu pomocného. Uživatel může také sledovat aktuální hodnoty na všech dostupných senzorech a další dostupné informace o provozu jednotky. [L12]

Hlavní režim **MANUÁLNĚ** má k dispozici celkem 4 úrovně průtoku vzduchu. Úrovně jsou nazvány: Vypnuto/Nízké/Normální/Maximum. Pro každou z těchto úrovní je možné v servisním nastavení zvolit hodnotu otáček ventilátorů. Hodnotu otáček je možné nastavit pro každý z ventilátorů zvlášť a tím vytvořit podtlakové/rovnotlaké/přetlakové větrání objektu. Dále se v tomto režimu nastavuje požadovaná teplota, která vlivem servisního nastavení představuje přívodní teplotu vzduchu, teplotu vzduchu v místnosti (nutno přidat senzor prostorové teploty) nebo teplotu vzduchu odváděného. Poslední možností tohoto režimu je aktivace tzv. **ECO** funkce, která na základě zvolené hodnoty 0 až 10 °C sníží nastavenou teplotu pro spuštění ohřívače. Tato funkce má za cíl snížit četnost spínání elektrického ohřívače a tím snížit provozní náklady. [L12]

Režim **AUTO** může být závislý na týdenním programu nebo na kvalitě vzduchu. Pokud režim **AUTO** pracuje podle týdenního programu, nastavuje uživatel čas trvání tzv. aktivní a inaktivní periody ve dnech od pondělí do neděle. Dále uživatel nastavuje požadovanou úroveň průtoku vzduchu (Vypnuto/Nízké/Normální/Maximum) a odchylku od nastavené teploty pro aktivní a inaktivní periodu. Zároveň je možné v tomto režimu aktivovat funkci **ECO**. Pokud pracuje režim **AUTO** na základě kvality vzduchu, pak přizpůsobuje úroveň větrání požadavku na kvalitu odváděného vzduchu nebo na základě externího snímače z referenční místnosti (většinou snímač CO<sub>2</sub> v kombinaci se snímačem vlhkosti). Režim pak nastavuje množství přiváděného vzduchu ve třech úrovních v závislosti na aktuální hodnotě požadované kvality vzduchu. Nastavení teploty funguje obdobně jako v režimu **MANUÁLNĚ** a funkce **ECO** je také dostupná. [L12]

Pomocný režim **DOVOLENÁ** slouží pro případy, kdy v domě není nikdo přítomný delší dobu. Nastaví se nízká úroveň průtoku vzduchu a aktivuje se automatický režim. Délku trvání nastavuje uživatel v řádech dnů. [L12]

Pomocný režim **NÁVŠTĚVA** se nastavuje při přítomnosti většího počtu osob. Úroveň průtoku vzduchu se nastaví na maximální a nastavená teplota se sníží o 3 K. Dobu trvání nastavuje uživatel v hodinách. [L12]

Pomocný režim **MIMO DOMOV** se volí, když v budově není nikdo přítomen kratší časový úsek. Úroveň průtoku vzduchu se nastaví na minimální a aktivuje se ECO režim. Dobu trvání nastavuje uživatel v hodinách. [L12]

Pomocný režim **PROVĚTRÁNÍ** se používá v případech, kdy je nutné rychle vyměnit maximální množství vzduchu v domě. Úroveň průtoku vzduchu se nastaví na maximální a dobu trvání volí uživatel v minutách. [L12]

Pomocný režim **KRB** se používá v případech odvodu kouře při použití krbu. Po aktivaci je přírodní ventilátor nastaven na maximální úroveň a odvodní ventilátor na úroveň minimální. Dobu trvání volí uživatel v minutách. [L12]

Řídicí systém jednotky dále umožňuje trvale připojit signální vodič z digestoře nebo centrálního vysavače a v případě zapnutí těchto zařízení aktivuje pomocný režim **DIGESTOŘ** nebo **CENTRÁLNÍ VYSAVAČ**. Aktivováním těchto režimů dojde k nastavení úrovně přírodního ventilátoru na maximální úroveň průtoku a odvodního ventilátoru na úroveň minimální. Vzniklý přetlak v budově napomůže lepší funkci spuštěného zařízení. [L12]

Další pro uživatele zajímavou funkcí je možnost ovládání jednotky pomocí mobilního telefonu nebo osobního počítače. Tato funkce je přístupná za pomoci dodatkového modulu pro připojení jednotky k internetu. Uživatel může také pomocí mobilního telefonu a PC provádět veškerá nastavení nebo sledovat aktuální informace o stavu jednotky a o parametrech z teplotních, vlhkostních, případně CO2 snímačů. [L12]

### **Servisní možnosti**

Servisní nastavení umožňuje technikovi přizpůsobit jednotku podmínkám každé instalace. Umožňuje především nastavit úrovním průtoku vzduchu

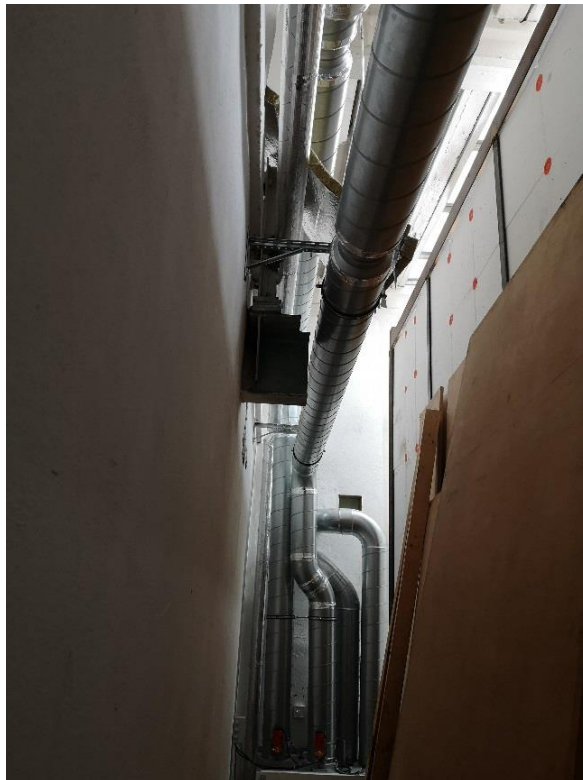
(Vypnuto/Nízké/Normální/Maximum) příslušné otáčky ventilátorů, umožňuje nastavit způsob regulace teploty, kompenzaci pro ECO režim, umožňuje inicializaci vstupních či výstupních pinů a umožňuje nastavit všechny potřebné parametry pro správnou regulaci všech komponentů. Užitečnou funkcí servisního nastavení je možnost generace dat v grafické nebo datové (.csv) podobě. Tato data lze vygenerovat se zpožděním až 2 týdnů. Technik má tedy možnost sledovat vývoj parametrů nebo jednodušeji odhalit závadu na některém ze snímačů. Vygenerovat lze data ze všech připojených senzorů, data o otáčkách ventilátorů, otáčkách regenerátoru nebo data o stavu komponentů ve smyslu zapnuto/vypnuto. [L12]

### **Další funkce**

Servisní nastavení dále umožňuje nastavit nebo povolit další dostupné funkce a nastavit parametry pro jich spuštění. Funkce přenosu vlhkosti mění velikost otáček regenerátoru na základě požadované relativní vlhkosti v odváděném vzduchu. Funkce volné chlazení se spouští v noci a slouží k maximálnímu možnému vychlazení budovy za pomoci chladnějšího venkovního vzduchu. Aktivací této funkce dochází k zastavení regeneračního výměníku a tím se minimalizuje výměna tepla mezi odvodním a přívodním vzduchem. Funkce kompenzace průtoku slouží k automatickému snížení průtoku vzduchu při extrémně nízké teplotě venkovního vzduchu za účelem snížení energetických nároků na dodatečný ohřev vzduchu. Další dostupnou funkcí je odmrazování. Tato funkce je spuštěna za předpokladu možné námrazy na regenerátoru. Funkce je dostupná při použití elektrického předehřívače, který se montuje na přívodní potrubí venkovního vzduchu. Osazení předehřívače kvůli odmrazování regenerátoru doporučuje výrobce pouze ve specifických klimatických podmínkách. K namrzání v podmínkách střední Evropy dochází zcela výjimečně. [L12]

## 4 Praktické měření na jednotce Systemair SAVE VTR 500 R

Měření probíhalo v laboratoři Ústavu techniky prostředí na fakultě strojní ČVUT v Praze. Měření byla podrobena VZT jednotka od firmy Systemair SAVE VTR 500 R (dále jen VTR 500), která je pevně osazena v laboratoři a slouží pro větrání učebny T4:H2-143a v době výuky. Hlavním cílem měření bylo zjistit dosahované průtoky vzduchu a na jejich základě, spolu s údaji o teplotách a vlhkostech, určit charakteristiku teplotního a vlhkostního faktoru rotačního regeneračního výměníku tepla. Dílčím cílem bylo porovnání možných způsobů měření průtoku vzduchu, teplot a vlhkostí.



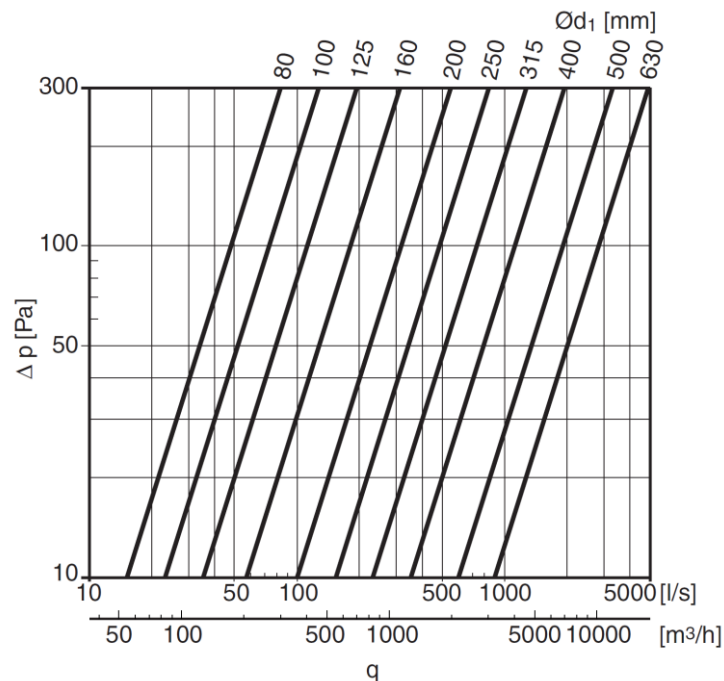
*Obrázek 7 Vedení potrubí k jednotce*

Samotná jednotka je umístěna v halové laboratoři. Přívodní potrubí čerstvého vzduchu je spolu s potrubím odpadního vzduchu vyvedeno nad plochou střeou halové laboratoře. Potrubí přiváděného a odváděného vzduchu je pak vedeno přes místnost vedlejší


laboratoře do samotné učebny T4:H2-143a. Všechna potrubí jsou vyrobena z pozinkovaného plechu o průměru 200 mm, v provedení spiro. Část potrubí čerstvého vzduchu směrem od střechy k jednotce je opatřena tepelnou kamennou vlnou. Před vstupem do učebny jsou na potrubí instalovány tlumiče hluku. Potrubí odváděného vzduchu je v učebně zakončeno čtvercovou vyústkou a potrubí přiváděného vzduchu je zakončeno textilní perforovanou vyústkou válcového tvaru. Tato vyústka je vedena podél celé jedné stěny učebny. Ovládání jednotky je možné pomocí nástěnného dotykového LCD panelu umístěného na jedné ze stěn učebny. Další panel je umístěn na těle jednotky. Poslední možností je jednotku ovládat pomocí mobilní nebo PC aplikace, která je po zadání příslušného hesla dostupná vyučujícímu.

#### **4.1 Měření průtoků vzduchu**

Samotné měření průtoků bylo realizováno pomocí clony (dále jako měřicí clona) od výrobce LINDAB, typ FMU 200-160. Oproti clonce definované normou ČSN ISO 5167 se konstrukčně jedná o poměrně jednoduché zařízení. Zúžením profilu potrubí dochází k tlakové ztrátě, která je úměrná rychlosti proudění. Díky znalosti průřezu potrubí pak lze snadno dopočítat zjišťovaný objemový průtok vzduchu. Pro běžné aplikace dodává výrobce k měřicí cloně graf (obrázek 8) udávající závislost tlakové ztráty měřicí clony na aktuálním průtoku vzduchu. Tento graf je odstupňován podle velikosti nabízených měřicích clon. Alternativně lze průtok zjišťovat podle rovnice, která je uvedena na štítku (obrázek 9) každé měřicí clony. [L14]



**Obrázek 8** Závislost tlakového rozdílu na měřicí cloně a objemového průtoku vzduchu [L14]

		FMU/FMDRU 200-160	
		Flow rate / Flöde	q l/s
Press. diff. / Tryckdiff.	$\Delta p$ Pa	10	300
$q = 29,4 \cdot \sqrt{\Delta p}$		$\Delta p = \left( \frac{q}{29,4} \right)^2$	
Disturbance before measuring device / Störning före mätdon	Meth.err. / Met.fel, m <sub>2</sub>	5 %	10 %
	Dist. from dev. / Avst. från don		
90° bend / 90°-böj		2×d	1×d
Butterfly damper / Vridspjäll		4×d	3×d
		1×d	1×d
		All types / Alla typer	

Rev. B 991206

**Obrázek 9** Štítek měřicí clona LINDAB, typ FMU 200-160

Na štítku je také uveden doporučený měřitelný rozsah průtoků. Splněním tohoto rozsahu a dalších podmínek definovaných na štítku lze předpokládat chybu měřicí clony 5 resp. 10 %. Pro správnou funkci měřicí clony je nejdůležitější zajistit dostatečnou délku přímého potrubí před a za clonou kvůli vyrovnání rychlostního profilu. [L14]

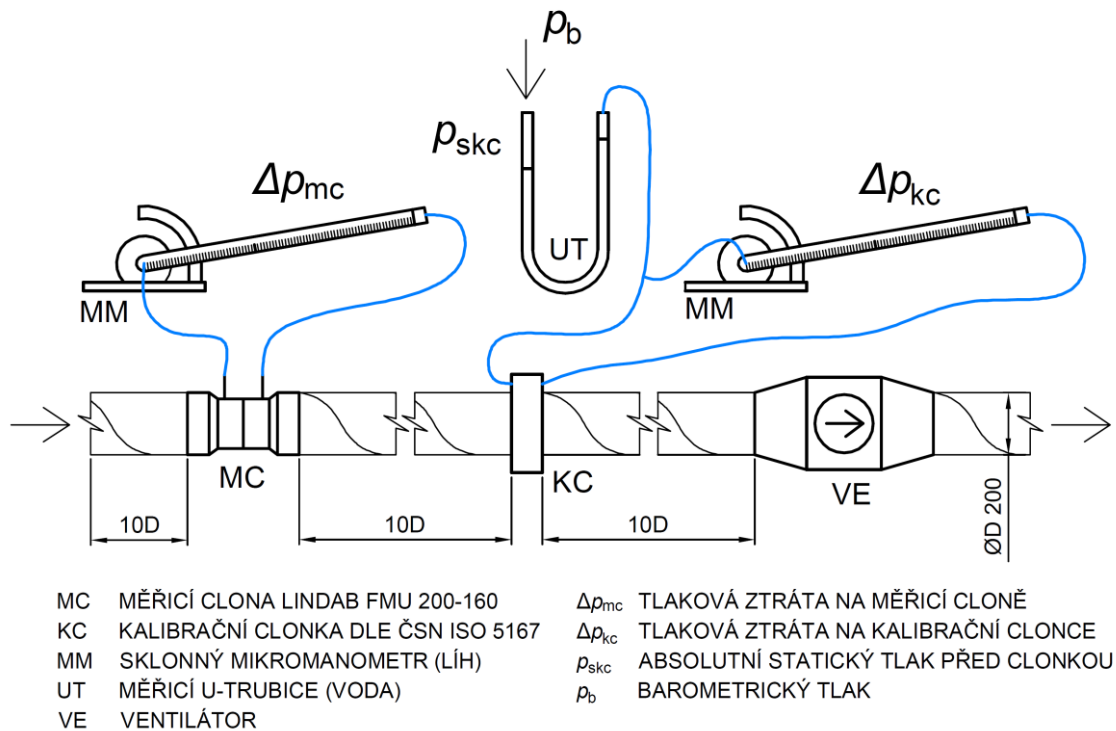




*Obrázek 10 Měřicí clona LINDAB, typ FMU 200-160*

#### **4.1.1 Kalibrace měřicích clon**

Účelem kalibrace bylo zvětšení měřicího rozsahu a zpřesnění měřicích clon. Jako přesnější kalibrační měřidlo byla použita clonka (dále jako kalibrační clonka) dle ČSN ISO 5167. Byla postavena externí měřicí trať, kde byly za sebou postupně umístěny ventilátor, kalibrační clonka a měřicí clona. Před a za oběma měřidly byly dostatečně dlouhé přímé úseky pro ustálení rychlostních profilů. Kalibrována byla jak měřicí clona následně použitá pro měření přiváděného průtoku vzduchu, tak měřicí clona, která byla využita pro měření průtoku na odvodu. Pro měření rozdílu tlaků na kalibrační clonce a měřicí cloně bylo použito sklonných mikromanometrů naplněných lihem. Statický tlak v potrubí před clonkou byl zjišťován pomocí U-trubice naplněné vodou. Vlhkost vzduchu byla určena podle teploty mokrého teploměru naměřenou Assmannovým aspiračním psychrometrem a tlak vzduchu byl stanoven pomocí staničního barometru. Kalibrace probíhala postupným zvyšováním otáček ventilátoru od stojícího ventilátoru až po jeho maximální možné otáčky. Změřeno bylo celkem 12 bodů výsledné charakteristiky.



**Obrázek 11** Schéma kalibrace měřicích clon

Následné zpracování naměřených dat vycházelo ze základní rovnice pro stanovení průtoku na kalibrační clonce, kde je výsledný objemový průtok clonkou definován jako:

$$\dot{V} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d_{kc}^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{kc}}{\rho}}, \quad (4)$$

- kde  $\dot{V}$  je objemový průtok vzduchu protékající clonkou [ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ],  
 $C$  je součinitel průtoku [-],  
 $\beta$  je poměr vnitřního průměru clonky a vnitřního průměru potrubí [-],  
 $\varepsilon$  je expanzní součinitel [-],  
 $d_{kc}$  je vnitřní průměr clonky [m],  
 $\Delta p_{kc}$  je tlaková ztráta na clonce [Pa],  
 $\rho$  je hustota vzduchu před clonkou [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]. [L15]

Součinitel průtoku  $C$  je závislý na Reynoldsově čísle, a proto je nutné výpočet provádět interační metodou. Často je rovnice (4) uváděna také ve tvaru:

$$\dot{V} = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d_{kc}^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{kc}}{\rho}}, \quad (5)$$

kde  $\alpha$  je úhrnný součinitel průtoku [-]. [L15]

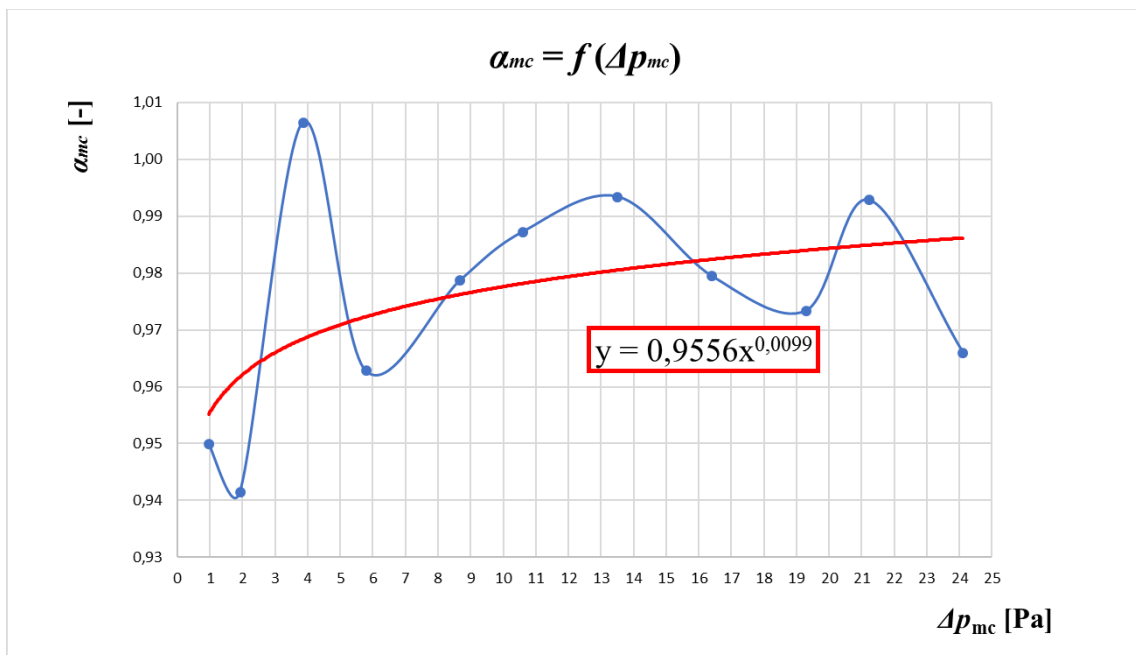
Cílem kalibrace je získat výše uvedený úhrnný součinitel průtoku  $\alpha$  pro kalibrovanou měřicí clonu a následně tak využít rovnici (5) pro stanovení průtoku vzduchu měřicí clonou. Využitím předpokladů, že se kalibrační clonka i měřicí clona řídí rovnicí (5) a při kalibraci protéká oběma měřidly stejný objemový průtok vzduchu, lze sestavit následující rovnost:

$$\alpha_{kc} \cdot \varepsilon_{kc} \cdot \frac{\pi \cdot d_{kc}^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{kc}}{\rho_{kc}}} = \alpha_{mc} \cdot \varepsilon_{mc} \cdot \frac{\pi \cdot d_{mc}^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{mc}}{\rho_{mc}}}. \quad (6)$$

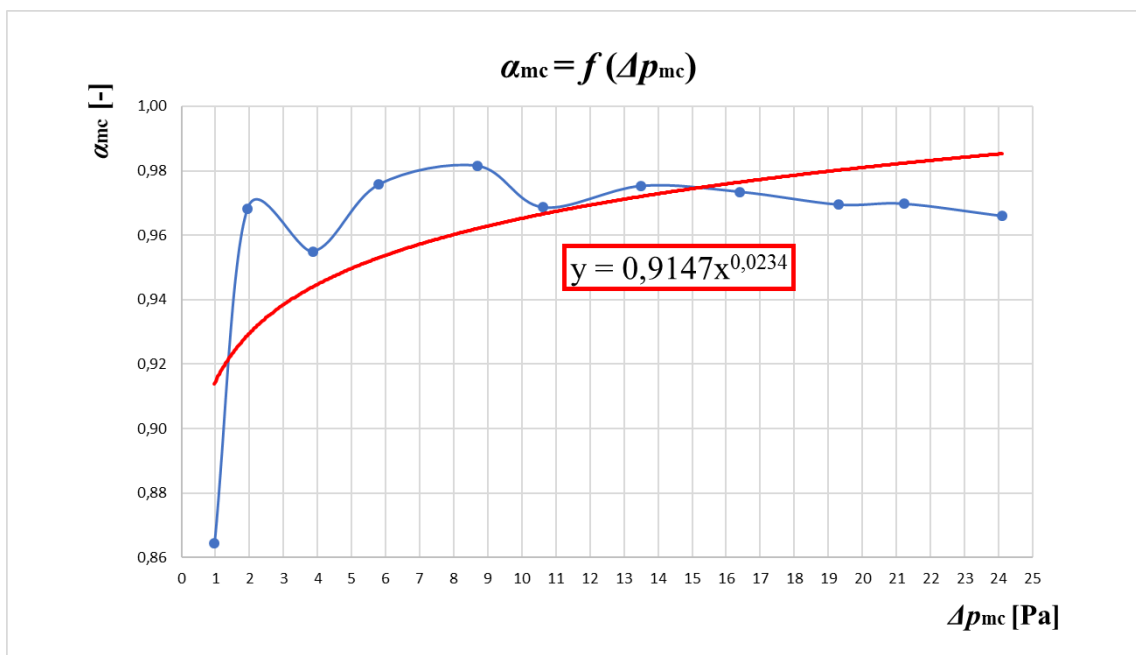
Index „kc“ náleží kalibrační clonce a index „mc“ měřicí cloně. Zanedbáním rozdílů hustot a expanzních součinitelů na kalibrační clonce a měřicí cloně lze vztah (6) upravit do následujícího tvaru:

$$\alpha_{mc} = \alpha_{kc} \left( \frac{d_{kc}}{d_{mc}} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_{kc}}{\Delta p_{mc}}}. \quad (7)$$

Dosazením naměřených hodnot do vztahu (7) byla získána závislost  $\alpha_{mc} = f(\Delta p_{mc})$ , kterou pro přívodní měřicí clonu zobrazuje následující obrázek 12 a pro měřicí clonu odváděného vzduchu pak obrázek 13.



**Obrázek 12** Závislost úhrnného průtokového součinitele na tlakové ztrátě měřicí clony pro přívod



**Obrázek 13** Závislost úhrnného průtokového součinitele na tlakové ztrátě měřicí clony pro odvod

Následně byly tyto závislosti proloženy exponenciálními regresními křivkami. Výsledkem kalibrace tak jsou regresní rovnice (8) a (9) odpovídající křivkám z obrázků 12 a 13. Tyto rovnice byly pak použity pro stanovení průtoku měřicími clonami při vlastním měření.

$$\text{Přívod:} \quad \alpha_{mc} = 0,9556 \cdot \Delta p_{mc}^{0,0099} \quad (8)$$

$$\text{Odvod:} \quad \alpha_{mc} = 0,9147 \cdot \Delta p_{mc}^{0,0234} \quad (9)$$

### Chyba kalibrace

Jelikož rovnice (8) a (9) vznikly regresní metodou jsou zatíženy určitou chybou. Pokud se zpětně dosadí do rovnic (8) a (9) naměřené rozdíly tlaků na měřicích clonách při kalibraci a získaný průtok se porovná s průtokem při kalibraci, tak rozdíl těchto průtoků představuje chybu kalibrace. Stejně tak můžeme porovnat průtoky vypočítané pomocí rovnice od výrobce (10) s průtoky naměřené kalibrační clonkou při kalibraci. Souhrn naměřených průtoků na kalibrační clonce včetně vyčíslení chyb ostatních metod stanovení průtoku pro měřicí clonu uvádí tab. 1.

$$q_{mc} = 29,4 \cdot \sqrt{\Delta p_{mc}} \quad [l \cdot s^{-1}] \quad (10)$$

*Tab. 1 Souhrn naměřených průtoků a chyby vyhodnocovacích metod*

Přívod					Odvod				
$V_{kc}$	Chyba regresní rovnice (8)		Chyba rovnice výrobce (10)		$V_{kc}$	Chyba regresní rovnice (9)		Chyba rovnice výrobce (10)	
$[m^3 \cdot h^{-1}]$	$[m^3 \cdot h^{-1}]$	[%]	$[m^3 \cdot h^{-1}]$	[%]	$[m^3 \cdot h^{-1}]$	$[m^3 \cdot h^{-1}]$	[%]	$[m^3 \cdot h^{-1}]$	[%]
89,0	0,5	<b>0,6</b>	23,0	<b>16,9</b>	81,0	4,6	<b>5,7</b>	23,0	<b>28,4</b>
124,7	2,7	<b>2,2</b>	18,8	<b>17,9</b>	128,2	-5,2	<b>-4,0</b>	18,8	<b>14,7</b>
188,4	-7,0	<b>-3,7</b>	29,1	<b>10,3</b>	178,8	-2,0	<b>-1,1</b>	29,1	<b>16,3</b>
220,7	2,4	<b>1,1</b>	30,9	<b>15,4</b>	223,7	-5,0	<b>-2,3</b>	30,9	<b>13,8</b>
274,7	-0,4	<b>-0,1</b>	36,3	<b>13,5</b>	275,5	-5,1	<b>-1,9</b>	36,3	<b>13,2</b>
306,3	-2,4	<b>-0,8</b>	44,2	<b>12,6</b>	300,6	-0,2	<b>-0,1</b>	44,2	<b>14,7</b>
347,6	-3,9	<b>-1,1</b>	47,6	<b>11,9</b>	341,3	-0,5	<b>-0,1</b>	47,6	<b>14,0</b>
377,5	2,0	<b>0,5</b>	53,3	<b>13,5</b>	375,3	2,0	<b>0,5</b>	53,3	<b>14,2</b>
406,8	5,5	<b>1,4</b>	59,6	<b>14,3</b>	405,3	5,5	<b>1,4</b>	59,6	<b>14,7</b>
435,1	-2,2	<b>-0,5</b>	62,5	<b>12,1</b>	425,1	6,8	<b>1,6</b>	62,5	<b>14,7</b>
451,1	10,9	<b>2,4</b>	68,5	<b>15,2</b>	451,2	10,6	<b>2,3</b>	68,5	<b>15,2</b>

Tabulka 1 ukazuje, že regresní chyba je až o jeden řád menší, než je chyba při použití rovnice výrobce (10). Nutné je podotknout, že doporučený rozsah měřitelných průtoků pro použité měřicí clony je 342 až 1908 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. Podstatná část měření tedy probíhala v oblasti průtoků, kterou výrobce doporučuje vynechat. Chyba rovnice uváděné výrobcem (10) je však i v doporučeném rozsahu podobně velká. Zjištěné hodnoty ukazují, že použití těchto měřicích clon a postupu vyhodnocení průtoku dle výrobce je zatíženo poměrně značnou chybou a je tedy nutné zvážit jejich použití pro danou aplikaci. Dále je vidět, že kalibrací pomocí přesnějšího měřidla (využitím přesnějšího vyhodnocovacího postupu) je možné zmiňovanou chybu poměrně razantně snížit. Výše uvedené postupy odkazují na chyby vůči průtoku určenému pomocí kalibrační clonky, což bylo nejpřesnější měřidlo, které bylo k dispozici. Vzhledem k výrazně přesnějším výsledkům bylo dále pro účely této práce užíváno regresní vyhodnocovací metody. Stanovením nejistoty určení průtoku na kalibrační clonce se pak zabývá následující kapitola.

#### 4.1.2 Nejistota měření průtoku vzduchu clonkou

Vzhledem k tomu, že při kalibraci měřicích clon byla naměřena pro každou měřicí clonu pouze jedna sada dat, tak nelze vyhodnotit nejistotu typu A, která je založena na statistickém vyhodnocování naměřených dat. Nastavení otáček ventilátoru bylo prováděno pomocí triakového regulátoru s manuálním ovládáním. Nebylo tak možné opakovaně nastavovat shodné otáčky ventilátoru. [L16]

Nejistota typu B je svou povahou vyhodnotitelná. Postup vyhodnocení pro clonky uvádí norma ČSN EN ISO 5167. Tato norma uvádí pro standardní nejistotu hmotnostního průtoku clonkou  $\delta q_m$  [kg.s<sup>-1</sup>] vztah (11) a celkovou nejistotu měření pak doporučuje uvádět ve formě rozšířené nejistoty s koeficientem 2 (hladina spolehlivosti 95 %). [L16]

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = \sqrt{\left(\frac{\delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \beta^4}{1 - \beta^4}\right)^2 \cdot \left(\frac{\delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{2}{1 - \beta^4}\right)^2 \cdot \left(\frac{\delta d}{d}\right)^2 + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}\right)^2 + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\delta \rho}{\rho}\right)^2}, (11)$$

kde  $D$  je průměr clonkové trati [m].

Nejistotu součinitele průtoku  $\delta C$  a expanze  $\delta \varepsilon$  uvádí norma ČSN EN ISO 5167.

- Pro rozmezí  $0,6 < \beta > 0,75$  platí:

$$\delta C = (1,667 \cdot \beta - 0,5)\% \cdot C, \quad (12)$$

$$\delta \varepsilon = \left(3,5 \cdot \frac{\Delta p}{\kappa \cdot p_1}\right)\% \cdot \varepsilon, \quad (13)$$

kde  $\kappa$  je Poissonova konstanta (izoentropický exponent) [-],

$p_1$  je absolutní tlak před clonkou [Pa].

Rozměry clonkové tratě  $D$  a vnitřní průměr průtočného průměru clonky  $d$  byly převzaty z údajů na samotné clonce použité při měření. Vzhledem k tomu, že průměry jsou udávány v setinách milimetru, byly rozměry  $D$  a  $d$  pravděpodobně naměřeny běžnými mikrometry při výrobě clonky. Nejistota rozměrů  $D$  a  $d$  se pak určí na základě největší pravděpodobné chyby při odečítání (u mikrometru se běžně pracuje s hodnotou 0,005 mm), pomocí vztahu:

$$\delta u_{Bz} = \frac{\Delta z_{\max}}{\chi}, \quad (14)$$

kde  $\delta u_{Bz}$  je nejistota typu B veličiny  $z$  [dle stupnice měřidla],

$\Delta z_{\max}$  je maximální předpokládaná chyba čtení [dle stupnice měřidla],

$\chi$  je koeficient rozložení pravděpodobnosti (pro rovnoměrné rozdělení  $\chi = \sqrt{3}$ ). [L16]

Rozdíl tlaků  $\Delta p$  na clonce je při měření mikromanometrem určen pomocí vztahu (15). Jelikož se jedná o nepřímé měření, je pro stanovení nejistoty rozdílu tlaků nutné stanovit dílčí nejistoty měřených veličin a jejich koeficienty citlivosti.

$$\Delta p = k \cdot \rho_L \cdot g \cdot (l_1 - l_0), \quad (15)$$

kde  $k$  je koeficient sklonu ramena mikromanometru [-],

$\rho_L$  je hustota kapaliny v mikromanometru (líh) [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],

$g$  je tíhové zrychlení [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ],

$l_1$  je délka sloupce odečtená při měření [m],

$l_0$  je délka sloupce odečtená před měřením [m].

Hustota lihu byla nepřímo určena na základě vztahu (16), kde přímo měřenou veličinou je teplota. Teplota okolí (předpokládaná teplota lihu) byla měřena pomocí „suchého teploměru“ na Assmannově aspiračním psychrometru. Kalibrační protokol teploměru udává maximální chybu teploměru 0,1 °C, vzhledem ke stáří kalibrace a rozlišení stupnice je ve výpočtu uvažováno s možnou maximální chybou 0,2 °C. Samotná nejistota stanovení teploty byla pak určena podle vztahu (14) (pro rovnoměrné rozdělení  $\chi = \sqrt{3}$ ).

$$\rho_L = 806,2 - 0,85 \cdot t_a, \quad (16)$$

kde  $t_a$  je teplota „suchého teploměru“ vzduchu (okolí) [°C].

Koeficient citlivosti hustoty na teplotě (17) vychází z 1. derivace vztahu (16) podle teploty.

$$\frac{\partial \rho_L}{\partial t_a} = A_{t_a} = -0,85 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (17)$$

Výslednou nejistotu hustoty lihu pak uvádí vztah (18).

$$\delta \rho_L = \sqrt{A_{t_a}^2 \cdot \delta t_a^2} \quad (18)$$

Koeficient citlivosti rozdílu tlaků na hustotě (19) vychází z 1. derivace vztahu (15) podle hustoty.

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial \rho_L} = A_{\rho_L} = k \cdot g \cdot (l_1 - l_0) \quad [\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (19)$$

Nejistota stanovení tíhového zrychlení, není vzhledem k zanedbatelně malé možné chybě, ve výpočtu uvažována. Použita je běžně uváděná hodnota pro Prahu 9,8104 m.s<sup>-2</sup>.

Nejistota rozměrů  $l_0$  a  $l_1$  na mikromanometru se stanoví na základě maximální možné předpokládané chyby odečtu, kterou se uvažuje 1 mm, což je velikost jednoho dílku stupnice mikromanometru. Samotná nejistota se pak určí podle vztahu (14) (pro rovnoměrné rozdělení  $\chi = \sqrt{3}$ ). [L16]



Koeficienty citlivosti rozdílu tlaků na rozměrech  $l_0$  a  $l_1$  vycházejí z 1. derivací vztahu (15) podle příslušných rozměrů:

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial l_0} = A_{l_0} = -k \cdot \rho_L \cdot g \quad [\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (20)$$

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial l_1} = A_{l_1} = k \cdot \rho_L \cdot g \quad [\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (21)$$

Výsledná nejistota určení rozdílu tlaku na clonce odpovídá následujícímu vztahu:

$$\delta \Delta p = \sqrt{A_{\rho_L}^2 \cdot \delta \rho_L^2 + A_{l_1}^2 \cdot \delta l_1^2 + A_{l_0}^2 \cdot \delta l_0^2} \quad (22)$$

Hustota proudícího vzduchu v potrubí před clonkou  $\rho_{kc}$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] při kalibraci byla stanovena pomocí následujícího vztahu:

$$\rho_{kc} = \frac{p_{skc}}{p_b} \cdot \rho_i, \quad (23)$$

kde  $p_{skc}$  je absolutní statický tlak v potrubí před clonkou [Pa],

$p_b$  je atmosférický tlak v místě laboratoře [Pa],

$\rho_i$  je hustota vzduchu při tlaku a teplotě laboratoře [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ].

Statický podtlak byl měřen v místě před clonkou U-trubicí naplněnou vodou. Výsledný absolutní tlak  $p_{skc}$  byl stanoven na základě vztahu (24). Hustota vody  $\rho_w$  byla stanovena pomocí vztahu (25). Barometrický tlak  $p_b$  byl měřen staničním barometrem a vyhodnocen pomocí postupu, který odpovídá použitému typu barometru. [L15] Hustota vzduchu v laboratoři  $\rho_i$  byla určena na základě měření teploty mokrého teploměru pomocí Assmannova aspiračního psychrometru a vyhodnocena pomocí vztahu (26).

$$p_{skc} = p_b - \Delta h \cdot g \cdot \rho_L, \quad (24)$$

kde  $\Delta h$  je rozdíl výšek hladin při měření na U-trubici [m].

$$\rho_w = 1000 - (t_a - 4) \cdot [0,097 + 0,0036 \cdot (t_a - 4)], \quad (25)$$

$$\rho_i = \frac{p - 0,378 \cdot \varphi \cdot p_{vs}}{r_a \cdot T}, \quad (26)$$

- kde  $p$  je tlak vzduchu (barometrický tlak) [Pa],  
 $\varphi$  je relativní vlhkost vzduchu [-],  
 $p_{vs}$  je parciální tlak sytých vodních par [Pa],  
 $r_a$  je měrná plynová konstanta suchého vzduchu [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  
 $T$  je teplota vzduchu [K].

Vzhledem k tomu, že práce se primárně nezabývá stanovením nejistot měření, tak poměrně komplikovaný řetězec pro stanovení nejistoty hustoty vzduchu před clonkou byl zjednodušen odhadem maximální možné chyby pro určení hustoty vzduchu před clonkou jako  $\Delta\rho_{kc} = 0,01 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Nejistota hustoty vzduchu před clonkou, byla pak stanovena pomocí vztahu (14) s uvažováním rovnoměrného rozdělení  $\chi = \sqrt{3}$ . [L16]

Naměřené průtoky clonkou při kalibraci včetně výsledných rozšířených nejistot  $U(k=2)$  určených na základě výše uvedeného postupu uvádí tab. 2.

**Tab. 2** Naměřené průtoky kalibrační clonkou při kalibraci, včetně rozšířených nejistot.

Přívod				Odvod			
$q_{kc}$	$U_q(k=2)$	$V_{kc}$	$U_v(k=2)$	$q_{kc}$	$U_q(k=2)$	$V_{kc}$	$U_v(k=2)$
[ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	[ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	[ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ]	[ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ]	[ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	[ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	[ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ]	[ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ]
0,0285	0,0018	89,0	<b>5,6</b>	0,0259	0,0020	81,0	<b>6,2</b>
0,0399	0,0014	124,7	<b>4,3</b>	0,0410	0,0014	128,2	<b>4,2</b>
0,0603	0,0012	188,4	<b>3,8</b>	0,0572	0,0012	178,8	<b>3,7</b>
0,0706	0,0013	220,7	<b>3,9</b>	0,0716	0,0013	223,7	<b>3,8</b>
0,0879	0,0014	274,7	<b>4,4</b>	0,0881	0,0014	275,5	<b>4,4</b>
0,0980	0,0016	306,3	<b>4,8</b>	0,0961	0,0015	300,6	<b>4,7</b>
0,1112	0,0017	347,6	<b>5,3</b>	0,1092	0,0017	341,3	<b>5,2</b>
0,1207	0,0019	377,5	<b>5,7</b>	0,1200	0,0018	375,3	<b>5,7</b>
0,1301	0,0020	406,8	<b>6,1</b>	0,1296	0,0020	405,3	<b>6,1</b>
0,1391	0,0021	435,1	<b>6,5</b>	0,1359	0,0021	425,1	<b>6,4</b>
0,1442	0,0022	451,1	<b>6,7</b>	0,1442	0,0022	451,2	<b>6,7</b>

Podrobnější analýza výpočtu nejistot ukazuje, že významný vliv na konečnou nejistotu má chyba určení rozdílu tlaků na clonce. Především při nižších průtocích bylo odečítáno na spodní hranici stupnice měřidla a výsledná relativní chyba byla poměrně vysoká.

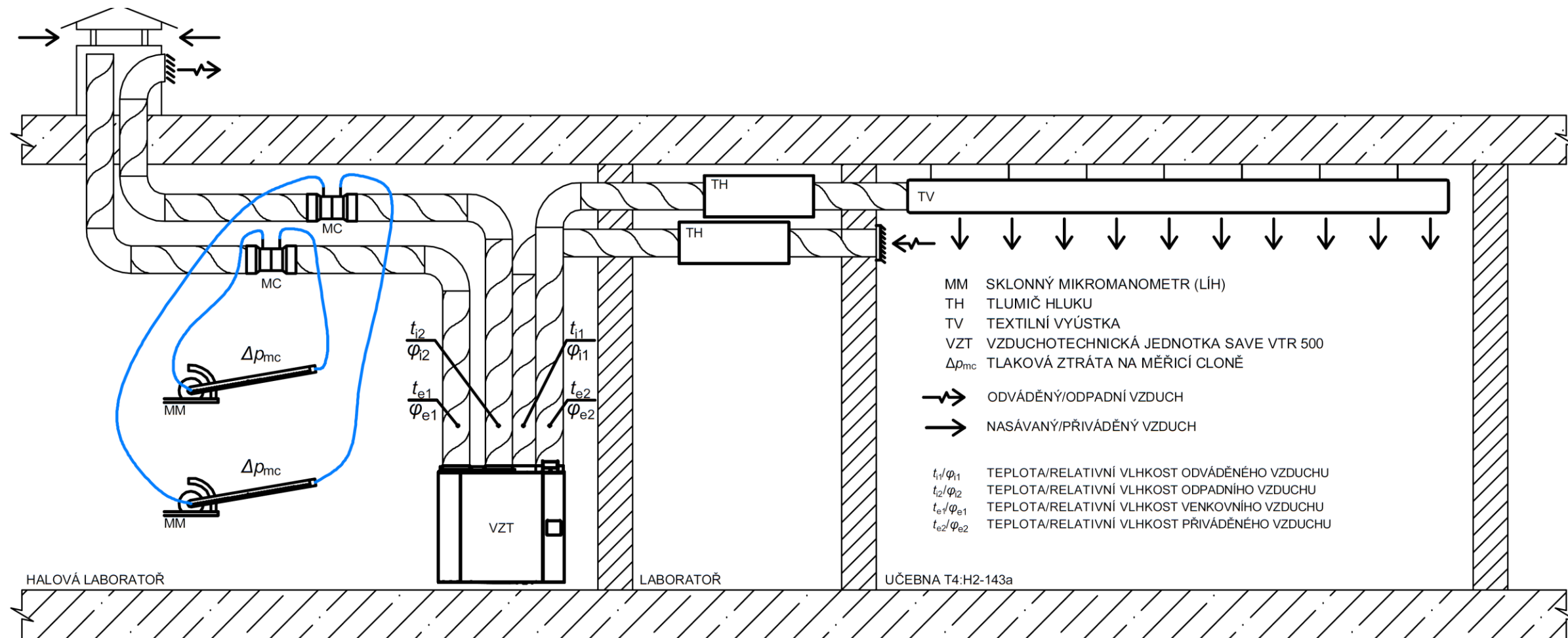
Ukazuje to i vývoj nejistot v tab. 2, kde směrem k větším průtokům nejistota nijak dramaticky nenarůstá, tedy relativní nejistota spíše klesá.

#### 4.1.3 Měření průtoků na jednotce Systemair SAVE VTR 500 R

Samotné měření průtoků na jednotce bylo realizováno pevným zabudováním zkalibrovaných měřicích clon do potrubní trati. Měřicí clony byly zabudovány do potrubí přiváděného venkovního vzduchu a do potrubí odváděného odpadního vzduchu viz schéma měření (obrázek 15). Vývody statických tlaků z měřicích clon byly pomocí plastových hadiček propojeny s měřicími mikromanometry.



*Obrázek 14 Měření rozdílu tlaků na měřicích clonách pomocí mikromanometrů*



Obrázek 15 Schéma měření průtoků, teplot a vlhkostí při provozu na jednotce VTR 500

Měření probíhalo ve třech režimech, kdy se zjišťovaly průtoky vzduchu při rovnotlakém, podtlakovém a přetlakovém větrání učebny. Nastavování průtoků vycházelo z řídicího systému jednotky, kde je možné nastavit úroveň otáček přívodního a odvodního ventilátoru v procentech. Rovnotlaké měření vycházelo z úrovně 100 %, po 10 % se průtok snižoval až do minima 0 %. Podtlakové a přetlakové měření probíhalo obdobně, pouze jeden z ventilátorů byl vždy nastaven na konstantní úroveň 50 % po celou dobu měření. Vyhodnocení bylo provedeno postupem uvedeným výše na základě vztahu (5). Úhrnný průtokový součinitel byl určen pomocí vztahů (8) a (9), expanzní součinitel byl pro zjednodušení zanedbán. Naměřené průtoky pak uvádí tab. 3.

**Tab. 3** Naměřené průtoky jednotkou SAVE VTR 500, pro různá nastavení ventilátorů

Rovnotlake				Nerovnotlaké				Nerovnotlaké			
Přívod		Odvod		Přívod konstantní		Odvod		Přívod		Odvod konstantní	
Nastavení ventilátoru [%]	$V_{mc}$ [ $m^3 \cdot h^{-1}$ ]	Nastavení ventilátoru [%]	$V_{mc}$ [ $m^3 \cdot h^{-1}$ ]	Nastavení ventilátoru [%]	$V_{mc}$ [ $m^3 \cdot h^{-1}$ ]	Nastavení ventilátoru [%]	$V_{mc}$ [ $m^3 \cdot h^{-1}$ ]	Nastavení ventilátoru [%]	$V_{mc}$ [ $m^3 \cdot h^{-1}$ ]	Nastavení ventilátoru [%]	$V_{mc}$ [ $m^3 \cdot h^{-1}$ ]
100	420	100	483	50	224	100	486	100	410	50	245
90	411	90	475	50	224	90	478	90	410	50	245
80	380	80	438	50	224	80	441	80	380	50	245
70	324	70	377	50	224	70	379	70	324	50	245
60	271	60	318	50	224	60	319	60	271	50	245
50	223	50	246	50	224	50	247	50	205	50	246
40	163	40	193	50	215	40	193	40	163	50	255
30	106	30	119	50	205	30	147	30	106	50	255
20	61	20	83	50	205	20	83	20	61	50	256
10	0	10	0	50	205	10	0	10	0	50	256

Tabulka 3 ukazuje, že průtoky na přívodní straně jsou nižší než průtoky na straně odvodní. Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben nerovnoměrným rozložením tlakových ztrát vzduchovodu a vyústí na přívodní a odvodní straně. Nerovnotlaké měření ukazuje, že dochází k ovlivňování proudů vzduchu mezi sebou. Dominantně se jednotka provozuje v rovnotlakém režimu, kde je vzájemné ovlivňování minimální. Vzhledem ke konstrukci rotačního výměníku a nedokonalostem týkajících se oddělení proudů vzduchu, lze předpokládat i mísení proudů mezi sebou. Kvantifikovat toto mísení by však představovalo realizovat detailnější měření v oblastech kolem rotačního výměníku.

Přesnost tohoto měření prakticky odpovídá přesnosti měření při kalibraci. Nejistota stanovení průtoku na měřicí cloně se tedy skládá z nejistoty stanovení průtoku na kalibrační clonce a chyby regresní metody pro určení úhrnného součinitele průtoku  $\alpha_{mc}$ . Vzhledem k tomu, že při měření nebyl měřen statický tlak před měřicí clonou, úhrnný součinitel průtoku byl dosazen z kalibračního měření, nebyla vyhodnocena nejistota typu A při stanovení nejistoty průtoku kalibrační clonkou a měření nebylo provedeno při stejných průtocích vzduchu jako při kalibraci, není následující určení nejistoty úplně správné. Jedná se tak v dané úloze spíše o nejlepší možný odhad nejistoty. Nejistota stanovení průtoku na měřicí cloně byla tedy na základě podobnosti s měřením na kalibrační clonce určena jako rozšířená nejistota pro nejbližší průtok při měření na kalibrační clonce, viz tab. 2, plus chyba regrese pro nejbližší průtok na kalibrační clonce.

#### *1. příklad určení nejistoty:*

– rovnotlaké měření, odvod, 20% průtok

- Zjištěný průtok  $83,1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- Nejbližší průtok při kalibraci  $81,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , tomu odpovídá  $U_v = 6,1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- Chyba regresní metody pro průtok při kalibraci  $81,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  je  $4,6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Výsledný průtok na odvodu při rovnotlakém měření a 20% výkonu ventilátorů jednotky byl tedy určen jako  $(83,1 \pm 10,7) \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

#### *2. příklad určení nejistoty:*

– rovnotlaké měření, přívod, 100% průtok

- Zjištěný průtok  $420,3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- Nejbližší průtok při kalibraci  $406,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , tomu odpovídá  $U_v = 6,1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- Chyba regresní metody pro průtok při kalibraci  $406,8 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  je  $5,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Výsledný průtok na odvodu při rovnotlakém měření a 100% výkonu ventilátorů jednotky byl tedy určen jako  $(420,3 \pm 11,6) \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

Výsledné hodnoty naměřených průtoků při rovnotlakém měření včetně určené nejistoty měření dle postupu aplikovaném v 1. a 2. příkladu uvádí následující tab. 4.

**Tab. 4** Hodnoty průtoků s určením nejistot při rovnotlaké měření

Rovnotlaké					
Přívod			Odvod		
Nastavení ventilátoru [%]	$V_{mc}$ [m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]	Nejistota [m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]	Nastavení ventilátoru [%]	$V_{mc}$ [m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]	Nejistota [m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]
100	420,3	11,6	100	483,4	17,3
90	410,7	11,6	90	474,7	17,3
80	380,4	7,6	80	437,9	13,1
70	323,9	7,1	70	376,5	7,6
60	270,9	4,8	60	317,6	4,9
50	223,3	6,2	50	246,3	8,9
40	163,0	10,7	40	192,7	5,7
30	105,9	6,1	30	119,3	9,3
20	60,5	6,1	20	83,1	10,7

Komplikací při měření bylo kolísání otáček ventilátorů, ke kterému dochází zřejmě vlivem elektronické regulace. Kolísání otáček probíhá vždy v úzkém rozmezí přibližně šedesáti otáček za minutu při všech výkonových úrovních. Relativně větší kolísání bylo tedy pozorováno na nižších výkonových stupních ventilátorů. Při měření byla snaha odečítat „průměrnou“ hodnotu, avšak především při spodní hranici stupnice, kde docházelo k největšímu kolísání, bylo odečítání složité.

## 4.2 Měření teplotních a vlhkostních charakteristik výměníku ZZT

Hlavním cílem při měření na rotačním regeneračním výměníku ZZT bylo zjistit teplotní a vlhkostní charakteristiky v závislosti na rychlosti otáčení výměníku a průtoku vzduchu výměníkem. Podmínky měření byly omezeny účelem použití jednotky. Nejednalo se o klasické laboratorní měření, ale o měření při běžném provozu. Parametry vstupního čerstvého, ale také odváděného vnitřního vzduchu jako jsou teplota a vlhkost, nebylo možné při měření nijak upravovat. Proto nebylo v některých případech dosaženo takových vstupních parametrů, které by byly pro měření a následné vyhodnocení optimální. Teplota přívodního čerstvého vzduchu byla naopak nepříznivě ovlivněna teplotními zisky způsobenými vedením přívodního potrubí čerstvého vzduchu k jednotce pod stropem vytápěné laboratoře. Tyto zisky byly ještě umocněny souběžným vedením

parovodního potrubí ve vzdálenosti několika centimetrů. Docházelo tak k ohřevu proudícího vzduchu potrubím až o 5 K při maximálním průtoku na délce vzduchovodu 10 m. Změnou trasy vzduchovodu, jeho částečnou tepelnou izolací kamennou vlnou a tepelnou izolací parovodu došlo k výrazné eliminaci tepelných zisků a tím ke zlepšení podmínek pro měření. Nyní při maximálním průtoku dochází k ohřevu vzduchu přibližně o 1 K. Při proudění vzduchu na úrovni 30 % maximálního průtoku k ohřevu přibližně o 3 K.

#### 4.2.1 Rychlost otáčení rotačního výměníku ZZT

Rychlost otáčení rotačního výměníku ovlivňuje konečný teplotní i vlhkostní faktor. Změnou otáček výměníku tak lze regulovat množství předávaného tepla, což může být za určitých podmínek přínosem. Obecně dosahují rotační výměníky nejvyššího teplotního faktoru v rozmezí 12 až 15 otáček za minutu pro maximální přenos vlhkosti se udává hodnota 20 otáček za minutu. Zároveň ale teplotní faktor poměrně strmě roste a už při 2 otáčkách za minutu běžně dosahuje 80 % svého maxima. Z toho vyplývá, že pro možnost regulovat množství předávaného tepla je potřeba výměník vybavit pohonem, který je schopen pracovat i při velmi nízkých otáčkách. [L17]

Rychlost otáčení výměníku na jednotce VTR 500 byla vyhodnocena na základě doby tří otáček výměníku. Naměřeny byly dvě sady hodnot, každá sada naměřena jinou osobou. Průměr z obou dob byl pak použit na výpočet otáček viz tab. 5.

**Tab. 5** Měření otáček výměníku ZZT na jednotce SAVE VTR 500

<i>U</i>	<i>Otáčky</i>	<i>Doba</i>	<i>Otáčky</i>
[V]	[n]	[s]	[min <sup>-1</sup> ]
1	3	171,57	<b>1,0</b>
2	3	88,53	<b>2,0</b>
3	3	58,37	<b>3,1</b>
4	3	43,50	<b>4,1</b>
5	3	34,75	<b>5,2</b>
6	3	28,82	<b>6,2</b>
7	3	24,73	<b>7,3</b>
8	3	21,78	<b>8,3</b>
9	3	19,31	<b>9,3</b>
10	3	18,31	<b>9,8</b>



Regulace otáček pohonu výměníku je realizována pomocí napětí v rozmezí 0 až 10 V. Napětí lze v manuálním režimu volit po 0,1 V. Stejně jemná regulace je používána v případě automatického režimu. Z měření vyplývá, že velikosti napětí přibližně odpovídá množství otáček výměníku za jednu minutu. Maximální rychlost otáčení výměníku je přibližně 10 otáček za minutu.

#### **4.2.2 Měření teplot a vlhkostí**

##### **Ahlborn ALMEMO 2690 8A**

Měření teplot a vlhkostí probíhalo kontinuálně pomocí tří zařízení. Jako hlavní měřicí zařízení sloužil datalogger Ahlborn ALMEMO 2690 8A. Naměřená data z tohoto zařízení sloužila pro veškeré výpočty v rámci této diplomové práce. Přístroj disponuje pěti univerzálními vstupy a dvěma výstupy (RS485, analog, Centronics aj.). Každý vstup obsahuje čtyři měřicí kanály. Rychlost vzorkování přístroje je až 100 kanálů za sekundu. Data je možné ukládat na vnitřní paměť 1 MB (200 000 hodnot) nebo je možné data ukládat na externí SD paměť. Sortiment měřících snímačů, které lze k přístroji připojit, je značný. Každý snímač má v připojovacím konektoru uloženu charakteristiku nebo korekční hodnotu, která je po připojení k přístroji automaticky načtena. Při měření byly použity kombinované snímače teploty a vlhkosti s označením FHAD 46-C7. Přesnost snímače při měření teploty je v rozsahu teplot  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $80\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,3\text{ K}$  a na rozsahu teplot  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,4\text{ K}$ . Přesnost snímače při měření vlhkosti je v měřicím rozsahu 20 až 90 % relativní vlhkosti při teplotě  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\%$  relativní vlhkosti. Samotné měření probíhalo v režimu záznamu dat ze všech čtyř snímačů v jeden okamžik s intervalem jedné minuty. Data byla zaznamenávána kontinuálně a za celou dobu měření nedošlo k žádnému výpadku. [L18] [L19]

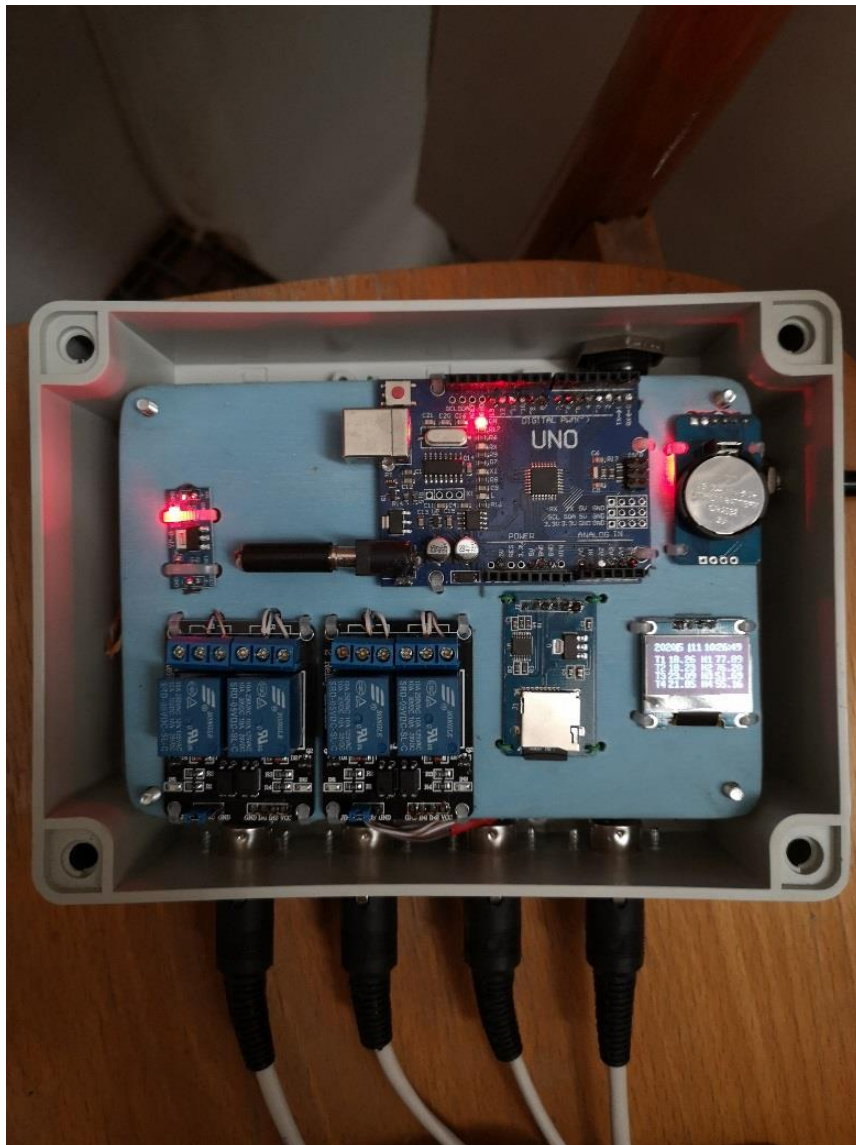


*Obrázek 16 Datalogger Ahlborn ALMEMO 2690 8A*

### **Datalogger vlastní konstrukce**

Druhým měřicím zařízením byl datalogger vlastní konstrukce, sestavený na základě platformy Arduino. Toto zařízení bylo sestaveno za účelem možnosti porovnání naměřených dat s daty naměřenými profesionálním přístrojem. Zařízení bylo sestaveno tak, aby fungovalo „shodně“ s výše popsaným dataloggerem ALMEMO. Stejně jako profesionální datalogger zařízení zapisovalo data ze čtyř kombinovaných snímačů v intervalu jedné minuty na externí paměť SD. Hlavním prvkem dataloggeru je procesorová deska (mikropočítač) Arduino UNO, ke které jsou dále připojeny vstupní a výstupní periferie. Konkrétně se jedná o Oled display pro čtení aktuálních dat, modul reálného času DS3231 pro zápis dat se správným časovým údajem, čtečka microSD karet pro zápis dat, kombinované snímače teploty a vlhkosti HTU21D a moduly s elektromagnetickým relé. Přesnost kombinovaného snímače HTU21D je podle datasheetu na rozsahu 5 °C až 60 °C  $\pm 0,4$  K, na rozsahu -40 °C až 100 °C  $\pm 1,2$  K. Přesnost při měření vlhkosti je pro rozsah 20 až 80 % relativní vlhkosti při teplotě 25 °C  $\pm 3$  % relativní vlhkosti. Výhodou těchto snímačů je připojení pomocí dvou vodičové sběrnice I2C, díky které je následná tvorba programu poměrně snadná. Komunikace po sběrnici I2C probíhá na úrovni MASTER/SLAVE, kdy zařízení master vyzývá ke komunikaci zařízení slave pomocí 7 bitové adresy. Nevýhodou snímačů HTU21D je,

že mají tuto adresu pevně nastavenou a nelze ji jednoduše změnit. Pokud je potřeba připojit na sběrnici více snímačů než jeden, je shodná adresa snímačů pro komunikaci problémem. Existuje více možností, jak tento problém řešit. Při konstrukci tohoto dataloggeru bylo, vzhledem k možnostem, využito čtyř relé modulů, které v intervalu dvou sekund připojí na sběrnici vždy pouze jeden snímač. Tím je zajištěno, že dojde ke čtení dat z právě požadovaného snímače. Možná až překvapivá byla spolehlivost popsaného dataloggeru. Během měření nebylo zaznamenáno žádného výpadku nebo chyby v měření dat. [L20] [L21]



*Obrázek 17 Datalogger vlastní konstrukce (Arduino)*

**Jednotka SAVE VTR 500**

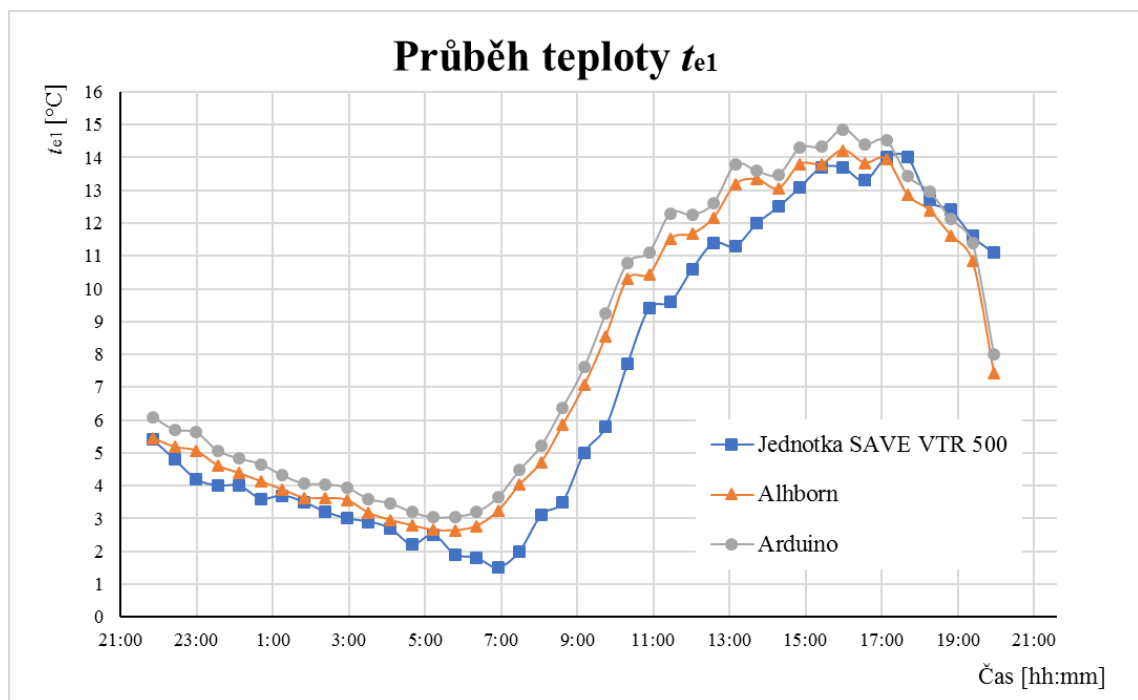
Třetím měřicím zařízením byla samotná jednotka VTR 500, která umožňuje data primárně určená pro regulaci ukládat a následně je použít pro další účely. Sledovaná jednotka má osazeny snímače pro teploty  $t_{e1}$ ,  $t_{e2}$  a  $t_{i1}$ , dále má osazen jeden snímač pro měření vlhkosti  $\varphi_{i1}$ . Nejkratší časový krok záznamu jsou 2 minuty. Data lze vygenerovat až se zpožděním 14 dnů. Aplikace také nabízí generaci grafu pro rychlý náhled vývoje sledované veličiny. Data lze získat v běžně používaném formátu .csv. Stažená data ve formátu .csv však vykazovala chyby a ze všech možných parametrů byly nakonec použitelné pouze data o teplotách.



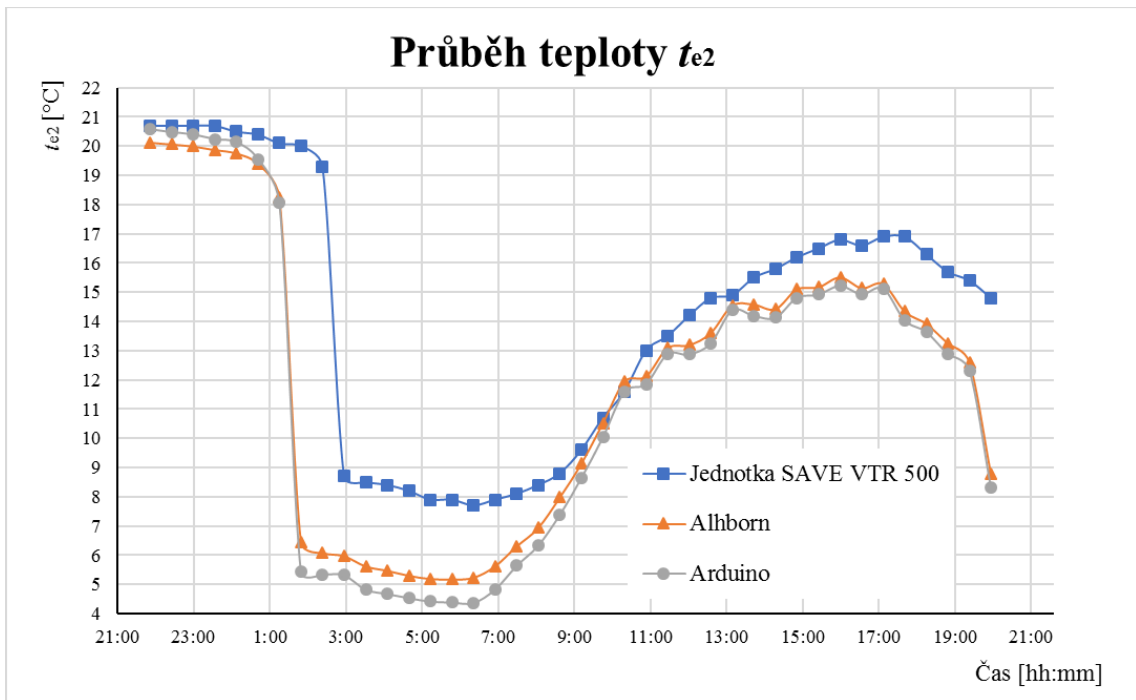
**Obrázek 18** Umístění kombinovaných snímačů teploty a vlhkosti (detail)

### Porovnání naměřených dat

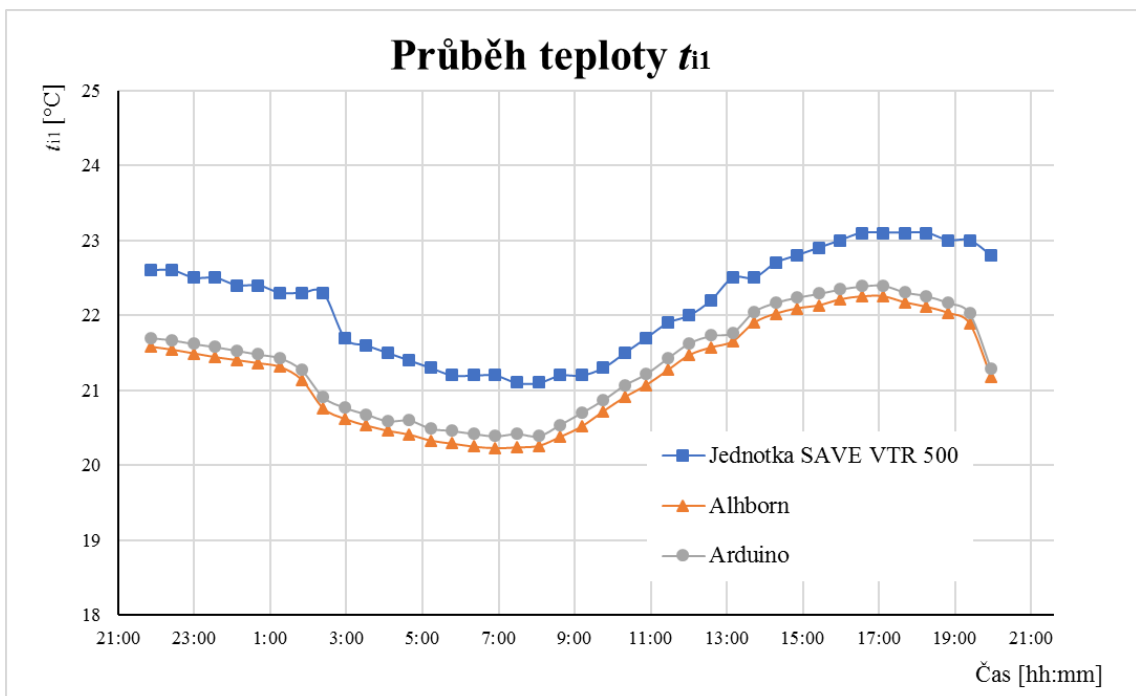
Vzhledem k tomu, že zařízení Alhborn včetně snímačů je profesionální zařízení a snímače prošly alespoň při výrobě kalibrací, je adekvátní jím naměřené hodnoty v tomto srovnání považovat za „etalon“. Z tohoto důvodu jsou naměřená data z ostatních zařízení vždy vztahována k údajům naměřeným právě zařízením Alhborn. Porovnání naměřených dat mezi sebou demonstrují obrázky 19 až 26. Porovnání zobrazuje časový úsek 22 h. Úsek začíná v čase přibližně 22.00, 29. 3. 2020 a končí přibližně ve 20.00, 1. 4. 2020. Úsek v první části pokrývá měření teplotního a vlhkostního faktoru výměníku ZZT při 50% průtoku vzduchu, kdy postupně od 22.00 je snižována rychlost otáčení výměníku až do zastavení ve 2.40. Výrazný je okamžik přibližně v 1.30, kdy dochází k razantnímu snížení množství předávaného tepla, což se projevuje na naměřených teplotách a vlhkostech vzduchů. Podrobněji o měření teplotních a vlhkostních faktorů pojednává kapitola 4.2.3.



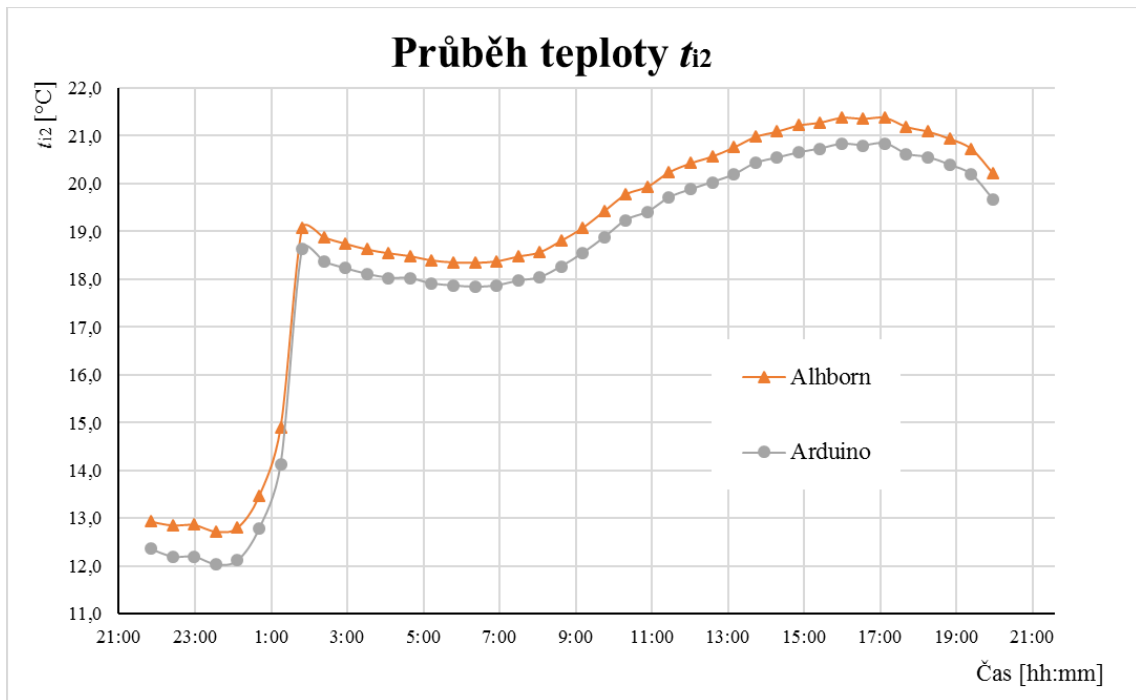
Obrázek 19 Průběhy sledované teploty  $t_{e1}$



Obrázek 20 Průběhy sledované teploty  $t_{e2}$

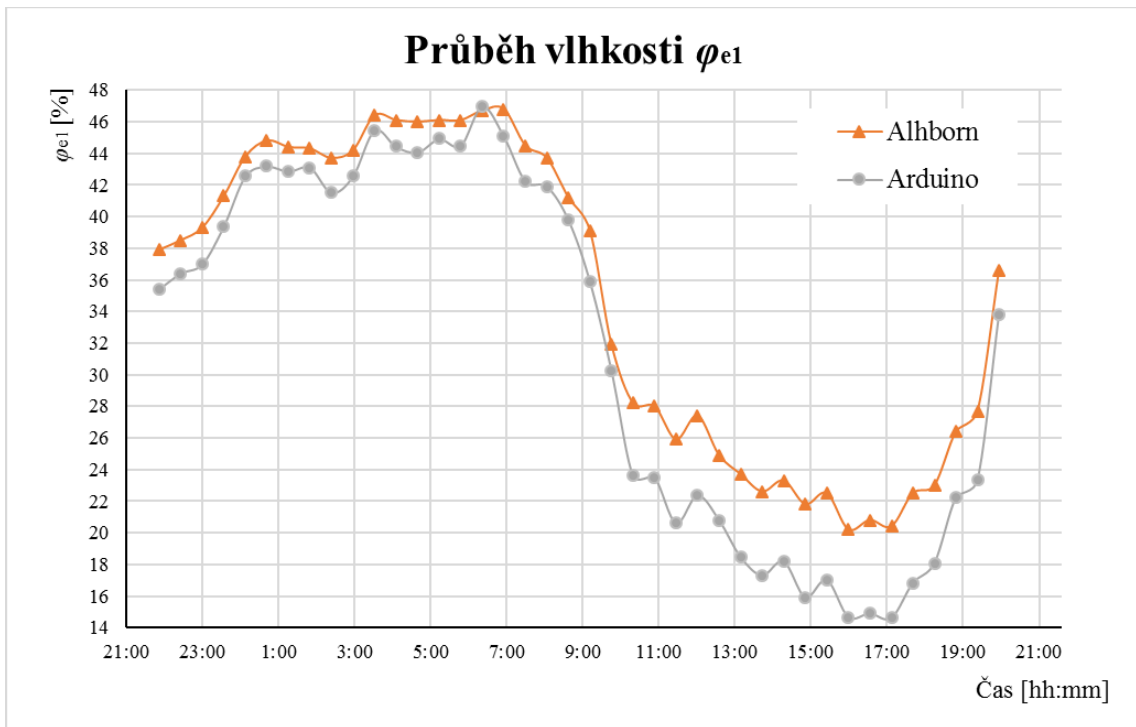


Obrázek 21 Průběhy sledované teploty  $t_{i1}$

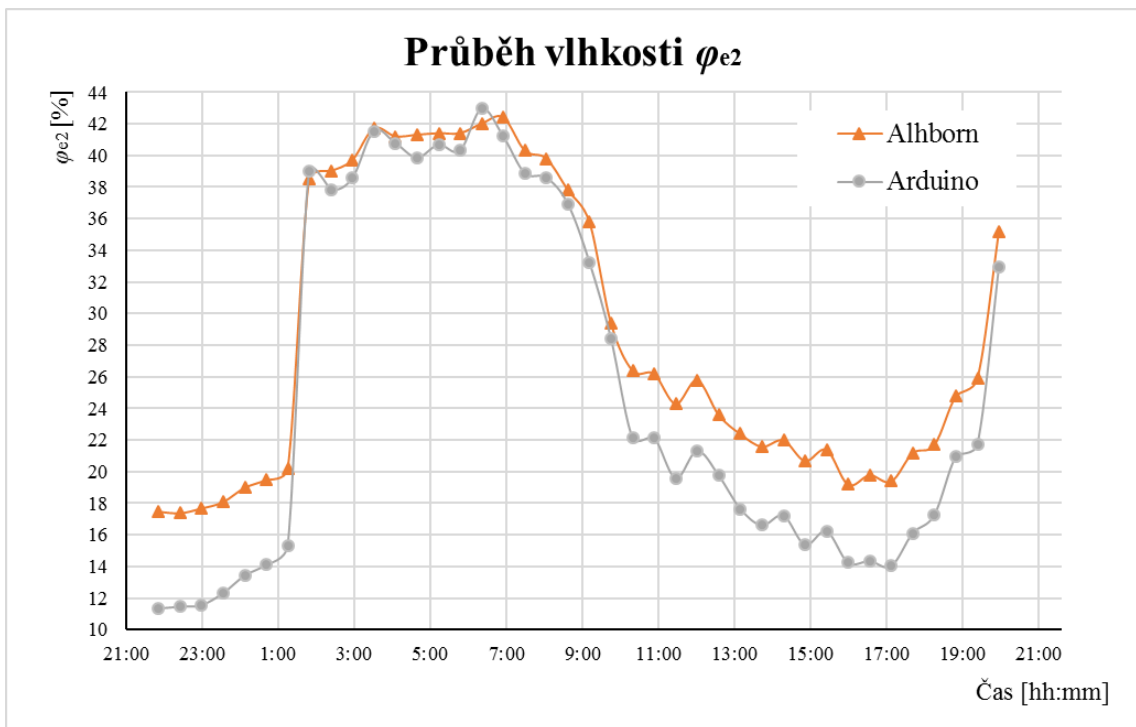


**Obrázek 22** Průběhy sledované teploty  $t_{12}$

Obrázky 19 až 22 ukazují, že hodnoty teplot naměřených zařízení Alhborn a zařízením Arduino se kopírují relativně správně. Odchylka těchto dvou měřidel je přibližně konstantní při všech měřených teplotách. Průměrná odchylka zařízení Arduino od naměřených teplot zařízení Alhborn je 0,41 K a největší naměřená odchylka je 1,03 K. Naměřené teploty jednotkou SAVE VTR 500 jasně ukazují výraznější odchylky od zařízení Alhborn. Průměrná odchylka je 1,37 K a maximální odchylka je 13,54 K. Takto velká maximální odchylka je pravděpodobně způsobena velkou setrvačností snímače teploty jednotky SAVE VTR 500. Další možnou příčinou je špatné umístění v nerepresentativní části proudu vzduchu nebo ovlivnění akumulací hmoty poblíž snímače.

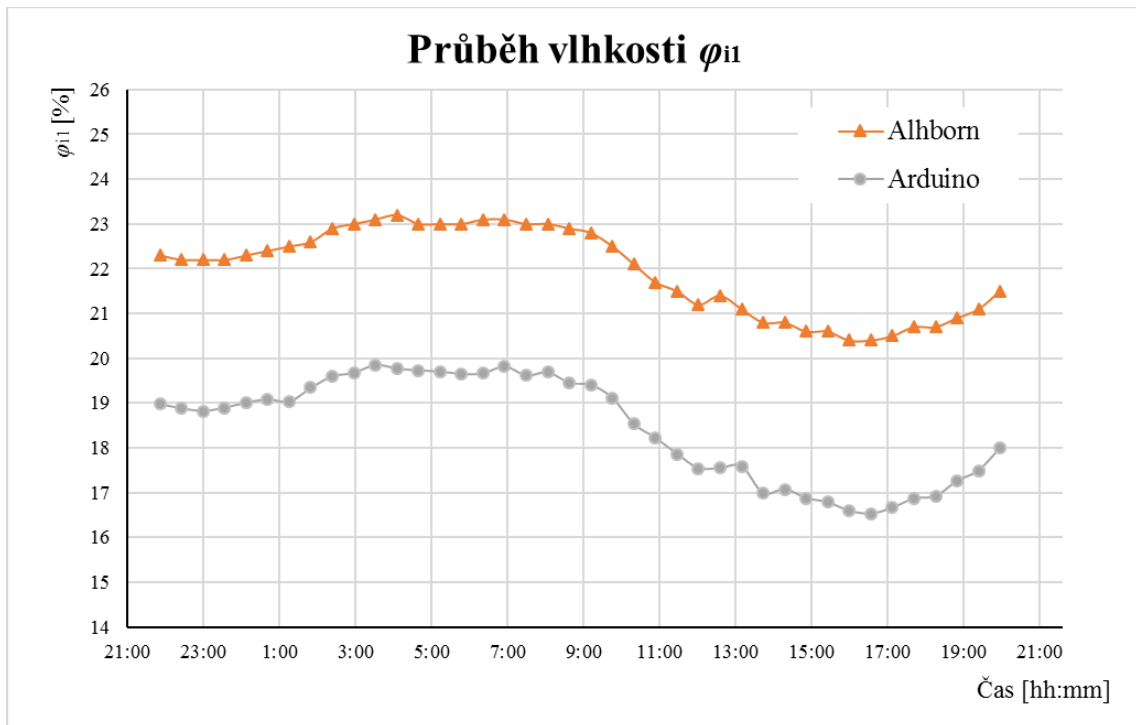
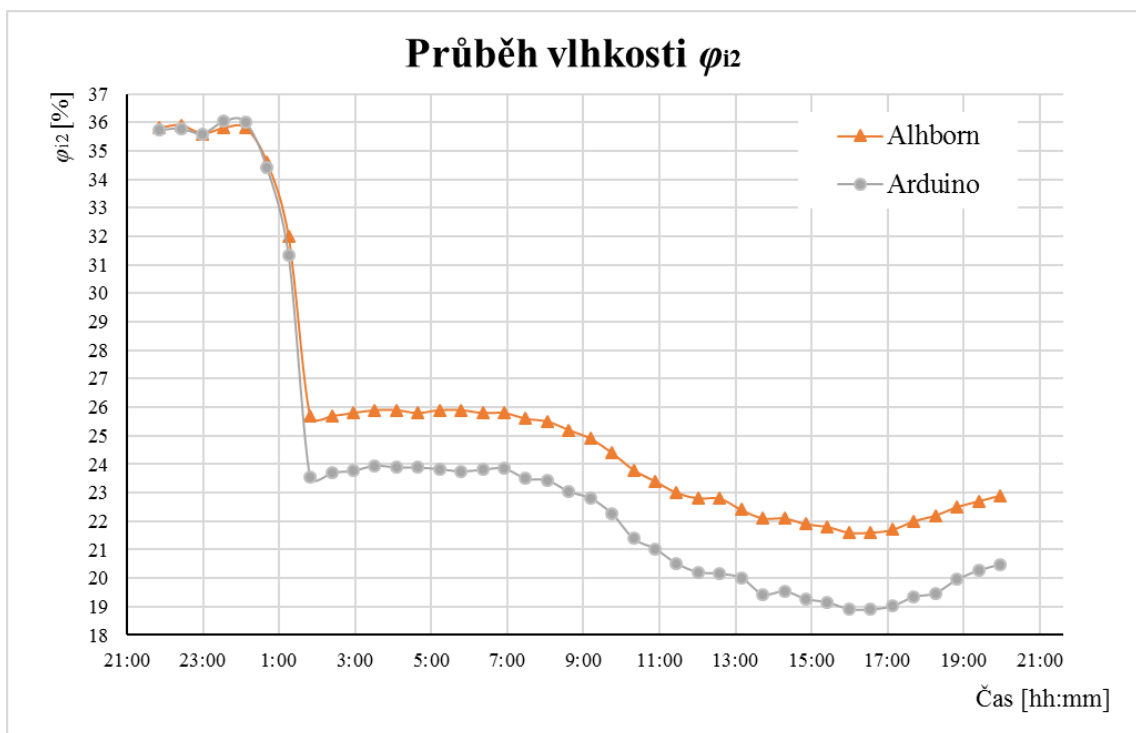


*Obrázek 23 Průběhy sledované relativní vlhkosti  $\varphi_{e1}$*



*Obrázek 24 Průběhy sledované relativní vlhkosti  $\varphi_{e2}$*



Obrázek 25 Průběhy sledované relativní vlhkosti  $\varphi_{i1}$ Obrázek 26 Průběhy sledované relativní vlhkosti  $\varphi_{i2}$

Obrázky 23 až 26 ukazují naměřená data relativních vlhkostí zařízeními Alhborn a Arduino ve zmiňovaném období. Data ze zařízení Arduino jsou kompenzována podle teploty dle rovnice (27) uvedené v datasheetu snímače [L21].

$$RH_{\text{compensatedT}} = RH_{\text{actualT}} + (25 - T_{\text{actual}}) \cdot \text{CoeffTemp}, \quad (27)$$

kde  $RH_{\text{compensatedT}}$  je relativní vlhkost kompenzovaná podle teploty [%],  
 $RH_{\text{actualT}}$  je relativní vlhkost naměřená snímačem HTU21D [%],  
 $T_{\text{actual}}$  je teplota naměřená snímačem HTU21D [°C],  
 $\text{CoeffTemp}$  je teplotní kompenzační koeficient (-0,15) [%·K<sup>-1</sup>].

Průměrná odchylka v naměřených datech pomocí zařízení Arduino oproti datům ze zařízení Alhborn je 3,02 % relativní vlhkosti a maximální odchylka naměřených dat je 6,15 % relativní vlhkosti. Tato maximální odchylka je naměřena v oblasti (pod 20 % relativní vlhkosti), kde oba druhy snímačů nemají garantovanou přesnost. Křivky naměřených dat se poměrně správně kopírují, odchylka naměřených dat není tak konstantní jako při měření teploty. Jasně je vidět, že odchylka pod hranicí 30 % relativní vlhkosti je výrazně větší než nad touto hranicí. Snímače obou zařízení mají deklarovanou přesnost až do hranice 20 % relativní vlhkosti. Je tedy vidět, že jednomu ze snímačů klesá přesnost už pod hranicí 30 % relativní vlhkosti.

Výsledkem porovnání je subjektivní hodnocení, které je v případě zařízení Arduino uspokojivé. Vzhledem k ceně sestavy zařízení Arduino (celkem cca 2 500,- Kč) oproti ceně sestavy Alhborn (celkem cca 105 000,- Kč) jsou odchylky naměřených hodnot přijatelné. Samozřejmě sestava Alhborn je mnohem univerzálnější, přináší uživateli určitou jistotu a lze ji velice snadno použít bez dalších hlubších znalostí. Platforma Arduino umožňuje při základních znalostech také velmi dobrou flexibilitu a zařízení lze přizpůsobit „na míru“ požadovanému typu měření. Vzhledem k přesnosti je zřejmé, že zařízení na bázi Arduina nelze použít všude. Vhodné je jeho použití v případech, kdy dosahovaná přesnost měření postačuje a je například riskantní použít drahých měřících snímačů nebo zařízení.

Data získaná z jednotky SAVE VTR 500 už dosahovala oproti datům naměřeným zařízeními Alhborn větších odchylek. Výrobce osazené snímače pravděpodobně

vyhovují požadavkům regulace jednotky a tak není důvodu osazovat jednotku přesnějšími snímači. Naměřená data ale ukazují, že pro pokročilejší regulaci nebo přesnější výpočty nejsou osazené snímače, vzhledem ke svojí nepřesnosti a vlastnostem, příliš vhodné. Kvalitě dat získaných ze snímačů nakonec odpovídá i cena snímačů, která se v případě teplotních snímačů pohybuje v řádech několika desítek Kč.

#### 4.2.3 Teplotní a vlhkostní faktor výměníku ZZT v jednotce VTR 500

Teplotní případně vlhkostní faktor je parametr, který dává dobrou, avšak ne úplnou představu o „kvalitě“ předávání tepla výměníkem. Drtivá většina výrobců i autorů článků nebo publikací uvádí hodnotu teplotního nebo vlhkostního faktoru bez informace, při jakých podmínkách (průtok vzduchu, teplota přiváděného venkovního vzduchu  $t_{e1}$ , teplota vnitřního odváděného vzduchu  $t_{i1}$ , případně odpovídající vlhkosti vzduchů) jich bylo dosaženo. Zmiňované podmínky mají samozřejmě vliv na výslednou hodnotu teplotního faktoru. Nařízení komise Evropské unie 1253/2014 o ekodesignu definuje teplotní faktor následovně: *„tepelnou účinností systému zpětného získávání tepla pro obytné budovy ( $\eta$ ) se rozumí poměr mezi tepelným ziskem přiváděného vzduchu a tepelnou ztrátou odváděného vzduchu, obojí v porovnání s venkovní teplotou, měřeno v systému zpětného získávání tepla za sucha a za standardních atmosférických podmínek, s vyváženým hmotnostním průtokem při referenčním průtoku, při rozdílu mezi vnitřní a venkovní teplotou 13 K, bez úpravy o tepelný zisk z motorů ventilátoru“*. Referenčním průtokem pak nařízení myslí průtok, který je roven 70 % maximálního průtoku při rozdílu tlaků  $\Delta p = 50$  Pa. Momentálně by tedy všichni výrobci, jejichž jednotky splňují zmiňované nařízení o ekodesignu, měli uvádět hodnoty teplotního faktoru za podmínek definovaných v nařízení. Díky této definici tak lze jednotlivé zařízení pro ZZT mezi sebou lépe porovnávat, avšak stále se nejedná o zcela striktní definici nebo soubor více pracovních bodů. Stále tak mohou zařízení pro ZZT se shodně uváděným parametrem teplotního faktoru vykazovat pracovní teplotní faktor během celého provozního období odlišný.

Podrobnější údaje o teplotním faktoru přináší metodika zkoušení VZT jednotek uvedená v ČSN EN 13141 Větrání budov – zkoušení výkonu součástí/výrobků pro větrání budov. Tato norma doporučuje zkoušet zařízení pro ZZT ve větracích jednotkách za podmínek

viz tab. 6. Někteří výrobci si svoje výrobky podle této metodiky nechávají zkoušet nad rámec legislativních požadavků. Často je zkoušení pomocí této normy zaštitěno certifikáty jako jsou Eurovent Certified Performance nebo Certified Passive House Component. Bohužel podrobnější výsledky těchto zkoušek nebo přesná metodika výpočtů je většinou běžnému zákazníkovi nebo projektantovi nepřístupná.

**Tab. 6** Standardní zkušební podmínky zařízení pro ZZT dle ČSN EN 13141

Standardní zkušební podmínky			
Stav	1	2	3
<b>Odváděný vzduch</b>			
teplota vzduchu $t_{i1}$ [°C]	20	20	20
teplota mokrého teploměru $t_{wi1}$ [°C]	12	15	12
odpovídající rel. vlhkost $\varphi_{i1}$ [%]	37	60	37
<b>Přiváděný vzduch</b>			
teplota vzduchu $t_{e1}$ [°C]	7	2	-7
teplota mokrého teploměru $t_{we1}$ [°C]	-	1	-8
odpovídající rel. vlhkost $\varphi_{e1}$ [%]	-	85	75

### Podmínky měření a vyhodnocení

Praktické měření rotačního výměníku na jednotce VTR 500 muselo pracovat s nahodilými podmínkami. Nebylo možné nijak upravovat parametry vstupního venkovního vzduchu ani odváděného vnitřního vzduchu. Bylo tedy nutné vždy „čekat“ na vhodné podmínky. Především nebylo snadné docílit dostatečně nízké venkovní teploty na vstupu do jednotky. Snahou bylo měřit vždy při takových teplotních podmínkách, aby se podmínky měření co nejvíce blížily standardním zkušebním podmínkám podle ČSN EN 13141. Přiblížení se ke stavu 3 podle tab. 6 nebylo možné vůbec. Stavů 1 a 2 podle tab. 6 se v některých případech podařilo přiblížit. Měření probíhalo většinou v noci mezi 22.00 a 5.00. Měřily se vždy všechny 4 teploty i vlhkosti vzduchů viz schéma měření obr. 15. Celkem bylo naměřeno 8 sad dat. Pro každý rovnotlaký průtok vzduchu byly naměřeny dvě sady dat. Měření probíhalo pro průtoky vzduchu 30, 50, 70 a 100 % podle nastavení regulace jednotky. Vždy byla měněna rychlost rotačního výměníku (s krokem 1 V od 1 až do 10 V). Sběr dat probíhal 30 minut na každé rychlostní úrovni výměníku. Data z prvních 10 minut nebyla ve vyhodnocení použita. Tento časový úsek sloužil pro ustálení podmínek měření. Výpočtem bylo určeno,

že za žádných podmínek nedocházelo ke kondenzaci. Přestože měření teplotního a vlhkostního faktoru probíhalo v rovnotlakém režimu nastavení jednotky, průtoky na obou stranách výměníku nebyly shodné, viz kap. 4.1.3, proto následující vyhodnocení respektuje rozdílné průtoky vzduchu.

### Vyhodnocení a výsledky teplotního faktoru

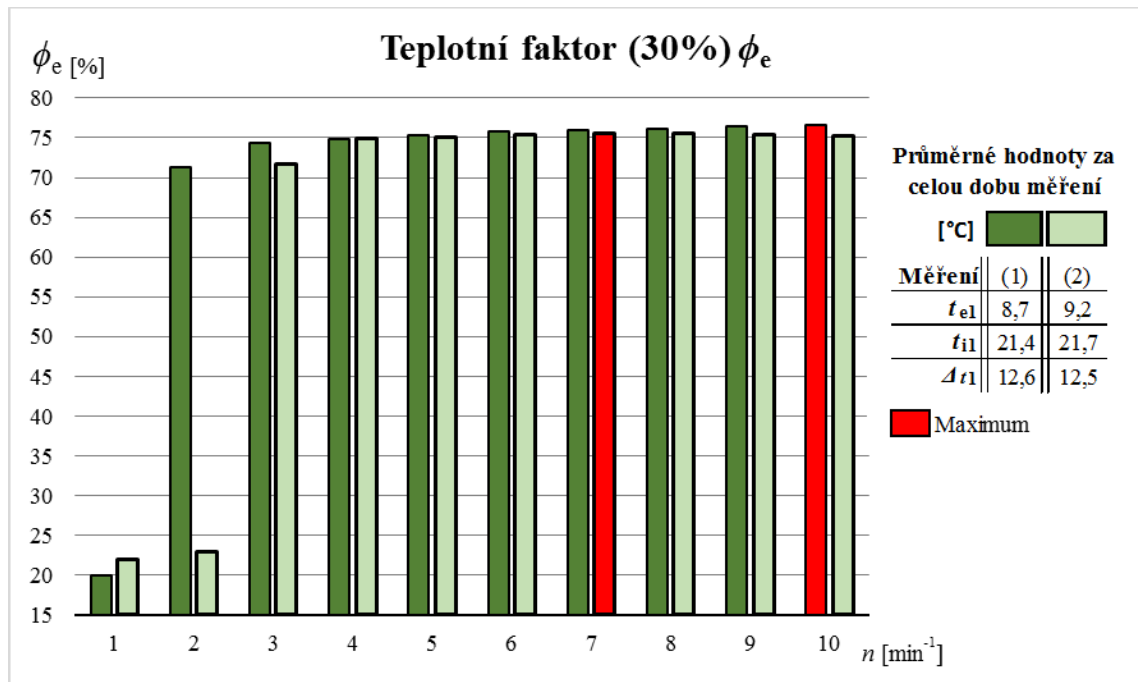
Vyhodnocení teplotního faktoru proběhlo na základě vztahu (28), což je vlastně modifikovaný vztah (1) pro výpočet teplotního faktoru při rozdílných průtocích vzduchu na obou stranách výměníku. Vztah (28) je zjednodušen předpokladem shodných hustot a měrných tepelných kapacit venkovního přívodního a vnitřního odváděného vzduchu.

$$\Phi_e = \frac{t_{e2} \cdot V_e - t_{e1} \cdot V_e}{t_{i1} \cdot V_i - t_{e1} \cdot V_e}, \quad (28)$$

kde  $V_e$  je objemový průtok venkovního příváděného vzduchu [ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ],

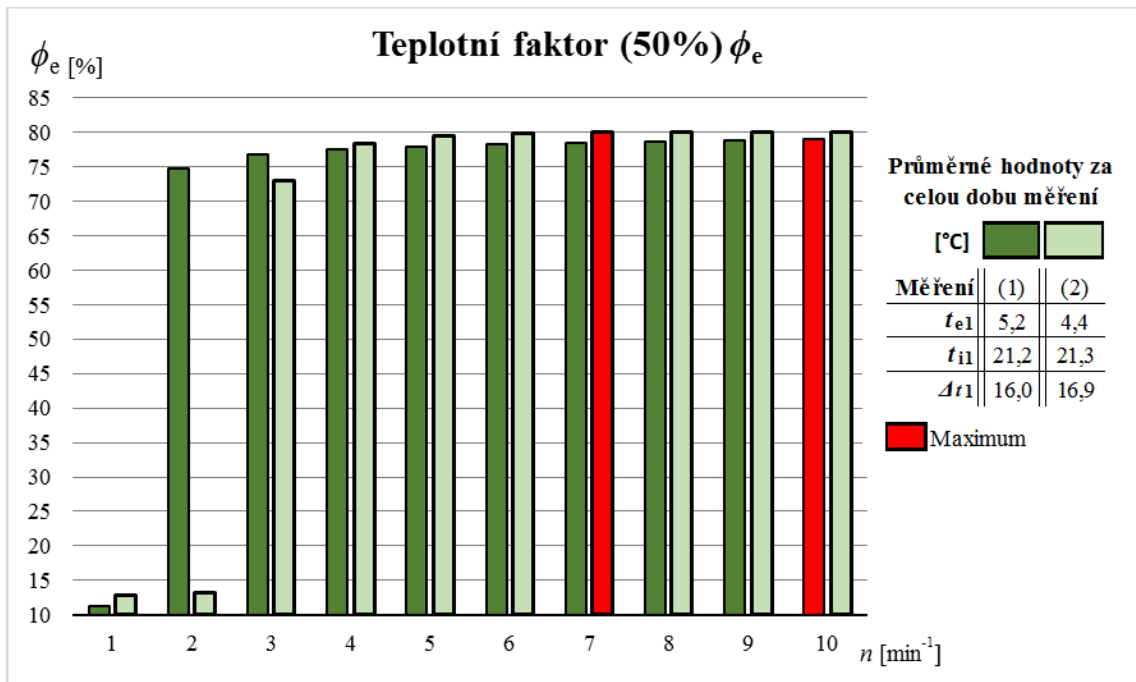
$V_i$  je objemový průtok vnitřního odváděného vzduchu [ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ].

Teplotní faktor byl následně určen jako průměr ze všech vypočtených teplotních faktorů pro každou rychlostní úroveň nastavení výměníku. Výsledky pro čtyři úrovně průtoků vzduchu zobrazují obrázky 27 až 30. Dodatková tabulka v každém grafu uvádí průměrné podmínky měření, při kterých celé jedno měření probíhalo. Maximální teplotní faktor pro dané měření je pak v grafech znázorněn červenou barvou. Každý z grafů zobrazuje 2 nezávislé měření, kdy u každého byla měněna rychlost otáčení rotoru výměníku jinak. Vždy při měření (1) bylo postupováno vzestupně od rychlosti 1 až do rychlosti 10 otáček za minutu a při měření (2) bylo postupováno sestupně.



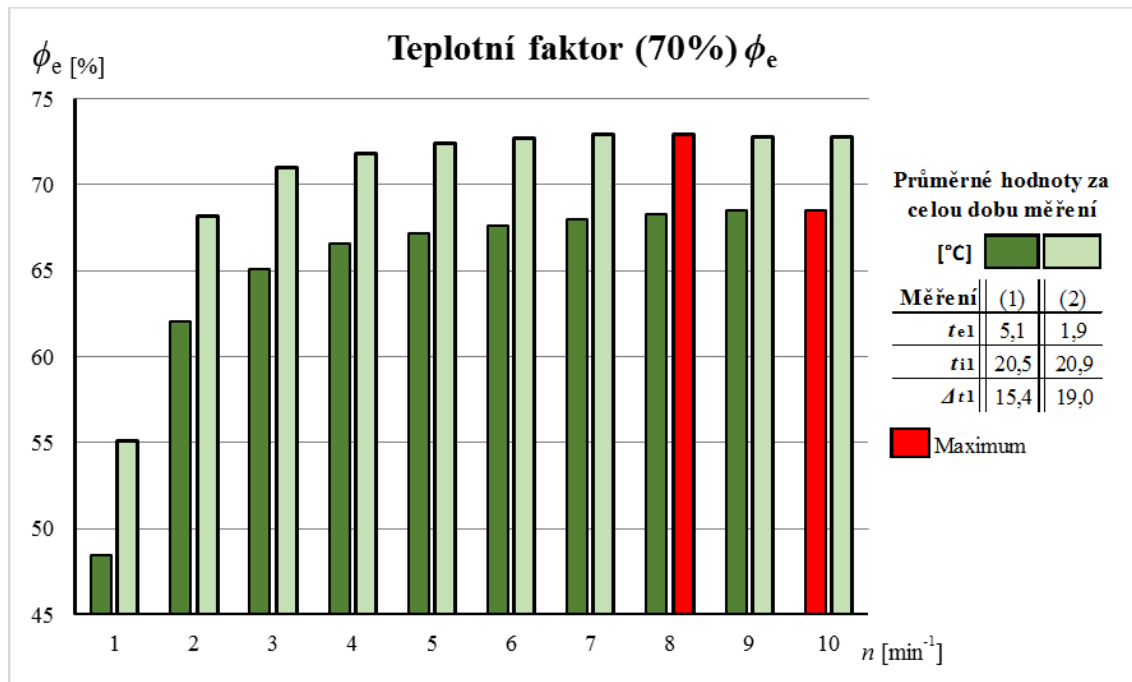
**Obrázek 27** Výsledné hodnoty teplotních faktorů při 30% průtoku vzduchu v závislosti na rychlosti otáčení regeneračního výměníku

Obrázek 27 zobrazuje vývoj teplotního faktoru při 30% průtoku vzduchu jednotkou. Vzhledem k velmi podobným podmínkám měření bylo dosaženo při měřeních (1) a (2) velmi podobných výsledků. Hodnota teplotního faktoru byla od čtvrtého stupně otáček přibližně konstantní na hodnotě 75 %. Výrazné snížení teplotního faktoru je zřejmé při prvním stupni otáček. Druhý stupeň otáček je pravděpodobně na pomezí výrazného nárůstu teplotního faktoru, proto vykazuje při měření (1) velmi odlišnou hodnotu od měření (2).



**Obrázek 28** Výsledné hodnoty teplotních faktorů při 50% průtoku vzduchu v závislosti na rychlosti otáčení regeneračního výměníku

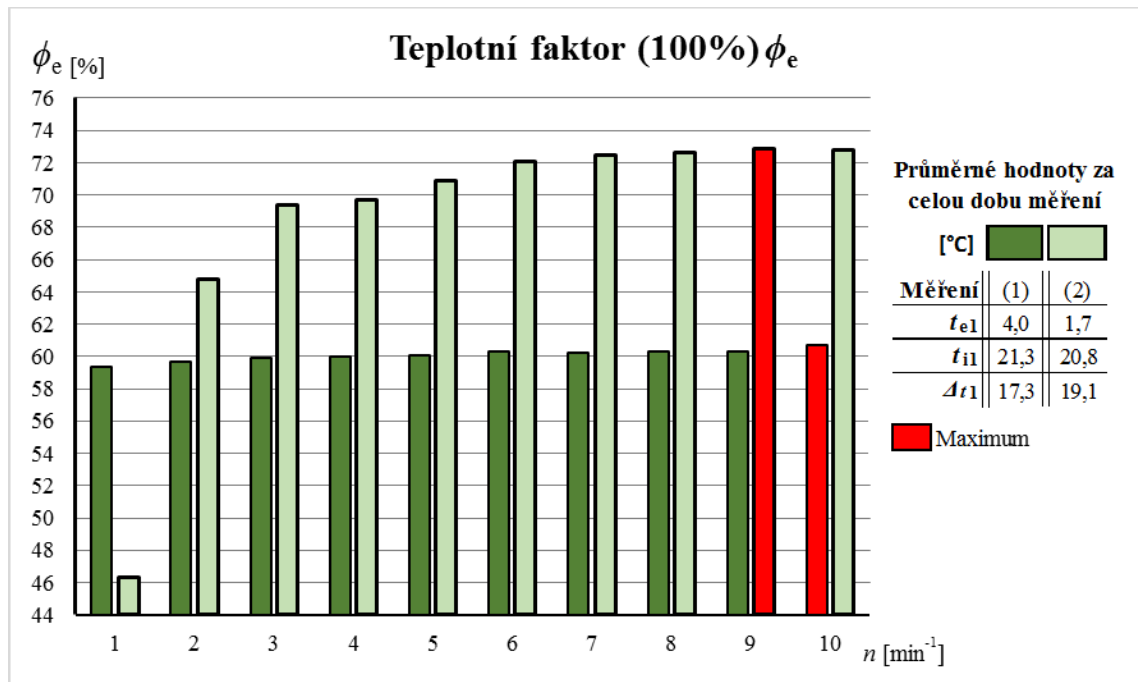
Obrázek 28 ukazuje výsledky pro 50% průtok vzduchu jednotkou. Průběh velikosti teplotního faktoru je velice obdobný jako při 30% průtoku. Velikost maximálního teplotního faktoru je zde ale přibližně o 5 % vyšší. Teplotní faktor je zde vyšší vlivem příznivějších podmínek měření, především většího průměrného rozdílu teplot  $\Delta t_1$ .



**Obrázek 29** Výsledné hodnoty teplotních faktorů při 70% průtoku vzduchu v závislosti na rychlosti otáčení regeneračního výměníku

Obrázek 29 zobrazuje průběh teplotního faktoru pro 70% průtok vzduchu. Velikost teplotního faktoru postupně narůstá až přibližně do sedmého stupně otáček. Od této úrovně je přibližně konstantní. Rozdíl ve velikosti teplotního faktoru mezi měřeními (1) a (2) je způsoben rozdílnými podmínkami měření, kdy vyššího teplotního fakturu je dosahováno opět při podmínkách s větším průměrným rozdílem teplot  $\Delta t_1$ .

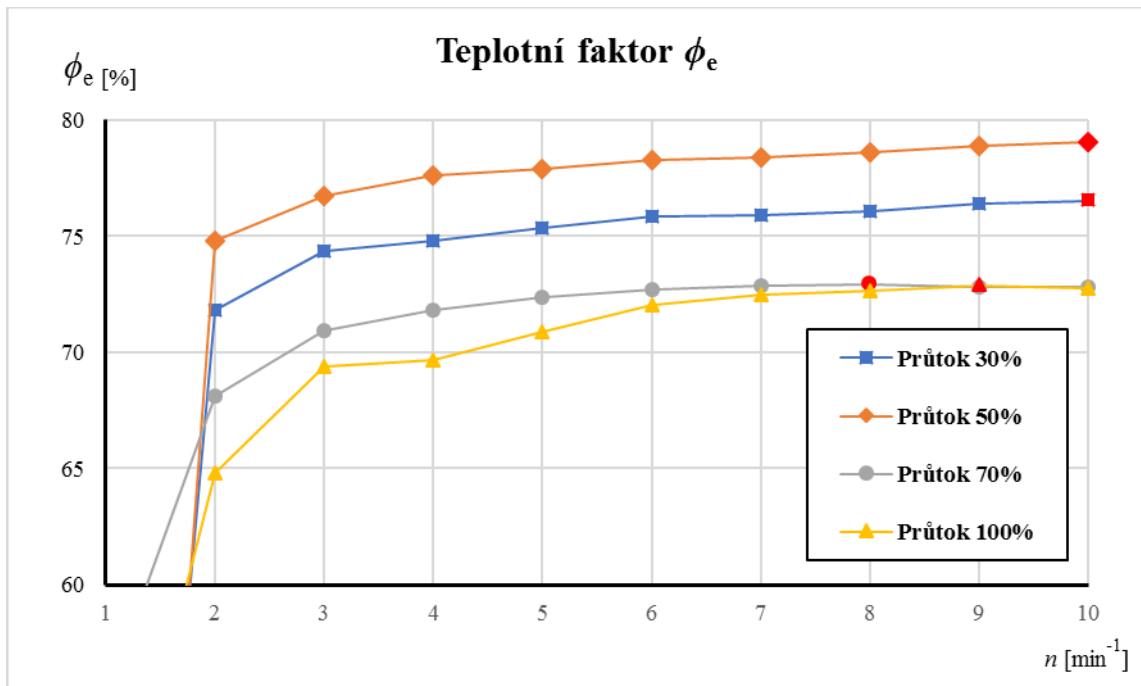




**Obrázek 30** Výsledné hodnoty teplotních faktorů při 100% průtoku vzduchu v závislosti na rychlosti otáčení regeneračního výměníku

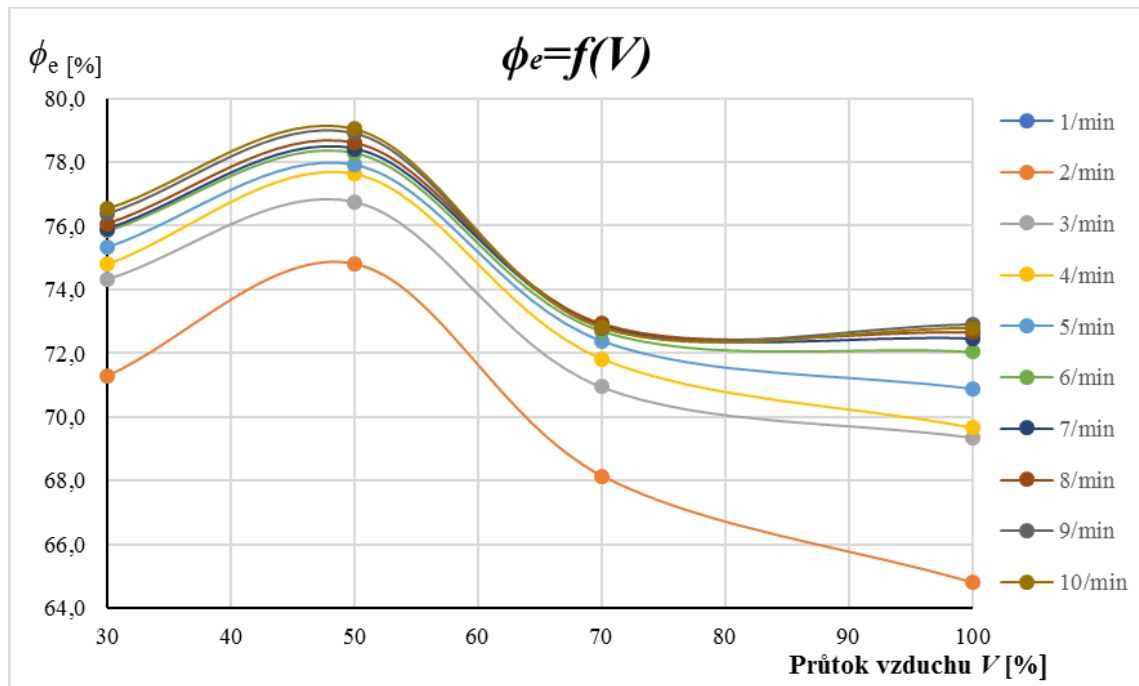
Obrázek 30 zobrazuje vývoj teplotního faktoru při maximálním 100% průtoku vzduchu. Průběh teplotního faktoru při měření (2) vypadá obdobně jako v ostatních případech, kdy postupně narůstá a od sedmého stupně otáček se už prakticky nemění. Měření (1) naopak vykazuje nestandardní chování. Lze tedy předpokládat, že u tohoto měření došlo pravděpodobně k chybě nebo vnějšímu ovlivnění.

Porovnání naměřených dat mezi sebou pro všechny průtoky vzduchu zobrazují obrázky 31 a 32. Vzhledem k rozdílným podmínkám, při kterých bylo výsledku dosaženo, nemá toto porovnání značnou vypovídající hodnotu. Dají se z něj ale vypozaorovat určité trendy v chování výměníku. Obrázky 31 a 32 jsou vytvořeny na základě dat z měření (1) pro 30% a 50% průtoky vzduchu a na základě dat z měření (2) pro 70% a 100% průtoky vzduchu.



**Obrázek 31** Porovnání naměřených teplotních faktorů pro všechny průtoky vzduchu v závislosti na rychlosti otáčení regeneračního výměníku

Obrázek 31 porovnává dosažené teplotní faktory v závislosti na otáčkách regeneračního výměníku. Každá křivka představuje jednu úroveň průtoku vzduchu. Teplotní faktor od hodnoty přibližně tří otáček za minutu roste pozvolně, maxima (označeno červenou barvou) dosahuje pro všechny průtoky v rozmezí 8 až 10 otáček za minutu.



**Obrázek 32** Porovnání naměřených teplotních faktorů pro všechny rychlosti otáčení regenerátoru v závislosti na průtoku vzduchu

Obrázek 32 zobrazuje závislost teplotního faktoru na průtoku vzduchu. Každá křivka zobrazuje jednu rychlostní úroveň otáčení regenerátoru. Teplotní faktor nejprve roste od 30% průtoku vzduchu, na úrovni 50% průtoku se trend obrací a teplotní faktor spíše klesá. Pokud by všechna měření byla provedena se shodným rozdílem teplot  $\Delta t_1$ , pravděpodobně by hodnoty teplotních faktorů pro 30% průtok vzduchu byly větší než pro 50% průtok vzduchu. Křivky by tak měly od počátku klesající charakter. Dále je na grafu patrné, že přibližně od rychlosti otáčení regenerátoru 7 otáček za minutu jsou rozdíly v naměřených teplotních faktorech minimální.

Porovnání naměřených hodnot s hodnotou uváděnou výrobcem je komplikované hned z několika důvodů. Výrobce udává referenční průtok vzduchu pro měření teplotního faktoru, který má hodnotu  $400 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , neuvádí ale teplotní podmínky, při kterých měření probíhalo. Lze pouze předpokládat, že se výrobce držel podmínek ekodesignu a měřil při teplotním rozdílu  $\Delta t_1 = 13 \text{ K}$ . Referenční průtok  $400 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  se předpokládá splnit na obou stranách rotačního výměníku. Shodného průtoku, vlivem různých tlakových ztrát na „každé“ straně sledované zabudované jednotky, nebylo možné docílit. Nejvíce se tomuto referenčnímu průtoku tedy blíží měření se 100% výkonem ventilátorů.

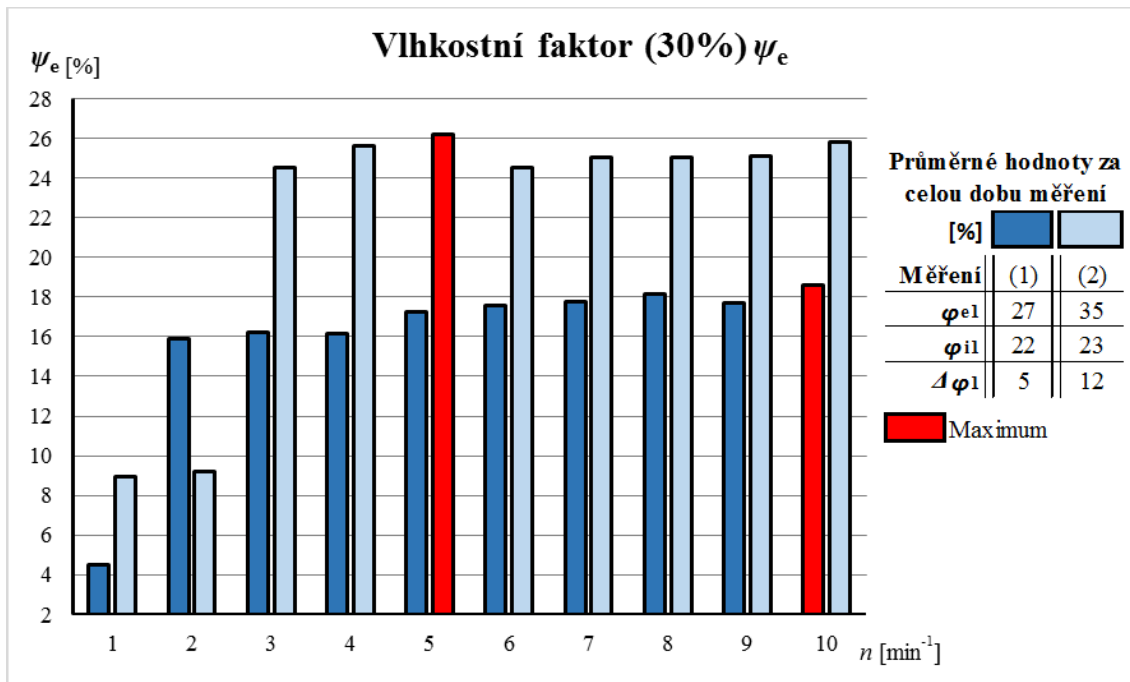
Maximální teplotní faktor dosažený při tomto měření (2) je přibližně 73 %. Nutno dodat, že tohoto teplotního faktoru bylo dosaženo při teplotním rozdílu nikoliv  $\Delta t_1 = 13$  K, ale při teplotním rozdílu  $\Delta t_1 = 19,1$  K. Výrobce uvádí teplotní faktor za referenčních podmínek o hodnotě 84 %. Vzhledem k tomu, že porovnávaný teplotní faktor o hodnotě 73 % byl naměřen ještě za výrazně vyššího teplotního rozdílu  $\Delta t_1$ , je rozdíl 11 % mezi hodnotou udávanou výrobcem a naměřenou hodnotou přes všechny nedokonalosti porovnání a měření poměrně velký.

### Vyhodnocení a výsledky vlhkostního faktoru

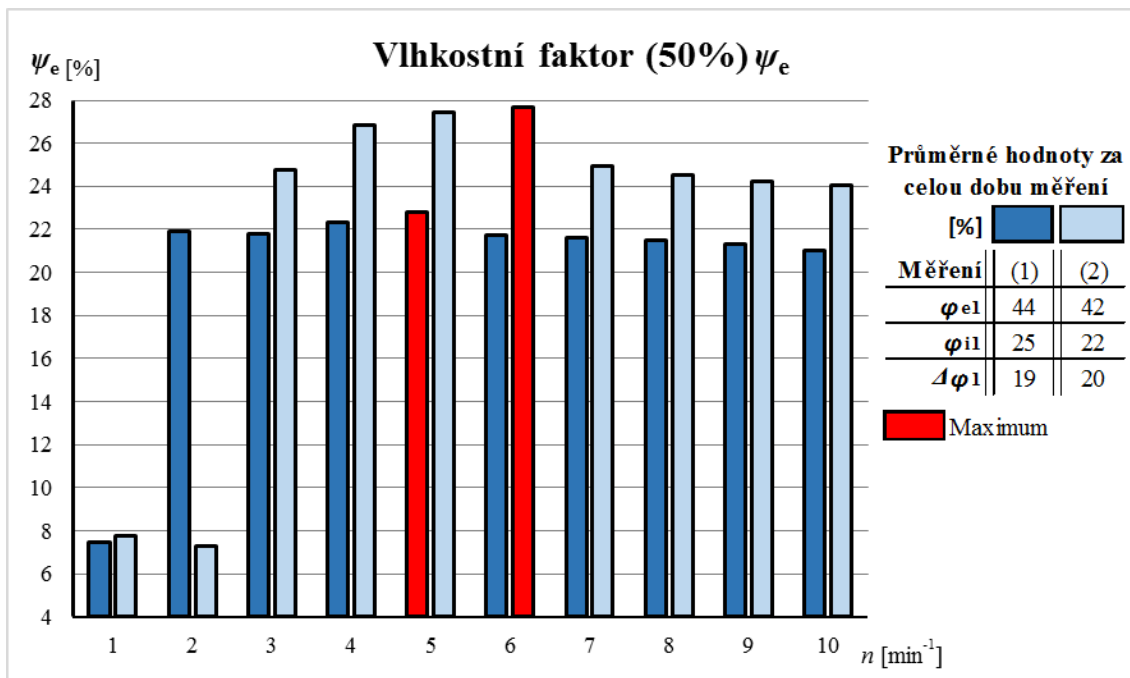
Vyhodnocení vlhkostního faktoru proběhlo obdobně jako vyhodnocení faktoru teplotního. Použit byl vztah (29), který je úpravou vztahu (2) pro rozdílné průtoky vzduchu na obou stranách výměníku. Před výpočtem byly naměřené relativní vlhkosti převedeny na měrné vlhkosti pomocí vztahů běžně dostupných v literatuře. [L15] Stejně jako u vztahu pro teplotní faktor je vztah (29) zjednodušen předpokladem shodných hustot a měrných tepelných kapacit venkovního přívodního a vnitřního odváděného vzduchu.

$$\psi_e = \frac{x_{e2} \cdot \dot{V}_e - x_{e1} \cdot \dot{V}_e}{x_{i1} \cdot \dot{V}_i - x_{e1} \cdot \dot{V}_e}, \quad (29)$$

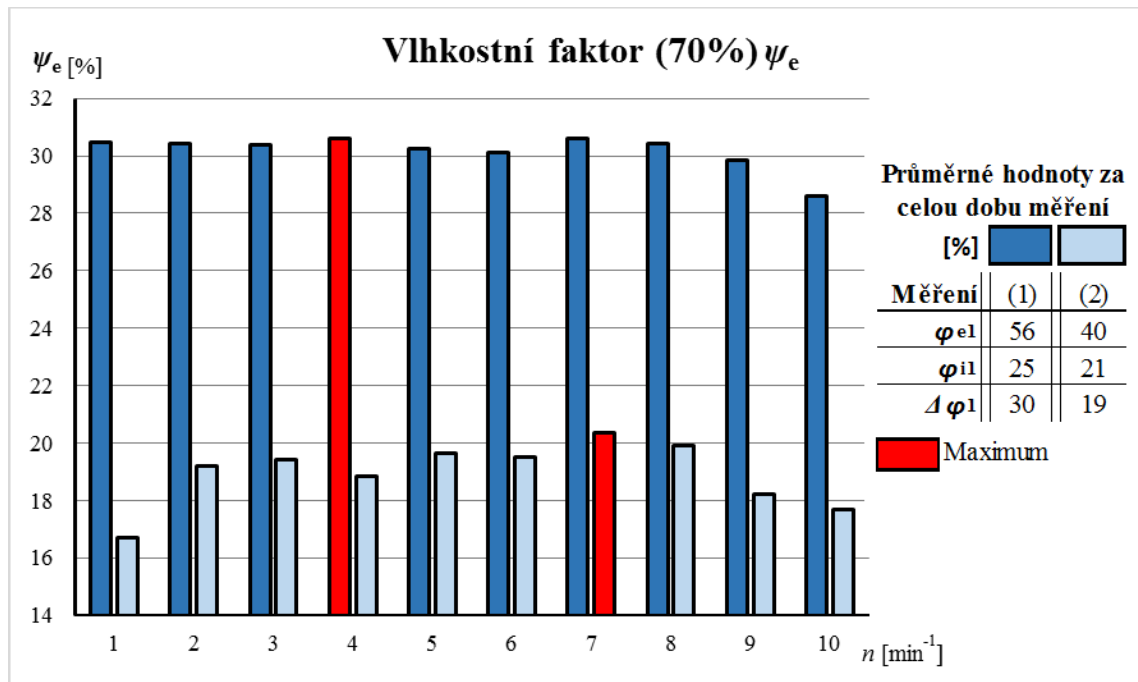
Následující grafy na obrázcích 33 až 37 s výslednými vlhkostními faktory jsou sestaveny obdobně jako grafy teplotních faktorů na obrázcích 27 až 31. Vypovídající schopnost grafů je však vzhledem k velice rozdílným podmínkám měření značně snížena, a proto bude následující popis a závěry stručnější.



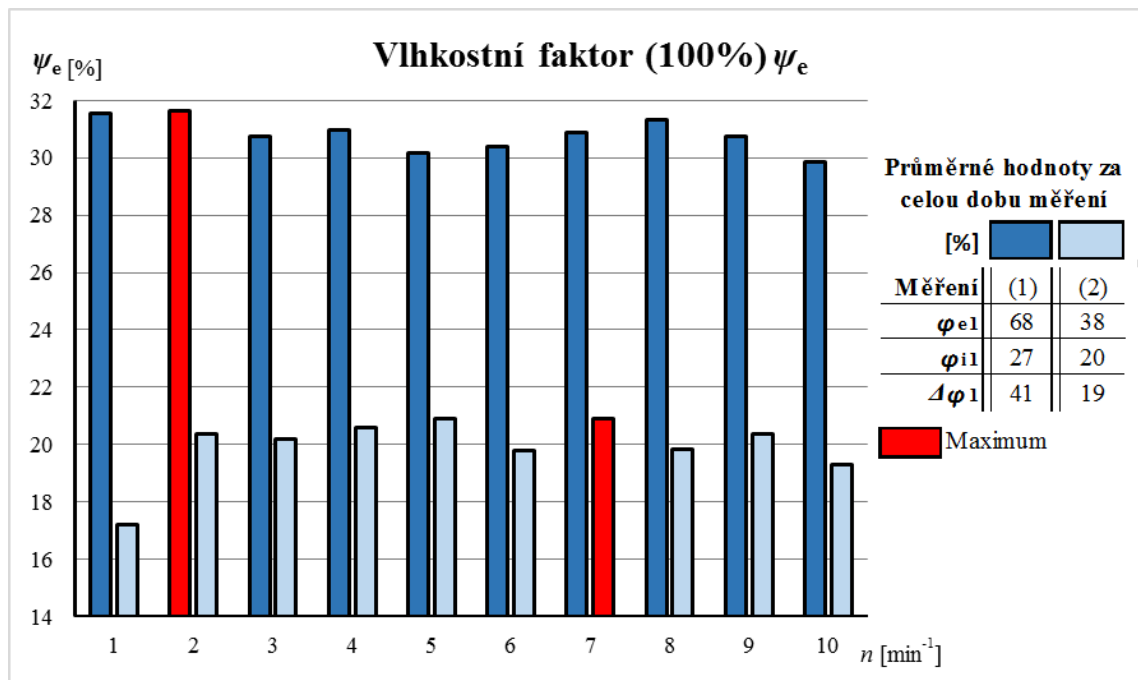
**Obrázek 33** Výsledné hodnoty vlhkostních faktorů při 30% průtoku vzduchu v závislosti na rychlosti otáčení regeneračního výměníku



**Obrázek 34** Výsledné hodnoty vlhkostních faktorů při 50% průtoku vzduchu v závislosti na rychlosti otáčení regeneračního výměníku

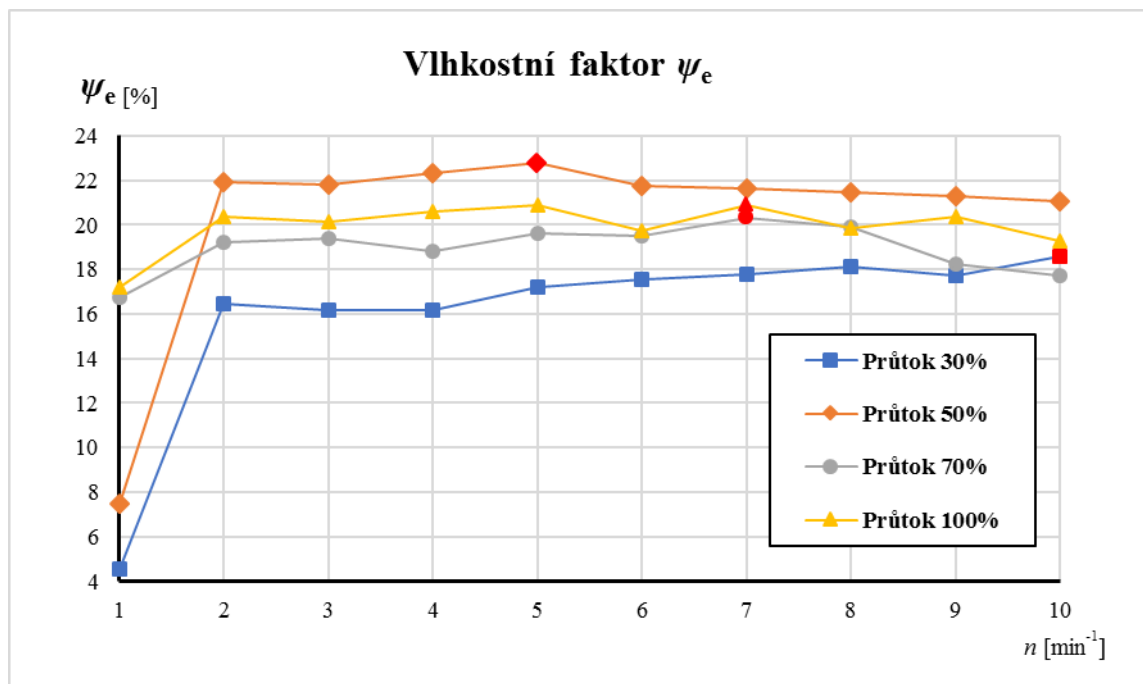


**Obrázek 35** Výsledné hodnoty vlhkostních faktorů při 70% průtoku vzduchu v závislosti na rychlosti otáčení regeneračního výměníku



**Obrázek 36** Výsledné hodnoty vlhkostních faktorů při 100% průtoku vzduchu v závislosti na rychlosti otáčení regeneračního výměníku

Výsledné hodnoty vlhkostních faktorů zpracované ve výše uvedených grafech se pohybují ve většině případů přibližně od 15 do 30 %. Běžně udávané hodnoty vlhkostního faktoru pro podobné typy rotačních regeneračních výměníků jsou mezi 10 a 20 %. [L11] Výrobce bohužel žádnou hodnotu vlhkostního faktoru neuvádí. Jednotka nabízí pouze funkci přenosu vlhkosti, kdy je řídicím systémem optimalizována rychlost výměníku pro zajištění přenosu optimálního množství vlhkosti. Další dostupné informace o vlhkostních faktorech rotačních výměníků podobného typu uvádějí, že vlhkostní faktor výměníku roste s jeho otáčkami. Maximálního vlhkostního faktoru je pak podle článku na webu dosahováno v rozmezí 19 až 23 otáček za minutu. [L17]. Přestože sledovaná jednotka disponuje maximální rychlostí otáčení výměníku pouze 10 otáček za minutu, zmiňovaný trend se nepotvrdil. Pouze v jednom případě měření byl maximální vlhkostní faktor při 10 otáčkách za minutu. Ostatní maxima vlhkostního faktoru byla zaznamenána prakticky napříč celou škálou otáček.



**Obrázek 37** Porovnání naměřených vlhkostních faktorů pro všechny průtoky vzduchu v závislosti na rychlosti otáčení regeneračního výměníku

Porovnání naměřených hodnot mezi sebou ukazuje obrázek 37, data pro graf byla vybrána ze shodných měření jako pro graf na obrázku 31. Tedy z měření (1) pro 30 a 50% průtoky

vzduchu a z měření (2) pro 70 a 100% průtoky vzduchu. Patrné je, že hodnoty vlhkostního faktoru nevykazují žádnou zřetelnou závislost na průtoku vzduchu. Dále lze konstatovat, že teplotní faktor je od druhého stupně otáček výměníku přibližně konstantní.

### Nejistota měření teplotního a vlhkostního faktoru

Stejně jako u stanovení nejistoty měření průtoku je v tomto případě možné vyhodnocovat pouze nejistotu typu B. Vztah pro stanovení nejistoty teplotního faktoru  $\delta\phi$  [%] (30) vychází z použitého výpočtového vztahu (28).

$$\delta\phi = \sqrt{A_{\dot{V}_e}^2 \cdot \delta\dot{V}_e^2 + A_{\dot{V}_i}^2 \cdot \delta\dot{V}_i^2 + A_{t_{e2}}^2 \cdot \delta t_{e2}^2 + A_{t_{e1}}^2 \cdot \delta t_{e1}^2 + A_{t_{i1}}^2 \cdot \delta t_{i1}^2} \quad (30)$$

kde koeficienty citlivosti mají následující tvar:

$$A_{\dot{V}_e} = \frac{t_{e2} - t_{e1}}{\dot{V}_i \cdot t_{i1} - \dot{V}_e \cdot t_{e2}} + \frac{\dot{V}_e \cdot (t_{e2} - t_{e1}) \cdot t_{e2}}{(\dot{V}_i \cdot t_{i1} - \dot{V}_e \cdot t_{e2})^2} \quad [\text{h} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (31)$$

$$A_{\dot{V}_i} = \frac{\dot{V}_e \cdot (t_{e1} - t_{e2}) \cdot t_{i1}}{(\dot{V}_i \cdot t_{i1} - \dot{V}_e \cdot t_{e2})^2} \quad [\text{h} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (32)$$

$$A_{t_{e1}} = \frac{\dot{V}_e^2 \cdot (t_{e2} - t_{e1})}{(\dot{V}_i \cdot t_{i1} - \dot{V}_e \cdot t_{e2})^2} - \frac{\dot{V}_e}{\dot{V}_i \cdot t_{i1} - \dot{V}_e \cdot t_{e1}} \quad [\text{K}^{-1}] \quad (33)$$

$$A_{t_{e2}} = \frac{\dot{V}_e}{\dot{V}_i \cdot t_{i1} - \dot{V}_e \cdot t_{e2}} \quad [\text{K}^{-1}] \quad (34)$$

$$A_{t_{i1}} = \frac{\dot{V}_e \cdot \dot{V}_i \cdot (t_{e1} - t_{e2})}{(\dot{V}_i \cdot t_{i1} - \dot{V}_e \cdot t_{e2})^2} \quad [\text{K}^{-1}] \quad (35)$$

Nejistoty veličin  $V_e$  a  $V_i$  jsou známé z kapitoly 4.1.3 a nejistoty stanovení teplot  $t_{e1}$ ,  $t_{e2}$  a  $t_{i1}$  se určí na základě vztahu (14), kde maximální předpokládaná možná chyba  $\Delta z_{\max}$  je dle výrobce snímače 1,3 K. Jako koeficient rozložení pravděpodobnosti byla použita hodnota pro normální rozdělení tedy  $\chi = \sqrt{3}$ . Následující tabulka 7 uvádí maximální teplotní faktor pro první (1) a druhé (2) měření včetně nejistoty určené na základě vztahu (30).



**Tab. 7** Výsledné hodnoty teplotních faktorů pro všechny průtoky vzduchu včetně nejistot

Průtok vzduchu [%]	Teplotní faktor [%]	
	(1)	(2)
30%	77 ± 13	76 ± 14
50%	79 ± 7	80 ± 7
70%	69 ± 6	73 ± 5
100%	61 ± 5	73 ± 6

Z tabulky 7 je vidět, že značně velké nejistota je především při průtoku vzduchu 30 %. Nejistota u ostatních průtoků vzduchu je již příznivější. Největší vliv na výslednou nejistotu má nejistota stanovení průtoku vzduchu. Nepříznivý vliv 2 až 3 % na výslednou nejistotu má také docela velká předpokládaná chyba snímače teploty, která je pro rozmezí teplot  $-20\text{ °C}$  až  $80\text{ °C} \pm 1,3\text{ K}$ . Tato hodnota působí vzhledem ke kvalitě snímače dost pesimisticky, ale v rámci korektnosti s ní bylo uvažováno.

Stanovení nejistoty měření vlhkostního faktoru by se uskutečnilo obdobně jako u teplotního faktoru. Stanovení by bylo složitější o řetězec nejistot převedení relativní vlhkosti na měrnou vlhkost. Pravděpodobně by hodnoty výsledných nejistot pro vlhkostní faktor byly podobné nebo vzhledem k většímu počtu vstupujících veličin spíše větší. Do výpočtu by mimo nejistot určení průtoků a relativních vlhkostí vstupovaly ještě veličiny potřebné pro zmíněný přepočít, což jsou teploty vzduchů a barometrický tlak.

## 5 Ekonomika provozu vzduchotechnické jednotky

Tato kapitola se zabývá ekonomickým hodnocením pořízení vzduchotechnické jednotky se zpětným získáváním tepla a důsledky této „investice“ v horizontu životnosti samotné jednotky. Především se kapitola zabývá co nejméně pravděpodobným stanovením úspor a spotřeby energie v důsledku instalace VZT jednotky. Pro účely hodnocení byl sestaven výpočetní nástroj v MS Excel. Následující text popisuje jednotlivé kroky, předpoklady a parametry výpočtu.

### 5.1 Výpočetní nástroj

Výpočet je přizpůsoben a pracuje s výše popisovanou jednotkou VTR 500. Celkově je rozdělen na 8 listů, které jsou podrobněji popsány níže. Vzhledem k tomu, že hlavním vstupním parametrem výpočtu byla vzduchotechnická jednotka, bylo nutné zvolit velikost domu na základě velikosti vzduchotechnické jednotky. Velikost „imaginárního“ domu včetně jednotlivých místností a parametrů větrání stanovuje první list výpočtu s názvem *Parametry větrání*. Dále se předpokládá, že dům bude větrán rovnotlance, přívod čerstvého vzduchu bude situován v obytných místnostech a odpadní vzduch bude nasáván na WC a v koupelnách. Dům je situován na území Prahy a předpokládá se celoroční provoz jednotky ve dvou režimech, tj. v přítomnosti, resp. nepřítomnosti osob.

#### List Parametry větrání

List rozděluje dům na 3 shodné bytové jednotky. Každému bytu náleží rozpis jednotlivých místností s podlahovou plochou. Podlahová plocha jednoho bytu činí 97 m<sup>2</sup>, kdy každý byt je složen z obytné kuchyně, ložnice, dvou pokojů, chodby, spíže, koupelny a WC. Objem jednotlivých místností je stanoven na základě světlé výšky místností, která byla stanovena jako 2,6 m. Přívod čerstvého vzduchu, jak bylo již zmíněno, se předpokládá v obytných místnostech, jmenovitě v obytné kuchyni, ložnici a obou pokojích. Hlavním kritériem pro stanovení množství čerstvého přívodního vzduchu byla dávka čerstvého vzduchu na osobu o hodnotě 25 m<sup>3</sup>.os<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>. Podružným kritériem bylo splnění požadavku na intenzitu větrání pro obytné místnosti 0,5 h<sup>-1</sup>. Předpokládá se,

že každý byt budou užívat 4 osoby. První kritérium platí pro pokoje a ložnici, podružné kritérium pak pro obytnou kuchyň. Jelikož VZT jednotka není vzhledem ke svojí funkci vybavena obtokovou klapkou, jsou zmiňovaná množství čerstvého vzduchu také množstvím přiváděným. Celkově pro jeden byt je tak přiváděno přibližně  $140 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Tato hodnota platí pro režim přítomnosti osob. V režimu nepřítomnosti osob je pak toto množství sníženo na 30 %. Harmonogram přítomnosti umožňuje po hodinách a dnech v týdnu nastavit přítomnost osob. Výsledná přítomnost osob v samotném výpočtu je v průměru  $12,4 \text{ h} \cdot \text{den}^{-1}$ . Celkový průtok jednotkou pro všechny 3 byty v době přítomnosti je pak  $419 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  a pro dobu nepřítomnosti  $126 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Při uvažování tlakové ztráty přívodního i odvodního vzduchovodu 200 Pa je pak adekvátní výkon ventilátorů pro průtok  $419 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  přibližně 75 % a pro průtok  $126 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  přibližně 25 %. Rezerva 25 % do maximálního výkonu jednotky je příznivá z hlediska nižší hlučnosti a může být dále využita například při režimu DIGESTOR. Harmonogram přítomnosti osob platí pro všechny 3 byty shodně a nelze tak zohlednit rozdílné chování uživatelů v jednotlivých bytech. Reálný systém by musel být doplněn o možnost individuální regulace, avšak pro účel výpočtu je tento předpoklad dostačující.

### **List Potřeba tepla na vytápění a TV**

Potřeba tepla na vytápění (hrazení tepelné ztráty větráním i prostupem) se odvíjí od zvolené hodnoty  $50 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  (nízkoenergetický standard z ČSN 730540-2). Zjednodušeně se ve výpočtu uvažuje čistá podlahová plocha z předchozího listu. Celková potřeba tepla na vytápění je pak rovna  $14\,550 \text{ kWh} \cdot \text{a}^{-1}$ . Od této hodnoty se následně odečítá tepelná ztráta větráním na základě průtoků vzduchu stanovených na předchozím listu. Výpočet této tepelné ztráty větráním (prozatím bez započítání vlivu ZZT) je proveden na základě hodinových dat venkovních teplot vzduchu (Praha, rok 2000). Teplota vnitřního vzduchu je ve výpočtu zvolena jako  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ . Výsledkem je „rozdělení“ celkové tepelné ztráty na část TZ prostupem  $4616 \text{ kWh} \cdot \text{a}^{-1}$  a TZ větráním  $9934 \text{ kWh} \cdot \text{a}^{-1}$ . Dále výpočet určuje množství tepla získaného zařízením ZZT na základě teplotního faktoru pro průtok vzduchu při přítomnosti ( $\Phi_e = 72 \%$ ) a pro průtok při nepřítomnosti ( $\Phi_e = 74 \%$ ). Hodnoty teplotních faktorů byly voleny s ohledem na sezonní provoz, jsou tedy nižší než „špičková“ hodnota naměřená výrobcem (84 %). Výpočet určuje také

množství tepla dodaného elektrickým dohříváčem, který je v činnosti při podkročení teploty za regenerátorem  $t_{e2}$ , pod zvolenou teplotní úroveň 18 °C. Určuje také dodané teplo otopnou soustavou (teplo potřebné pro dohřev přiváděného vzduchu na vnitřní výpočtovou teplotu vzduchu) a ztrátové teplo přívodního ventilátorů, které se projevuje ohřevem přiváděného vzduchu.

Posledním výpočtem tohoto listu je stanovení potřeby tepla pro ohřev teplé vody, kdy bylo uvažováno se spotřebou  $40 \text{ l.os}^{-1}.\text{den}^{-1}$  a poměrnou ztrátou tepla při distribuci 0,3. Množství tepla na ohřev TV bylo získáno s předpokládaným využitím 350 dnů za rok.

### **List Energie**

Určuje energii potřebnou na vytápění, ohřev teplé vody a elektrickou energii pro pohon VZT jednotky včetně elektrické energie pro ostatní spotřebiče. Potřebné teplo je na energii přepočítáno pomocí běžně dosahovaných účinností výroby, distribuce a regulace příslušných technologií a systémů. První krok výpočtu určuje potřebu energie při použití VZT jednotky. Druhý krok stanovuje potřebu energie bez použití VZT jednotky (celou tepelnou ztrátu hradí otopná soustava). Pokud je ve výpočtu třeba rozlišovat dvoutarifní sazby el. energie, je uvažováno s nízkým a vysokým tarifem. Pokud je vstupní energií pro ohřev teplé vody el. energie, uvažuje se ohřev pouze v době nízkého tarifu.

### **List Ceny energií**

Tento list stanovuje ceny pro jednotlivé formy energií a případných dalších plateb za odběrné místo apod. Ceny el. energie jsou převzaty z ceníku Pražská energetika, a.s. k 7. 7. 2020. Ceny zemního plynu jsou převzaty z ceníku Pražská plynárenská, a.s. k 7. 7. 2020. Cena dřevních pelet je převzata ze zdroje na webu [L22]. Výpočet zohledňuje platbu za odběrné místo v závislosti na velikosti jističe (odběrného místa). Vzhledem k tomu, že špičkový odběr VZT jednotky je 2,1 kW, není nutné navyšovat velikost jističe oproti variantě bez VZT jednotky. Velikost jističe ve výpočtu tak ovlivňuje pouze typ zdroje tepla, případně zdroje pro přípravu TV a další spotřebiče, které se však uvažují pro všechny varianty shodné.

**List Náklady na energie**

List vyčísluje náklady na jednotlivé energie a náklady celkem za období jednoho roku.

**List Investiční a provozní výdaje**

Na tomto listu jsou vyčísleny předpokládané investiční a vypočtené provozní výdaje. Jednotlivé pořizovací ceny jsou, kromě samotné jednotky VTR 500, poměrně hrubým subjektivním odhadem, nepodloženým žádnou reálnou cenovou nabídkou. V rámci provozních výdajů je uvažováno s každoročním servisem a výměnou případně čištěním filtrů. Další výdaje jsou očekávány po 15 letech provozu jednotky ve formě výměny ventilátorů a pohonu regenerátoru.

**List Efektivnost**

Podrobuje výdaje na pořízení VZT jednotky a budoucí ekonomické důsledky této investice ve formě výdajů nebo úspor ekonomickým investičním kritériím. Prvním kritériem je čistá současná hodnota (NPV), která zohledňuje hodnotu peněz v časovém horizontu dané investice a „převádí“ budoucí ekonomické důsledky investice do současného okamžiku (okamžik vynaložení investice). Výpočet uvažuje s diskontní sazbou 5 %, dobou životnosti investice 25 let a zohledněním růstu cen 2 %, což se promítá jak do výdajů, tak do úspor. Druhým použitým kritériem je kritérium roční ekvivalentní peněžní tok RCT. Toto kritérium vyjadřuje čistou současnou hodnotu rovnoměrně rozdělenou do jednotlivých let investice. Kritérium je rozhodně vhodné použít, pokud je porovnáváno více variant se shodným počátečním okamžikem investice, ale rozdílnou dobou životnosti. Diskontní sazba pro výpočet RCT byla uvažována také 5 %. [L23]

**List Primární energie**

Poslední list určuje množství spotřebované primární neobnovitelné energie pro variantu s VZT jednotkou a pro variantu bez VZT jednotky. Výpočet je proveden na základě nejaktuálnějších konverzních faktorů primární energie (elektrická energie  $F = 2,6$ ). [L24]

## 5.2 Výsledky

Celkem byl výpočetní nástroj aplikován pro 5 variant použitých zdrojů tepla. Každá varianta je řešena ve vlastním Excel souboru. Jednalo se o následující varianty:

- Vytápění i příprava teplé vody kondenzačním plynovým kotlem
- Vytápění plynovým kondenzačním kotlem a příprava teplé vody el. zásobníkovým ohřívačem
- Vytápění elektrokotlem a příprava teplé vody el. zásobníkovým ohřívačem
- Vytápění i příprava teplé vody tepelným čerpadlem vzduch – voda
- Vytápění i příprava teplé vody automatickým kotlem spalujícím dřevní pelety

Nutno podotknout, že následující porovnání variant nemá ukázat na (ekonomicky) nejvýhodnější kombinaci zdroje tepla a VZT jednotky, ale má ukázat možnou výši finančních prostředků vynaložených na pořízení a provoz VZT systému obdobného typu v závislosti na dalším, již stávajícím, vybavení domácnosti (především na zdroji tepla). Výsledné hodnocení ani nezahrnuje pořizovací náklady technologií na vytápění a ohřev vody, proto ani nemůže mít vzájemné porovnání za cíl určit „nejlepší“ variantu. Nejlépe lze výsledky vystihnout otázkou: „Kolik může stát pořízení a provoz VZT jednotky do domu, kde bude vytápění a ohřev teplé vody řešen pomocí...“, za výpustku na konci citace lze dosadit jednu z předložených variant.

Následující tabulka 8 shrnuje provoz jednotky pouze v období vytápění, které je zvoleno od 15. září do 15. května. Tabulka uvádí množství tepla získané pomocí regenerátoru, množství tepla dodaného el. ohřívačem pro zajištění dostatečné teploty přiváděného vzduchu a množství ztrátového tepla přívodního ventilátoru. Tato tři množství jsou následně sečtena a nazvána jako teplo „dodané“ do objektu VZT jednotkou. Součet je zajímavé porovnat s množstvím el. energie, které bylo na provoz jednotky ve zmiňovaném období vynaloženo (viz růžové buňky). Součet tepla dodaného VZT jednotkou a tepla dodaného otopnou soustavou (pro eliminaci zbylé části TZ větráním) je celková tepelná ztráta větráním v období vytápění.

**Tab. 8** Měsíční tepelná bilance při provozu VZT jednotky

	Led	Úno	Bře	Dub	Kvě	Čvn	Čvc	Srp	Zář	Řij	Lis	Pro	<b>Celkem</b>
Teplo získané ZZT [kWh]	1190	1104	955	720	257	0	0	0	216	713	980	1059	<b>7193</b>
Teplo dodané ohřivačem [kWh]	150	144	74	38	3	0	0	0	0	17	80	107	<b>612</b>
Ztrátové teplo ventilátor [kWh]	28	26	28	27	13	0	0	0	13	29	28	28	<b>220</b>
	Teplo "dodané" do objektu VZT jednotkou v období vytápění [kWh]												<b>8024</b>
Teplo dodané otopnou soustavou [kWh]	275	251	262	210	83	0	0	0	69	226	266	268	<b>1910</b>
	El. energie potřebná pro provoz jednotky v období vytápění [kWh]												<b>1734</b>
	Tepelná ztráta větráním v období vytápění [kWh]												<b>9934</b>

Bylo již zmíněno, že v samotném ekonomickém hodnocení se uvažuje s celoročním provozem VZT jednotky. Ekonomický výpočet tedy započítává také teplo získané ZZT a ztrátové teplo přívodního ventilátoru v měsících, kdy je otopná soustava mimo provoz. Získané teplo ZZT v letních měsících nepředstavuje pro ekonomický výpočet žádnou chybu. Výpočet předpokládá celoroční provoz z důvodu zajištění kvalitních hygienických podmínek, možnosti řízeného „nočního chlazení“ chladnějším venkovním vzduchem a případné úspory energie využitím zpětného získávání „chlada“ (pokud by bylo instalováno aktivní chlazení).

Následující tabulka 9 shrnuje výsledky ekonomických výpočtů přepočtené na jednu domácnost. První část tabulky uvádí provozní výdaje na energii pro jednotlivé uvažované zdroje tepla a způsoby ohřevu teplé vody pro varianty s VZT jednotkou a bez VZT jednotky. Zde je vidět, že instalace VZT jednotky přináší výraznější finanční úsporu pouze v případě vytápění a ohřevu teplé vody pomocí elektrokotle. Úspora u ostatních variant není nijak výrazná vlivem „levné“ energie na vytápění. Obdobné závěry plynou z druhé části tabulky, která vyčísluje ekonomická kritéria NPV a RCT. Kladného výsledku, tedy kladného NPV a RCT, dosahuje pouze varianta, kde vytápění a ohřev TV je řešen pomocí elektrokotle. Zjednodušeně řečeno je sledovaný systém větrání s VZT jednotkou investicí s reálnou návratností pouze při instalaci v domě vytápěným a ohřívajícím TV pomocí elektrokotle. Čistá současná hodnota NPV pak u dalších variant udává hodnotu „investice“ (se zohledněním úspor) v době instalace. Stejně tak ekvivalentní roční peněžní tok si lze představit jako roční hodnotu „investice“ v horizontu uvažované životnosti jednotky. Poslední údaje v tabulce 9 nesouvisí s ekonomickým hodnocením, ale zohledňují ekologickou stránku instalace VZT jednotky. Tato část

vyčísluje množství dodané neobnovitelné primární energie do budovy opět pro všechny druhy zdrojů vytápění a ohřevu TV, pro varianty s VZT jednotkou a bez VZT jednotky. Znovu lze vidět výraznější úsporu primární neobnovitelné energie u zdroje typu elektrokotel a méně výrazné úspory u ostatních typů zdrojů. Dokonce u zdroje typu kotel na pelety vychází efekt úspory primární neobnovitelné energie záporný.

**Tab. 9 Ekonomické důsledky pořízení VZT jednotky**

Ekonomické důsledky pořízení větrací jednotky přepočteny na 1 domácnost					
Zdroj vytápění	Tepelné č.	Zemní plyn	Zemní plyn	El. kotel	Kotel pelety
Zdroj TV	Tepelné č.	Zemní plyn	EL. ohřivač	El. kotel	Kotel pelety
Výdaje na energie při použití VZT jednotky [Kč.rok-1]	17 500 Kč	25 100 Kč	30 900 Kč	28 400 Kč	26 900 Kč
Výdaje na energie bez použití VZT jednotky [Kč.rok-1]	17 900 Kč	25 500 Kč	31 800 Kč	34 500 Kč	28 500 Kč
Úspora [Kč.rok-1]	400 Kč	400 Kč	900 Kč	6 100 Kč	1 600 Kč
Čistá současná hodnota investice NPV [Kč]	-70 300 Kč	-69 300 Kč	-61 300 Kč	29 600 Kč	-47 900 Kč
Roční ekvivalentní peněžní tok RCT [Kč.rok-1]	-5 000 Kč	-4 900 Kč	-4 300 Kč	2 100 Kč	-3 400 Kč
Spotřeba primární neobnovitelné energie při použití VZT jednotky [kWh.m-2.rok-1]	138	158	210	245	104
Spotřeba primární neobnovitelné energie bez použití VZT jednotky [kWh.m-2.rok-1]	142	172	224	302	90
Rozdíl [kWh.m-2.rok-1]	4	14	14	57	-14

\* Předpokládaná životnost investice 25 let

Výše uvedené ekonomické hodnocení tedy ukazuje, že minimálně pro podobně řešený systém větrání není pořízení systému primárně otázkou významných úspor, ale spíše zlepšení komfortu a hygienických podmínek uvnitř budovy. Kladem může být částečná úspora provozních nákladů, která v budoucím čase sníží velikost počáteční investice. Zřejmé je, že v nových nebo rekonstruovaných budovách s velmi těsnou obálkou budovy je pro obsluhu velmi obtížné až nemožné zajistit odpovídající přirozené větrání. Proto je zcela logické řešit kvalitní větrání v nových i rekonstruovaných budovách. Paradoxně pak nastávají situace, kdy úsporné opatření (typicky výměna oken) vede k výraznému zhoršení hygienických podmínek nebo je toto úsporné opatření nepříznivým vlivem (nevhodným větráním) devalvováno. [L25]



Masivnějšímu rozšíření větracích systémů, které by zajistily vhodné vnitřní podmínky, pravděpodobně brání:

- Ekonomické důvody, spojené s poměrně velkou počáteční investicí a dlouhou nebo nedosažitelnou dobou návratnosti
- Malé povědomí o účincích zhoršených hygienických podmínek na lidské zdraví, s tím související neochota vynaložit finanční prostředky na zajištění těchto optimálních podmínek

Co by mohlo pomoci masivnějšímu rozšíření větracích systémů:

- Větší povědomí veřejnosti o zdravotních účincích snížených hygienických podmínek uvnitř budov
  - Snížení ceny produktů pro větrací systémy. Tím by došlo k následnému snížení počáteční investice a k celkově příznivější návratnosti těchto systémů. Vlivem instalace většího počtu zařízení lze předpokládat snížení ceny komponentů těchto systémů, bohužel instalace těchto systémů představuje poměrně velký podíl lidské práce, jejíž cena bude pravděpodobně nadále stoupat.
  - Zefektivnění systému, kde bohužel na poli ZZT je už potenciál poměrně vyčerpán a v rámci dopravy vzduchu (účinnost ventilátorů) nelze předpokládat razantních zlepšení účinnosti.
  - Využití hybridních systémů větrání nebo dalších způsobů, kterými lze snížit náklady na provoz zařízení. Z hlediska hybridních systémů se jedná především o systémy využívající pro dopravu vzduchu účinků přirozeného vztlaku nebo větru. Cesta by mohla být také ve větším využití senzorové techniky a přivádění do každého prostoru vždy pouze takového množství čerstvého vzduchu, které je právě potřeba na základě přítomnosti osob nebo koncentrace CO<sub>2</sub> apod.
  - Větší dohled státních orgánů nad technickým řešením větrání u kolaudací staveb
  - Větší kupní síla obyvatelstva, pro které nebudou vynaložené náklady „navíc“ tolik zatěžující. Tento trend můžeme možná částečně pozorovat v tuto chvíli.
- [L26] [L27] [L28]

### 5.3 Porovnání výsledků s hodnotou SEC

Zde je vhodné uvést srovnání s parametrem SEC definovaným v Nařízení komise (EU) č. 1253/2014 o ekodesignu. Parametr SEC se stanoví na základě rovnice (36). [L9]

$$SEC = t_a \cdot p_{ef} \cdot q_{net} \cdot MISC \cdot CTRL^x \cdot SPI - t_h \cdot \Delta T_h \cdot \eta_h^{-1} \cdot c_{air} \cdot (q_{ref} - q_{net} \cdot CTRL \cdot MISC \cdot (1 - \eta_t)) + Q_{defr}, \quad (36)$$

kde	SEC	je specifická spotřeba energie na větrání na m <sup>2</sup> vytápěné podlahové plochy	[kWh.m <sup>-2</sup> .a <sup>-1</sup> ],
	t <sub>a</sub>	je počet ročních provozních hodin	[h.a <sup>-1</sup> ],
	p <sub>ef</sub>	je faktor primární energie pro výrobu a distribuci el. e.	[-],
	q <sub>net</sub>	je požadavek na čistou výměru vzduchu na m <sup>2</sup> vytápěné podlahové plochy	[m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> ],
	MISC	je souhrnný faktor obecné typologie, který zahrnuje faktory účinnosti větrání, netěsnosti potrubí a zvláštní infiltrace	[-],
	CTRL	je faktor řízení větrání	[-],
	SPI	je měrný příkon	[kW.m <sup>3</sup> .h],
	t <sub>h</sub>	je celkové trvání otopného období	[h],
	ΔT <sub>h</sub>	je průměrný rozdíl vnitřní (19 °C) a venkovní teploty v otopném období mínus 3 K korekce o solární a vnitřní zisky	[K],
	η <sub>h</sub>	je průměrná účinnost vytápění prostor	[-],
	c <sub>air</sub>	je měrná tepelná kapacita vzduchu při konstantním tlaku a hustotě	[kWh.m <sup>-3</sup> .K <sup>-1</sup> ],
	q <sub>ref</sub>	je referenční míra přirozené výměny vzduchu na m <sup>2</sup> vytápěné podlahové plochy	[m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> ],
	η <sub>t</sub>	je tepelná účinnost zpětného získávání tepla	[-],
	Q <sub>defr</sub>	je tepelná energie ročně vynaložená na m <sup>2</sup> vytápěné podlahové plochy, za účelem odtávání, založená na variabilním elektrickém odporovém vytápění	[kWh.m <sup>-2</sup> .a <sup>-1</sup> ].

\* Definice a značení veličin odpovídá Nařízení komise EU č. 1253/2014. [L9]

Následující obrázek 38 uvádí přehled parametrů pro výpočet SEC.

## Parametry výpočtu SEC

<b>Obecná typologie</b>						<b>MISC</b>
Jednotky vedené do potrubí						<b>1,1</b>
Bezpotrubní jednotky						<b>1,21</b>
<b>Řízení větrání</b>						<b>CTRL</b>
Ruční řízení (bez DCV)						<b>1</b>
Časové řízení (bez DCV)						<b>0,95</b>
Centrální řízení podle potřeby						<b>0,85</b>
Lokální řízení podle potřeby						<b>0,65</b>
<b>Motor &amp; pohon</b>						<b>hodnota x</b>
Zapnuto/vypnuto & jediná rychlost						<b>1</b>
2 rychlosti						<b>1,2</b>
více rychlostí						<b>1,5</b>
proměnné otáčky						<b>2</b>
<b>Klima</b>	<b><math>t_h</math></b> v h	<b><math>\Delta T_h</math></b> v K	<b><math>t_{defr}</math></b> v h	<b><math>\Delta T_{defr}</math></b> v K	<b><math>Q_{defr}^{(*)}</math></b> v kWh/m <sup>2</sup> .a	
Chladné	<b>6 552</b>	<b>14,5</b>	1 003	5,2	<b>5,82</b>	
Průměrné	<b>5 112</b>	<b>9,5</b>	168	2,4	<b>0,45</b>	
Teplé	<b>4 392</b>	<b>5</b>	—	—	—	
(*) Odtávání se týká pouze obousměrných jednotek s rekuperačním výměníkem tepla a vypočte se podle vzorce $Q_{defr} = t_{defr} * \Delta T_{defr} * c_{air} * q_{net} * p_{ef}$ . Pro jednosměrné jednotky nebo jednotky s regeneračním výměníkem tepla platí, že $Q_{defr} = 0$ .						
<b>Výchozí hodnoty</b>						<b>hodnota</b>
měrná tepelná kapacita vzduchu, $c_{air}$ v kWh/(m <sup>3</sup> K)						<b>0,000344</b>
čistý požadavek na větrání na m <sup>2</sup> vytápěné podlahové plochy, $q_{net}$ v m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup>						<b>1,3</b>
referenční míra přirozené výměny vzduchu na m <sup>2</sup> vytápěné podlahové plochy, $q_{ref}$ v m <sup>3</sup> /h.m <sup>2</sup>						<b>2,2</b>
roční provozní hodiny, $t_a$ v h						<b>8 760</b>
faktor primární energie pro výrobu a distribuci elektrické energie, $p_{ef}$						<b>2,5</b>
účinnost vytápění prostor, $\eta_h$						<b>75 %</b>

Obrázek 38 Vstupní parametry pro výpočet SEC [L9]

**Rozbor rovnice (36)**

## 1. část pravé strany rovnice (36)

$$t_a \cdot p_{ef} \cdot q_{net} \cdot MISC \cdot CTRL^x \cdot SPI \quad [\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}], \quad (36.1)$$

- výchozí hodnota pro parametr  $t_a$  je 8 760 h, tedy roční počet hodin
- výchozí hodnota pro parametr  $p_{ef}$  je 2,5 (elektrická energie), což je o 0,1 méně než aktuální hodnota pro Českou republiku, hodnota 2,5 je pravděpodobně zvolena jako kompromis pro celou Evropskou unii
- výchozí hodnota pro parametr  $q_{net}$  je  $1,3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ , což při uvažování světlé výšky místnosti 2,6 m představuje intenzitu větrání  $0,5 \text{ h}^{-1}$ .
- $MISC$  parametr zohledňující ztráty energie případně vzduchu netěsnostmi při dopravě vzduchu (volen z tabulky podle určení VZT jednotky)
- $CTRL$  parametr zohledňující regulaci procesu větrání (volen z tabulky podle „kvality“ regulačního vybavení VZT jednotky)
- $x$  parametr zohledňující regulaci otáček ventilátorů (volen z tabulky podle typu regulace otáček ventilátorů)
- $SPI$  měrný příkon (měřená hodnota výrobce při referenčním průtoku)

Tato část rovnice (36.1) tedy představuje množství spotřebované primární neobnovitelné energie na celoroční provoz jednotky při intenzitě větrání  $0,5 \text{ h}^{-1}$ , přičemž zohledňuje typologii rozvodu vzduchu a způsob regulace. Nutno dodat, že se výpočet vztahuje k referenčnímu průtoku při tlakové ztrátě vzduchovodu 50 Pa. [L9]

## 2. část pravé strany rovnice (36)

$$t_h \cdot \Delta T_h \cdot \eta_h^{-1} \cdot c_{air} \cdot (q_{ref} - q_{net} \cdot CTRL \cdot MISC \cdot (1 - \eta_t)) + Q_{defr} \quad [\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}], \quad (36.2)$$

- výchozí hodnota pro parametr  $t_h$  se určí na základě volby klimatu, kdy pro průměrné klima reprezentující přibližně podmínky v České republice je  $t_h$  5 112 h, což je 213 dnů (pro Prahu a střední denní venkovní teplotu pro začátek a konec otopného období  $t_{em} = 12 \text{ °C}$  je délka otopného období 216 dnů)

- parametr  $\Delta T_h$  je pro průměrné klima roven hodnotě 9,5 K (průměrná venkovní teplota pro zmiňované otopné období v Praze jsou 4 °C, pokud budeme uvažovat s průměrnou teplotou vnitřního vzduchu dle nařízení 19 °C a odečteme od této hodnoty průměrnou venkovní teplotu za otopné období a 3 K na solární a vnitřní zisky podle nařízení, vychází adekvátní hodnota parametru  $\Delta T_h$  pro Prahu 12 K)
- parametry  $\eta_h$  a  $c_{air}$  byly již popsány
- výchozí hodnota pro parametr  $q_{ref}$  je  $2,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ , což při uvažování světlé výšky místnosti 2,6 m představuje intenzitu větrání  $0,85 \text{ h}^{-1}$ , jedná se o referenční hodnotu, která zřejmě představuje referenční množství vzduchu, které by při absenci nuceného větrání bylo do místnosti přivedeno přirozeným větráním.
- parametry  $\eta_t$  a  $Q_{defr}$  byly již popsány

Druhá část rovnice (36.2) tedy představuje množství tepla, které se díky instalaci VZT jednotky podaří ušetřit. Množství ušetřeného tepla není vztaženo k předpokládanému průtoku vzduchu (intenzitě větrání), ale je vtaženo k průtoku referenčnímu. Ušetřené množství tepla není tedy vztaženo k období provozu VZT jednotky, ale k určitému referenčnímu období, kdy ještě VZT jednotka nebyla nainstalována a větrání probíhalo přirozeně s referenční intenzitou. Neopodstatněným faktem je, že první část rovnice přepočítává pomocí  $p_{ef}$  spotřebovanou el. energii jednotkou na neobnovitelnou primární energii, kdežto druhá část rovnice množství uspořené tepla navyšuje pouze o ztráty energie v závislosti na referenční průměrné účinnosti vytápění prostor  $\eta_h$ . Výše popsané skutečnosti o mechanismu výpočtu tedy ukazují, že výsledná hodnota SEC nedává moc dobrou představu o výsledných úsporách energie VZT jednotkou, ale jedná se spíše o kritérium, díky kterému lze porovnávat VZT jednotky mezi sebou. [L9]

Samotná definice SEC („SEC je specifická spotřeba energie na větrání na  $\text{m}^2$  vytápěné podlahové plochy“) je poměrně nejednoznačná, z rozboru rovnice 36 se lze totiž domnívat, že výsledná hodnota SEC by měla představovat množství ušetřené neobnovitelné primární energie vůči „referenčnímu“ stavu. [L9]

### Porovnání SEC parametru jednotky VTR 500

Porovnání parametru SEC s hodnotami získanými ve výše uvedeném ekonomickém výpočtu není vzhledem k rozdílným vstupním parametrům úplně vypovídající. Může ale ukázat, k jak rozdílným výsledkům lze dospět zdánlivě podobnými přístupy.

Porovnání parametru SEC pro průměrné klima uváděné výrobcem jednotky VTR 500 se získanými hodnotami „změn“ spotřeby primární neobnovitelné energie při použití VZT jednotky VTR 500 podle výše uvedeného ekonomického výpočtu uvádí tabulka 11. [L9]

*Tab. 10 Porovnání výsledků ekonomického hodnocení s hodnotou SEC*

Zdroj vytápění	Tepelné č.	Zemní plyn	Zemní plyn	El. kotel	Kotel pelety
Zdroj TV	Tepelné č.	Zemní plyn	EL. ohříváč	El. kotel	Kotel pelety
Změna spotřeby primární neobnovitelné energie při instalaci VTZ jednotky VTR 500 [kWh.m-2.rok-1]	-3,6	-13,8	-13,8	-57,3	13,6
SEC VTR 500 [kWh.m-2.rok-1]	-36,4				

Tabulka 11 jasně ukazuje, že uváděné hodnoty jsou neporovnatelné, protože výsledná hodnota změny spotřeby primární energie při instalaci VZT jednotky je závislá na použitém způsobu vytápění, přesněji řečeno na energonositeli pro vytápění. Pravděpodobně parametr SEC byl zamýšlen pouze jako kritérium pro porovnávání různých typů VZT jednotek mezi sebou. Pohled na fyzikální jednotku parametru SEC [kWh.m<sup>-2</sup>.a<sup>-1</sup>] může svádět k možnému „vyčíslování“ energetických úspor při instalaci a provozu jednotky. Zřejmé je, že v případě nesprávného použití (zneužití) této hodnoty například do výpočtu hodnocení ekonomické efektivity, povede výsledek k značně optimistickému závěru. Vzhledem k pracnosti a obsáhlosti metodiky ohledně výpočtu SEC by se dala očekávat větší vypovídající hodnota tohoto parametru. [L9]

## 6 Závěr

Praktická část práce se nejprve věnovala měření průtoku vzduchu na pevně osazené konkrétní vzduchotechnické jednotce Systemair SAVE VTR 500, pomocí poměrně levné měřicí clony jednoduché konstrukce od firmy LINDAB s typovým označením FMU 200-160. Výsledky z měření ukazují, že použitím této měřicí clony spolu s vyhodnocovacím postupem podle výrobce lze získat poměrně hrubé výsledky s relativní chybou přibližně od 12 do 17 % vůči totožnému průtoku vzduchu na clonce dle ČSN EN ISO 5167. Přesnost měření na clonce stanovuje výpočet rozšířené relativní nejistoty podle ČSN EN ISO 5167, která pro nejmenší měřený průtok  $81 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  má velikost přibližně 8 % a pro největší naměřený průtok  $451 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  má pak velikost přibližně 1,5 %. Za účelem zpřesnění byly měřicí clony FMU 200-160 zkalibrovány pomocí zmiňované clonky. Jelikož bylo nutné při kalibraci aproximovat závislost úhrnného průtokového součinitele na tlakovém rozdílu měřicí clony ( $\alpha_{mc} = f(\Delta p_{mc})$ ), nebyla kalibrace vůči stejnému průtoku na clonce bezchybná. Pomocí kalibrace se ale podařilo snížit relativní chybu měřicí clony při stejném průtoku vůči kalibrační clonce na maximální relativní chybu 5,7 % (ve většině případů do 2 %). Pomocí zkalibrovaných měřicích clon byla následně naměřena sada provozních průtoků jednotky VTR 500 a vyhodnocena nejistota takto stanovených průtoků vzduchu. Relativní nejistota konečného měření průtoků na VZT jednotce VTR 500 byla určena v rozmezí přibližně od 2 do 13 %. Dominantní vliv na nejistotu průtoku má stanovení tlakového rozdílu na kalibrační clonce. Měření průtoků ukázalo, že poměrně snadnou kalibrací lze „zvýšit“ přesnost levné měřicí clony prakticky o řád. Ukázalo ale také, že pro důležitá měření s důrazem na přesnost je lepší použít kvalitnější měřidla typu clonka apod.

Další část práce, která se zabývala stanovením teplotních a vlhkostních faktorů rotačního regeneračního výměníku narážela na problém, kdy bylo nutné měřit za nahodilých podmínek. Nebylo možné upravovat parametry vstupních vzduchů do VZT jednotky a proto nejsou výsledky z tohoto měření tak vypovídající. Teploty a vlhkosti pro stanovení teplotních a vlhkostních faktorů byly měřeny třemi zařízeními typu datalogger. Vzájemné porovnání těchto zařízení ukázalo, že výsledné hodnoty z experimentálně

sestaveného zařízení na bázi mikropočítače Arduino dobře kopírovaly naměřené hodnoty pomocí profesionálního záznamníku dat od firmy Alhborn, jehož cena je přibližně 40krát větší než cena zařízení Arduino. Při měření teploty byla průměrná odchylka těchto dvou měřidel přibližně 0,4 K a při měření vlhkosti přibližně 3 % relativní vlhkosti. Třetí způsob měření dat zajišťovala samotná VZT jednotka VTR 500. Zde byly odchylky od profesionálního snímače výraznější a export dat z jednotky se neobešel bez chyb a ztráty některých dat. Takto naměřená data jsou však pro servis a regulaci jednotky dostačující. Naměřené hodnoty teplotních faktorů se pohybují v rozmezí přibližně 60 až 80 % v závislosti na podmínkách. Hodnoty 84 % udávané výrobcem se nepodařilo dosáhnout. Potvrdil se předpokládaný trend, kdy nejvyšších teplotních faktorů bylo dosahováno při vyšších rychlostech otáčení regenerátoru. Také se potvrdilo, že směrem ke spodním rychlostem otáčení regenerátoru teplotní faktor klesá (prostor pro možnou regulaci množství předávaného tepla). Výsledné hodnoty vlhkostních faktorů vzhledem k měření na spodní hranici snímačů a možné větší chyby jsou ještě méně vypovídající, ale podařilo se pohybovat okolo běžně dosahované hodnoty vlhkostního faktoru (20 %) pro podobné typy výměníků. Nejistota při tomto měření byla stanovena pouze pro teplotní faktor a je výrazně ovlivněna zmiňovanou nejistotou průtoku. Pohybuje se v rozmezí  $\pm 5$  až 14 % (14 % pouze při nejnižším průtoku, pro ostatní průtoky nepřesahuje 7 %). Měření ukázalo, že pro přesnější měření teplotního a vlhkostního faktoru je klíčové použít kvalitnější zařízení pro měření průtoku vzduchu a v případě vlhkostního faktoru také co možná nejpresnější zařízení pro měření vlhkosti.

Závěrečná část práce zabývající se energetickou náročností provozu jednotky ve vztahu k pořizovacím a provozním nákladům ukázala, že provozní náklady a případná výše úspor díky instalaci VZT jednotky je silně závislá na druhu provozované otopné soustavy v objektu. Prokázalo se také, že hlavním přínosem zkoumaného systému větrání a daného typu VZT jednotky je dosažení kvalitních hygienických podmínek ve větraném prostoru a vysoký komfort obsluhy. Výsledkem ekonomického hodnocení je částka ročního ekvivalentního peněžního toku RCT. Tato částka představuje pro jednu čtyřčlennou domácnost roční náklady na pořízení a provozování systému větrání (s odečtením úspor). Pro nejčastější typy používaných zdrojů tepla se tato částka pohybuje okolo



4800 Kč.rok<sup>-1</sup>, při předpokládané životnosti 25 let. Tento ekonomický výsledek je možná částečnou odpovědí na otázku z úvodu, proč se stále nedaří instalovat systémy větrání ve větší míře? Nelze na základě tohoto výpočtu tvrdit, že neexistují systémy, které kromě kvalitních hygienických podmínek přinesou v čase také kladné ekonomické důsledky. Výpočet, ale také mnohé příklady staveb a rekonstrukcí z posledních let bez vyřešeného systému větrání naznačují, že budov, kde lze s vhodným systémem větrání dosáhnout kladných ekonomických důsledků, je prozatím stále málo. Pravděpodobně by v tomto směru mohla pomoci ještě větší osvěta veřejnosti, která by zdůrazňovala zdravotní benefity kvalitně vyřešeného větrání. Nakonec také předposlední část práce ohledně bilance spotřebované neobnovitelné primární energie ukazuje, že instalaci VZT jednotky nedochází k tak markantní úspoře neobnovitelné primární energie, jak by se možná očekávalo. Výsledná úspora primární neobnovitelné energie při instalaci VZT jednotky byla stanovena pro nejběžnější typy zdrojů tepla v rozmezí 4 až 14 kWh.m<sup>-2</sup>.a<sup>-1</sup>. Zásadní se při ekonomickém a ekologickém hodnocení ukazuje přístup k velikosti intenzity větrání. Přístup evropské legislativy je takový, že předpokládá vlivem pořízení a instalace VZT zařízení poměrně razantní snížení intenzity větrání. Toto snížené množství přiváděného vzduchu pak legislativa bere jako energetickou úsporu a díky tomu je celkové hodnocení poměrně optimistické. Tato práce naopak předpokládá, že stejné množství vzduchu, které je do prostoru přiváděno pomocí VZT zařízení, bylo do prostoru přiváděno i před instalací tohoto zařízení jiným způsobem (nejčastěji přirozeně). Lze tedy konstatovat, že cesta k masivnímu využívání systému větrání není zdaleka u konce.

Hlavním přínosem práce by měl být především komplexní pohled na pořízení a následný provoz VZT jednotky. Tento pohled se odráží ve vytvořeném výpočetním nástroji, který umožňuje zachytit co možná největší množství vstupních parametrů. Díky tomu je možné poměrně podrobně postihnout chování VZT jednotky pro danou aplikaci. Ukázkové výpočty v tomto nástroji pak podporují tvrzení, že instalace VZT systémů automaticky neznamená ekonomickou úsporu nebo markantní energetickou úsporu primární neobnovitelné energie.

## 7 Seznam literatury a použitých pramenů

- [L1] *Spotřeba energie v EU roste. Dosažení cílů pro rok 2020 je nepravděpodobné* [online]. ČERVINKOVÁ, Jana, 2019, [cit. 1. 4. 2020]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/evropska-unie/eurostat-spotreba-energie-evrope-roste>
- [L2] *Energetické standardy budov – NZEB* [online]. ČEJKA, Michal a ANTONÍN, Jan, 2019, [cit. 1. 4. 2020]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/evropska-unie/eurostat-spotreba-energie-evrope-roste>
- [L3] *EU 11/20 Plán cílů v oblasti klimatu do roku 2030* [online]. HOSPODÁŘSKÁ KOMORA ČR, 2020, [cit. 30. 6. 2020]. Dostupné z: <https://www.komora.cz/legislation/eu-11-20-plan-cilu-v-oblasti-klimatu-do-roku-2030-t18-6-2020/>
- [L4] *Emise CO<sub>2</sub> z aut: fakta a čísla (infografika)* [online]. EVROPSKÝ PARLAMENT, 2019, [cit. 30. 6. 2020]. Dostupné z: <https://www.europarl.europa.eu/news/cs/headlines/society/20190313STO31218/emise-co2-z-aut-fakta-a-cisla-infografika>
- [L5] *Bude Česká republika schopná naplnit výzvu 20-20-20 k úsporám energie v budovách do roku 2020?* [online]. JÍCHA, Miroslav 2011, [cit. 30. 6. 2020]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/uspory-energie-vetrani-klimatizace/7621-bude-ceska-republika-schopna-naplnit-vyzvu-20-20-20-k-usporam-energie-v-budovach-do-roku-2020>
- [L6] *Výměna starých oken za těsná je změnou jejich funkce* [online]. KOPÁČKOVÁ, Dagmar 2017, [cit. 30. 6. 2020]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-skol/15625-vymena-starych-oken-za-tesna-je-zmenou-jejich-funkce>
- [L7] *Koncept větrání – pravidlo správné praxe* [online]. ODBOR 71100 MPO, 2017, [cit. 30. 6. 2020]. Dostupné z: [https://www.mpo.cz/cz/stavebnictvi-a-suroviny/stavebni-vyrobky/koncept-vetrani-\\_pravidlo-spravne-praxe--232516/](https://www.mpo.cz/cz/stavebnictvi-a-suroviny/stavebni-vyrobky/koncept-vetrani-_pravidlo-spravne-praxe--232516/)

- [L8] DRKAL, František a ZMRHAL, Vladimír: *Větrání*. Praha: Česká technika, 2013. 157 s. ISBN 978-80-01-05181-8.
- [L9] *Požadavky na ekodesign větracích jednotek* [online]. LAIN, Miloš 2015, [cit. 5. 4. 2020]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/13613-pozadavky-na-ekodesign-vetracich-jednotek>
- [L10] *ESB 2 Zpětné získávání tepla a chladu ve vzduchotechnice* [online]. ADAMOVSKEÝ, Daniel 2017, [cit. 6. 4. 2020]. Dostupné z: <http://tzb.fsv.cvut.cz/files/vyuka/125esbt/prednasky/125esb2-09.pdf>
- [L11] *Zpětné získávání tepla ve větrání a klimatizaci (II)* [online]. LAIN, Miloš 2006, [cit. 6. 4. 2020]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-s-rekuperaci/3688-zpetne-ziskavani-tepla-ve-vetrani-a-klimatizaci-ii>
- [L12] *SAVE VTR 500 R – Webová stránka*. [online]. SYSTEMAIR, 2020, [cit. 8. 4. 2020]. Dostupné z: <https://shop.systemair.com/cs-CZ/save--vtr--500--r/p413782>
- [L13] *Radiální ventilátor K3G190-RD45-14 – Datasheet*. [online]. PBM PAPST, 2020, [cit. 8. 4. 2020]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/d90166bf168367c0ff6fab19452f50a8/K3G190-RD45-03-EN-DTE.pdf>
- [L14] *Měřicí clona FMU 200 160 – Technická informace*. [online]. LINDAB, 2020, [cit. 10. 4. 2020]. Dostupné z: <https://itsolution.lindab.com/lindabweb/productsdoc/pdf/documentation/ads/Lindab/technical/fmu.pdf>
- [L15] MATUŠKA, Tomáš: *Experimentální metody v technice prostředí*. Praha: Česká technika, 2005. 200 s. ISBN 80-01-03291-4.
- [L16] *Nejistoty měření, přesnost měření, správnost měření a otázky spojené se vzájemnou porovnatelností výsledků měření a s prohlášením o shodě s technickými specifikacemi – Sborník technické harmonizace*. [online]. LUDVÍK, Vladimír, 2005, [cit. 15. 4. 2020]. Dostupné z: [https://www.unmz.cz/sborniky\\_th/sb8/nejistoty.pdf](https://www.unmz.cz/sborniky_th/sb8/nejistoty.pdf)

- [L17] *Moderní rotační výměníky tepla* [online]. POSTUPA, Martin, 2017, [cit. 20. 4. 2020]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-s-rekuperaci/15795-moderni-rotacni-vymineniky-tepla>
- [L18] *ALMEMO 2690-8A – Technická informace*. [online]. ALHBORN, 2020, [cit. 25. 4. 2020]. Dostupné z: [https://www.ahlborn.cz//out/pictures/wysiwigpro/MA2690-8A\\_CZ.pdf](https://www.ahlborn.cz//out/pictures/wysiwigpro/MA2690-8A_CZ.pdf)
- [L19] *Digitální snímač vlhkosti vzduchu, teploty FHAD 46-7 – Datasheet*. [online]. ALHBORN, 2020, [cit. 25. 4. 2020]. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz//out/pictures/wysiwigpro/FHAD467CZ.pdf>
- [L20] *Stručný popis sběrnice I2C* [online]. Redakce hw.cz, 2000, [cit. 25. 4. 2020]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/strucny-popis-sbernice-i2c-a-jeji-prakticke-vyuziti-k-pripojeni-externi-EEPROM-24LC256>
- [L21] *Digital Relative Humidity sensor with Temperature output – Datasheet*. [online]. MEASUREMENT SPECIALTIES, 2013, [cit. 25. 4. 2020]. Dostupné z: [https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/1899\\_HTU21D.pdf](https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/1899_HTU21D.pdf)
- [L22] *Porovnání nákladů na vytápění, teplou vodu a elektrickou energii – Interaktivní výpočet*. [online]. TZB-info, 2020, [cit. 7. 7. 2020]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/138-porovnani-nakladu-na-vytapani-teplou-vodu-a-elektrickou-energii-tzb-info>
- [L23] *EKONIMIKA PODNIKÁNÍ – Stránka předmětu*. [online]. ČVUT FEL, 2020, [cit. 7. 7. 2020]. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=1092>
- [L24] *MPO potvrdilo snížení konverzního faktoru (koeficientu) pro elektrickou energii* [online]. KOPÁČKOVÁ, Dagmar 2019, [cit. 7. 7. 2020]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-elektrinou/19370-mpo-potvrdilo-snizeni-konverzniho-faktoru-koeficientu-pro-elektrickou-energii>
- [L25] ČEJKOVÁ, Eliška, *Vliv zateplování obytných budov na koncentraci CO<sub>2</sub> v ovzduší bytů – Diplomová práce*, Univerzita Karlova v Praze, 2016. 134 s.

- [L26] *Hybridní ventilace – 1. část* [online]. JÍCHA, Miroslav 2014, [cit. 10. 7. 2020].  
Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/uspory-energie-vetrani-klimatizace/10866-hybridni-ventilace-1-cast>
- [L27] *Hybridní ventilace – 2. část* [online]. JÍCHA, Miroslav 2014, [cit. 10. 7. 2020].  
Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/10887-hybridni-ventilace-2-cast>
- [L28] *Hybridní ventilace – 3. část* [online]. JÍCHA, Miroslav 2014, [cit. 10. 7. 2020].  
Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/uspory-energie-vetrani-klimatizace/10917-hybridni-ventilace-3-cast>

#### **Další citované prameny normativní povahy, směrnice a nařízení**

**ČSN EN 15665** *Větrání budov – Stanovení výkonových kritérií pro větrací systémy*

**ČSN ISO 5167** *Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku*

**ČSN EN 13141** *Větrání budov – Zkoušení výkonu součástí/výrobků pro větrání bytů*

**ČSN 730540-2** *Tepelná ochrana budov – Požadavky*

**Vyhláška č.268/2009 Sb.** *o technických požadavcích na stavby obytných budov*

**Nařízení Komise EU 1253/2014** *požadavky na ekodesign větracích jednotek*